

UNIVERSITÉ JOSEPH FOURIER (UJF) – GRENOBLE 1
UNIVERSITÉ DU QUÉBEC – INSTITUT NATIONAL DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE Eau-Terre-Environnement (INRS-ETE)

| / / / / / / / / / / / / / / /

CO-TUTELLE DE THESE
pour obtenir les grades de
Docteur de l'UJF
et de
Philosophiae doctor de l'INRS-ETE

Spécialités : Sciences de la Terre et de l'Univers (UJF), Sciences de l'Eau (INRS-ETE)

Préparée dans l'Unité de Recherche Hydrologie-Hydraulique, Cemagref (Lyon) et la Chaire
Hydro-Québec/Alcan/CRSNG, INRS-ETE (Québec)

présentée et soutenue publiquement par

Robin NAULET

le 27 septembre 2002 à Grenoble

**Utilisation de l'information des crues historiques pour une
meilleure prédétermination du risque d'inondation. Application
au bassin de l'Ardèche à Vallon Pont-d'Arc et
St-Martin d'Ardèche.**

Directeurs de thèse

Michel LANG
Taha OUARDA

(Cemagref, Lyon)
(INRS-ETE, Québec)

Composition du jury

Prof. Philippe BOIS
Prof. Félix FRANCES
Prof. André MUSY
Prof. Bernard BOBEE

ENSHMG, Représentant UJF
Université Polytechnique de Valence
Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne
INRS-ETE

Président
Rapporteur
Rapporteur
Examinateur (co-encadrant)

Remerciements

Je tiens à remercier les membres du jury pour le temps consacré à l'évaluation du présent manuscrit. Je remercie en particulier les professeurs Bernard Bobée et Taha Ouarda ainsi que Michel Lang pour l'encadrement de cette thèse et leurs corrections du manuscrit.

Je tiens également à remercier Denis Coeur pour son apport essentiel dans la réalisation de l'Etat Général des Sources et Christine Gigon pour sa grande disponibilité et son aide pour accéder aux données du Service d'Annonce des Crues de l'Ardèche. J'adresse également mes remerciements aux personnes responsables des fonds d'archives exploités (Société Hydrotechnique de France, Fonds Maurice Pardé, Archives Départementales de l'Ardèche,).

Enfin je remercie particulièrement mes parents, Jean Claude et Simone Naulet, ma compagne Elisabeth Delecroix ainsi que tous mes amis français et québécois pour leur soutien durant cette thèse. Je remercie en particulier Eric Sauquet pour m'avoir prêté un peu plus longtemps que prévu son ordinateur.

Résumé

Cette thèse aborde l'exploitation de l'information historique pour améliorer la prédétermination du risque d'inondation. Après avoir présenté la problématique en introduction, ce rapport se décompose en quatre parties.

Le chapitre 2 présente les différentes données exploitables dans l'analyse fréquentielle des crues. Les informations préhistoriques, historiques et contemporaines sont abordées en détaillant d'une part les moyens disponibles pour les obtenir et d'autre part les problèmes liés à leur utilisation. La formalisation des données sur les crues en vue de leur exploitation dans l'analyse fréquentielle est ensuite abordée.

Le chapitre 3 aborde l'analyse fréquentielle des crues avec prise en compte des données historiques et présente une synthèse des méthodes existantes. Une formulation généralisée pour la méthode du maximum de vraisemblance (MLE_G) dans le cadre des séries de maxima annuels (AM) a été développée. Une adaptation de la méthode de l'algorithme des moments espérés (EMA) aux lois EV1 et GEV est également effectuée. Les méthodes adaptées aux séries de valeurs supérieures à un seuil (POT) sont présentées en second lieu. Quelques commentaires sont également effectués sur les probabilités empiriques et sur la prise en compte des erreurs de mesure des débits.

Le chapitre 4 traite de l'inventaire et de la collecte des données historiques sur les inondations à travers l'étude de cas de l'Ardèche. Une méthodologie, appelée HISTORISQUE et basée sur une collaboration entre historiens et hydrologues, a été développée. Les principaux résultats de la mise en oeuvre de cette méthode sur le bassin étudié sont ensuite présentés.

Le chapitre 5 présente l'exploitation de l'information historique sur deux secteurs du bassin versant de l'Ardèche. Les données limnimétriques collectées sont critiquées puis converties en débits par le biais de modèles hydrauliques 1D. Une vérification de la stationnarité des séries reconstituées est effectuée avant d'estimer les quantiles de crue. Une comparaison des résultats obtenus en exploitant soit l'information historique, soit l'information pluviométrique (méthode du Gradex) montre une bonne cohérence.

En guise de conclusion, nous dressons un bilan du travail réalisé et ouvrons des perspectives pour la poursuite des recherches sur la prise en compte de l'information des crues historiques.

Mots clés : Crues Historiques, Analyse Fréquentielle, Maximum de Vraisemblance, Algorithme des Moments Espérés, Ardèche.

Abstract

This thesis deals with the use of historical flood information to improve flood risk estimation. The problem is presented in introduction and after this report is divided into four parts.

Chapter 2 presents the various data exploitable in flood frequency analysis (FFA). Prehistoric, historical and contemporary information are discussed. Actual means to collect this data and problems involved in its use are also presented. The formalization of the flood data for exploitation in FFA is then tackled.

Chapter 3 deals with FFA when historical data are taken into account and presents a synthesis of existing methods. A generalized formulation for the method based on Maximum Likelihood Estimators (MLE_G) within the framework of the annual maximum flood series (AM) was developed. An adaptation of the Expected Moment Algorithm (EMA) to EV1 and GEV distributions is also carried out. Methods adapted to Peak Over Threshold series (POT) are presented afterwards. Some comments are also carried out on plotting position and measurement errors.

Chapter 4 drafts the inventory and the gathering of historical data on floods through the case study of Ardeche river. A methodology, called HISTORISQUE and based on a collaboration between historians and hydrologists, was developed. Main results of this method applied to the Ardeche river are then presented.

Chapter 5 presents the exploitation of historical information on two sectors of the catchment area of Ardeche. The collected limnimetric data are criticized then converted into flows with hydraulic models. The stationarity of the reconstituted series is examined before estimating flood quantiles. A comparison of results obtained by exploiting either historical information, or pluviometric information (Gradex method) shows a good agreement.

We conclude by striking the balance of this work and proposing future prospects of the use of historical flood information.

Key-Words : Historical floods, Flood Frequency Analysis, Maximum Likelihood Estimators, Expected Moment Algorithm, Ardèche river.

Table des matières

1	Introduction	15
1.1	Préambule	15
1.2	Contexte et problématique	15
1.3	Programmes associés	19
1.4	Plan de la thèse	20
1.5	Bibliographie	22
2	Données disponibles pour l'étude de la distribution des crues	25
2.1	Introduction	27
2.2	Différentes sources d'informations relatives aux crues	27
2.2.1	La période préhistorique (<i>Paleoflood</i>)	28
2.2.2	La période historique	33
2.2.3	La période contemporaine	38
2.3	Schématisation des données	43
2.3.1	L'information systématique (<i>systematic data</i>)	43
2.3.2	L'information non systématique (<i>non systematic data</i>)	43
2.3.3	Traitement statistique de l'information non systématique	45
2.4	Conclusion	47
2.5	Bibliographie	48
3	Analyse fréquentielle des crues avec données non systématiques	53
3.1	Introduction	55
3.2	Rappel des méthodes d'estimation des paramètres sans information censurée	57
3.2.1	Méthode du maximum de vraisemblance (MLE)	57
3.2.2	Méthode des moments (MO)	58
3.2.3	Méthode des moments de probabilité pondérés (PWM)	59
3.2.4	Méthode des <i>L</i> -Moments (LM)	60
3.3	Estimation des paramètres avec information censurée, à partir d'échantillons constitués de valeurs maximales annuelles (AM)	63
3.3.1	Méthode du maximum de vraisemblance (MLE)	64
3.3.2	Méthode des moments pondérés historiquement (HWM)	71
3.3.3	Méthodes des moments partiels de probabilité pondérés (PPWM)	74
3.3.4	Méthode de l'algorithme des moments espérés (EMA)	76
3.4	Rappel du modèle de dépassement	79
3.4.1	Principe général	79
3.4.2	Modèle de dépassement avec flux de Poisson	82

3.5	Estimation des paramètres avec information censurée, à partir d'échantillons constitués de valeurs supérieures à un seuil (POT)	83
3.5.1	Intensité des crues non connue, censure de type binomiale (MLE_{sbc})	83
3.5.2	Intensité des crues connues au-dessus d'un seuil fixé (MLE_{sc})	84
3.5.3	Intensité des crues située dans un intervalle de censure au-dessus d'un seuil fixé (MLE_{sic})	84
3.5.4	Intensité des plus fortes crues connues (MLE_{smf})	85
3.6	Quelques remarques sur les probabilités empiriques (<i>plotting position</i>)	86
3.6.1	Probabilités empiriques sans information censurée	86
3.6.2	Probabilités empiriques avec information censurée	91
3.7	Réduction de l'incertitude d'échantillonnage grâce à l'information historique	96
3.8	Prise en compte des erreurs de reconstitution des débits dans les méthodes d'estimation	97
3.9	Conclusion	100
3.10	Bibliographie	103
4	Collecte des données historiques sur les inondations de l'Ardèche	109
4.1	Introduction	110
4.2	Présentation du bassin versant étudié	111
4.3	Inventaire et collecte des informations sur les crues historiques	116
4.3.1	Aspects généraux de la méthodologie	116
4.3.2	Déroulement de la démarche	117
4.4	Principaux résultats concernant les historiques	125
4.4.1	Rapide historique des services producteurs de données techniques sur les cours d'eau	125
4.4.2	Valeurs remarquables de pluies et de cotes de crues de l'Ardèche issues de l'enquête historique	135
4.5	Conclusion	153
4.6	Bibliographie	154
5	Exploitation de l'information historique (Vallon et St-Martin)	167
5.1	Introduction	168
5.2	Choix des secteurs étudiés	169
5.3	Critique des données limnimétriques	171
5.3.1	Zéro des échelles	171
5.3.2	Cotes retenues et exhaustivité des événements	177
5.4	Reconstitution des débits de crue	183
5.4.1	Secteur de Vallon	183
5.4.2	Secteur de Saint Martin	193
5.4.3	Chroniques de débit retenues	197
5.5	Analyse fréquentielle	203
5.5.1	Test de l'homogénéité et de la stationnarité	203
5.5.2	Ajustements à l'aide des données de Vallon-Pont-d'Arc issues de la période systématique, puis historique	207
5.5.3	Comparaison des résultats obtenus avec l'information des crues historiques de St-Martin avec l'extrapolation par la méthode du Gradex213	213
5.6	Conclusion	216

5.7	Bibliographie	217
6	Conclusion et perspectives	223
6.1	Conclusion	223
6.2	Perspectives	226
6.3	Bibliographie	227
A	Rapports et publications réalisés dans le cadre de la thèse	229
B	Détail des programmes	231
B.1	Format des fichiers de données	231
B.2	Lecture des fichiers et construction des structures	233
B.3	Fonction d'estimation des paramètres de la loi EV1 par la méthode EMA .	234
B.4	Fonction d'estimation des paramètres de la loi EV1 par la méthode MLE_G	236
B.5	Fonction d'estimation des paramètres de la loi GEV par la méthode EMA .	240
B.6	Fonction d'estimation des paramètres de la loi GEV par la méthode MLE_G	243
B.7	Bibliographie	246
C	Etat Général des Sources sur l'Ardèche	247
C.1	Instruments de recherche	249
C.1.1	Institut de Géographie Alpine (IGA) - Fonds Maurice Pardé	249
C.1.2	Archives Départementales de l'Ardèche (ADA)	250
C.1.3	Archives Nationales (AN)	250
C.1.4	Bibliothèque de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées (ENPC) .	251
C.1.5	Société Hydrotechnique de France (SHF)	251
C.1.6	Bibliothèque Nationale (BN)	251
C.2	Grille de Lecture	251
C.3	Détail des fonds documentaires exploités	253
C.3.1	Direction Régionale de l'Environnement Rhone-Alpes (DIREN-RA)	253
C.3.2	Institut de Géographie Alpine (IGA)	254
C.3.3	Direction Départementale de l'Equipement de l'Ardèche (DDE07) .	261
C.3.4	Archives Départementales de l'Ardèche (ADA)	271
C.3.5	Archives communales (AC)	276
C.3.6	Archives Nationales (AN)	277
C.3.7	Ecole Nationale des Ponts et Chaussées (ENPC)	280
C.3.8	Société Hydrotechnique de France (SHF)	295
C.3.9	Bibliothèque Nationale (BN)	302
C.4	Bibliographie	306
D	Historique des crues de l'Ardèche	307
D.1	Crues de l'Ardèche avant le XIXe siècle	308
D.2	Crues de l'Ardèche de 1805 à 1830	313
D.3	Inventaire des relevés hydrométriques disponibles aux stations de Vallon Pont d'Arc et St-Martin d'Ardèche	318
D.3.1	Station de Vallon Pont d'Arc	319
D.3.2	Station de St-Martin d'Ardèche	320
D.4	Bibliographie	320



Liste des figures

1.1	Inondation de Nîmes le 03/10/1988	16
1.2	Inondation de Palaja le 23/06/1992	16
1.3	Inondation de l'Aude le 12/11/1999 (destruction du pont SNCF)	16
1.4	Inondation du Saguenay à Chicoutimi le 19/07/1996	16
1.5	Illustration du concept de risque d'inondation	17
2.1	Les différentes sources d'informations relatives aux crues	28
2.2	Schéma de principe d'élaboration des terrasses	30
2.3	Schéma d'une coupe stratigraphique type	30
2.4	Schéma de localisation des différents dépôts	30
2.5	Courbe de tarage établie à partir de dépôts de paléo-crues	34
2.6	Schéma d'une section de contrôle idéale	39
2.7	Exemple d'évolution du matériel et d'adaptation du traitement à EDF	40
2.8	Schéma de la relation section mouillée-débit en fonction du régime de l'écoulement	42
2.9	Différents types d'informations historiques	44
3.1	Diagramme du rapport des L -moments	62
3.2	Schéma des différents types d'information relatives aux crues dans le cadre du modèle de maxima annuels	64
3.3	Schéma de principe de la méthode HWM	72
3.4	Schéma de principe de la méthode PPWM	75
3.5	Schéma de l'algorithme des moments espérés	79
3.6	Définition des variables aléatoires décrivant le processus du renouvellement	80
3.7	Estimation de alpha pour la loi EV1	87
3.8	Illustration des formules de probabilités empiriques, cas de la loi EV1	88
3.9	Illustration de l'inconsistance du traitement des crues historiques par le calcul des probabilités empiriques sur différentes périodes	91
3.10	Illustration de la détermination des probabilités au dépassement des seuils	94
3.11	Série des maxima annuels de la Big Sandy River à la station de Bruceton	95
3.12	Probabilités empiriques par la formule de Hirsch et Stedinger (1987)	95
3.13	Probabilités empiriques par la formule modifiée	95
3.14	Probabilités empiriques avec probabilité de dépassement du seuil estimé par la méthode analytique	95
3.15	Influence de l'erreur de mesure sur l'estimation des quantiles	98
3.16	Estimation de l'intervalle de confiance à 95 % avec débits ponctuels (a et b) ou compris dans un intervalle (c)	98

4.1	Détail des stations hydrométriques du bassin versant de l'Ardèche depuis 1857	112
4.2	Profil en long de l'Ardèche et surface drainée	113
4.3	Hydrogrammes de quelques crues à la station de Sauze St-Martin (n° 61)	113
4.4	Répartition des débits moyens journaliers suivant l'époque de l'année à la station de Sauze St-Martin (n° 61) - Régime pluvial cévenol	113
4.5	Topographie et pluviomètres du bassin de l'Ardèche	114
4.6	Courbe hypsométrique du bassin de l'Ardèche	114
4.7	Structures géologiques du bassin de l'Ardèche	114
4.8	Aménagements hydrauliques	114
4.9	Les différentes étapes de la collecte et de la validation des informations historiques	118
4.10	Surface du bassin versant de l'Ardèche et des sous bassins d'après Cassini	127
4.11	Evolution du nombre de postes pluviométriques au cours des deux derniers siècles	133
4.12	Chronique hauteurs/temps (CTH) à la station de St-Martin d'Ardèche (n° 64) sur la période 1892-1964	138
4.13	Chronique hauteurs/temps (CTH) à la station de Vallon Pont d'Arc (n° 55) sur la période 1861-1964	138
4.14	Carte de l'Ardèche à Vallon-Pont-d'Arc (IGN 1985)	145
4.15	Carte de l'Ardèche à Vallon-Pont-d'Arc en 1857: localisation des sections en travers	145
4.16	Profils en long de lignes d'eau de crues de l'Ardèche à Vallon Pont d'Arc (1827, 1846, 1855, 1856)	146
4.17	Profil en travers n° 1	146
4.18	Profil en travers n° 2	147
4.19	Profil en travers n° 3	147
4.20	Plan du débouché de l'arche de Pont d'Arc	147
4.21	Chronique de débits moyens journaliers (QJO) à la station de Sauze St-Martin (n° 61)	149
4.22	Chronique de débits instantanés maximum mensuels (QMM) à la station de Sauze St-Martin (n° 61)	149
4.23	Chronique de hauteurs instantanées maximales mensuelles (HMM) à la station de Sauze St-Martin (n° 61)	149
4.24	Chronique hauteurs/temps (CTH) à la station de Sauze St-Martin (n° 61)	150
4.25	Chronique hauteurs/temps (CTH) à la station de Vallon Pont d'Arc (n° 55)	150
5.1	Altitude des crues historiques au Moulin de Salavas	170
5.2	Hauteurs minimales annuelles à l'échelle de Vallon (n° 55) sur la période 1875-1964	173
5.3	Hauteurs minimales annuelles à l'échelle de St-Martin (n° 64) sur la période 1892-1964	173
5.4	Hauteurs maximales annuelles des crues historiques à Vallon (n° 55) avant la mise en place du SAC	178
5.5	Correspondance entre les hauteurs aux échelles de Vallon (n° 55) et de St-Martin (n° 64) établie à partir des cotes maximales annuelles issues des relevés d'observateurs	181

5.6	Localisation des profils en travers du modèle hydraulique de Vallon	184
5.7	Crue du 22 septembre 1890 au niveau de l'arche naturelle de Pont d'Arc .	185
5.8	Coefficients de rugosité des débits de crues et de basses eaux simulés	185
5.9	Représentation 3D de la géométrie du modèle hydraulique de Vallon	186
5.10	Profil en long de l'Ardèche à Vallon, topographie actuelle (1994-97)	187
5.11	Profil en long de l'Ardèche à Vallon, topographie ancienne (1849)	187
5.12	Courbe de tarage en régime permanent à l'échelle de Vallon (n° 55) et tests de sensibilité du modèle aux paramètres de calage	189
5.13	Crues de 1857: a) Hydrogramme estimé au pont de Vallon, b) limni- grammes observés (points) et simulés (ligne) aux différentes échelles	191
5.14	Crues de 1859: a) Hydrogramme estimé au pont de Vallon, b) limni- grammes observés (points) et simulés (ligne) aux différentes échelles	191
5.15	Modélisation en régime transitoire: a) Hydrogrammes théoriques testés, b) Courbe de tarage à l'échelle de Vallon	191
5.16	Modélisation en régime transitoire: sensibilité de la courbe de tarage de Vallon aux coefficients de rugosité	191
5.17	Courbe de tarage à l'échelle de Vallon (n° 55) avant 1921	192
5.18	Courbe de tarage à l'échelle de Vallon (n° 55) période 1921-2001	192
5.19	Profil en long de l'Ardèche à St-Martin	193
5.20	Courbe de tarage de l'échelle de St-Martin (n° 64) avant 1941	195
5.21	Courbe de tarage de l'échelle de St-Martin (n° 64) depuis 1941	195
5.22	Courbe de tarage de l'échelle de Sauze (n° 61)	196
5.23	Comparaison des débits de crue estimés à Vallon, Sauze et St-Martin . . .	197
5.24	Test de stationnarité de la série des débits supérieurs au seuil de 810 m ³ /s à Vallon sur la période 1980-2001	204
5.25	Test de stationnarité de la série des débits supérieurs au seuil de 2250 m ³ /s à Vallon sur la période 1892-2001	204
5.26	Test de stationnarité de la série des débits supérieurs au seuil de 4750 m ³ /s à Vallon sur la période 1815-2001	205
5.27	Test de stationnarité de la série des débits supérieurs au seuil de 5650 m ³ /s à Vallon sur la période 1708-2001	205
5.28	Test de saisonnalité à Vallon pour différents seuils	206
5.29	Chronique de débits maximum annuels à Vallon exploitée dans l'analyse fréquentielle	208
5.30	Chronique de débits maximum annuels à St-Martin exploitée dans l'analyse fréquentielle	208
5.31	Distributions des débits à Vallon avec prise en compte de l'information historique	211
5.32	Distribution des débits à St-Martin avec information historique ou plu- viométrique	215
B.1	Fonction d'Euler	235
C.1	Grille de lecture	252



Liste des tableaux

3.1	Valeurs de alpha pour la formule des probabilités empiriques	89
3.2	Propriétés des méthodes statistiques d'exploitation des données historiques	100
3.3	Synthèse des fonctions de vraisemblance pour les différents types d'information historique (BC, C, IC et MF) suivant les approches maxima annuel (AM) ou valeur supérieure à un seuil (POT)	101
4.1	Caractéristiques des principaux barrages sur l'Ardèche	115
4.2	Fonds inventoriés dans le cadre du projet HISTORISQUE-Ardèche	122
4.3	Valeurs en mètre à ajouter aux altitudes anciennes pour les convertir au système NGF-IGN69 dans les secteurs de Vallon Pont d'Arc et St-Martin d'Ardèche	129
4.4	Cumuls de pluie remarquables sur la période 1805-1900	135
4.5	Hauteurs maximales annuelles au-dessus de l'étiage des crues historiques répertoriées à Vallon (n° 55) et St-Martin (n° 64) sur la période 1522-1891	141
4.6	Synthèse des lacunes des séries disponibles dans la banque HYDRO aux stations de Vallon et Sauze	152
5.1	Historique des stations de Vallon	172
5.2	Estimation du zéro du limnigraphe de Vallon	175
5.3	Historique des stations de Sauze	176
5.4	Historique des stations de Saint Martin	177
5.5	Hauteurs maximales annuelles au-dessus de l'étiage des crues historiques retenues à Vallon (n° 55) et St-Martin (n° 64) - Seuils adoptés sur la période 1645-1891	180
5.6	Erreurs relatives maximales entre les hauteurs modélisées et les laisses des crues historiques à Vallon	188
5.7	Comparaison entre les débits de crue (m ³ /s) estimés à Vallon par Maurice Pardé et ceux issus du modèle hydraulique	198
5.8	Liste des crues de l'Ardèche à Vallon, Sauze et St-Martin	200
5.9	Quantiles (en m ³ /s) estimés à Vallon	212
5.10	Quantiles (en m ³ /s) estimés à St-Martin	214
B.1	Format des fichiers	232
B.2	Structure des données non censurées	233
B.3	Structure des données censurées	233
B.4	Différentes combinaisons des bornes de l'information censurée	234
B.5	Différentes combinaisons des bornes de l'information censurée	241

D.1	Résumé des crues de l'Ardèche avant le XIX ^e siècle	308
D.2	Résumé des crues de l'Ardèche de 1805 à 1830	313
D.3	Relevés hydrométriques - feuilles mensuelles - station de Vallon	319
D.4	Relevés hydrométriques - feuilles mensuelles - station de St-Martin	320

Chapitre 1

Introduction

Sommaire

1.1	Préambule	15
1.2	Contexte et problématique	15
1.3	Programmes associés	19
1.4	Plan de la thèse	20
1.5	Bibliographie	22

1.1 Préambule

Cette thèse de doctorat s'inscrit dans le cadre d'une co-tutelle France-Québec établie entre l'Université Joseph Fourier (*UJF*) et l'Institut National de la Recherche Scientifique (*INRS-ETE*), dans les spécialités respectives Mécanique des Milieux Géophysiques et Environnement d'une part et Sciences de l'Eau d'autre part.

Le travail de recherche s'est effectué en alternance entre l'Unité de Recherche Hydrologie-Hydraulique du *Cemagref* de Lyon et la Chaire industrielle en hydrologie statistique (*INRS-ETE*). La co-direction a été assurée par Michel Lang (*Cemagref*), Taha Ouarda et Bernard Bobée (*INRS-ETE*). Les travaux ont été effectués soit au *Cemagref* pour les périodes de décembre 1997 à juillet 1999 et d'août 2000 à février 2002, soit à l'*INRS-ETE* pour la période d'août 1999 à juillet 2000.

1.2 Contexte et problématique

La problématique des risques naturels et plus particulièrement du risque inondation est tout à fait d'actualité au regard notamment des dernières grandes crues catastrophiques du sud de la France (1988, 1992, 1993, 1994...1999, 2002) mais également de celle survenue en juillet 1996 dans la région du Saguenay du Québec.

Les enjeux des inondations sont considérables. Leur impact économique direct (dégâts matériels et intangibles) en fait, au moins en France, le risque naturel le plus dommageable. Les coûts économiques indirects (perturbations d'activités et de transport) peuvent aussi de la même façon être qualifiés de très importants, du moins localement. De plus, les

impacts sociaux sont loin d'être négligeables, même s'ils ne peuvent pas être quantifiés précisément. Dans ce contexte l'estimation de l'aléa revêt un caractère déterminant et la recherche de l'ensemble des informations pouvant l'améliorer se voit économiquement et socialement justifiée.

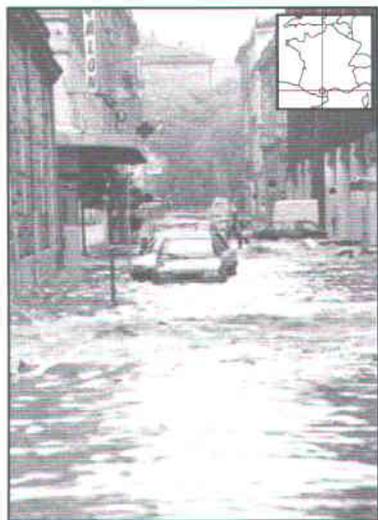


FIG. 1.1 – Inondation de Nîmes le 03/10/1988



FIG. 1.2 – Inondation de Palaja le 23/06/1992

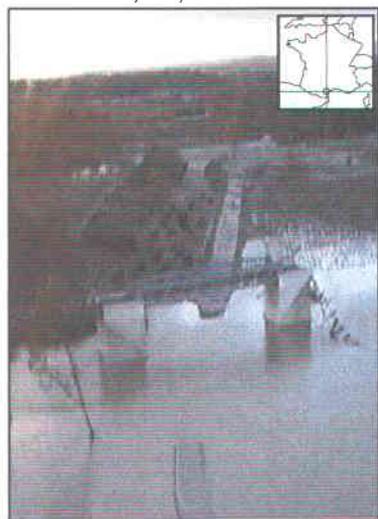


FIG. 1.3 – Inondation de l'Aude le 12/11/1999 (destruction du pont SNCF)

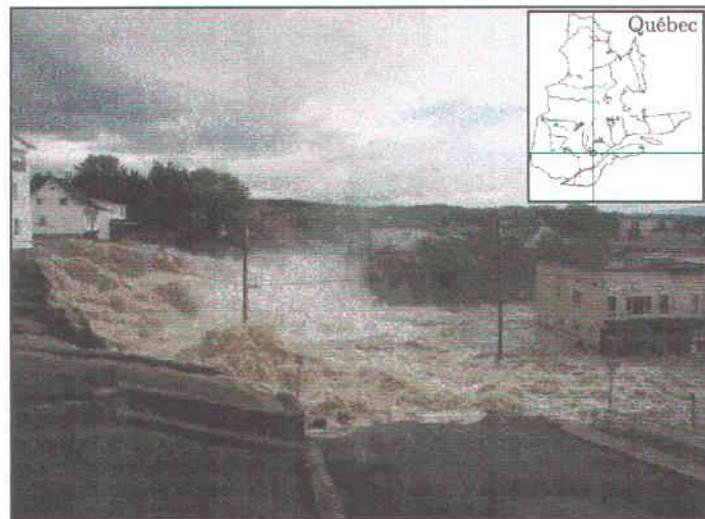


FIG. 1.4 – Inondation du Saguenay à Chicoutimi le 19/07/1996

Dans ce contexte, il importe de définir des outils de gestion et d'aménagement du territoire rigoureux qui présupposent une appréhension scientifique non biaisée des phénomènes naturels. On définit généralement le concept du risque d'inondation par le croisement de deux composantes : le phénomène aléatoire des crues, lié à l'hydrologie de la rivière, et la vulnérabilité aux inondations, liée quant à elle à l'occupation du sol (cf. figure 1.5, p. 17).

L'étude de la composante aléatoire du risque s'effectue le plus fréquemment à partir des informations des réseaux hydrométriques nationaux, qui permettent de disposer en général de vingt à trente ans de mesures en continu sur le régime des rivières. Cette quantité d'information n'est malheureusement pas suffisante d'un point de vue statistique pour estimer de façon fiable les crues de très faible occurrence (période de retour supérieure ou égale à 100 ans).

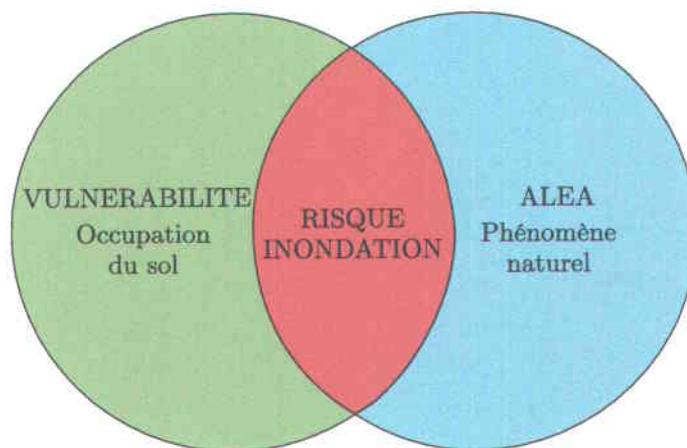


FIG. 1.5 – Illustration du concept de risque d'inondation

Différentes techniques permettent cependant de contourner ce problème et d'étoffer la série d'enregistrement systématique afin d'améliorer l'estimation des crues rares et extrêmes : l'utilisation de l'information régionale, l'utilisation de l'information pluviométrique (méthode du GRADEX développée par EDF pour le dimensionnement des évacuateurs de crue des barrages, Guillot et Duband, 1967 ; méthode AGREGEE développée par le Cemagref qui hérite des principes de la première, Margoum et al., 1994) et l'utilisation de l'information historique (paléohydrologie, dendrohydrologie, enquêtes en archives et auprès d'observateurs).

Dans ce travail nous proposons d'exploiter plus particulièrement les deux dernières sources d'information en insistant notamment sur l'analyse des crues historiques (avec essentiellement des enquêtes en archive). Il est surprenant de constater, au regard de l'importance que prend la gestion du risque dans la société actuelle, une exploitation encore trop modeste et très incomplète du capital des informations historiques. La consultation des archives des services techniques du siècle passé, des documents administratifs ou juridiques anciens permet pourtant de recueillir des informations sur les crues majeures du XVIII^e au XX^e siècle. Un travail de critique des données et des considérations hydrauliques permettent ensuite de reconstituer le débit de ces crues historiques.

Il semble que cette sous exploitation soit liée à la nature très diversifiée de ce type d'information et par delà à son accessibilité relativement délicate en comparaison de celle des bases de données hydrométéorologiques existantes. Certaines critiques fréquemment formulées renvoient également à la plus grande incertitude liée aux données ainsi reconstituées. Comme le notent Bernier et al. (1986, p. 157) les données historiques sont souvent négligées car elles sont considérées comme douteuses. La détermination du débit des crues, qu'elles soient historiques ou récentes, reste encore une démarche indirecte qui passe par

l'établissement d'une courbe de tarage. Les jaugeages étant rarement effectués pour les événements de forte intensité (difficultés opératoires), cette courbe hauteur/débit est extrapolée pour les débits importants. Dans ces conditions, il ne semble pas que l'incertitude liée à la conversion hauteur-débit des crues historiques soit fondamentalement supérieure à celle des crues récentes. L'information historique est cependant moins précise pour ce qui concerne les hauteurs d'eau (référentiel altimétrique) et la géométrie de la rivière (variations morphologiques du lit).

Un autre point délicat, pouvant également expliquer la sous-exploitation des crues historiques, a trait au problème de la stationnarité des phénomènes hydrométéorologiques au cours du temps. Cependant, comme l'a rappelé Duband (1994), un éventuel changement climatique n'est pas mis en évidence au regard des longues séries de pluies disponibles. Si des modifications sont probablement décelables sur les paramètres météorologiques (température, pression, composition des gaz), elles restent imperceptibles au niveau des variables étudiées en hydrologie qui intègrent de nombreux processus (pluies et débits). Il conclut que l'on peut raisonnablement envisager de faire l'hypothèse que les averses importantes et les crues qu'elles ont engendrées périodiquement dans le passé, sans qu'il y ait une quelconque régularité cyclique, auront des probabilités d'occurrence sensiblement identiques dans le futur. Quoiqu'il en soit des tests statistiques existent pour vérifier la stationnarité des échantillons reconstitués.

Différentes distributions de probabilités ou compositions de lois (modèle à deux populations) sont utilisées pour représenter les phénomènes hydrologiques (lognormal à deux paramètres : LN2, log Pearson III : LP3, valeurs extrêmes généralisée : GEV, composition de deux lois des valeurs extrêmes : TCEV, etc.). Le choix de l'une d'elles est toujours une phase délicate. En effet bien qu'elles fournissent sensiblement les mêmes estimations de quantiles pour les faibles périodes de retour (10 ans), des écarts importants sont constatés pour les événements rares. A ce titre l'information historique va apporter d'une part une aide à la décision précieuse dans le choix d'un comportement asymptotique (choix de la loi) et d'autre part un gain en terme de robustesse pour l'estimation de la queue de distribution. Par ailleurs l'information historique offre une réponse au problème de l'interprétation des horsains (*outliers*). Soit ces derniers font réellement partie de la même population que les autres événements et alors leur position aberrante en fréquence, liée au sous échantillonnage, sera corrigée dans une série plus longue. Soit ils résultent réellement de processus générateurs différents des autres événements et l'enquête historique pourra les mettre en évidence.

De nombreux auteurs (par exemple Leese, 1973 ; Cohn, 1986) ont pu mettre en évidence l'intérêt de l'information historique du point de vue de la réduction des incertitudes d'échantillonnage sur les quantiles estimés. Cette réduction, pouvant atteindre 50 % et plus, est étudiée par le biais de simulations Monte Carlo ou le calcul analytique de la variance asymptotique (*Cramer-Rao Lower Bound, CRLB*). Elle est observée quelles que soient : (1) les types d'information historique (binomiale : BC, censurée : C, censurée dans un intervalle : IC, crues maximales : MF), (2) les approches (série de maximum annuels : AM, série de valeurs supérieures à un seuil : POT), (3) les méthodes d'estimation (maximum de vraisemblance : MLE, moments pondérés historiquement : HWM, moments partiels de probabilité pondérés : PPWM, algorithme des moments espérés : EMA), (4) les distributions (LP3, GEV, etc.), (5) les paramètres de forme. Ces conclusions sont cependant toutes obtenues dans le cadre de l'approche statistique classique, dite également

« objective », sans tenir compte de l'incertitude sur les débits des crues, qu'elles soient historiques ou récentes.

1.3 Programmes associés

Cette thèse est impliquée dans différents projets qui associent d'une part des historiens, aptes à définir une méthodologie pour la collecte d'informations historiques et à l'appliquer, et d'autre part, des hydrologues et hydrauliciens, aptes à critiquer et exploiter cette information :

- i)* Le projet « HISTORISQUE–Guiers » : il a été financé par le Pôle Grenoblois sur les Risques Naturels sur la période 1996-1997. Organisé autour d'une collaboration entre l'Université Pierre Mendès France de Grenoble (histoire-urbanisme), EDF/DTG (hydrologie) et le groupement de Lyon du *Cemagref* (Division Hydrologie-Hydraulique), il avait pour but de reconstituer les plus fortes crues du bassin versant du Guiers depuis 1750. Le projet a fait l'objet d'un rapport final (Lang et al., 1998b) et de deux publications, une dans une revue technique (Lang et al., 1998a), l'autre dans des actes de colloque (Lang et al., 1999).
- ii)* Le projet « HISTORISQUE–Isère et affluents torrentiels » : il a été financé par le Pôle Grenoblois sur les Risques Naturels et le *Cemagref* dans le cadre du thème mobilisateur risques naturels sur la période 1998-1999. Organisé autour d'une collaboration entre l'Université Pierre Mendès France de Grenoble (histoire-urbanisme), le Service Départemental des Archives de l'Isère, le *Cemagref* Grenoble (ETNA) et le *Cemagref* Lyon (Division Hydrologie-Hydraulique), il a fait l'objet d'un rapport final (Brochot et al., 2000), d'une publication dans une revue technique (Coeur et al., 1998) et d'un article (Coeur et Lang, 2000).
- iii)* Le projet « HISTORISQUE–Ardèche » : il a été financé dans le cadre du Contrat de Plan Etat-Région Rhône-Alpes sur la période 1998-1999. Organisé autour d'une collaboration entre l'Université Pierre Mendès France de Grenoble (histoire-urbanisme), le service d'annonce des crues de l'Ardèche / DDE 07 (hydrologie) et le groupement de Lyon du *Cemagref* (Division Hydrologie-Hydraulique), ce projet avait pour but de reconstituer les plus fortes crues de l'Ardèche au cours des deux derniers siècles. Il a fait l'objet d'un rapport final (Coeur et al., 2001), de deux articles (Naulet et al., 2001 ; Lang et al., 2002) et d'une présentation au congrès EGS qui s'est tenu du 19 au 23 avril 1999 à la Haye (Pays-Bas) : *Collaboration between historians and hydrologists on the Ardeche river: use of historical information for flood frequency analysis*.

Cette thèse s'inscrit également dans le projet SPHERE retenu à l'occasion de l'appel d'offre du cinquième Programme de la Commission Européenne (*Energy, Environment and Sustainable Development Programme, spécialité : Floods and hydrogeological risks*). Le projet SPHERE (*Systematic, Palaeoflood and Historical data for the improvEment of flood Risk Estimation*) voit une collaboration entre des équipes espagnoles (CSIC, Environmental Sciences Centre, Univ. Barcelone, Univ. Valence), israéliennes (Univ. Jerusalem), françaises (*Cemagref*, société Acthys), allemande (Univ. Stuttgart) et québécoise (*INRS-ETE*), dans

les domaines de la paléohydrologie, l'analyse historique, l'hydraulique et l'hydrologie (analyse fréquentielle et de stationnarité) et la climatologie. Ce projet a fait l'objet de plusieurs présentations au congrès EGS qui s'est tenu du 25 au 29 avril 2000 à Nice, France (Benito et al., 2000; Capó et al., 2000; Sheffer et al., 2000), des informations complémentaires sont disponibles via un site internet (www.ccma.csic.es/dpts/suelos/hidro/sphere/index.html).

1.4 Plan de la thèse

Les champs abordés pour exploiter l'information historique sont très divers, depuis la méthodologie de collecte et de validation des données brutes, leur conversion en débits, jusqu'aux méthodes d'analyse fréquentielle. Cette nature intrinsèquement pluridisciplinaire de la problématique est particulièrement intéressante mais s'insère plus difficilement dans le cadre académique d'une thèse. Aussi ce travail s'est attaché à aborder l'utilisation de l'information des crues historiques d'un point de vue opérationnel, en déroulant l'ensemble de la démarche sur un cas d'étude, l'Ardèche.

Le chapitre 2 présente une synthèse des différentes sources d'informations sur les crues pouvant être exploitées dans l'analyse fréquentielle. Les méthodes de collecte et les problèmes liés à l'utilisation de chaque type de donnée sont également discutés. Ce chapitre aborde ensuite la formalisation, en termes statistiques, de ces informations. Nous concluons par les différentes lacunes constatées dans la collecte et la validation des données historiques, constat qui nous a amené à développer la démarche HISTORISQUE.

Le chapitre 3 aborde l'analyse fréquentielle des crues avec des données historiques. Il présente en premier lieu les méthodes adaptées aux séries de maxima annuels (AM) et permettant de traiter l'information systématique seule puis d'incorporer l'information historique (non systématique). Dans ce cadre une formulation généralisée pour la méthode du maximum de vraisemblance (MLE_G) a été développée. Ce chapitre aborde en second lieu les méthodes adaptées aux séries de valeurs supérieures à un seuil (POT) avec incorporation de l'information historique. Quelques commentaires sont également effectués sur les probabilités empiriques (*plotting position*). Nous concluons par des remarques qui synthétisent les résultats issus de la littérature sur les performances des différentes méthodes et sur la prise en compte de l'incertitude des débits.

Le chapitre 4 présente la collecte des données historiques sur les inondations à travers l'étude de cas de l'Ardèche. Nous abordons successivement les caractéristiques du bassin versant étudié, la méthodologie mise en oeuvre pour l'inventaire et la collecte de l'information historique et enfin les principaux résultats : un historique des services producteurs de données techniques sur les cours d'eau et les valeurs remarquables de pluies et de cotes de crues de l'Ardèche.

Le chapitre 5 aborde l'exploitation de l'information historique sur deux secteurs du bassin versant de l'Ardèche. Nous justifions en premier lieu le choix de ces deux secteurs, les données limnimétriques présentées au chapitre précédent sont ensuite critiquées. Une partie du chapitre est également dédiée à la conversion des hauteurs en débits par le biais de modèles hydrauliques 1D. Enfin nous abordons l'analyse fréquentielle des crues avec tout d'abord la vérification de la stationnarité des séries reconstituées puis les ajustements

par les méthodes de l'algorithme des moments espérés (EMA) et du maximum de vraisemblance (MLE_G) avec la loi GEV. Une comparaison des résultats obtenus en exploitant soit l'information historique, soit l'information pluviométrique est également effectuée.

Le chapitre 6 est relatif à la conclusion générale. Nous présentons à cette occasion les principaux éléments qui se dégagent de ce travail de thèse ainsi que les perspectives.

L'annexe A présente la liste bibliographique des travaux auxquels nous avons participé au cours de cette thèse.

L'annexe B a trait aux programmes développés. Elle détaille notamment les expressions analytiques établies pour mettre en oeuvre la méthode MLE_G avec les lois de Gumbel (EV1) et GEV. Cette annexe présente également l'adaptation, pour ces mêmes lois, de la méthode EMA développée jusqu'alors uniquement pour la loi normale (N2) et log Pearson type III (LP3).

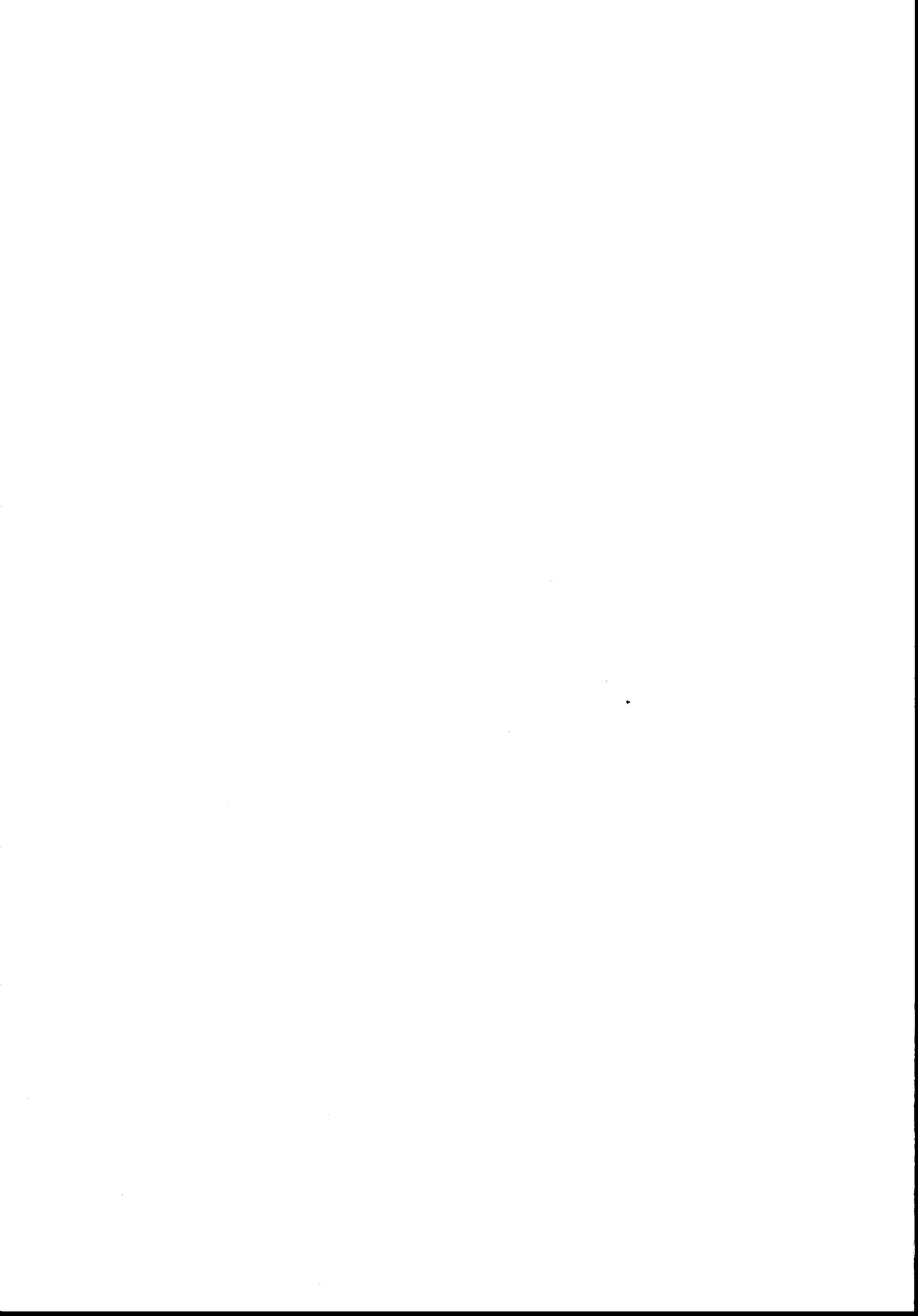
L'annexe C présente l'Etat Général des Sources (EGS) qui synthétise l'ensemble des sources documentaires sur les inondations et l'aménagement de la rivière Ardèche au cours des deux derniers siècles. Nous abordons en premier lieu les instruments de recherche disponibles. La grille de lecture, représentant l'outil commun de travail entre hydrologues et historiens, est ensuite présentée. Enfin les différents fonds documentaires exploités sont détaillés en suivant le cadre général de classement des archives lorsqu'il existe. Bien que réalisé en particulier pour le bassin versant de l'Ardèche, cet EGS, qui met en évidence les aspects méthodologiques et les informations disponibles, peut servir de guide pour transposer la démarche à d'autres cours d'eau.

L'annexe D constitue un historique des crues de l'Ardèche. Elle présente en premier lieu les crues recensées entre 1500 et 1830, puis en second lieu l'inventaire des relevés hydrométriques disponibles aux stations de Vallon-Pont-d'Arc et de St-Martin d'Ardèche entre 1861 et 1964.

1.5 Bibliographie

- Benito, G., Bardossy, A., Bobée, B., Coeur, D., Enzel, Y., Francés, F., Lang, M. et Llasat, M. C. (2000). Systematic, Palaeoflood and Historical data for the improvement of flood risk estimation: SPHERE project, *EGS, XXIV General Assembly, Posters session*, session NH4 03: The use of historical data in natural hazard assessment: Floods, Nice, France, 25-29 april.
- Bernier, J., Miquel, J., Lebossé, A. et Griffet, A. (1986). Use of additional historical information for estimation and goodness of fit of flood frequency models, *in* Singh, V. P. (ed.), *Proceedings of the International Symposium on Flood Frequency and Risk Analyses*, Louisiana State University, Baton Rouge, Louisiana, USA, may, pp. 153-164.
- Brochot, S., Coeur, D., Lang, M., Naulet, R. et Richard, D. (2000). Historisque-Isère et torrents affluents: utilisation de l'information historique pour une meilleure définition du risque d'inondation, *Rapport final*, Cemagref, Thème mobilisateur risque et aménagement, nov.
- Capó, E., Llasat, M. C., Quintas, L. et Barriendos, M. (2000). A methodology for the treatment of long hydrometeorological series: application to the case of peninsular Spain, *EGS, XXIV General Assembly, Oral presentations*, session NH4 03: The use of historical data in natural hazard assessment: Floods, Nice, France, 25-29 april.
- Coeur, D., Gigon, C., Lang, M., Naulet, R. et Recking, A. (2001). Historisque-Ardèche - Utilisation de l'information historique pour une meilleure définition du risque d'inondation sur la rivière de l'Ardèche, *Rapport Final*, Programme de Recherche sur les Risques Naturels, Contrat de Plan Etat-Région Rhône-Alpes, juil.
- Coeur, D. et Lang, M. (2000). L'information historique des inondations: l'histoire ne donne-t-elle que des leçons?, *La Houille Blanche* (2): 79-84.
- Coeur, D., Lang, M., Naulet, R., Brunet, R. et Strazzeri, D. (1998). Histoire et connaissance des phénomènes naturels extrêmes, *Ingenierie - EAT* (numéro spécial Risques Naturels): 15-26.
- Cohn, T. A. (1986). *Flood frequency analysis with historical flood information*, PhD thesis, Faculty of the Graduate School of Cornell University, Cornell, june.
- Duband, D. (1994). Pour une meilleure prise en compte de l'information hydrométéorologique historique, sur les crues importantes des bassins supérieurs de certaines rivières à risque, *Congrès de la SHF, 23ème journée de l'hydraulique*, Nimes, France, sept., pp. 137-144.
- Guillot, P. et Duband, D. (1967). La méthode du Gradex pour le calcul de la probabilité des crues à partir des pluies, *Colloque International sur les crues et leur évaluation*, Leningrad, 15-22 août, *IASH*, publication n° 84, 560-56. Symposium International d'Hydrologie, Fort Collins, sept.
- Lang, M., Coeur, D., Lallement, C. et Naulet, R. (1998a). Valorisation de l'information historique pour la prédétermination du risque d'inondation: application au bassin du Guiers, *Ingenierie - EAT* (16): 3-13.
- Lang, M., Coeur, D., Lallement, C., Naulet, R. et Boudou, G. (1998b). Historisque-Guiers - Utilisation de l'information historique pour une meilleure définition du risque inondation, *Rapport technique*, Pôle Grenoblois d'Etude et de Recherche pour la Prévention des Risques Naturels, juin.

- Lang, M., Coeur, D., Lallement, C. et Naulet, R. (1999). Use of historical information for flood frequency studies: the example of river Guiers, in Llasat, C., Versace, P. et Ferrari, E. (ed.), *Heavy Rains and Rare Floods - Proceedings of the Joint Session of Topic IV (Rare Floods) and Topic VI (Heavy Rains)*, Vol. 2049, FRIEND-AMHY, UNESCO IHP-V 1.1 Project, National Research Council, Group for Prevention from Hydrogeological Disasters, Istanbul, Turquie, 16 oct. 1998.
- Lang, M., Naulet, R., Recking, A., Coeur, D. et Gigon, C. (2002). Etude de cas: l'analyse des pluies et crues extrêmes observées depuis 200 ans dans un bassin cévenol, l'Ardèche, *La Houille Blanche*, à paraître n° 6 ou 7/8.
- Leese, M. N. (1973). Use of censored data in the estimation of Gumbel distribution parameters for annual maximum flood series, *Water Resources Research*, 9 (6): 1534-1542.
- Margoum, M. , Oberlin, G. , Lang, M. et Weingartner, R. (1994). Estimation des crues rares et extrêmes: principe du modèle Agrégee, *Hydrologie Continentale*, 9 (1), 85-100.
- Naulet, R., Lang, M., Coeur, D. et Gigon, C. (2001). Collaboration between historians and hydrologists on the Ardeche river (France). First step: Inventory of Historical Flood Information, in Glade, T., Albin, P. et Francés, F. (ed.), *The Use of Historical Data in Natural Hazard Assessments*, Vol. 17 of *Advances in Natural and Technological Hazards Research*, chapter B: Flooding, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, oct., 113-129.
- Sheffer, N., Enzel, Y., Grodek, T., Benito, G., Lang, M., Naulet, R. et Gigon, C. (2000). Extreme floods of the Ardèche river, France (SPHERE Project), *EGS, XXIV General Assembly, Posters session*, session NH4 03: The use of historical data in natural hazard assessment: Floods, Nice, France, 25-29 april.



Chapitre 2

Données disponibles pour l'étude de la distribution des crues

Sommaire

2.1	Introduction	27
2.2	Différentes sources d'informations relatives aux crues	27
2.2.1	La période préhistorique (<i>Paleoflood</i>)	28
2.2.1.1	Collecte et validation des informations préhistoriques	29
	Etudes des dépôts de sédiments de crues (<i>Slackwater deposits</i>)	29
	Etudes géobotaniques	31
2.2.1.2	Problèmes liés à l'utilisation des crues préhistoriques	31
	Exhaustivité et fiabilité des crues préhistoriques	31
	Stationnarité de la population des crues préhistoriques	32
	Estimation de la hauteur des crues préhistoriques	32
	Estimation du débit des crues préhistoriques	32
2.2.2	La période historique	33
2.2.2.1	Collecte et validation des informations historiques	33
	Méthodologie générale de collecte des données historiques	33
	Recueil d'informations historiques sur les inondations en France	35
2.2.2.2	Problèmes liés à l'utilisation des crues historiques	36
	Exhaustivité et fiabilité des sources historiques	37
	Stationnarité de la population des crues historiques	37
	Estimation du débit des crues historiques	37
2.2.3	La période contemporaine	38
2.2.3.1	Collecte et validation des informations contemporaines	38
	Mesure de la hauteur d'eau : station hydrométrique	38
	Jaugeages	40
	Tracé de la courbe de tarage	41
2.2.3.2	Problèmes de la chaîne de traitement	42
2.3	Schématisation des données	43
2.3.1	L'information systématique (<i>systematic data</i>)	43

2.3.2	L'information non systématique (<i>non systematic data</i>)	43
2.3.3	Traitement statistique de l'information non systématique	45
2.4	Conclusion	47
2.5	Bibliographie	48

2.1 Introduction

Nous avons rappelé dans le paragraphe relatif à la problématique du chapitre précédent que les informations pluviométrique et régionale pouvaient être utilisées comme complément des chroniques d'enregistrements systématiques dans l'analyse fréquentielle des crues (*Flood Frequency Analysis* : FFA). Dans ce chapitre nous nous limiterons à la présentation des informations relatives aux crues dans un contexte local (au sens de la FFA puisque la critique des données non systématiques fait intervenir un cadre régional).

Les différentes sources d'informations qui peuvent être exploitées dans l'analyse fréquentielle des crues sont abordées en premier lieu (§2.2, p. 27). Nous présentons ensuite l'interprétation et la représentation schématique de ces données en terme statistique (§2.3, p. 43).

2.2 Différentes sources d'informations relatives aux crues

Dans Ouarda et al. (1998) l'information non contemporaine liée aux crues est classée en trois catégories selon sa source (a) évidence physique d'événements anciens (*paléohydrologie*), (b) évidence botanique des crues anciennes ayant laissé des traces sur les arbres (*dendrohydrologie*) et (c) observations enregistrées dans les journaux, archives et témoignages. Baker (1987) propose une distinction différente, fondée sur la chronologie. Dans ce cas, la paléohydrologie (*Paleoflood hydrology*) est définie comme l'étude des crues anciennes, antérieures à l'observation humaine ou aux moyens directs de mesures modernes, quelles que soient les techniques employées.

La figure (2.1), p. 28, illustre les différentes sources d'informations relatives aux crues suivant une classification chronologique retenue pour simplifier la présentation. Elle est organisée autour d'un découpage en trois périodes, préhistorique, historique et contemporaine, bien que le traitement, au niveau de l'analyse fréquentielle, se fasse plutôt en fonction de la nature des données (censurées ou non).

La période préhistorique (au sens de l'hydrométrie), domaine de la paléohydrologie, est appréhendée par des techniques reposant sur des indicateurs géologiques et biologiques. Ces dernières produisent des données de type censurées dont l'intensité peut être estimée ou non et dont la date d'occurrence est connue avec une certaine incertitude.

La période historique est pour sa part essentiellement étudiée par le biais de techniques archivistiques bien que le champ d'application des indicateurs précédemment cités puisse s'étendre jusqu'à elle. Cette période est subdivisée en deux parties, la plus ancienne représente le domaine des observations ponctuelles à l'occasion d'événements remarquables (les données produites sont supérieures à un seuil de perception) et la seconde partie, plus récente, correspond aux observations régulières qui ont vu le jour avec la mise en place des services d'annonce des crues (fin du XIX^e siècle). Cette dernière source d'informations est composée de relevés journaliers de hauteurs à pas de temps fixes en temps normal (1 à 3 relevés de hauteur d'eau par jour) et à pas de temps variables en fonction du dépassement des cotes d'alerte lors des crues (jusqu'à 1 relevé par heure).

La période contemporaine correspond à l'installation des stations hydrométriques qui fournissent, selon la stabilité du site et la fréquence des jaugeages, une chronique continue de débits de plus ou moins bonne qualité. La collecte de témoignages (oraux, pho-

tographiques) peut enrichir l'étude de cette période notamment en ce qui concerne les événements extrêmes (problèmes d'extrapolation des courbes de tarage).

Enfin la figure (2.1), p. 28, précise le domaine du travail de thèse, à savoir l'étude de la période contemporaine et historique (essentiellement par le biais d'enquêtes archivistiques), l'étude des crues par le biais d'indicateurs géologiques est réalisée en parallèle par d'autres équipes dans le cadre du projet de recherche européen SPHERE.

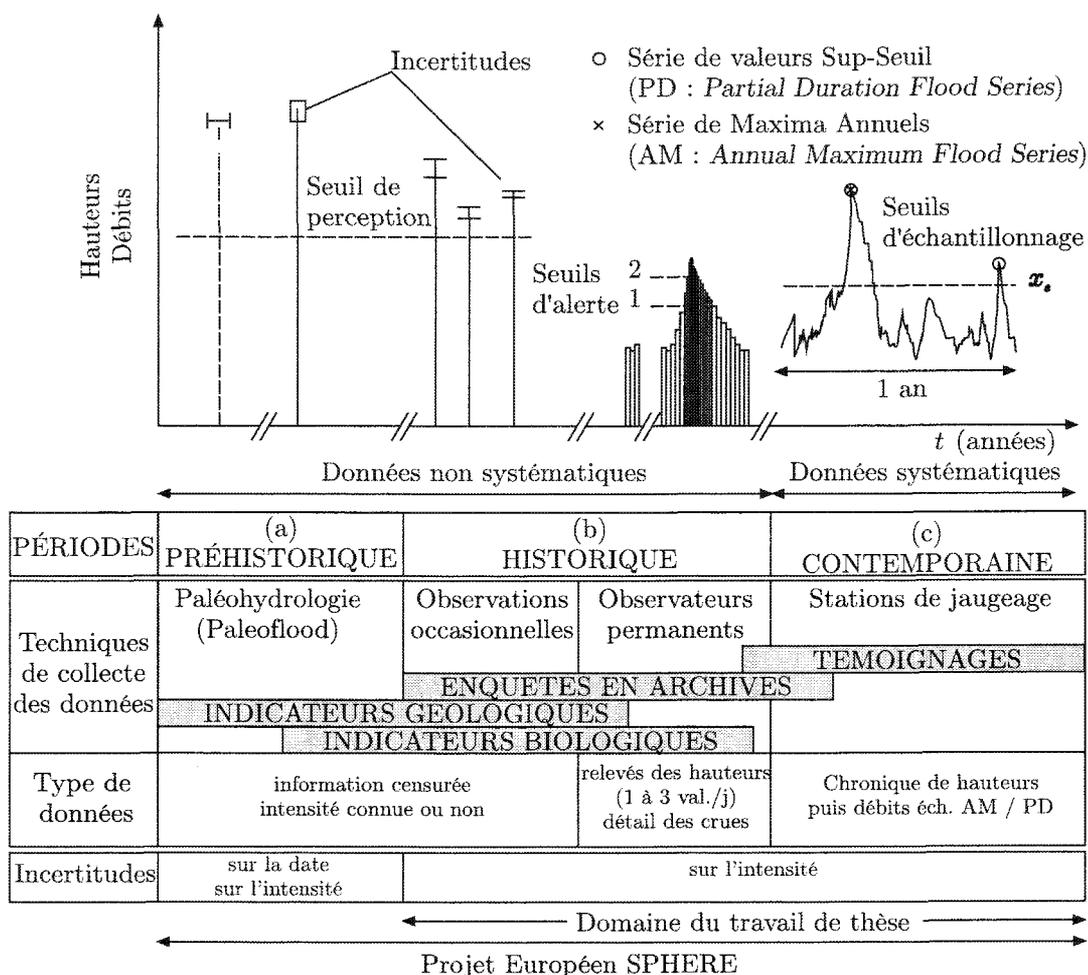


FIG. 2.1 – Les différentes sources d'informations relatives aux crues

2.2.1 La période préhistorique (*Paleoflood*)

Bien que la présente thèse ne se propose pas d'effectuer des investigations sur la période préhistorique nous en présentons dans ce paragraphe une brève synthèse bibliographique. La littérature concernant la paléohydrologie (*paleoflood*) est essentiellement d'origine nord américaine, les premières études ayant trait à l'utilisation de ce type d'information semblent, d'après Costa (1978), être dues à Jahns (1947) pour ses travaux effectués dans la vallée du Connecticut au Massachusetts entre 1936-1938. Un état de

l'art des pratiques et connaissances sur la paléohydrologie a récemment été réalisé par House et al. (2001).

2.2.1.1 Collecte et validation des informations préhistoriques

Différentes techniques existent pour étendre la série de crues à la période préhistorique (utilisables également pour la période historique comme le montre la figure 2.1, p. 28), depuis la sédimentologie, la géomorphologie et la géobotanique. Baker (1987) cite une revue générale de celles-ci par Gregory (1983), Williams (1984) et Foley et al. (1984).

Etudes des dépôts de sédiments de crues (Slackwater deposits)

D'après Baker (1987) la méthode paléohydrologique qui s'est montrée la plus appropriée pour conduire à une estimation des débits et de leurs dates repose sur les dépôts de sédiments de crues (*Slackwater deposits - SWD*), notamment dans les rivières non alluviales (comme l'Ardèche) où dans ce cas la géomorphologie des berges ne relève plus d'un équilibre avec la charge en matière en suspension. Ce type de cours encaissé transporte des argiles, des sables et voire même des graviers dans la colonne d'eau en raison des fortes vitesses et des macro turbulences induites par les parois quasi figées. Dans les sections où il se produit un ralentissement, le cours d'eau perd brusquement de sa capacité de transport et on assiste à un dépôt rapide de sédiments. Les sites préférentiels de ces dépôts sont les embouchures d'affluents, l'amont des resserrments, les élargissements brusques du cours, les grottes, les intrados de méandre et les méandres partiellement déconnectés ainsi que les terrasses créées par les macro turbulences (cf. figures 2.2, 2.3 et 2.4, p. 30).

Un élément important de l'utilisation des dépôts anciens reste la garantie qu'ils n'ont pas été remaniés par des crues ultérieures. Ainsi en ce qui concerne les dépôts d'embouchure, le bassin versant de l'affluent ne doit pas être trop actif au regard des crues et des dépôts du cours principal. Les sites privilégiés en matière de conservation semblent être les grottes (cf. étude de Patton et Dibble, 1982, sur le site d'Arenosa Shelter, Texas), les marques de niveaux d'eau atteints (cf. figure 2.4, point S, p. 30) peuvent y être conservées plusieurs centaines d'années (O'Conner et al., 1986). Par ailleurs certains facteurs généraux conditionnent la possibilité d'utilisation de ce type d'information comme l'existence de gorges confinées dans des matériaux géologiques résistants, une concentration en matière en suspension adéquate, un lit relativement stable et un climat aride afin d'éviter la destruction des structures sédimentaires par des bioturbations (perturbations d'origine végétales et animales).

La datation des dépôts de crues (*géochronologie*) peut être soit relative (par rapport à un autre dépôt) soit absolue et repose le plus fréquemment sur des techniques liées à la cinétique de désintégration de l'isotope 14 du carbone (^{14}C) contenu dans la matière organique. Des méthodes archéologiques peuvent également être employées (cf. estimation d'une période de retour supérieure à 2000 ans pour la crue de 1954 sur la rivière de Pecos, Texas, créée par l'ouragan Alice; Patton et Baker, 1977). Cullingford et al. (1980), Goudie (1981) et Baker (1987) présentent une revue de l'ensemble des techniques géochronologiques des sédiments du Quaternaire. Les problèmes spécifiques de la datation au ^{14}C sont quant à eux discutés en détail par Campbell et al. (1967) et Ruhe (1969). Des évolutions récentes permettent d'analyser des échantillons plus petits grâce à l'utilisation

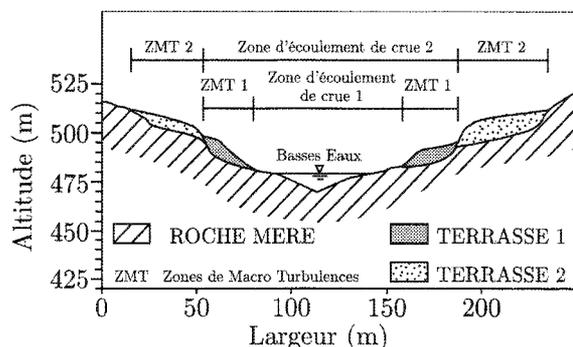


FIG. 2.2 - Schéma de principe d'élaboration des terrasses (d'après Benito et al., 1998)

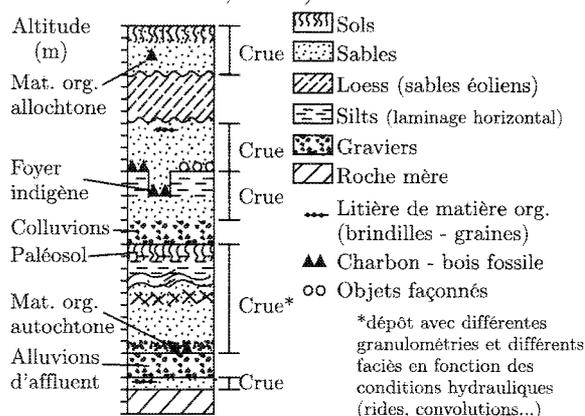
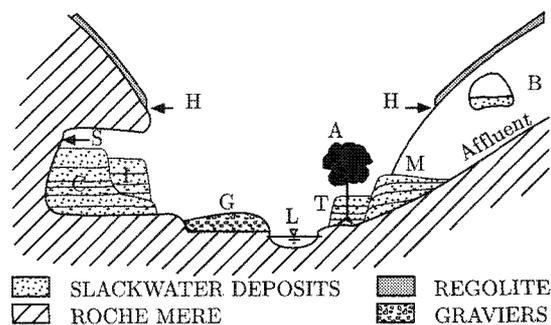


FIG. 2.3 - Schéma d'une coupe stratigraphique type (d'après Baker, 1987 et Benito et al., 1998, modifié)



Légendes :

SLACKWATER DÉPÔTS
ROCHE MERE
REGOLITE
GRAVIERS

A : arbre avec racines adventives poussant sur les dépôts de crue ; B : dépôts de crue élevés dans des grottes ; C : dépôts dans des cavités ; G : gravier sur le sol du canyon ; H : marques laissées par les crues sur les régolites friables des parois du canyon ; I : insertion de « slackwater deposits » ; L : étiage ; M : « slackwater deposits » d'embouchure d'affluents ; S : marque de Silt des crues anciennes préservées dans les cavités ; T : dépôts en terrasse.

FIG. 2.4 - Schéma de localisation des différents dépôts (d'après Baker, 1987, modifié)

en parallèle de la spectrométrie de masse (Taylor et al., 1984).

Suivant l'origine de la matière organique (MO) utilisée, la précision de la datation varie de un an à plus d'un siècle. La meilleure estimation est obtenue avec des MO autochtones (arbres recouverts de dépôt de crues qui ont poussé sur place : 1 an) ensuite viennent les matières allochtones disposées en haut des unités stratigraphiques (feuilles et brindilles : 1 à 10 ans) puis enfin des MO de diverses provenances telles que les bois charriés et les sols fossilisés (précision de 100 ans et plus). Les écarts de précision tiennent au principe même de la datation au ^{14}C (il s'agit du temps écoulé depuis la mort de l'organisme analysé). Ainsi les brindilles et les feuilles qui tombent rapidement au sol donnent une estimation relativement proche de l'âge du dépôt qui les contient, alors que les morceaux de bois eux donnent un âge maximum (ils peuvent en effet avoir été érodés sur un dépôt plus ancien avant de finir leur course dans la structure sédimentaire analysée). En ce qui concerne les paléosols, l'âge déterminé représente un minimum puisque le processus de formation est cumulatif (mort des organismes au fur et à mesure de la constitution). Enfin la datation au ^{14}C est sensible aux problèmes de contaminations principalement engendrés par la pénétration de racines de plantes récentes mais également par la percolation d'acides humiques. Ce dernier problème peut être en partie contourné en déterminant le temps

moyen de résidence à partir de la fraction insoluble de la MO (Geyh et al., 1971). Par ailleurs il faut veiller à établir une correction qui prenne en compte la variation entre les années ^{14}C et les années calendaires (Wendland et Donley, 1971 ; Stuiver et Suess, 1966).

L'analyse stratigraphique des dépôts permet d'isoler les unités sédimentaires successives liées aux crues mais également de les différencier des structures ayant d'autres origines telles que les colluvions (matériaux des versants) ou les loess (matériaux éoliens). Le haut d'une séquence appartenant à une crue est repéré par la présence d'indicateurs tels que les *mudcracks* (craquelures qui apparaissent lors de la déshydratation du sol), les débris de crue ou encore la présence d'un paléosol (cf. figure 2.3, p. 30). La différenciation de chaque séquence se fait en combinant plusieurs méthodes : l'analyse granulométrique (généralement une succession d'éléments de plus en plus fin au cours du dépôt lors de la crue), l'analyse lithologique et pétrochimique (nature des roches du sous bassin versant ayant été entraînées par la crue ; Baker, 1983), la datation au ^{14}C ou archéologique et enfin l'analyse des faciès propres à l'enchaînement des diverses conditions hydrauliques au cours de la crue et de la décrue. Quelques difficultés peuvent être rencontrées comme la bioturbation et la possibilité d'observer une séquence incomplète même en l'absence de remaniements.

Etudes géobotaniques

Les études géobotaniques se situent plutôt à l'interface entre paléohydrologie et analyse historique. On peut notamment estimer la fréquence des crues à partir de l'étude de la vitesse de développement d'un sol. Salisbury (1925), dans une étude située dans le sud du Canada, a déterminé une vitesse de développement comprise entre 250 et 300 ans. En outre, l'analyse des anneaux de croissance des arbres arrachés ou couchés par les crues récentes peut donner un intervalle de temps minimum depuis l'occurrence d'un événement de même intensité. Lors la crue de décembre 1964 sur Coffee Creek, Californie (Stewart et LaMarche, 1967) de nombreux arbres déracinés étaient vieux de 200 à 300 ans. Ils ont survécus aux crues jusqu'alors, ce qui suggère une période de retour approximative de 200-300 ans pour cet événement. Par ailleurs si les arbres ne sont pas arrachés ou couchés les cicatrices peuvent être datées (Sigafos, 1964) et la hauteur de ces cicatrices peut également donner une indication du niveau d'eau atteint. Harrison et Reid (1967) ont réalisé une analyse fréquentielle sur des données de cicatrices d'arbres. Plus récemment on citera également les travaux de Hupp (1987, 1988) et de Meko et Graybill (1995).

2.2.1.2 Problèmes liés à l'utilisation des crues préhistoriques

Exhaustivité et fiabilité des crues préhistoriques

Un des points qui reste à approfondir dans l'estimation des quantiles de débits est l'interprétation fréquentielle des informations paléohydrologiques. On peut dégager trois cas :

- i) On observe une érosion d'un dépôt de crue ancien par une crue récente. Dans ce cas on dispose d'une information sur la période de retour de la crue récente.
- ii) On observe un dépôt de crue ancien en place non érodé. Ce type d'information donne la période de retour minimale d'un événement de même intensité.

- iii*) On observe une superposition de dépôts de crue anciens. Dans ce cas on peut avoir plusieurs informations paléohydrologiques : (a) soit les crues sont arrivées chronologiquement avec une intensité croissante, ce qui est peu probable, et auquel cas l'échantillon est exhaustif, (b) soit les crues arrivent de façon aléatoire et la succession des dépôts observés ne donne qu'une information biaisée des fréquences de crue.

Les points (*i*) et (*ii*) sont le plus fréquemment traités dans la littérature, ils permettent d'évaluer la probabilité empirique du maxima de la série de débits. A notre connaissance il existe peu d'études abordant le type d'information du point (*iii*). On ne peut envisager son utilisation que si l'érosion des dépôts n'est que partielle, lorsqu'une crue d'intensité supérieure se produit. Dans ce cas les dépôts représentent une source d'information exhaustive, au moins au-dessus d'un certain seuil. Il est par ailleurs possible de recouper les informations sur les dépôts de crue en examinant la cohérence des niveaux suivant le profil en long de la rivière (ligne d'eau reconstituée à partir de laisses de crue).

Stationnarité de la population des crues préhistoriques

Une des hypothèses de base de l'approche fréquentielle des crues consiste à supposer que les crues sont issues d'une seule population et que le phénomène hydrométéorologique est resté stationnaire. Or on sait que le climat planétaire a connu de fortes variations à grande échelle (ère quaternaire par exemple). Ainsi l'étude des crues préhistoriques pose encore plus clairement que pour la période historique le problème de la stationnarité des phénomènes enregistrés (modifications topographiques du bassin à grande échelle, modifications climatiques) en référence notamment aux différentes périodes de glaciations.

Estimation de la hauteur des crues préhistoriques

Le problème majeur lié à l'utilisation de ce type d'information est de relier la hauteur des dépôts à la hauteur réelle d'eau des crues qui les ont engendrés, puis d'estimer le niveau du fond du lit de la rivière à cette époque. Le haut des dépôts va représenter alors une borne inférieure du niveau maximum atteint par la crue. Pour réduire cette incertitude une étude de corrélation entre différents sites peut être envisagée (Patton et Dibble, 1982). On peut également estimer un coefficient de correction à partir d'une relation empirique établie entre la hauteur des dépôts récents et les niveaux correspondants enregistrés aux stations de jaugeage (Baker, 1987).

Estimation du débit des crues préhistoriques

Les débits peuvent être estimés à partir des hauteurs reconstituées aux différents endroits :

- i*) soit en régime uniforme (c.-à-d. hauteurs d'eau, sections mouillées et vitesses sont constantes à chaque section en travers ; pentes du fond, de la ligne d'eau, de la ligne de charge sont égales $S_0 = S_w = S_f$) par la formule de *Manning-Strickler* :

$$Q = K \cdot S_0^{1/2} \quad (2.1)$$

avec Q le débit en $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, S_0 la pente longitudinale du fond et K la débitance définie

par :

$$K = \frac{1}{n} \cdot A \cdot R^{2/3} \quad (2.2)$$

avec n le coefficient de rugosité de Manning (en $\text{s.m}^{-1/3}$), A la section mouillée (en m^2) et R le rayon hydraulique défini par le rapport de la section mouillée sur le périmètre mouillé $R = A/P$,

- ii) soit en régime non uniforme (mais en utilisant les concepts du régime uniforme) par un calage itératif de la pente de la ligne de charge S_f sur deux sections minimum : « *Slope-area method* » (Dalrymple et Benson, 1967). French (1985, pp. 182-185) rappelle les conditions d'application d'une telle méthode : une différence de débitance entre les deux sections inférieure à 30%, un secteur avec peu de changement dans la forme des sections en travers en raison de l'incertitude sur les pertes de charge (h_e),...
- iii) soit par une modélisation hydraulique à partir de sections en travers.

Dans tous les cas une estimation des coefficients de perte de charge doit être envisagée. Cependant les travaux de Dawdy et Motayed (1979) montrent une faible sensibilité au coefficient de rugosité lorsque le niveau d'eau est élevé. Les éléments déterminants sont alors la précision de la géométrie du cours d'eau (stabilité) et la précision des indicateurs de la hauteur des crues préhistoriques. Kirby (1985) a estimé une erreur moyenne (*RMSE*) des débits reconstitués par la méthode « *Slope-area* » à partir de données historiques (hauteurs observées mais stations non jaugées) de 25 %. D'après Maizels (1983), les erreurs selon les différentes méthodes paléohydrologiques s'étendent quant à elles de $\pm 45\%$ à $\pm 125\%$. La figure (2.5), p. 34, présente un exemple de courbe de tarage obtenue à l'aide d'un modèle hydraulique monodimensionnel. Il s'agit d'une étude des dépôts de crues historiques réalisée sur la rivière Tagus (Espagne). Benito et al. (1998) ont par ailleurs montré que le modèle n'était que peu sensible aux variations du coefficient de rugosité (une variation de 25 % induit une erreur de 4 % au niveau des débits calculés). On nuancera toutefois ce dernier résultat au regard des remarques effectuées au §2.2.2.2, p. 36, et de nos propres résultats sur la rivière d'Ardèche (cf. §5.4.1.2, p. 188, une variation de $\pm 25\%$ sur les coefficients de rugosité induit une incertitude de $\pm 15\%$ sur les débits estimés en régime permanent).

2.2.2 La période historique

La période historique est principalement appréhendée par le biais d'enquêtes archivistiques. Toutefois, comme noté précédemment, des indicateurs géologiques et biologiques peuvent conforter une information historique.

2.2.2.1 Collecte et validation des informations historiques

Méthodologie générale de collecte des données historiques

La littérature internationale sur l'aspect méthodologique de la collecte des données historiques sur les inondations en vue d'une exploitation fréquentielle est relativement

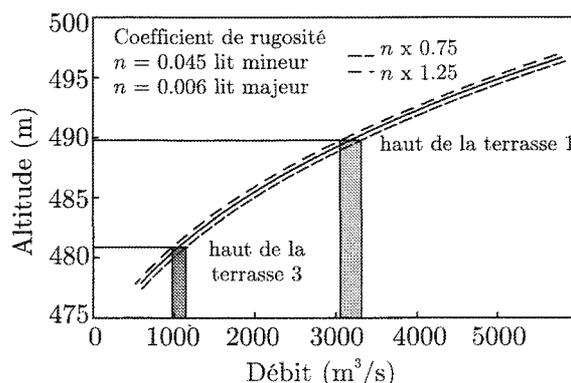


FIG. 2.5 – Courbe de tarage établie à partir de dépôts de paléo-crues (d'après Benito et al., 1998)

pauvre. Les différents auteurs (Thomson et al., 1964 ; Suttor, 1989 ; Luo, 1987 ; Stedinger et Cohn, 1987) passent assez rapidement sur la phase d'acquisition et de validation. La citation de certaines sources relève plus d'une illustration anecdotique que d'une réelle démarche scientifique de validation.

Les travaux de Potter (1978) sur les informations historiques disponibles en Angleterre sont toutefois plus conséquents (dates des événements majeurs entre 1093 et 1912) mais la méthodologie est encore peu développée. Il s'agit d'une inspection des sources d'informations en différentes étapes chronologiques depuis l'état actuel jusqu'à la période médiévale :

- i) La première étape (XX^e siècle) consiste à recueillir des informations sur la période récente auprès notamment des autorités en charge de la gestion de l'eau qui émettent généralement des rapports lors des événements importants. Il précise qu'il s'agit là de se forger une connaissance hydrologique du site étudié pour appréhender l'amplitude des phénomènes à rechercher. Cette source d'information est complétée, pour des événements ciblés, par une recherche dans les journaux locaux qui disposent dans leurs propres archives de nombreuses photographies non publiées.
- ii) La deuxième étape (fin XIX^e - début XX^e siècle) s'attache à collecter les enregistrements du passé récent. Il cite à cet effet les services en charge de la navigation (ceux de la Tamise détiennent notamment les débits journaliers à Teddington depuis 1883). Par ailleurs des périodiques anciens à caractère scientifique et technique peuvent contenir de l'information (cf. Proceedings of the Institution of Civil Engineers publié depuis 1837 et Transactions of the Institution of Water Engineers [1896-1946], succédé par le Journal of the Institution of Water Engineers 1977, puis le Journal of the Institution of Water Engineers and Scientists). Enfin les journaux des différents comités météorologiques contiennent parfois des renseignements relatifs aux crues. Dans tous les cas ils permettent de valider l'existence d'un événement et d'en estimer l'extension géographique.
- iii) La troisième étape se réfère à la période du XVIII^e au XIX^e siècle. Les sources d'informations sont les journaux, les périodiques émis par des groupes d'historiens locaux ainsi que les rapports spécialisés d'arpenteurs et de commissaires du gouver-

nement. Potter (1978) note un meilleur suivi des crues dans les journaux avant la première Guerre Mondiale. Les rapports spécialisés (plans, profils en travers) sont établis à l'occasion de constructions de canaux, de ponts, d'aqueducs, d'extension de ville.

- iv) Enfin la quatrième et la cinquième étape se réfèrent au XVI^e et XVII^e siècles ainsi qu'à la période médiévale où les sources d'informations sont essentiellement d'origine ecclésiastique. Des difficultés sont rencontrées quant à la traduction des documents anciens.

De nombreuses recherches d'informations historiques ont été réalisées en Chine, pays qui bénéficie d'une histoire importante et relativement bien conservée grâce à la mise en place précoce d'une administration. Luo (1987) présente les travaux engagés dans les années cinquante. La procédure passe par deux étapes : en premier lieu une recherche de terrain (témoignages, inscriptions) puis une analyse de la littérature (journaux). La forme la plus familière d'informations historiques est sûrement les marques faites sur les bâtiments. Ce type de marquage se retrouve dans de nombreuses parties du monde (Stedinger et Cohn, 1987). D'après Chen et al. (1974) il s'agit d'un comportement commun de l'homme en réponse à une crue inhabituelle. Lors d'une étude menée sur le Yangtze, ils ont retrouvé de nombreuses marques de crues sur des rochers ou des monuments, remontant pour les plus anciennes jusqu'à 1153.

Thomson et al. (1964), dans une étude engagée en 1957 en Nouvelle Angleterre, ont rencontré quelques problèmes de persistance des ouvrages ayant servi de référence pour les hauteurs. Très peu de marques, bien que certaines soient rapportées dans des documents historiques, ont pu être retrouvées et nivelées. Différentes hypothèses ont été émises pour justifier cette relative pauvreté : (a) en Nouvelle Angleterre les crues sont fréquentes et la population qui possède la culture des risques d'inondation n'est que peu impressionnée. Par conséquent les niveaux d'eau atteints sont rarement relevés ; (b) des crues récentes très fortes ont effacé la majeure partie des inscriptions ; (c) la récession économique des années 1930 a engendré la disparition de nombreux moulins qui représentaient jusqu'alors le noyau d'un développement économique proche des rivières. Les auteurs concluent que la quantité et la qualité de l'information historique varient en fonction de l'effet social et économique des crues, le facteur déterminant étant la densité de population.

Recueil d'informations historiques sur les inondations en France

L'ouvrage de Champion (1858, 1859, 1861, 1862, 1863, 1864, ré-édition du *Cemagref*, 2000, préface de Denis Coeur), qui présente un recueil des principales inondations sur l'ensemble des cours d'eau depuis le V^e siècle, fait toujours référence bien que des réserves puissent être émises quant à la qualité de certaines informations. Un effort de transparence a toutefois été mené et quelques documents sources sont insérés en annexe.

Pour la première moitié du XX^e siècle, on trouve de nombreuses informations dans les travaux édités et les archives personnelles de Maurice Pardé qui sont pour la plupart regroupés dans un fonds documentaire spécifique (Institut de Géographie Alpine, Grenoble : iga.ujf-grenoble.fr/parde/index.htm). Ces travaux concernent l'ensemble des rivières françaises (Rhône et affluents, Garonne, Lot, etc.). Les articles publiés par Maurice Pardé sont trop nombreux pour qu'ils soient détaillés, nous présentons uniquement les principales revues dans lesquelles ils ont été publiés : *La Houille Blanche*, *Revue Générale*

de l'Hydraulique (étiées par la Société Hydrotechnique de France, SHF), *Revue de Géographie Alpine*, *Revue Géographique des Pyrénées et du Sud Ouest*, *Les Etudes Rhodaniennes*, *Annales de Géographie*, *Bulletin de la section de Géographie du Comité des Travaux historiques et scientifiques*, *Revue pour l'Etude des Calamités*, *L'Information Géographique*, *Geographica* (Espagne), *Bulletin Annuel de Météorologie et de Climatologie*, *Annuaire Hydrologique de la France*. Ces informations sur les crues historiques sont abondamment reprises par les auteurs contemporains (Miquel, 1984).

Dernièrement la recherche d'informations historiques sur les inondations s'est développée. Goubet (1997) présente une étude des crues historiques de la Seine à Paris. Les aspects méthodologiques de la démarche de collecte des informations ne sont pas précisés, cependant, cette étude repose sur des recherches effectuées en partant de sources non compilées, au niveau des archives brutes. Dacharry (1996) publie un article comparable sur les crues historiques de la Loire. La Direction Départementale de l'Equipement (DDE) du Gard a réalisé un recueil des crues historiques dans ce département, également à partir de recherches en archives (disponible via internet : www.gard.equipement.gouv.fr, cf. rubrique : L'eau et l'environnement). Miramont et Guilbert (1997) exploitent des plans anciens pour étudier la morphogénèse fluviale de la Durance en rapport avec la fréquence des crues. Enfin nous avons participé aux projets interdisciplinaires HISTORISQUE sur les rivières Ardèche, Guiers et Isère (Coeur et al., 2001 ; Lang et al., 1998 ; Brochot et al., 2000), l'Ardèche et l'Isère étant également des sites d'étude du projet européen SPHERE.

Au regard des différents exemples présentés, « *on constate que la dissémination des informations au sein de multiples organismes et la variété des supports utilisés au cours des décennies pour les consigner nécessitent, en effet, des qualités d'historiens qui font souvent défaut aux personnes chargées habituellement de mener à bien ce type d'enquête. Ainsi il semble important de développer une méthodologie basée sur une collaboration entre historiens et hydrologues dans la collecte et la critique des données. Celle-ci doit permettre d'éviter deux écueils courants dans le domaine de l'étude des crues historiques, à savoir, premièrement une collecte principalement descriptive et qualitative ne permettant pas à l'hydrologue d'exploiter statistiquement cette information, deuxièmement un inventaire hydrologique incomplet faute d'avoir su tirer parti de la diversité des sources d'archives* » (Coeur et al., 2001, p. 5). A titre d'exemple, une situation typique où le recours à un historien peut être particulièrement intéressant est celle sous forme de marques sur un bâtiment. On peut raisonnablement supposer que le seuil de perception ne varie pas au moins pour la période d'existence de l'édifice. Aussi la date de construction du bâtiment, qui a priori n'est pas une information directement reliée à l'hydrologie, pourra donner une indication sur la fréquence minimale à attribuer à la plus ancienne inscription.

Nous renvoyons au chapitre 4, p. 109, pour plus d'informations sur la méthodologie de collecte et de validation de l'information historique qui a été mise en oeuvre sur le bassin versant de l'Ardèche.

2.2.2.2 Problèmes liés à l'utilisation des crues historiques

Un numéro spécial de *Journal of Hydrology* a été consacré à l'analyse des événements hydrologiques extrêmes (Kirby et al., 1987). Parmi la trentaine d'articles, plus d'une vingtaine concerne l'usage de l'information des crues historiques pour l'estimation des probabilités de crue. Les auteurs sont principalement originaires des Etats-Unis ou de la République Populaire de Chine et ils relatent leur expérience en la matière. Nous

présentons un bilan des points sensibles de l'approche historique, à partir de synthèses réalisées par Sutcliffe (1987), Lang et al. (1998), Ouarda et al. (1998).

Exhaustivité et fiabilité des sources historiques

« Il est clair que les sources historiques sont d'autant plus fournies que l'on se trouve dans un secteur habité et que la société de l'époque dispose de structures administratives capables de garder la mémoire des événements hydrologiques. Ainsi, on constate généralement une augmentation du nombre de rapports sur les crues anciennes, depuis le Moyen-Age jusqu'à aujourd'hui.. »

« Ceci conduit à être critique sur l'exhaustivité des sources historiques du Moyen-Age et milite pour une exploitation de sources plus récentes, sur les deux ou trois derniers siècles. Un recoupement des sources d'information permet de garantir la fiabilité des comptes rendus des crues anciennes, tant sur la réalité des événements que sur les paramètres physiques mentionnés : destruction d'ouvrages, cotes d'inondation, durée de submersion, état du lit de la rivière, débits mesurés ou estimés ... » (d'après Lang et al., 1998, p. 28).

Stationnarité de la population des crues historiques

« Sur la période historique, de nombreux auteurs, dont Leroy Ladurie (1975), Suttor (1989) et Jacquet (1990), ont mis en évidence des fluctuations sur le dernier millénaire, la manifestation la plus connue en Europe étant celle du petit âge glaciaire au XVII^e et XVIII^e siècle. Les actions anthropiques, comme l'urbanisation, la déforestation ou des travaux hydrauliques sur la rivière (digues, seuils, moulins, barrages ...), ont contribué à modifier les conditions d'écoulement ».

« Tout ceci conduit à rester prudent sur la longueur de la période d'investigation de l'enquête historique. Il est nécessaire de tester la stationnarité de l'échantillon des crues historiques, à l'aide d'un des nombreux tests statistiques disponibles. Notons que cette vérification n'est pas spécifique aux crues historiques. La question se pose actuellement de savoir si le climat est susceptible à l'avenir de modifications significatives. L'examen des mesures disponibles depuis le siècle dernier (Duband, 1990) est une des pistes possibles pour répondre à cette question ».

« L'examen des conditions dans lesquelles se sont produits les événements extrêmes peut parfois amener à séparer une valeur de crue du reste de l'échantillon. Sutcliffe (1987) cite le cas de crues exceptionnelles qui résultent de précipitations intenses et de l'obstruction de la vallée par un glissement de terrain. On peut également mentionner d'autres phénomènes perturbateurs comme les embâcles et débâcles (Ice Jam), les laves torrentielles » (d'après Lang et al., 1998, p. 28-29).

Estimation du débit des crues historiques

« Les premières mesures de débit datent du XVII^e et XVIII^e siècle pour les débits courants (Kirby et Moss, 1987) et du XIX^e siècle pour les crues. Même actuellement, les débits de crue sont rarement connus directement, mais reconstitués d'après le niveau mesuré. Les opérateurs qui effectuent les mesures de débit (jaugeages) ne peuvent matériellement pas être disponibles lors de toutes les crues importantes, soit par incapacité d'être sur le site pendant la crue (délai d'intervention, information sur l'occurrence de la crue, plusieurs crues à mesurer ...), soit parce qu'il n'était pas possible physiquement de

réaliser la mesure ».

« Le débit des crues historiques est donc estimé d'après l'information des cotes historiques atteintes et la reconstitution d'une courbe de tarage de l'époque (ou l'utilisation d'une courbe de tarage ancienne si elle est disponible). Ce deuxième point est délicat puisqu'il faut tenir compte de l'évolution de la topographie de la rivière. Comme pour les crues préhistoriques, un calcul hydraulique permet la conversion d'une hauteur y en débit Q . Cook (1987) présente quelques méthodes disponibles, par ordre croissant de complexité et de précision dans les résultats : (a) extrapolation de la courbe de tarage $Q(y)$ à l'aide d'un graphique Log-Log, en prenant en compte la topographie du lit de la rivière, (b) extrapolation de la courbe $S_f(y)$, (c) utilisation de la « Slope-area method » (cf. §2.2.1.2, p. 31), (d) modélisation hydraulique de l'écoulement à partir de la géométrie de la rivière et de l'estimation des coefficients de perte de charge ».

« Jarrett (1984, 1987) et Kirby (1987) ont réalisé une étude de sensibilité sur les paramètres de ces méthodes. Il en ressort que les éléments les plus importants pour l'estimation du débit de crue sont, par ordre décroissant : (a) la position du fond du lit, (b) le coefficient de rugosité de Strickler, (c) la hauteur d'écoulement et (d) l'estimation des pertes de charge singulières. D'autres éléments peuvent parfois modifier les estimations de débit, comme l'existence d'un transport solide, la présence de ressauts hydrauliques ou la formation d'embâcles-débâcles. Ceci conduit à s'intéresser à l'évolution morphologique du lit des rivières et à réaliser, dans la mesure du possible, des modélisations hydrauliques de l'écoulement sur des tronçons particuliers » (d'après Lang et al., 1998, p. 29-30).

2.2.3 La période contemporaine

La principale source d'information relative à la période contemporaine provient de la chaîne d'acquisition des stations hydrométriques. En période de crue, des informations complémentaires peuvent être reconstituées à partir de témoignages (marques, observateurs, photographies aériennes ou non, vidéo) ou de la gestion et du comportement hydraulique de certains ouvrages (barrages, ponts).

2.2.3.1 Collecte et validation des informations contemporaines

Les données contemporaines se présentent généralement sous forme de chroniques de débits journaliers ou à pas de temps variable (pour les plus récentes) stockées sur support informatique. Elles sont issues d'une chaîne de traitement qui comporte trois étapes principales : la mesure de la hauteur d'eau, les jaugeages, la conversion des hauteurs en débits par le biais d'une courbe de tarage.

Mesure de la hauteur d'eau : station hydrométrique

Une station hydrométrique peut être définie comme l'ensemble des dispositifs utilisés en un point pour permettre d'en déterminer le débit à tout instant à partir du repérage du niveau de l'eau. Les éléments constitutifs sont une section de contrôle, un limnimètre de référence (une échelle) et un dispositif de mesure et d'enregistrement du niveau d'eau.

Le choix de la section de contrôle est primordial, il va déterminer la sensibilité (dy/dQ) de la station (difficile compromis entre sensibilité à l'étiage et en crue) ainsi que la fidélité de la relation hauteur-débit (cf. figure 2.6, p. 39). Les critères d'une bonne section de

contrôle sont : (a) une forme immuable, (b) des conditions d'écoulement qui ne sont pas trop modifiées par des variations de l'écoulement aval. Pour garantir ce dernier point, le régime doit être torrentiel (*supercritical*) dans la section aval, c'est à dire qu'il doit y avoir passage par la hauteur critique y_c pour tous les débits (nombre de Froude $F = \frac{\bar{u}}{\sqrt{gD}} > 1$, où \bar{u} est la vitesse moyenne, g l'accélération de la pesanteur et D la profondeur hydraulique : par définition, dans un canal, le rapport de la section mouillée sur la largeur au miroir $D = A/T$), (c) la pente doit être faible à l'amont afin que la hauteur cinétique $\frac{\bar{u}^2}{2g}$ ne soit pas trop importante dans l'expression suivante qui lie le débit à la hauteur d'eau :

$$Q = a \left(y - y_0 + \frac{\bar{u}^2}{2g} \right)^b \quad (2.3)$$

avec Q le débit, a et b des paramètres fonction de la forme géométrique de la section, \bar{u} la vitesse moyenne d'approche dans la section où l'on mesure la hauteur y , y_0 étant le repère de hauteur d'eau à débit nul. La condition (c) est toutefois moins importante puisque la vitesse dans un cours d'eau est fonction de la racine carrée de la pente d'après l'expression (2.1), p. 32, de *Manning-Strickler*.

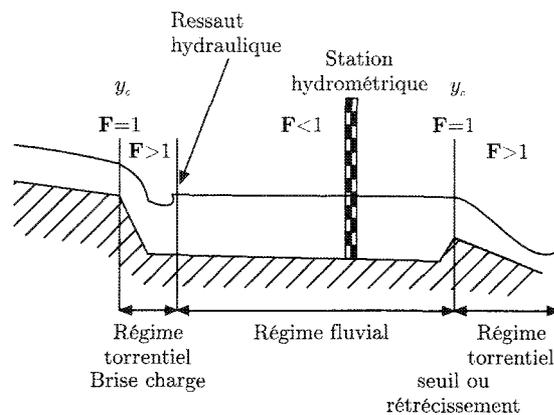


FIG. 2.6 – Schéma d'une section de contrôle idéale

Les capteurs de niveau d'eau sont de diverses natures. Les premières stations ont été équipées de systèmes à flotteurs puis pneumatiques et dernièrement de capteurs de pression (piézorésistivité et piézoélectricité). Les systèmes à flotteurs posent des problèmes liés au gel, à l'envasement des puits, à l'amplitude de la hauteur d'eau mesurable et à la gestion des retournements sur les enregistrements. Les nouveaux systèmes sont plus facilement adaptables aux différentes configurations du terrain et présentent des précisions de l'ordre de 0.1 % PE (Pression d'Eau), soit 1 cm pour une colonne d'eau de 10 m. Certains systèmes à ultrason sont également disponibles. Les divers signaux analogiques de sortie fournis par les capteurs sont reçus par des codeurs (mécaniques ou électriques) qui les transforment en informations numériques reprises à leur tour par des enregistreurs. La figure (2.7), p. 40, présente l'évolution du matériel utilisé à EDF durant les quarante dernières années. Différents matériels d'enregistrement se sont succédés depuis le limnigraphe jusqu'à l'enregistrement sur mémoire de masse avec télétransmission.

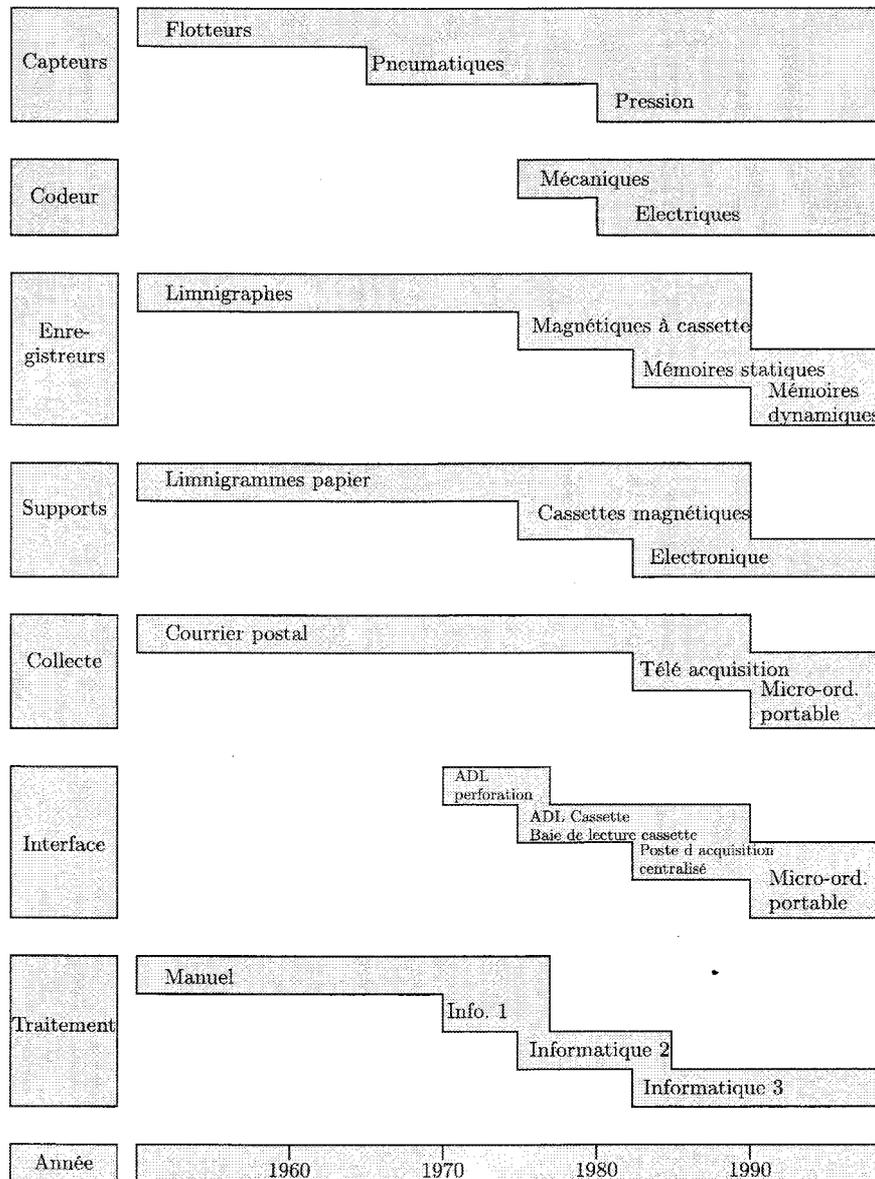


FIG. 2.7 – Exemple d'évolution du matériel et d'adaptation du traitement à EDF (d'après Audinet, 1995)

Jaugeages

On distingue différentes méthodes de mesure des débits qui ont fait l'objet de normalisations (cf. normes ISO citées par Forray et al., 1998) :

- i) les méthodes d'exploration du champ des vitesses : le débit Q , au droit d'une section de mesure A est donné par la relation $Q = \bar{u} \cdot A$, la vitesse moyenne \bar{u} est obtenue soit par la technique du jaugeage par intégration (intégration physique de la vitesse sur une verticale en descendant à vitesse constante un saumon muni d'un moulinet), soit par la technique du jaugeage point par point, soit par une mesure ultrasonique (principe de l'effet Doppler).

- ii) la méthode par capacité : le débit est directement estimé par la mesure du temps nécessaire pour remplir un récipient de capacité donné.
- iii) les méthodes par dilution : l'injection dans la rivière d'un traceur chimique (soit à débit constant, soit de façon instantanée), puis la mesure en aval de sa concentration permettent une estimation du débit.

La première méthode reste la plus utilisée en rivière. Dans les conditions normales d'application, l'erreur sur la mesure est de l'ordre de 2 à 3 % pour Audinet (1995) et de 6 à 10 % pour Forray et al. (1998). On rencontre la seconde pour la mesure des débits d'étiages et la troisième dans les torrents de montagne. On rappelle également l'existence des jaugeages aux flotteurs qui consistent à estimer la vitesse moyenne \bar{u} à partir de la mesure d'une vitesse de surface u_s et d'un coefficient multiplicateur qui varie selon les auteurs de 0.68 à 1.05 (Roche, 1963 ; Lalanne-Berdouticq, 1994). Bien qu'une assez grande incertitude soit liée à cette méthode, elle présente l'avantage d'être facilement mise en oeuvre et devrait pouvoir retrouver un champ d'application lors des événements extrêmes qui le plus souvent ne peuvent être mesurés en raison de la violence du phénomène : « il vaut mieux rapporter une estimation du débit que rien du tout » (Audinet, 1995). De plus une bonne partie des jaugeages en crue a été réalisée par la méthode des flotteurs au cours du XIX^e siècle.

Enfin depuis la deuxième moitié des années 1990 se développe une technique spécifique de mesure des débits sur les grands cours d'eau à partir de l'exploration en continu du champ des vitesses (*Acoustic Doppler Current Profiler* : ADCP). Un dispositif de mesure des vitesses de déplacement des matières en suspensions (MES) reposant sur l'effet Doppler (cf. Naulet, 1996 pour un rappel du principe), couplé à un repérage en temps réel de la position du bateau sur lequel est embarqué le matériel, permet de calculer très rapidement le débit écoulé (après une seule traversée du cours d'eau). Ce dispositif ne peut toutefois pas être mis en application, pour des raisons de sécurité de l'équipage, lors de crues avec de fortes vitesses ou la présence de corps flottants.

Tracé de la courbe de tarage

Le tracé de la courbe de tarage ne pose pas de problème particulier dans la plage observée lorsque la station répond aux critères précédemment décrits. Une méthode de type moindres carrés (minimisation de la somme des écarts *relatifs* entre débits observés et calculés) est le plus souvent utilisée pour faire passer une courbe moyenne $Q = f(y)$ parmi tous les jaugeages. Les formulations employées sont du type de l'expression (2.3), p. 39. Un calcul de l'écart type peut être effectué et par suite un intervalle de confiance (en supposant que les erreurs suivent une loi normale).

La difficulté est liée à l'extrapolation de la courbe de tarage pour les débits importants. L'erreur la plus courante consiste à extrapoler linéairement alors que les formules hydrauliques sont de type puissance. Une autre erreur lors de l'extrapolation est liée à la discontinuité de la section de jaugeage. Dans ce cas il est conseillé d'extrapoler d'une part la courbe $A = f(y)$ d'après la topographie et d'autre part la courbe $\bar{u} = f(y)$ d'après les jaugeages et de recalculer ensuite le débit $Q = A \cdot \bar{u}$. La meilleure des solutions est encore d'effectuer une modélisation hydraulique calée sur des repères de ligne d'eau de crues.

L'étape finale de la démarche, pour permettre la transformation des hauteurs en débits, est de convertir la courbe de tarage en tronçons de courbes polynomiales d'ordre deux ou

trois. Jacon (1986, p. 180) présente les aspects théoriques liés au tracé de la courbe de tarage et notamment les critères de choix des points pivots.

2.2.3.2 Problèmes de la chaîne de traitement

Les hauteurs d'eau, au-delà de la précision intrinsèque des capteurs, sont connues avec une plus ou moins bonne exactitude en raison du batillage qui se produit lors des crues, de remous localisés liés à la présence du support du capteur ou d'un rétrécissement de l'écoulement (arches de ponts). Le phénomène de batillage entraîne notamment une erreur de lecture liée à l'épaisseur du trait des limnigrammes (selon le type de réduction du limnigraphe 1 mm sur le papier correspond à 5 mm d'eau ou à 10 mm d'eau). Par ailleurs lors de l'exploitation des limnigrammes, de nombreuses erreurs d'interprétation du basculement du stylet sont commises. Les capteurs sont parfois déplacés lors d'une inondation importante. On ne dispose pas actuellement de méthode pour estimer l'évolution de la topographie de la section de contrôle au cours d'une crue, il s'agit là d'un paramètre prépondérant pour les cours d'eau à fort charriage.

Une autre incertitude est liée à la relation hauteur-débit (courbe de tarage) qui, dans le cas d'un écoulement à régime variable, n'est pas univoque (*phénomène d'hystérésis*). Des jaugeages exécutés par l'ORSTOM en 1956, à la station de Boghé sur le fleuve Sénégal, ont mis en évidence pour une même hauteur voisine de 7 mètres, un débit de 1000 m³/s en crue et de seulement 400 m³/s en décrue (Henry, 1968). La figure (2.8), p. 42, présente un diagramme théorique de la relation entre le débit Q et la section mouillée A dans le cas d'un régime permanent (courbe en pointillé) et d'un régime variable : le point a représente le maximum de débit et le point b le maximum de hauteur.

Cook (1987) rapporte une erreur de 10 à 25 % sur l'estimation finale, réalisée dans des conditions idéales, des débits de pointes d'événements récents.

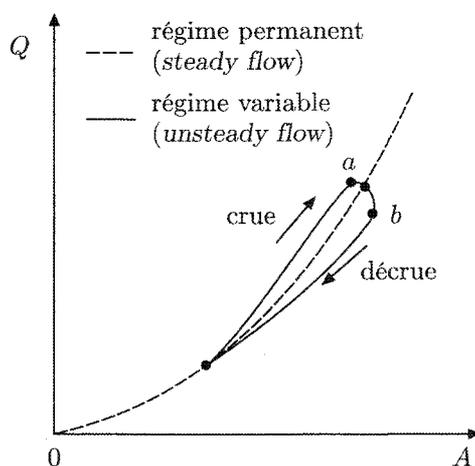


FIG. 2.8 – Schéma de la relation section mouillée-débit en fonction du régime de l'écoulement

2.3 Schématisation des données

Les paragraphes précédents avaient pour but de faire un état des lieux des informations disponibles et de donner un bref aperçu des moyens mis en oeuvre pour les obtenir. Nous présentons dans ce paragraphe une synthèse de ces données, organisées dans un schéma permettant leur traitement statistique dans l'analyse fréquentielle, certaines variables sont également introduites.

2.3.1 L'information systématique (*systematic data*)

L'**information systématique** représente les données hydrologiques contemporaines, acquises aux stations de jaugeage et qui se présentent sous la forme d'une chronique continue de valeurs enregistrées sur une période de N_S années (*systematic records, continuous records*). Concrètement il s'agit d'une série discrète de hauteurs d'eau (y), à pas de temps fin généralement variable dans le temps (t) en fonction du gradient $\frac{dy}{dt}$. Afin de travailler sur des données plus conservatives, ces séries de hauteurs sont converties, par le biais de courbes de tarage $Q(t) = \phi[y(t)]$, en chroniques de débits instantanés (m^3/s). L'analyse fréquentielle des crues (*Flood Frequency Analysis* : FFA) va s'intéresser à la distribution des valeurs extrêmes issues de telles chroniques. Ces variables, dont on doit s'assurer du caractère aléatoire, sont également appelées débits de pointe (*peak discharge*) et notées de façon générale X , puisqu'elles peuvent subir des changements de variable. On distingue deux techniques pour obtenir les débits de pointe (cf. figure 2.9, p. 44) :

- i) un échantillonnage par sélection du débit instantané maximum de chaque année, on parlera alors d'une série de débits maxima annuels (*Annual Maxima flood series* : AM). La variable aléatoire (v.a.), relative aux débits ainsi obtenus, sera notée X^* . Cette technique est la plus répandue dans les études fréquentielles.
- ii) un échantillonnage par sélection des débits instantanés supérieurs à un seuil x_s (*sampling threshold*), dans ce cas on parlera d'une série de débits sup-seuil (*Peak Over Threshold flood series* : POT, ou *Partial Duration flood series* : PD). La v.a. sera notée X_s et représente l'ensemble du débit et non pas la différence ($X - x_s$), soit $X_s = X$ pour $X > x_s$. Lang et al. (1999) présentent une revue détaillée de cette méthode. On présente au §3.4, p. 79 un rappel du modèle de dépassement adapté à l'étude fréquentielle de cette variable.

2.3.2 L'information non systématique (*non systematic data*)

L'**information non systématique** se décompose quant à elle suivant le schéma retenu par Francés (2001), en deux ensembles discriminés par le mode d'obtention des données plutôt que par leurs âges (dans la pratique ces deux modes de ségrégation se recouvrent partiellement comme nous l'avons vu précédemment). La durée de la période qui précède les enregistrements systématiques sera notée N_H et la v.a. relative au crues non systématiques sera notée Y :

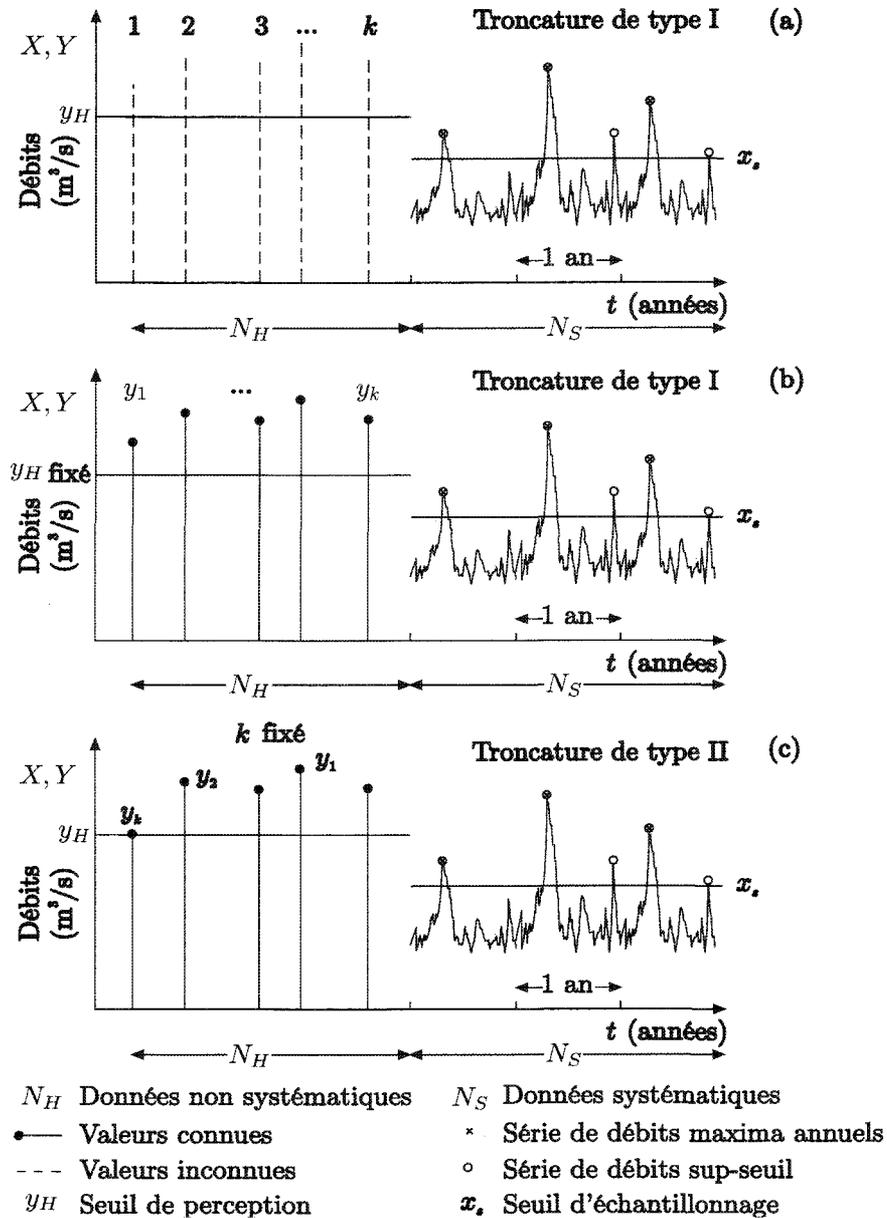


FIG. 2.9 – Différents types d'informations historiques (d'après Francés et al., 1994, modifié)

i) Le premier ensemble est relatif à l'**information historique** (*historical information*) et comprend toutes les données produites et archivées par l'intervention de l'homme, sans qu'il y ait pour autant un objectif hydrologique initialement établi. Il est composé :

- a) des cotes d'eau relevées par les observateurs à partir de la mise en place des premiers Services d'Annonce des Crues (SAC), vers 1890 en France ;
- b) des rapports techniques anciens effectués à l'occasion de crues exceptionnelles ;

- c) des marques inscrites sur des constructions anciennes (ponts, moulins, maisons,...) ou seulement la date de l'édifice ;
 - d) des archives non spécialisées : article dans des journaux, des chroniques locales ecclésiastiques ou de cercle d'intellectuels, des notes manuscrites non publiées ;
 - e) des photographies, des gravures ou des peintures ;
 - f) des communications verbales de la population locale.
- ii) Le second ensemble est relatif à l'**information paléohydrologique** (*paleoflood information*) et comprend l'ensemble des données directement inscrites dans l'environnement naturel :
- a) à partir d'indicateurs botaniques (*botanical evidence*) tels que les cicatrices, les bourgeons adventifs, les anomalies des cercles de croissance ou dans la répartition des âges des populations végétales ;
 - b) à partir d'indicateurs géomorphologiques tels que les dépôts de décrue ou d'étale (*slackwater deposits*), les terrasses alluviales abandonnées qui représentent des surfaces géomorphologiques stabilisées, perturbées au non au cours du temps, des dépôts dans des grottes, etc.

Il faut remarquer que le terme anglo-saxon *paleoflood* peut porter à confusion. En effet sa racine grecque *palaios* veut dire « ancien », faisant ainsi intervenir une dimension temporelle, alors que telle qu'énoncée ci-avant, la ségrégation de l'information non systématique s'effectue selon un critère de nature. Toutefois, pour des raisons pratiques, on désignera ces événements également par le terme de paléo-crues.

On notera que l'information historique du point (ia) est constitué de séries discrètes de valeurs journalières à pas de temps fixe (1 à 3 valeurs par jour) où généralement la hauteur maximale a également été notée lors des crues. Par conséquent, ce type d'information pourra représenter soit un échantillon exhaustif et venir directement compléter les enregistrements systématiques, soit un échantillon tronqué.

2.3.3 Traitement statistique de l'information non systématique

Les traitements statistiques de l'information historique et paléohydrologique sont identiques. Ces informations, après reconstitution des débits, représentent des échantillons tronqués ou censurés (*censored samples*) constitués :

- i) de séries discrètes de débits de pointe d'**intensité connue** y_j qui ont dépassé un certain seuil.
- ii) de séries discrètes de valeurs de débits d'**intensité non connue** soit :
 - **inférieures à un seuil** y_{Uj} au cours d'une certaine période j . Dans le cadre de l'information historique on parlera de seuil de perception. Il pourra être question, par exemple, de constructions dont on a la connaissance qu'elles n'ont pas été inondées. On parlera de bornes de non dépassement paléohydrologiques (*paleohydrologic nonexceedence bounds*) pour l'information paléohydrologique.
 - **supérieures à un seuil** y_{Lj} au cours d'une certaine période j . On parlera de bornes de dépassement paléohydrologiques (*paleohydrologic exceedence bounds*) pour l'information paléohydrologique.

- **comprises dans un intervalle** (lui-même supérieur au seuil de perception) au cours d'une certaine période. La borne supérieure de l'intervalle de la période j est notée y_{Uj} (*Upper bound* ou *nonexceedence bound*) et la borne inférieure est notée y_{Lj} (*Lower bound* ou *exceedence bound*)

Dans le cas de l'information non systématique, on peut distinguer trois cas de figure dans le dépassement d'un seuil unique au cours du temps y_H (cf. figure 2.9 a, b et c, p. 44) :

- a) information limitée au nombre d'occurrence du dépassement du seuil
On sait que k crues ont été supérieures à y_H , sans connaître leur valeur exacte. Ce cas correspond à une information historique connue avec une faible précision et qualifiée de *binomiale* dans la littérature. Il s'agit d'une *troncature de type I*.
- b) information sur toutes les crues non systématiques supérieures au seuil y_H
On connaît la valeur y_j de toutes les crues supérieures à y_H . Le nombre de crues est alors une variable aléatoire et l'information est qualifiée de *censurée* dans la littérature. Il s'agit d'une *troncature de type I*.
- c) information sur les k plus fortes crues non systématiques
On connaît la valeur des k plus fortes crues $y_1 \geq y_2 \geq \dots \geq y_k$. Le seuil y_H est une variable aléatoire et est pris comme la plus petite des crues historiques : $y_H = y_k$. Il s'agit d'une *troncature de type II*. Le cas le plus courant concerne la connaissance d'une seule paléo-crue, $k = 1$.

D'après l'étude bibliographique réalisée par Lang et al. (1998), « *ce type d'information présente une analogie avec les échantillons obtenus en biologie ou en médecine (Lawless, 1982). Il s'agit par exemple de l'étude de la durée de vie d'une population animale soumise à un certain conditionnement. Au lieu d'attendre que l'expérimentation soit terminée pour tous les individus testés, on décide d'arrêter l'expérience au bout d'un certain temps (troncature de type I) ou lorsqu'un certain nombre d'individus ont atteint le stade final recherché (troncature de type II)* ».

« *Dans la pratique, la différence entre les cas b et c est difficile à mettre en évidence. La démarche opérationnelle consiste en effet à collecter le maximum d'informations sur la période historique. On détermine ensuite le seuil de perception en ne retenant que les crues dont on est sûr qu'elles sont les plus fortes de la période considérée. En d'autres termes, la garantie de l'exhaustivité de l'échantillon des crues historiques est obtenue en travaillant indifféremment sur le nombre de valeurs historiques ou sur un seuil de sélection* ».

On peut noter également que la nature de l'information non systématique se rapproche plus des données systématique traitées par l'approche du modèle de dépassement (POT) que celle des maxima annuels (AM).

« *Gerard et Karpuk (1979) donnent un exemple où le seuil de perception varie en fonction de la période considérée. Ils distinguent plusieurs périodes, suivant la sensibilité de la population aux inondations, la disponibilité des archives et le développement du réseau de mesure hydrométrique. On retrouve également un exemple de variation du seuil au cours de la période historique présenté par Sutcliffe (1987)* » (d'après Lang et al., 1998, p. 28).

2.4 Conclusion

Nous avons présenté dans ce chapitre les différentes données exploitables dans l'analyse fréquentielle des crues. Les informations préhistoriques, historiques et contemporaines ont été abordées en détaillant d'une part les moyens disponibles pour les obtenir et d'autre part les problèmes liés à leur utilisation.

Concernant l'information historique en particulier, domaine de la présente thèse, la littérature fait état de peu de développements méthodologiques pour la collecte des données. Les travaux, à l'image du « Répertoire mondial des crues maximales observées » publié par Rodier et Roche (1984), se présentent essentiellement sous la forme de compilations, sans que la démarche liée à l'obtention des cotes et/ou débits de crue soit explicitée.

Nous avons montré, en abordant la collecte de l'information préhistorique, que les hydrologues avaient très tôt travaillé dans un contexte interdisciplinaire, en s'associant les compétences de géomorphologues, de géobotanistes, etc. Paradoxalement l'appréhension de la période historique s'effectue sans recours extérieurs.

Face à ce constat, il a semblé important de développer une méthodologie basée sur une collaboration entre historiens et hydrologues dans la collecte et la critique des données. Celle-ci, intitulée HISTORISQUE a été déclinée sur trois secteurs d'étude : le Guiers, l'Isère et l'Ardèche (cf. §1.3, p. 19). L'application sur le bassin de l'Ardèche sera présentée en détail au chapitre 4. Cette approche doit permettre d'éviter deux écueils courants dans le domaine de l'étude des crues historiques : (1) une collecte principalement descriptive et qualitative ne permettant pas d'exploiter statistiquement cette information ; (2) un inventaire hydrologique incomplet faute d'avoir su tirer parti de la diversité des sources d'archives.

Enfin nous avons présenté la formalisation de l'information sur les crues en vue de son exploitation dans l'analyse fréquentielle. Les données, sans distinction d'origine, sont de nature : (1) non censurée, les intensités des crues sont connues ; (2) censurée, les intensités des crues sont inconnues mais situées au-dessous d'un seuil, au-dessus ou dans un intervalle. Parallèlement le seuil de troncature peut être : (1) une variable aléatoire et l'information est alors qualifiée de censurée ou de binomiale suivant que l'intensité des crues est connue ou non, (2) une valeur fixe correspondant à la dernière des plus fortes crues connues de manière exhaustive et classées par ordre décroissant.

2.5 Bibliographie

- Audinet, M. (1995). *Hydrométrie appliquée aux cours d'eau*, Vol. 91, *Collection de la Direction des Etudes et Recherches d'Electricité de France*, Eyrolles, Paris.
- Baker, V. R. (1983). Paleoflood hydrologic techniques for the extension of streamflow records, *Improving estimates from flood studies*, National Academy of Sciences, Washington, DC, pp. 920-922.
- Baker, V. R. (1987). Paleoflood hydrology and extraordinary flood events, *Journal of Hydrology*, 96 (1/4) : 79-99.
- Benito, G., Machado, M. J., Pérez-Gonzalez, A. et Sopena, A. (1998). Paleoflood hydrology of the Tagus River, Central Spain, in Benito, G., Baker, V. R. et Gregory, K. J. (ed.), *Paleohydrology and Environmental Change*, John Wiley and Sons, nov, pp. 317-333.
- Brochot, S., Coeur, D., Lang, M., Naulet, R. et Richard, D. (2000). Historisque-Isère et torrents affluents : utilisation de l'information historique pour une meilleure définition du risque d'inondation, *Rapport final*, Cemagref, Thème mobilisateur risque et aménagement, nov.
- Campbell, C. A., Paul, E. A., Rennie, D. A. et McCallum, K. J. (1967). Factors affecting the accuracy of the carbon-dating method in soil humus studies, *Soil Science* (104) : 81-85.
- Champion, M. (1858). *Les inondations en France depuis le VIème siècle jusqu'à nos jours*, Vol. I, édition originale Dunod, ré-édition du Cemagref, 2000, Paris.
- Champion, M. (1859). *Les inondations en France depuis le VIème siècle jusqu'à nos jours*, Vol. II, édition originale Dunod, ré-édition du Cemagref, 2000, Paris.
- Champion, M. (1861). *Les inondations en France depuis le VIème siècle jusqu'à nos jours*, Vol. III, édition originale Dunod, ré-édition du Cemagref, 2000, Paris.
- Champion, M. (1862). *Les inondations en France depuis le VIème siècle jusqu'à nos jours*, Vol. IV, édition originale Dunod, ré-édition du Cemagref, 2000, Paris.
- Champion, M. (1863). *Les inondations en France depuis le VIème siècle jusqu'à nos jours*, Vol. V, édition originale Dunod, ré-édition du Cemagref, 2000, Paris.
- Champion, M. (1864). *Les inondations en France depuis le VIème siècle jusqu'à nos jours*, Vol. VI, édition originale Dunod, ré-édition du Cemagref, 2000, Paris.
- Chen, C., Yeh, Y. et Tan, W. (1974). The important role of historical flood data in the estimation of Spillway design floods, *Technical report*, Pekin, China.
- Coeur, D., Gigon, C., Lang, M., Naulet, R. et Recking, A. (2001). Historisque-Ardèche - Utilisation de l'information historique pour une meilleure définition du risque d'inondation sur la rivière de l'Ardèche, *Rapport Final*, Contrat de Plan Etat-Région Rhône-Alpes, Cemagref Lyon, UPMF Grenoble, DDE Ardèche, juillet, 94 p.
- Cook, J. L. (1987). Quantifying peak discharges for historical floods, *Journal of Hydrology*, 96 (1/4) : 29-40.
- Costa, J. E. (1978). Holocene stratigraphy in flood frequency analysis, *Water Resources Research*, 14 (4) : 626-632.
- Cullingford, R. A., Davidson, D. A. et Lewin, J. (1980). *Timescales in geomorphology*, John Wiley and Sons, New York.

- Dacharry, M. (1996). Les grandes crues historiques de la Loire, *La Houille Blanche* (6/7) : 47-53.
- Dalrymple, T. et Benson, M. A. (1967). Measurement of peak discharge by the slope-area method, *Technical report*, chap. A2, book 3, US Geological Survey Technical Water Resources Investigation.
- Dawdy, D. R. et Motayed, A. K. (1979). Uncertainties in determination of flood profiles, *Inputs for risk analysis in water resources*, Water Resources Publications, Fort Collins, Colorado, pp. 193-208.
- Duband, D. (1990). Réflexions sur l'utilisation des longues séries d'observations climato-logiques dans le cadre de l'étude du climat et de son évolution, *La Houille Blanche* (6) : 399-401.
- Foley, M. G., Doeburg, J. M. et Zimmerman, D. A. (1984). Paleohydrologic techniques with environmental applications for siting hazardous waste facilities, in Koster, E. H. et Steel, R. J. (ed.), *Sedimentology of Gravels and Conglomerates*, Vol. 10, Can. Soc. Pet. Geol. Men., pp. 99-118.
- Forray, N., Auer, J. C., Brochot, J. F., Eraud, Y., Favriau, A., Ghio, M., Lallement, C., Lang, M., Odier, M. et Scherer, C. (1998). Charte qualité de l'hydrométrie - Code de bonnes pratiques, *Rapport technique*, Publication du Ministère de l'Aménagement du Territoire et de l'Environnement, sep.
- Francés, F. (2001). Incorporating non-systematic information to flood frequency analysis using the maximum likelihood estimation method, in Glade, T., Albini, P. et Francés, F. (ed.), *The Use of Historical Data in Natural Hazard Assessments*, Vol. 17 of *Advances in Natural and Technological Hazards Research*, chapter B: Flooding, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, oct., 89-99.
- Francés, F., Salas, J. D. et Boes, D. C. (1994). Flood frequency analysis with systematic and historical or paleoflood data based on the two-parameter general extreme value models, *Water Resources Research*, 30 (6) : 1653-1664.
- French, R. H. (1985). *Open-channel hydraulics, Civil Engineering Series*, McGraw-Hill.
- Gerard, R. et Karpuk, E. W. (1979). Probability analysis of historical flood data, *Journal of the Hydraulics Division. ASCE*, 105 (HY9) : 1153-1165.
- Geyh, M. A., Benzler, J. H. et Roeschmann, G. (1971). Problems of dating Pleistocene and Holocene soils by radiometric methods, in Yaalon, D. H. (ed.), *Paleopedology, origin, nature, and dating of paleosols*, International Society of Soil Science and Israel University Press, Jerusalem, pp. 63-75.
- Goubet, A. (1997). Les crues historiques de la Seine à Paris, *La Houille Blanche*, 52 (8) : 23-27.
- Goudie, A. (1981). *Geomorphological techniques*, George Allen and Unwin, London.
- Gregory, K. J. (1983). *Background to paleohydrology : A perspective*, John Wiley and Sons, New York.
- Harrison, S. S. et Reid, J. R. (1967). A flood-frequency graph based on tree-scar data, *Proceeding of the North Dakota Academy of Science*, Vol. 21, pp. 23-33.
- Henry, M. (1968). La connaissance des débits en régime variable en une station donnée, *Hydrologie - Mélange offert à Pardé, M.*, Orphrys, pp. 301-312.
- House, P. K., Webb, R. H., Baker, V. R., Levish D. R. (2001). Ancient Floods, Modern Hazards. Principles and Applications of Paleoflood Hydrology. Water Science and

- Application 5, *American Geophysical Union*, Washington DC, 385 p.
- Hupp, C. R. (1987). Botanical evidence of floods and paleoflood history, *Proceedings of the International Symposium on Flood Frequency and Risk Analysis*, Louisiana State University, Baton Rouge, Louisiana, USA, may, pp. 365-369.
- Hupp, C. R. (1988). Plant ecological aspects of flood geomorphology and paleoflood history, *Flood geomorphology*, John Wiley and Sons, New York, pp. 335-356.
- Jaccon, G. (1986). *Manuel d'hydrométrie, tome V, Tracé de la courbe de tarage et calcul des débits*, Vol. 70, *Initiations, documentation technique*, ORSTOM.
- Jacquet, J. (1990). Les grands mouvements climatiques, *La Houille Blanche* (1): 19-41.
- Jahns, R. H. (1947). Geologic features of the Connecticut Valley, Massachusetts as related to recent floods, *US Geological Survey Water Supply Paper*, 996: 158 p.
- Jarrett, R. D. (1984). Hydraulics of high-gradient streams, *Journal of the Hydraulics Division. ASCE*, 110 (11): 1519-1539.
- Jarrett, R. D. (1987). Errors in slope-area computations of peak discharges in mountain streams, *Journal of Hydrology*, 96 (1/4): 53-67.
- Kirby, W. H. (1985). Statistical error analysis of the slope-area method of indirect discharge determination, *American Geophysical Union Transactions (EOS)* (66): 267.
- Kirby, W. H. (1987). Linear error analysis of slope-area discharge determinations, *Journal of Hydrology*, 96 (1/4): 125-138.
- Kirby, W. H., Hua, S. Q. et Beard, L. R. (1987). Analysis of extraordinary flood events, *Journal of Hydrology*, 96 (1/4): 3-383.
- Kirby, W. H. et Moss, M. E. (1987). Summary of flood frequency analysis in the United States, *Journal of Hydrology*, 96 (1/4): 5-14.
- Lalanne-Berdouticq, G. (1994). Aspects méthodologiques de la reconstitution des écoulements des grandes crues catastrophiques, *Congrès de la SHF, 23ème journée de l'hydraulique*, Nimes, France, sept., pp. 111-119.
- Lang, M., Coeur, D., Lallement, C., Naulet, R. et Boudou, G. (1998). Historisque-Guiers - Utilisation de l'information historique pour une meilleure définition du risque inondation, *Rapport technique*, Pôle Grenoblois d'Etude et de Recherche pour la Prévention des Risques Naturels, juin.
- Lang, M., Ouarda, T. B. M. J. et Bobée, B. (1999). Towards operational guidelines for over-threshold modeling, *Journal of Hydrology*, 225: 103-117.
- Lawless, J. F. (1982). *Statistical models and methods for lifetime data*, *Wiley Series in Probability and Statistics - Applied Probability and Statistics Section*, John Wiley and Sons, jan.
- Leroy Ladurie, E. (1975). *Histoire du climat depuis l'an Mil*, Flammarion.
- Luo, C. Z. (1987). Investigation and regionalization of historical floods in China, *Journal of Hydrology*, 96 (1/4): 41-51.
- Maizels, J. K. (1983). Palaeovelocity and paleodischarge determination for coarse gravel deposits, in Gregory, K. J. (ed.), *Background to palaeohydrology*, John Wiley and Sons, New York, pp. 101-139.
- Meko, D. et Graybill, D. A. (1995). Tree-ring reconstruction of upper Gila river discharge, *Water Resources Bulletin*, 31 (24): 605-616.
- Miquel, J. (1984). *Guide pratique d'estimation des probabilités de crues*, Vol. 53, *Collection de la Direction des Etudes et Recherches d'Electricité de France*, Eyrolles, Paris.

- Miramont, C. et Guilbert, X. (1997). Variations historiques de la fréquence des crues et évolution de la morphogénèse fluviale en moyenne Durance (France du Sud-Est), *Géomorphologie* (4) : 325-337.
- Naulet, R. (1996). *Sédimentation des particules dans la Seine*, Mémoire de DEA Sciences et Techniques de l'Environnement, Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, Ecole du Génie Rural des Eaux et des Forêts, Université Paris XII-Val de Marne, Paris, sept.
- O'Conner, J. E., Webb, R. H. et Baker, V. R. (1986). Paleohydrology of pool and riffle pattern development, Boulder Creek, Utah, *Geol. Soc. Am. Bull.* (97) : 410-420.
- Ouarda, T. B. M. J., Rasmussen, P. F., Bobée, B. et Bernier, J. (1998). Utilisation de l'information historique en analyse hydrologique fréquentielle, *Revue des Sciences de l'Eau* (spécial) : 41-49.
- Patton, P. C. et Baker, V. R. (1977). Geomorphic response of central Texas stream channels to catastrophic rainfall and runoff, in Doehring, D. O. (ed.), *Geomorphology in arid and semi-arid regions*, Publ. Geomorphol., State Univ. of New York, Binghamton, N. Y., pp. 189-217.
- Patton, P. C. et Dibble, D. S. (1982). Archeologic and geomorphic evidence for the paleohydrologic record of the Pecos River in West Texas, *Am. J. Sci.* (282) : 97-121.
- Potter, H. R. (1978). The use of historic records for the augmentation of hydrological data, *Technical report number 46*, Institute of Hydrology, Wallingford, jan.
- Roche, M. (1963). *Hydrologie de surface*, Gauthier-Villars, Paris.
- Rodier, J. A. et Roche, M. (1984). *World catalogue of maximum observed Floods - Répertoire mondial des crues maximales observées*, Contribution au Programme Hydrologique International de l'UNESCO, Vol. 143, IAHS - AISH Publication.
- Ruhe, R. V. (1969). *Quaternary Landscapes in Iowa*, Iowa State University Press, Ames.
- Salisbury, E. J. (1925). Note on the edaphic succession in some dune soils with special reference to time factor, *J. Ecol.* (13) : 322-328.
- Sigafoos, R. S. (1964). Botanic evidence of floods and flood plain development, *US Geological Survey Professional Paper*, 485-A : 35.
- Stedinger, J. R. et Cohn, T. A. (1987). Historical flood frequency data : its value and use, *Proceedings of the International Symposium on Flood Frequency and Risk Analysis*, Louisiana State University, Baton Rouge, Louisiana, USA, may, pp. 273-286.
- Stewart, J. H. et LaMarche, J. V. C. (1967). Erosion and deposition in the flood of december 1964 on Coffee creek, Trinity County, California, *US Geological Survey Professional Paper*, 422-K : 22.
- Stuiver, M. et Suess, H. E. (1966). On the relationship between radiocarbon dates and true sample ages, *Radiocarbon* (8) : 534-540.
- Sutcliffe, J. V. (1987). The use of historical records in flood frequency analysis, *Journal of Hydrology*, 96 (1/4) : 159-171.
- Suttor, M. (1989). Etude historique d'hydrologie fluviale : l'exemple de la Meuse, *Bulletin de la Société Géologique de Liège*, 25 : 159-174.
- Taylor, R. E., Donahue, D. J., Zabel, T. H., Damon, P. E. et Jull, A. J. T. (1984). Radiocarbon dating by particle accelerators : an archaeological perspective, in Lambert, J. B. (ed.), *Archaeological chemistry*, Vol. 3, Am. Chem. Soc. Adv. Chem. Ser, pp. 333-356.

- Thomson, M. T., Gannon, W. B., Thomas, M. P. et Hayes, G. S. (1964). Historical floods in New England, *US Geological Survey Water Supply Paper*, 1779-M: M1-M99.
- Wendland, W. M. et Donley, D. L. (1971). Radiocarbon-calendar age relationship, *Earth Planet. Sci. Lett.* (11): 135-139.
- Williams, G. P. (1984). Paleohydrologic equations for rivers, in Costa, J. E. et Fleisher, P. J. (ed.), *Developments and applications of geomorphology*, Springer-Verlag, Berlin, pp. 343-367.

Chapitre 3

Analyse fréquentielle des crues avec données non systématiques

Sommaire

3.1	Introduction	55
3.2	Rappel des méthodes d'estimation des paramètres sans information censurée	57
3.2.1	Méthode du maximum de vraisemblance (MLE)	57
3.2.2	Méthode des moments (MO)	58
3.2.3	Méthode des moments de probabilité pondérés (PWM)	59
3.2.4	Méthode des <i>L</i> -Moments (LM)	60
3.3	Estimation des paramètres avec information censurée, à partir d'échantillons constitués de valeurs maximales annuelles (AM)	63
3.3.1	Méthode du maximum de vraisemblance (MLE)	64
3.3.1.1	Intensité des crues non connue, censure de type binomiale (MLE_{bc})	64
3.3.1.2	Intensité des crues connues au-dessus d'un seuil fixé (MLE_c)	65
3.3.1.3	Intensité des crues située dans un intervalle de censure au-dessus d'un seuil fixé (MLE_{ic})	66
3.3.1.4	Intensité des plus fortes crues connues (MLE_{mf})	67
3.3.1.5	Généralisation (MLE_G)	68
3.3.2	Méthode des moments pondérés historiquement (HWM)	71
3.3.3	Méthodes des moments partiels de probabilité pondérés (PPWM)	74
3.3.4	Méthode de l'algorithme des moments espérés (EMA)	76
3.4	Rappel du modèle de dépassement	79
3.4.1	Principe général	79
3.4.1.1	Méthode du renouvellement	79
3.4.1.2	Modèle de dépassement	81
3.4.2	Modèle de dépassement avec flux de Poisson	82
3.5	Estimation des paramètres avec information censurée, à partir d'échantillons constitués de valeurs supérieures à un seuil (POT)	83

3.5.1	Intensité des crues non connue, censure de type binomiale (MLE_{sbc})	83
3.5.2	Intensité des crues connues au-dessus d'un seuil fixé (MLE_{sc})	84
3.5.3	Intensité des crues située dans un intervalle de censure au-dessus d'un seuil fixé (MLE_{sic})	84
3.5.4	Intensité des plus fortes crues connues (MLE_{smf})	85
3.6	Quelques remarques sur les probabilités empiriques (<i>plotting position</i>)	86
3.6.1	Probabilités empiriques sans information censurée	86
3.6.2	Probabilités empiriques avec information censurée	91
3.7	Réduction de l'incertitude d'échantillonnage grâce à l'information historique	96
3.8	Prise en compte des erreurs de reconstitution des débits dans les méthodes d'estimation	97
3.9	Conclusion	100
3.10	Bibliographie	103

3.1 Introduction

L'objectif de l'analyse fréquentielle des crues est d'interpréter la série des événements passés en terme de future probabilité d'occurrence (Bobée et Ashkar, 1991). A travers cet énoncé on discerne qu'une condition préalable est la *stationnarité* des phénomènes, c.-à-d. que les probabilités des événements ne dépendent pas de l'instant t . Dans le cas contraire, il est nécessaire de raisonner sur des sous-périodes stationnaires ou d'utiliser des modèles fréquents plus complexes faisant intervenir le temps (cf. par exemple le processus de Poisson non stationnaire). L'échantillon constitué à partir des méthodes présentées au chapitre précédent doit également vérifier d'autres conditions : les données doivent être (a) *aléatoires*, c.-à-d. issues d'un phénomène naturel (b) *indépendantes*, c.-à-d. non auto-corrélées chronologiquement comme le sont les débits journaliers, (c) *homogènes*, c.-à-d. issues d'une même population (absence d'effets saisonniers) ou en d'autres termes identiquement distribuées suivant une même loi. L'échantillon doit aussi être *exhaustif* (tous les événements étudiés ont été répertoriés). Cette condition est particulièrement importante lorsque l'information historique est utilisée mais des pannes de matériel peuvent également engendrer ce type de problème sur la période contemporaine. Lorsque l'une de ces trois conditions n'est pas vérifiée, il faut soit transformer l'échantillon initial (données naturelles reconstituées ; élimination des valeurs liées ; sous-échantillons homogènes), soit utiliser des processus d'occurrence adaptés au cas considéré (Yagouti et al., 2001).

En plus des méthodes paramétriques de l'approche statistique classique, dite également « objective », qui font l'objet de ce chapitre, d'autres techniques existent. Il s'agit essentiellement des méthodes non paramétriques et bayésiennes. Nous en donnons ci-après un bref aperçu, elles ne seront plus abordées par la suite.

- i) **Méthodes non paramétriques** : Un des points mis fréquemment en avant pour justifier l'utilisation des approches non paramétriques est qu'elles ne nécessitent pas d'hypothèse particulière concernant la fonction de densité des crues. Il s'agit de méthodes de lissage des probabilités empiriques à partir d'un noyau constitué d'une fonction continue (normal, Gumbel,...). Bien que la constante de lissage (le pas) soit primordiale sa valeur optimale se détermine souvent empiriquement. Outre le fait qu'elles ne présentent que peu d'intérêt pour l'estimation des événements extrêmes, en raison de leur faible capacité à extrapoler, les estimations au delà des observations seront très fortement dépendantes du choix du noyau. Elles perdent alors leur seul atout. Bardsley (1989), Adamowski et Feluch (1990), Adamowski et al. (1998) et Guo (1991) ont développé cette méthode avec une procédure permettant d'incorporer l'information historique.
- ii) **Méthodes bayésiennes** : Le paradigme bayésien est un cas particulier de la théorie de l'information de Shannon (1948). Morlat et al. (1956) ont présenté l'un des premiers travaux sur le traitement de l'information hydrologique hétérogène dans le cadre bayésien. Cunnane et Nash (1971) utilisent cette méthode pour incorporer l'information régionale. Il s'agit d'obtenir la vraisemblance (ou fonction de densité) *a posteriori* des paramètres en combinant, par le biais de la formule de Bayes, la vraisemblance *a priori* des paramètres et celle de l'échantillon. Cette approche permet un traitement de l'incertitude en combinant informations objectives et subjectives. Bernier et al. (2000) en présentent une série d'applications dans le domaine de l'environnement. On trouve dans le rapport de Bernier (1981) les éléments théoriques de

l'analyse bayésienne appliquée au crues. Miquel (1984, p. 129) qui présente l'application de cette méthode à des échantillons de valeurs supérieures à un seuil (POT), en rappelle les principaux avantages : la détermination des fonctions de densité des paramètres (et au-delà des régions de confiance des quantiles) est souvent plus facile que par l'approche classique (l'approche bayésienne reconnaît explicitement que les paramètres et les données ne sont jamais connus exactement), des informations de type « appréciation d'expert » peuvent être prises en compte dans la vraisemblance *a priori* (informations inexploitable dans l'analyse classique) et enfin les estimations peuvent être mises à jour et précisées au cours du temps. O'Connell et al. (1996, 1999a, 1999b) exploitent l'information paléohydrologique dans un cadre bayésien à partir de la méthodologie développée par Tarantola (1987). O'Connell (1999) présente le logiciel **fldfrq3** qui permet d'incorporer les données non systématiques. Les incertitudes sur les débits maxima annuels sont prises en compte avec différentes distributions discrètes en fonction de la nature des données (systématiques, historiques ou paléohydrologiques), l'incertitude sur la durée de non dépassement des bornes peut également être incorporée. L'estimation des paramètres est effectuée en recherchant le maximum global de la vraisemblance avec l'algorithme SA (*Simulated Annealing*, Goffe et al., 1994) puis en affinant avec la méthode du *Simplex* (Nelder et Mead, 1965). L'intégration d'une grille de l'espace des paramètres, dans les limites définies par un ratio de la vraisemblance optimale, permet de déterminer leur régions de confiance.

Comme énoncé ci-avant, nous nous sommes intéressé aux méthodes paramétriques de l'approche statistique classique. Ces dernières relèvent, après le choix a priori d'une loi théorique pour représenter la distribution de la population, de l'*estimation des paramètres* de celle-ci à partir de l'échantillon disponible. Le traitement statistique ne prétend pas expliquer les crues, il met plutôt en évidence notre méconnaissance du phénomène et est utilisé dans ces conditions comme un recours opérationnel. Il est en effet peu probable que les crues suivent une loi particulière, comme le rappelle notamment Bobée (1999), les hypothèses à la base de la théorie des valeurs extrêmes ne sont pas entièrement respectées en hydrologie (le maximum annuel d'une série de débits journaliers ne rentre pas directement dans le cadre d'une théorie asymptotique : les débits journaliers ne sont généralement pas indépendants et identiquement distribués). La démarche est donc pragmatique, on choisira une loi cohérente avec les observations, tout en raisonnant sur la famille de distributions adaptée aux valeurs extrêmes.

Nous présentons dans ce chapitre un rappel des différentes méthodes d'estimation des paramètres à partir de l'information systématique en termes soit de séries de maxima annuels (AM), soit de valeurs supérieures à un seuil (POT) ainsi que leur adaptation pour incorporer les données historiques. Quelques remarques sont également effectuées sur le mode de calcul des probabilités empiriques (*plotting position*) qui traditionnellement sont exploitées pour apprécier visuellement l'adéquation entre la distribution théorique choisie a priori et la distribution des valeurs de l'échantillon.

3.2 Rappel des méthodes d'estimation des paramètres sans information censurée

Cette partie présente un rappel succinct des différentes méthodes existantes pour estimer les paramètres des lois de probabilités choisies pour représenter la distribution des crues *sans prise en compte d'information censurée*. Les calculs relatifs à l'application de ces méthodes pour différentes lois (loi de Gumbel : EV1 ; loi généralisée des valeurs extrêmes : GEV ; loi exponentielle : EXP ; loi généralisée de Pareto : GPA et loi de Poisson : P) ne sont pas détaillés ici, ils ont fait l'objet d'un rapport de synthèse (Naulet, 2002). Ce rapport présente différents rappels de statistique appliqués à l'hydrologie, notamment la définition des quantiles et des différentes périodes de retour suivant l'approche adoptée (AM ou POT), et le calcul, pour chaque méthode d'estimation abordée, de la variance asymptotique des quantiles permettant d'estimer, moyennant certaines hypothèses, les intervalles de confiance des quantiles x_T .

3.2.1 Méthode du maximum de vraisemblance (MLE)

La méthode du maximum de vraisemblance (*Maximum Likelihood Estimators* : MLE) consiste à trouver l'ensemble Θ des paramètres qui, compte tenu de la loi de probabilité f_X retenue, rend maximale la probabilité d'obtenir les valeurs observées sur l'échantillon.

On considère en premier lieu la probabilité, en effectuant un tirage au hasard, d'avoir la valeur x_i de l'échantillon au sein d'un intervalle :

$$\Pr [x_i < X \leq x_i + dx_i] = f_X(\Theta|x_i)dx_i$$

où Θ représente le vecteur des k paramètres ($\theta_j : j = 1$ à k) de la loi considérée. Si les tirages sont *indépendants* et *identiquement distribués* suivant la loi f_X , la probabilité P d'avoir tiré dans n'importe quel ordre les n valeurs de l'échantillon observé (x_1, x_2, \dots, x_n) est le produit de ces n probabilités soit :

$$\begin{aligned} P &= \Pr[\{x_1 < X \leq x_1 + dx_1\} \cap \\ &\quad \{x_2 < X \leq x_2 + dx_2\} \cap \dots \\ &\quad \{x_n < X \leq x_n + dx_n\}] \\ P &= f_X(\Theta|x_1)dx_1 \cdot f_X(\Theta|x_2)dx_2 \cdot \dots \cdot f_X(\Theta|x_n)dx_n \end{aligned} \quad (3.1)$$

On définit ainsi la fonction de vraisemblance L qui est proportionnelle à P :

$$L(\Theta|x_1 \cdots x_n) = \prod_{i=1}^n f_X(\Theta|x_i) \quad (3.2)$$

Pour maximiser cette fonction de vraisemblance par rapport aux paramètres, on cherche les valeurs des θ_j qui annulent les dérivées partielles, soit :

$$\frac{\partial L(\Theta|x_1 \cdots x_n)}{\partial \theta_j} = 0 \quad j = 1 \cdots k \quad (3.3)$$

En fait la fonction de vraisemblance aura son maximum pour les mêmes valeurs $\hat{\theta}_j$ que pour toute transformation par une fonction monotone, dans ce cas $LL = \ln L(\Theta|x_1 \cdots x_n)$:

$$LL = \ln L(\Theta|x_1 \cdots x_n) = \sum_{i=1}^n \ln f_X(\Theta|x_i) \quad \text{et} \quad (3.4)$$

$$\frac{\partial LL(\Theta|x_1 \cdots x_n)}{\partial \theta_j} = \frac{1}{L} \cdot \frac{\partial L}{\partial \theta_j} = 0 \quad j = 1 \cdots k \quad (3.5)$$

La méthode du maximum de vraisemblance fait l'hypothèse que si cet échantillon est celui qui est apparu c'est qu'il avait une probabilité forte d'apparaître. Il est par conséquent cohérent de choisir les valeurs des paramètres de manière à maximiser la probabilité d'obtenir cet échantillon dans le contexte d'une loi donnée choisie au préalable.

Remarque 3.1 *On notera que si, pour une fonction de densité de probabilité donnée, il existe des statistiques exhaustives (cf. Lehmann, 1983, pour la théorie des statistiques exhaustives), on aura une méthode optimale d'estimation des paramètres quelle que soit la taille de l'échantillon et si une solution existe, elle sera unique et correspondra à la méthode du maximum de vraisemblance (Bobée, 1999). On peut notamment trouver des statistiques exhaustives pour les distributions Normale, exponentielle et Gamma.*

3.2.2 Méthode des moments (MO)

Les estimateurs (vecteur des paramètres estimés noté $\hat{\Theta}$) par la méthode des moments sont obtenus en posant l'égalité entre les moments théoriques (μ_r), calculés à partir de la fonction de densité de probabilité choisie pour représenter la variate, et ceux empiriques déduits de l'échantillon (m_r).

$$\mu_r = m_r \quad (3.6)$$

On renvoie au rapport de Naulet (2002) pour le calcul des différents moments et coefficients théoriques ainsi que pour le calcul des moments et coefficients empiriques. On utilise autant de moments indépendants qu'il est nécessaire, en fonction du nombre n de paramètres de la loi choisie. Finalement on aura à résoudre un système de n équations mettant en relation les moments et les paramètres. On opte généralement pour des moments indépendants d'ordre r les plus faibles (moyenne, variance et coefficient d'asymétrie) car leurs estimations sont moins biaisées.

Remarque 3.2 *On notera que le choix des ordres r à prendre en considération n'est pas anodin. La théorie des statistiques exhaustives peut suggérer des ordres plus appropriés que d'autres pour une loi donnée. Ainsi Ashkar et Bobée (1987) proposent une méthode généralisée des moments (Generalized Method of Moments : GMM) où par exemple les moments d'ordre 1 et 2 (moyenne et variance) peuvent être remplacés par les moments d'ordres $\underline{0}$ (moyenne géométrique : ordre quasi-zéro : $r \rightarrow 0$) et 1 pour la distribution Gamma à 2 paramètres (G2) et par les moments d'ordres -1 et $\underline{0}$ (moyennes harmonique et géométrique) pour la distribution Gamma inverse. Ashkar et Ouarda (1996) ont également utilisé cette méthode avec la loi généralisée de Pareto (GPA) qui dérive de la loi log-Pearson Type III (LP3) par changement de variable. Le choix de l'ordre des moments utilisés dans la méthode GMM donne plus ou moins de poids aux valeurs fortes ou faibles de l'échantillon. Aussi ils montrent par le biais de simulations Monte Carlo qu'en fonction du paramètre de forme de la distribution GPA, le choix des ordres utilisés peut*

faire varier de façon importante la variance des quantiles estimés. Pour la loi Log Pearson type 3, la méthode SAM (ordres $-1, \underline{0}, 1$) et la méthode des moments mixtes ($\underline{0}, 1, 2$) font intervenir des moments d'ordre petit, donc de plus faible variance, ce qui a une influence sur la variance asymptotique des quantiles (Bobée, 1999).

3.2.3 Méthode des moments de probabilité pondérés (PWM)

La méthode des moments de probabilité pondérés (*Probability Weighted Moments*: PWM) a été développée par Greenwood et al. (1979). Elle est particulièrement utile pour des lois dont la fonction de distribution est inversible. Les moments de probabilité pondérés d'une variable aléatoire X avec une fonction de répartition $F \equiv F_X(x|\Theta) = \Pr[X \leq x]$, de vecteur de paramètres Θ , sont définis par :

$$M_{p,r,s} = E[X^p F^r (1-F)^s] \quad (3.7)$$

$$M_{p,r,s} = \int_0^1 [x(F)]^p \cdot F^r \cdot (1-F)^s \cdot dF \quad (3.8)$$

où $x(F)$ est la fonction inverse de F et p, r, s sont des nombres réels. Les moments de probabilité utilisés en pratique sont obtenus avec $p = 1$ et $s = 0$, soit :

$$\beta_r = M_{1,r,0} = E[XF^r] = \int_0^1 x(F) \cdot F^r \cdot dF \quad (3.9)$$

Pour un échantillon de taille n classé par ordre croissant $x_1 \leq x_2 \leq \dots \leq x_n$, Landwehr et al. (1979, annexe, p. 1063) ont montré que b_r sera un estimateur non biaisé de β_r :

$$b_r = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{(i-1)!}{(i-r-1)!} \frac{(n-r-1)!}{(n-1)!} x_i \quad (3.10)$$

Hosking et al. (1985, annexe A, p. 259) ont proposé un autre estimateur de β_r , noté $\hat{\beta}_r$:

$$\hat{\beta}_r(i,n) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n p_{i,n}^r x_i \quad (3.11)$$

où $p_{i,n}^r$ est la probabilité empirique, une estimation de $F(x_i)$, définie suivant :

$$p_{i,n}^r = \frac{i-a}{n} \quad \text{avec : } 0 < a < 1 \quad \text{ou} \quad (3.12)$$

$$p_{i,n}^r = \frac{i-m}{n+1-2m} \quad \text{avec : } -\frac{1}{2} < m < \frac{1}{2} \quad (3.13)$$

L'expression des moments de probabilité pondérés théoriques, β_r , est fonction des paramètres Θ de la distribution. Aussi les estimations $\hat{\Theta}$ seront obtenues, comme pour la méthode des moments, en résolvant le système d'équation suivant :

$$\beta_r = b_r \quad (3.14)$$

On utilisera autant de moments d'ordre r indépendants qu'il y a de paramètres à estimer.

Remarque 3.3 D'après Hosking et al. (1985, annexe A, p. 259), l'utilisation de l'une ou de l'autre des probabilités empiriques (3.12) et (3.13), conduit à des estimateurs $\hat{\beta}_r$

asymptotiquement équivalent aux estimateurs b_r de Greenwood et al. (1979). Haktanir et Bozduman (1995) ont réalisé des simulations Monte Carlo à partir des distributions LN3, LP3, GEV et Wakeby, pour comparer l'expression (3.10) proposée par Landwehr et al. (1979) et l'expression (3.11) proposée par Hosking et al. (1985), avec une probabilité empirique calculée à partir de l'expression (3.12) (avec $a = 0.35$) ou (3.13) (formule de Weibull, $m = 0$, ou de Cunnane, $m = 0.4$). Sans rentrer dans le détail, ils concluent que pour toutes ces lois la formule de Weibull est la moins performante. Les expressions (3.10) et (3.12) (avec $a = 0.35$) sont quasiment équivalentes : pour la loi GEV elles viennent concurrencer la méthode du maximum de vraisemblance susceptible de conduire, dans certains cas, à des problèmes de convergence numérique.

3.2.4 Méthode des L -Moments (LM)

La méthode des L -Moments (LM) a été introduite par Hosking (1990). Une bonne synthèse est présentée dans le livre de Hosking et Wallis (1997). Ces L -Moments, notés λ_r , dérivent directement d'une combinaison linéaire des moments de probabilité pondérés calculés avec $p = 1$ et $s = 0$, soit :

$$\beta_r = M_{1,r,0} = \int_0^1 x(F) \cdot F^r \cdot dF \quad (3.15)$$

Les L -moments ont d'abord été définis par rapport aux PWM suivant l'expression :

$$\lambda_{r+1} = \sum_{k=0}^r p_{r,k}^* \beta_k \quad (3.16)$$

avec :

$$p_{r,k}^* = (-1)^{r-k} \binom{r}{k} \binom{r+k}{k} \quad (3.17)$$

Les quatre premiers moments sont définis par :

$$\lambda_1 = \beta_0 \quad (3.18)$$

$$\lambda_2 = 2\beta_1 - \beta_0 \quad (3.19)$$

$$\lambda_3 = 6\beta_2 - 6\beta_1 + \beta_0 \quad (3.20)$$

$$\lambda_4 = 20\beta_3 - 30\beta_2 + 12\beta_1 - \beta_0 \quad (3.21)$$

Hosking (1989, version révisée du 15/07/96) donne une nouvelle définition dont la théorie est mieux développée. Soit X une variable aléatoire telle que $E(X) < \infty$ (la variable X a une moyenne finie), avec une fonction de répartition $F(x)$ et l'expression du quantile $x(F)$, et soient $X_{1:n} \leq X_{2:n} \leq \dots \leq X_{n:n}$ les statistiques d'ordre d'un échantillon aléatoire de taille n tiré de la distribution de X . Alors les L -moments sont définis par :

$$\lambda_r = \frac{1}{r} \sum_{k=0}^{r-1} (-1)^k \binom{r-1}{k} E(X_{r-k:r}) \quad (3.22)$$

Le « L » dans le nom « L -moments » met en exergue le fait que λ_r est une fonction *linéaire* (*linear*) de l'espérance des statistiques d'ordre. La valeur espérée d'une statistique d'ordre

est (cf. démonstration au §3.6.1, p. 86, relatif aux probabilités empiriques, l'expression ci-après est obtenue en prenant l'espérance de l'équation 3.103, p. 86) :

$$E(X_{j:r}) = \frac{r!}{(j-1)!(r-j)!} \int_0^1 x \cdot [F(x)]^{j-1} \cdot [1-F(x)]^{r-j} \cdot dF(x) \quad (3.23)$$

En substituant cette expression dans (3.22), puis en développant le binôme dans $F(x)$ et en additionnant les coefficients de chaque puissance de $F(x)$, on obtient :

$$\lambda_r = \int_0^1 x(F) \cdot P_{r-1}^*(F) \cdot dF \quad \text{avec :} \quad (3.24)$$

$$P_r^*(F) = \sum_{k=0}^r p_{r,k}^* F^k \quad (3.25)$$

où $P_r^*(F)$ sont les r -ièmes polynômes de Legendre « transposés » (*shifted*) de telle sorte qu'ils soient orthogonaux non plus sur l'intervalle $(-1,1)$ mais sur $(0,1)$. On rappelle que les polynômes classiques de Legendre d'ordre r , notés $P_r(x)$, se définissent par récurrence (formule de Rodrigues) :

$$P_r(x) = \frac{1}{2^r r!} \frac{d^r}{dx^r} (x^2 - 1)^r \quad \text{avec :} \quad (3.26)$$

$$P_r^*(u) = P_r(2u - 1) \quad (3.27)$$

d'où en calculant les 4 premiers polynômes et en les remplaçant dans l'expression (3.24) :

$$\lambda_1 = E(X) = \int_0^1 x \cdot dF \quad (3.28)$$

$$\lambda_2 = \frac{1}{2} E(X_{2:2} - X_{1:2}) = \int_0^1 x \cdot (2F - 1) dF \quad (3.29)$$

$$\lambda_3 = \frac{1}{3} E(X_{3:3} - 2X_{2:3} + X_{1:3}) = \int_0^1 x \cdot (6F^2 - 6F + 1) dF \quad (3.30)$$

$$\lambda_4 = \frac{1}{4} E(X_{4:4} - 3X_{3:4} + 3X_{2:4} - X_{1:4}) = \int_0^1 x \cdot (20F^3 - 30F^2 + 12F - 1) dF \quad (3.31)$$

Les équations (3.28) à (3.31) sont les mêmes que celles (3.18) à (3.21) en tenant compte de l'expression (3.15). Pour le sens des statistiques d'ordre dans (3.28) à (3.31) on renvoie au livre de Hosking et Wallis (1997). Contrairement aux moments de probabilité pondérés, les L -moments ont un sens physique comparable aux moments classiques de même ordre : moyenne, variance, asymétrie, ... (Bobée, 1999).

Pour un échantillon de taille n classé par ordre croissant $x_1 \leq x_2 \leq \dots \leq x_n$, ℓ_r sera un estimateur non biaisé de λ_r :

$$\ell_{r+1} = p_{r,k}^* b_k \quad (3.32)$$

Le rapport $\tau_3 = \frac{\lambda_3}{\lambda_2}$ qui est une *mesure de l'asymétrie (skewness)* et le rapport $\tau_4 = \frac{\lambda_4}{\lambda_2}$ qui est une *mesure d'aplatissement (kurtosis)*, peuvent être utilisés dans un diagramme facilitant le choix de la loi à employer. La figure (3.1) illustre la position des lois fréquemment utilisées en hydrologie (Musy, 2001). Celle-ci est réalisée à partir

des approximations polynomiales de Hosking et Wallis (1997, annexe A.12), les approximations de τ_4 sont valides avec une précision de $5 \cdot 10^{-4}$ pour $-0.6 \leq \tau_3 \leq 0.9$. Les lois à 2 paramètres sont représentées par des points (UNI: Uniforme, NOR: Normale, EV1: Gumbel, EXP: Exponentielle, LN2: log-normale à 2 paramètres) alors que les lois à 3 paramètres sont figurées par des courbes (GEV: extrême généralisé, GPA: Pareto généralisé, LN3: log-normale à 3 paramètres, PIII: Pearson Type III, GLO: Logistique généralisée). Dans une large gamme des situations rencontrées en pratique, les diagrammes des L -moments fournissent une meilleure identification de la population parentale que la génération d'échantillon particulier (Hosking, 1990, figure 6).

Remarque 3.4 *On notera que par définition, les L -moments sont robustes aux valeurs extrêmes d'un échantillon (Vogel et Fennessey, 1993, figures 3 et 4). Cependant, comme le rappelle Bobée (1999), à partir d'une communication personnelle de Bernier (1993), dans le cas d'une valeur élevée observée et validée, cette robustesse peut être un inconvénient puisque l'on accorde un poids trop faible à une information importante concernant la queue de la distribution (typiquement l'information historique). Pour répondre à ce problème et donner plus de poids aux fortes valeurs, Wang (1997) propose une généralisation de la méthode, nommée LH-moments. D'après des simulations Monte Carlo issues d'une loi GEV, il semble que l'estimation des quantiles de périodes de retour élevées (25 à 100 ans) soit moins biaisée et plus efficace que la méthode classique mais uniquement lorsque le paramètre de forme est positif (cas d'une borne supérieure).*

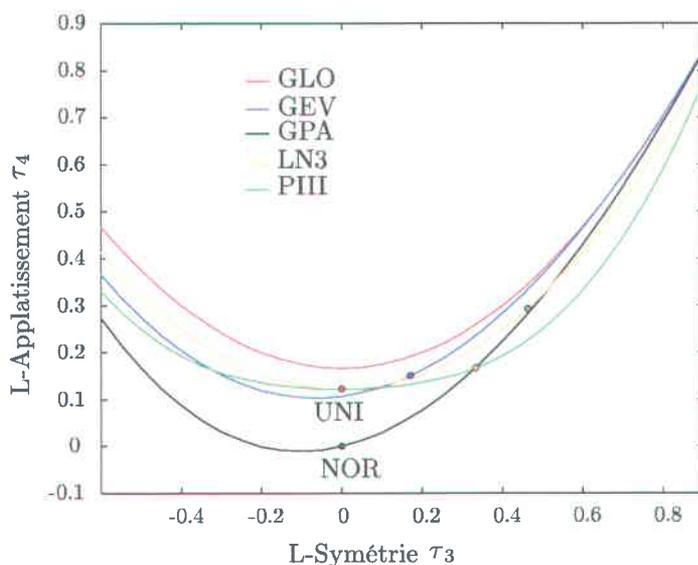


FIG. 3.1 – Diagramme du rapport des L -moments (d'après Hosking et Wallis, 1997)

3.3 Estimation des paramètres avec information censurée, à partir d'échantillons constitués de valeurs maximales annuelles (AM)

Dans le cadre du modèle de maxima annuels, l'information hydrologique peut être synthétisée suivant le schéma général de la figure (3.2), p. 64. On rencontre trois cas de figure :

i) *Information non censurée :*

L'**intensité** des débits maxima annuels est **connue**, ces débits sont notés x_i pour les crues de la période systématique, avec $i = 1$ à N_S^\bullet et y_j pour les crues de la période historique, avec $j = 1$ à N_H^\bullet (le point en exposant indique que l'intensité de la crue est connue).

ii) *Information censurée :*

L'intensité des débits maxima annuels n'est **pas connue** précisément mais elle est soit :

a) **inférieure à un seuil :**

$$N_S^< \text{ valeurs } X^* < x_{U_i} \text{ et } N_H^< \text{ valeurs } Y^* < y_{U_j};$$

b) **supérieure à un seuil :**

$$N_S^> \text{ valeurs } X^* > x_{L_i} \text{ et } N_H^> \text{ valeurs } Y^* > y_{L_j};$$

c) **comprise dans un intervalle :**

$$N_S^{<>} \text{ valeurs } X^* \in [x_{L_i}; x_{U_i}] \text{ et } N_H^{<>} \text{ valeurs } Y^* \in [y_{L_j}; y_{U_j}].$$

iii) *Aucune information :*

Les années où aucune information n'est disponible (représentées par « ? » sur la figure 3.2) sont retirées de l'analyse.

Finalement l'échantillon total est constitué de N années réparties suivant :

$$\begin{aligned} N &= N_S + N_H \\ &= N_S^\bullet + N_S^< + N_S^> + N_S^{<>} + N_H^\bullet + N_H^< + N_H^> + N_H^{<>} \end{aligned}$$

Les données de la période systématique et historique ont finalement la même nature et constituent un seul échantillon tronqué. On conservera cependant la distinction des variables X^* et Y^* afin de pouvoir leur affecter ultérieurement des incertitudes différentes.

Cette classification est déclinée ensuite avec les méthodes du maximum de vraisemblance (cf. §3.3.1), des moments pondérés historiquement (cf. §3.3.2), des moments de probabilité pondérés partiels (cf. §3.3.3) et de l'algorithme des moments espérés (cf. §3.3.4). On notera que l'ensemble des méthodes d'incorporation de l'information historique présentées fait l'hypothèse que les crues systématiques et non systématiques sont *identiquement distribuées*, c'est à dire qu'elles suivent la même fonction de distribution de probabilité, soit $f_{X^*}(\cdot) = f_{Y^*}(\cdot)$.

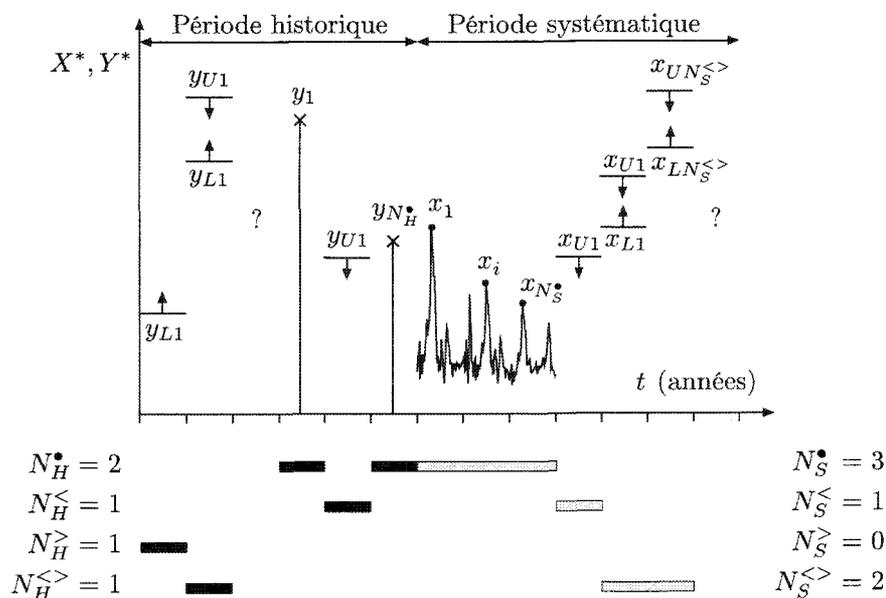


FIG. 3.2 – Schéma des différents types d'information relatives aux crues dans le cadre du modèle de maxima annuels

3.3.1 Méthode du maximum de vraisemblance (MLE)

On présente ci-après les différentes expressions de la fonction de vraisemblance lorsque l'information historique est prise en compte. A partir de ces expressions, la détermination de l'ensemble $\hat{\Theta}$ des paramètres estimés s'effectuera de la même manière que dans le cas classique rappelé au §3.2.1.

On s'intéresse dans un premier temps au cas où l'information historique est disponible de façon homogène sur une période de N_H années :

- i) soit en termes de k dépassements d'un seuil fixé y_H (cf. §3.3.1.1) ;
- ii) soit en termes de k crues d'intensité connue (y_1, \dots, y_k) supérieures au seuil fixé y_H (cf. §3.3.1.2) ;
- iii) soit en termes de k intervalles $[y_{Lm}; y_{Um}]$ ($m = 1$ à k) contenant les crues historiques (cf. §3.3.1.3)
- iv) soit en terme d'un nombre fixe k des plus fortes crues $(y_1 \geq \dots \geq y_k)$ (cf. §3.3.1.4).

On présente ensuite un modèle général (§3.3.1.5) d'incorporation de l'information censurée par la méthode du maximum de vraisemblance. Ce modèle permet de représenter : (a) une synthèse des quatre types d'information présentés ci-avant, (b) une information censurée aussi bien sur la période systématique que sur la période historique, (c) des seuils de perception successifs différents au cours du temps.

3.3.1.1 Intensité des crues non connue, censure de type binomiale (MLE_{bc})

On considère en premier lieu la probabilité P_1 d'avoir observé *exactement* k crues supérieures à un seuil fixé y_H au cours d'une période de N_H années (modèle avec une

troncature de type I, cf. figure 2.9a, p. 44). On ne connaît ni l'intensité de ces crues ni leur ordre. Soit deux événements exhaustifs et mutuellement exclusifs : $P(A \cup \bar{A}) = 1$ et $P(A \cap \bar{A}) = 0$. L'événement de base $A : [y_H < Y^* \leq +\infty]$ a pour probabilité élémentaire :

$$q = \int_{y_H}^{+\infty} f_{X^*}(y|\Theta) dy = 1 - F_{X^*}(y_H|\Theta)$$

Son complément est l'événement $\bar{A} : [-\infty \leq Y^* \leq y_H]$ de probabilité élémentaire :

$$p = F_{X^*}(y_H|\Theta)$$

On rappelle que tel qu'énoncé au §3.3, les crues historiques et systématiques sont supposées avoir la même distribution, d'où la notation $f_{X^*}(y|\Theta)$. Dans les conditions citées ci-avant, la v.a. K , qui représente le nombre de crues historiques supérieures au seuil parmi les N_H événements, suit une distribution binomiale faisant intervenir la variable de Bernoulli (événement A de probabilité q et \bar{A} de probabilité p définis précédemment), soit :

$$P_1 = \Pr[K = k] = C_{N_H}^k \cdot q^k \cdot p^{N_H-k} \quad \text{avec : } C_{N_H}^k = \binom{N_H}{k} = \frac{N_H!}{k! \cdot (N_H - k)!}$$

$$P_1 = C_{N_H}^k \cdot [1 - F_{X^*}(\Theta|y_H)]^k \cdot [F_{X^*}(\Theta|y_H)]^{N_H-k} \quad (3.33)$$

La méthode du maximum de vraisemblance consiste à maximiser les paramètres d'une fonction *proportionnelle* à la probabilité de l'échantillon observé. Aussi, étant donné que le terme $C_{N_H}^k$ de l'expression (3.33) ne dépend pas de Θ , il est parfois supprimé par certains auteurs, sans que cela ait une influence sur l'estimation des paramètres obtenus en maximisant la fonction. La fonction de vraisemblance (*Likelihood function* : L) va s'écrire (Cohn, 1984, 1986 ; Stedinger et Cohn, 1986 ; Cohn et Stedinger, 1987 ; Kuczera, 1992 ; Francés et al., 1994 ; Lang et al., 1998 ; Francés, 1998, 2001) :

$$L_{bc} = C_{N_H}^k \cdot [1 - F_{X^*}(\Theta|y_H)]^k \cdot [F_{X^*}(\Theta|y_H)]^{N_H-k} \quad (3.34)$$

L'expression (3.34), qui correspond à la loi binomiale $B(k, N_H, F_{X^*}(\Theta|y_H))$, est relative à une information avec une censure qualifiée dans la littérature de binomiale (*binomial censored*). Les estimateurs (paramètres estimés $\hat{\Theta}$) obtenus à partir de cette fonction de vraisemblance seront notés MLE_{bc} .

3.3.1.2 Intensité des crues connues au-dessus d'un seuil fixé (MLE_c)

On s'intéresse à la probabilité P_2 d'observer un échantillon de k crues d'intensité connue (y_1, \dots, y_k) au cours de N_H années, en considérant le fait que si elles ont été répertoriées c'est qu'elles ont dépassé un certain seuil de perception y_H (modèle avec une *troncature de type I*, cf. figure 2.9b, p. 44). Soient les événements $B : [y < Y^* \leq y + dy]$ et $A : [y_H < Y^* \leq +\infty]$. La probabilité conditionnelle que B se réalise, A étant réalisé, s'exprime par :

$$\Pr[\{y < Y^* \leq y + dy\} | \{y_H < Y^* \leq +\infty\}] = \frac{\Pr[\{y < Y^* \leq y + dy\} \cap \{y_H < Y^* \leq +\infty\}]}{\Pr[y_H < Y^* \leq +\infty]}$$

or comme B est un sous ensemble de A ($B \subset A$), on a :

$$\Pr[\{y < Y^* \leq y + dy\} \cap \{y_H < Y^* \leq +\infty\}] = \Pr[y < Y^* \leq y + dy]$$

d'où :

$$\Pr [\{y < Y^* \leq y + dy\} | \{y_H < Y^* \leq +\infty\}] = \frac{f_{X^*}(\Theta|y)}{1 - F_{X^*}(\Theta|y_H)} dy$$

Soit pour les k crues, en supposant des événements indépendants :

$$P_2 = \prod_{m=1}^k \frac{f_{X^*}(\Theta|y_m)}{1 - F_{X^*}(\Theta|y_H)} dy_m \quad (3.35)$$

En combinant les expressions (3.33) et (3.35), on peut calculer la probabilité P_3 d'avoir observé, sur N_H années, *exactement* k crues d'intensité connues (y_1, \dots, y_k) et $(N_H - k)$ crues censurées en-dessous du seuil de perception :

$$\begin{aligned} P_3 &= P_1 \cdot P_2 \\ &= C_{N_H}^k \cdot [1 - F_{X^*}(\Theta|y_H)]^k \cdot [F_{X^*}(\Theta|y_H)]^{N_H - k} \cdot \prod_{m=1}^k \frac{f_{X^*}(\Theta|y_m)}{1 - F_{X^*}(\Theta|y_H)} dy_m \\ &= C_{N_H}^k \cdot [F_{X^*}(\Theta|y_H)]^{N_H - k} \cdot \prod_{m=1}^k f_{X^*}(\Theta|y_m) dy_m \end{aligned} \quad (3.36)$$

La fonction de vraisemblance s'écrit alors (Leese, 1973; Cohn, 1984, 1986; Hosking et Wallis, 1986a, 1986b; Stedinger et Cohn, 1986; Cohn et Stedinger, 1987; Sutcliffe, 1987; Guo et Cunnane, 1991; Pilon et Adamowski, 1993; Francés et al., 1994; Kroll, 1996; Cohn et al., 1997; Lang et al., 1998; Francés, 1998, 2001) :

$$L_c = C_{N_H}^k \cdot [F_{X^*}(\Theta|y_H)]^{N_H - k} \cdot \prod_{m=1}^k f_{X^*}(\Theta|y_m) \quad (3.37)$$

L'expression (3.37) est relative à une information qualifiée de censurée (*censored*). Les estimateurs (paramètres estimés $\hat{\Theta}$) obtenus à partir de cette fonction de vraisemblance seront notés MLE_c .

3.3.1.3 Intensité des crues située dans un intervalle de censure au-dessus d'un seuil fixé (MLE_{ic})

On s'intéresse à la probabilité P_4 d'observer k crues dont l'intensité est comprise dans un intervalle de censure $[y_{Lm}; y_{Um}]$ au cours de N_H années. On considère, comme au §3.3.1.2, que si ces crues ont été répertoriées c'est qu'elles ont dépassé un certain seuil de perception y_H (modèle avec une *troncature de type I*, cf. figure 2.9b, p. 44). La probabilité conditionnelle s'écrit :

$$\Pr [\{y_L < Y^* \leq y_U\} | \{y_H < Y^* \leq +\infty\}] = \frac{F_{X^*}(\Theta|y_U) - F_{X^*}(\Theta|y_L)}{1 - F_{X^*}(\Theta|y_H)}$$

avec : $y_L > y_H$

Soit pour les k crues, en supposant des événements indépendants :

$$P_4 = \prod_{m=1}^k \frac{F_{X^*}(\Theta|y_{Um}) - F_{X^*}(\Theta|y_{Lm})}{1 - F_{X^*}(\Theta|y_H)} \quad (3.38)$$

En combinant les expressions (3.33) et (3.38), on peut calculer la probabilité P_5 d'avoir observé *exactement* k crues d'intensité connue dans un intervalle et $(N_H - k)$ crues censurées en-dessous du seuil de perception :

$$\begin{aligned}
 P_5 &= P_1 \cdot P_4 \\
 &= C_{N_H}^k \cdot [1 - F_{X^*}(\Theta|y_H)]^k \cdot [F_{X^*}(\Theta|y_H)]^{N_H-k} \\
 &\quad \cdot \prod_{m=1}^k \frac{F_{X^*}(\Theta|y_{U_m}) - F_{X^*}(\Theta|y_{L_m})}{1 - F_{X^*}(\Theta|y_H)} \\
 &= C_{N_H}^k \cdot [F_{X^*}(\Theta|y_H)]^{N_H-k} \cdot \prod_{m=1}^k [F_{X^*}(\Theta|y_{U_m}) - F_{X^*}(\Theta|y_{L_m})] \quad (3.39)
 \end{aligned}$$

La fonction de vraisemblance a pour expression :

$$L_{ic} = C_{N_H}^k \cdot [F_{X^*}(\Theta|y_H)]^{N_H-k} \cdot \prod_{m=1}^k [F_{X^*}(\Theta|y_{U_m}) - F_{X^*}(\Theta|y_{L_m})] \quad (3.40)$$

L'expression (3.40) qui est relative à une information qualifiée de censurée dans un intervalle (*interval censored*) a été présentée par Sutcliffe (1987) et Ouarda et al. (1997). Les estimateurs (paramètres estimés $\hat{\Theta}$) obtenus à partir de cette fonction de vraisemblance seront notés MLE_{ic} .

3.3.1.4 Intensité des plus fortes crues connues (MLE_{mf})

On connaît les k plus fortes crues $y_1 \geq y_2 \geq \dots \geq y_k$ sur une période de N_H années, k étant un nombre fixé. Il s'agit d'un modèle avec une *troncature de type II* (cf. figure 2.9c, p. 44). La fonction de densité jointe des variables aléatoires ordonnées $Y_1^* \geq Y_2^* \geq \dots \geq Y_k^*$ est donnée par l'expression suivante (Francés, 2001) :

$$\begin{aligned}
 f_{Y^*}(y|\Theta) &= \lim_{\Delta y \rightarrow 0} \frac{1}{\Delta y} \Pr \left[\begin{aligned} &\{y_1 < Y^* \leq y_1 + \Delta y\} \cap \\ &\{y_2 < Y^* \leq y_2 + \Delta y\} \cap \\ &\dots \\ &\{y_k < Y^* \leq y_k + \Delta y\} \cap \\ &\{(N_H - k) \text{ valeurs } Y^* < y_k\} \end{aligned} \right]
 \end{aligned}$$

En utilisant une distribution multinomiale et en prenant les limites, la fonction du maximum de vraisemblance s'écrit (Condie et Lee, 1982 ; Condie, 1986 ; Phien et Fang, 1989 ; Francés, 2000) :

$$L_{mf} = A_{N_H}^k \cdot [F_{X^*}(\Theta|y_k)]^{N_H-k} \cdot \prod_{m=1}^k f_{X^*}(\Theta|y_m) \quad (3.41)$$

L'expression (3.41) est relative à une information sur les crues maximales (*maximum flood*). $A_{N_H}^k = \frac{N_H!}{(N_H-k)!}$ est le nombre de possibilités de ranger les k crues choisies parmi N_H . Les estimateurs (paramètres estimés $\hat{\Theta}$) obtenus à partir de cette fonction de vraisemblance seront notés MLE_{mf} .

3.3.1.5 Généralisation (MLE_G)

On se propose dans cette partie de montrer que les formulations développées par les différents auteurs et exposées ci-avant peuvent être synthétisées dans un cadre unique, à la fois plus simple et plus universel.

Il est envisageable, en premier lieu, de supprimer tous les termes constants des fonctions de vraisemblance L_{bc} , L_c , L_{ic} et L_{mf} qui, bien que reflétant l'interprétation théorique de la nature des données disponibles, disparaissent quoi qu'il en soit lors de la maximisation. Il est également intéressant de se donner la possibilité de prendre en compte différents seuils y_{Hj} ou différents intervalles $[y_{Lj}; y_{Uj}]$ aux cours de τ périodes de N_{Hj} années chacune ($j = 1$ à τ), avec k_j crues $> y_{Hj}$ et $\sum_{j=1}^{\tau} N_{Hj} = N_H$:

i) *Intensité des crues non connue, censure de type binomiale.*

L'expression (3.34) de la fonction de vraisemblance L_{bc} devient pour l'ensemble des périodes :

$$L_{bc} = \prod_{j=1}^{\tau} [1 - F_{X^*}(\Theta|y_{Hj})]^{k_j} \cdot [F_{X^*}(\Theta|y_{Hj})]^{N_{Hj}-k_j} \quad (3.42)$$

Soit le logarithme :

$$LL_{bc} = \sum_{j=1}^{\tau} \{k_j \ln [1 - F_{X^*}(\Theta|y_{Hj})] + (N_{Hj} - k_j) \ln [F_{X^*}(\Theta|y_{Hj})]\} \quad (3.43)$$

Si l'on ne considère que des périodes successives de un an ($N_{Hj} = 1$), alors $k_j = 1$ ou 0 dans le cas où respectivement la crue de l'année j est supérieure ou non au seuil y_{Hj} . On a ainsi sur l'ensemble de la période historique :

- $N_H^>$ années où la crue maximale est supérieure à y_{Hj} , noté dans ce cas y_{Lj} (*Lower bound*);
- $N_H^<$ années où la crue maximale est inférieure à y_{Hj} , noté dans ce cas y_{Uj} (*Upper bound*).

L'expression (3.43) du logarithme de la fonction de vraisemblance peut alors s'écrire :

$$LL_{bc} = \sum_{j=1}^{N_H^>} \ln [1 - F_{X^*}(\Theta|y_{Lj})] + \sum_{j=1}^{N_H^<} \ln [F_{X^*}(\Theta|y_{Uj})] \quad (3.44)$$

ii) *Intensité des crues connue au-dessus d'un seuil fixé.*

L'expression (3.37) de la fonction de vraisemblance L_c devient pour l'ensemble des périodes :

$$L_c = \prod_{j=1}^{\tau} \left\{ [F_{X^*}(\Theta|y_{Hj})]^{N_{Hj}-k_j} \cdot \prod_{m=1}^{k_j} f_{X^*}(\Theta|y_{m,j}) \right\} \quad (3.45)$$

Soit le logarithme :

$$LL_c = \sum_{j=1}^{\tau} (N_{Hj} - k_j) \ln [F_{X^*}(\Theta|y_{Hj})] + \sum_{j=1}^{\tau} \sum_{m=1}^{k_j} \ln [f_{X^*}(\Theta|y_{m,j})] \quad (3.46)$$

Si l'on ne considère que des périodes successives de un an ($N_{Hj} = 1$), alors $k_j = 1$ ou 0 dans le cas où respectivement la crue de l'année j est supérieure ou non au seuil y_{Hj} . On a ainsi sur l'ensemble de la période historique :

- $N_H^<$ années où la crue maximale est inférieure à y_{Hj} , noté dans ce cas y_{Uj} (*Upper bound*);
- $N_H^\bullet = \sum_{j=1}^{\tau} k_j$ années où la crue maximale est d'intensité connue y_j supérieure au seuil.

L'expression (3.46) du logarithme de la fonction de vraisemblance peut alors s'écrire :

$$LL_c = \sum_{j=1}^{N_H^<} \ln [F_{X^*}(\Theta|y_{Uj})] + \sum_{j=1}^{N_H^\bullet} \ln [f_{X^*}(\Theta|y_j)] \quad (3.47)$$

iii) *Intensité des crues située dans un intervalle de censure au-dessus d'un seuil fixé.*

L'expression (3.40) de la fonction de vraisemblance L_{ic} devient pour l'ensemble des périodes :

$$L_{ic} = \prod_{j=1}^{\tau} \left\{ [F_{X^*}(\Theta|y_{Hj})]^{N_{Hj}-k_j} \cdot \prod_{m=1}^{k_j} [F_{X^*}(\Theta|y_{Um,j}) - F_{X^*}(\Theta|y_{Lm,j})] \right\} \quad (3.48)$$

Soit le logarithme :

$$\begin{aligned} LL_{ic} &= \sum_{j=1}^{\tau} (N_{Hj} - k_j) \ln [F_{X^*}(\Theta|y_{Hj})] \\ &+ \sum_{j=1}^{\tau} \sum_{m=1}^{k_j} \ln [F_{X^*}(\Theta|y_{Um,j}) - F_{X^*}(\Theta|y_{Lm,j})] \end{aligned} \quad (3.49)$$

Si l'on ne considère que des périodes successives de un an ($N_{Hj} = 1$), alors $k_j = 1$ ou 0 dans le cas où respectivement la crue de l'année j est supérieure ou non au seuil y_{Hj} . On a ainsi sur l'ensemble de la période historique :

- $N_H^<$ années où la crue maximale est inférieure à y_{Hj} , noté dans ce cas y_{Uj} (*Upper bound*);
- $N_H^{<>}$ année où la crue maximale est d'intensité située dans l'intervalle $[y_{Lj}; y_{Uj}]$.

L'expression (3.49) du logarithme de la fonction de vraisemblance peut alors s'écrire :

$$LL_{ic} = \sum_{j=1}^{N_H^<} \ln [F_{X^*}(\Theta|y_{Uj})] + \sum_{j=1}^{N_H^{<>}} \ln [F_{X^*}(\Theta|y_{Uj}) - F_{X^*}(\Theta|y_{Lj})] \quad (3.50)$$

iv) *Intensité des plus fortes crues connues.*

De la même manière l'expression (3.41) de L_{mf} devient en prenant en compte différentes périodes :

$$L_{mf} = \prod_{j=1}^{\tau} \left\{ [F_{X^*}(\Theta|y_{kj})]^{N_{Hj}-k_j} \cdot \prod_{m=1}^{k_j} f_{X^*}(\Theta|y_{m,j}) \right\} \quad (3.51)$$

Soit le logarithme :

$$LL_{mf} = \sum_{j=1}^{\tau} (N_{Hj} - k_j) \ln [F_{X^*}(\Theta|y_{kj})] + \sum_{j=1}^{\tau} \sum_{m=1}^{k_j} \ln [f_{X^*}(\Theta|y_{m,j})] \quad (3.52)$$

Si l'on ne considère que des périodes successives de une année et que le seuil est pris tel que $y_{kj} = y_{Hj} = y_{Uj}$, alors on retrouve l'expression (3.47) :

$$LL_{mf} = \sum_{j=1}^{N_H^{\leq}} \ln [F_{X^*}(\Theta|y_{Uj})] + \sum_{j=1}^{N_H^{\bullet}} \ln [f_{X^*}(\Theta|y_j)] \quad (3.53)$$

Finalement, on remarque que les différentes expressions du logarithme de la fonction de vraisemblance (3.44), (3.47), (3.50) et (3.53) sont des compositions de fonctions élémentaires. Pour le cas général présenté en figure (3.2), p. 64, le logarithme de la fonction de vraisemblance est obtenu en traitant :

i) *l'information non censurée : les années où l'intensité des crues est connue.*

$$LL_H^{\bullet} = \sum_{j=1}^{N_H^{\bullet}} \ln [f_{X^*}(\Theta|y_j)] \quad \text{Période historique} \quad (3.54)$$

$$LL_S^{\bullet} = \sum_{i=1}^{N_S^{\bullet}} \ln [f_{X^*}(\Theta|x_i)] \quad \text{Période systématique} \quad (3.55)$$

ii) *l'information censurée : les années où l'intensité des crues n'est pas connue.*

a) Crue située dans un intervalle :

$$LL_H^{\langle \rangle} = \sum_{j=1}^{N_H^{\langle \rangle}} \ln [F_{X^*}(\Theta|y_{Uj}) - F_{X^*}(\Theta|y_{Lj})] \quad \text{Période hist.} \quad (3.56)$$

$$LL_S^{\langle \rangle} = \sum_{i=1}^{N_S^{\langle \rangle}} \ln [F_{X^*}(\Theta|x_{Ui}) - F_{X^*}(\Theta|x_{Li})] \quad \text{Période syst.} \quad (3.57)$$

b) Crue supérieure à un seuil :

$$LL_H^{\rangle} = \sum_{j=1}^{N_H^{\rangle}} \ln [1 - F_{X^*}(\Theta|y_{Lj})] \quad \text{Période historique} \quad (3.58)$$

$$LL_S^{\rangle} = \sum_{i=1}^{N_S^{\rangle}} \ln [1 - F_{X^*}(\Theta|x_{Li})] \quad \text{Période systématique} \quad (3.59)$$

c) Crue inférieure à un seuil :

$$LL_H^{\leq} = \sum_{j=1}^{N_H^{\leq}} \ln [F_{X^*}(\Theta|y_{Uj})] \quad \text{Période historique} \quad (3.60)$$

$$LL_S^{\leq} = \sum_{i=1}^{N_S^{\leq}} \ln [F_{X^*}(\Theta|x_{Ui})] \quad \text{Période systématique} \quad (3.61)$$

Le logarithme de la fonction de vraisemblance pour la totalité de l'échantillon s'obtient en considérant l'ensemble des types d'information présents :

$$LL_{TOT} = \underbrace{LL_H^\bullet}_{\text{Non censuré}} + \underbrace{LL_H^{<>} + LL_H^> + LL_H^<}_{\text{Censuré}} \} \text{ Historique} \quad (3.62)$$

$$+ \underbrace{LL_S^\bullet}_{\text{Non censuré}} + \underbrace{LL_S^{<>} + LL_S^> + LL_S^<}_{\text{Censuré}} \} \text{ Systématique}$$

Nous reviendrons en conclusion sur les problèmes de l'utilisation de l'information censurée dans un intervalle ($LL_S^{<>}$ et $LL_H^{<>}$).

3.3.2 Méthode des moments pondérés historiquement (HWM)

Le bulletin 17 de l'United States Water Resources Council (1976) et sa version révisée (Interagency Advisory Committee On Water Data, 1982) présentent la méthode des moments pondérés historiquement (*Historically Weighted Moments* - HWM), également appelée méthode des moments ajustés (Ouarda et al., 1998). Elle repose sur le même principe que la méthode classique des moments (cf. §3.2.2, p. 58), à savoir poser l'égalité entre les moments empiriques de l'échantillon et ceux théoriques de la distribution sélectionnée. Cette méthode, comme le soulignent Cohn et al. (1997), a été conçue pour prendre en compte (a) les horsains (*outlier*), c'est à dire les valeurs singulières de débits de crues qui apparaissent exceptionnellement élevées au sein d'une chronique relativement courte d'enregistrements systématiques, (b) le fait qu'il peut souvent être établi que des crues historiques et/ou les crues maximales de la période récente, sont les plus forts événements ayant eu lieu au cours d'une période historique plus longue que celle des observations systématiques. D'après ces mêmes auteurs qui se réfèrent à une communication orale de W.H. Kirby, la méthode HWM a été élaborée avec l'objectif initial de rendre l'estimation des quantiles compatible avec « l'expérience commune » dans de tels cas.

La méthode des moments pondérés historiquement utilise l'information systématique et historique traitée de façon à constituer une série de débits maxima annuels. L'information historique est exploitée afin de définir une période historiquement étendue N , composée des N_H années de la période historique et des N_S années d'enregistrements systématiques.

La démarche repose sur un partage des échantillons X^* et Y^* par rapport à un seuil de perception y_U . La méthode HWM, telle qu'elle est présentée dans le bulletin 17, ne permet pas d'envisager le cas où les débits systématiques sont également censurés ($N_S^{<>} = 0$, $N_S^< = 0$, $N_S^> = 0$). Les débits historiques peuvent être soit d'intensité connue ($y_1 \geq \dots \geq y_j \geq \dots \geq y_{N_H}^\bullet$), soit inférieurs au seuil y_U . Contrairement au cas général de la figure (3.2), ce dernier est unique au cours du temps :

$$y_{Uj} = y_U \quad \forall j : 1 \text{ à } N_H^<$$

La valeur y_U est la plus faible valeur des crues historiques connues, de façon à ce que, sur la période des N_H années, l'échantillon des crues y_j soit exhaustif (cf. figure 3.3).

Nous présentons la méthode qui permet de calculer la moyenne, la variance et le coefficient d'asymétrie (notés respectivement \tilde{m} , \tilde{s}^2 et \tilde{C}_s) empiriques sur la période globale (historique et systématique). L'ensemble $\hat{\Theta}$ des paramètres estimés est ensuite obtenu de la même manière que la méthode des moments classique, comme précisé ci-avant, en

résolvant le système d'équations obtenu en posant l'égalité entre les moments empiriques et les moments théoriques de la distribution sélectionnée.

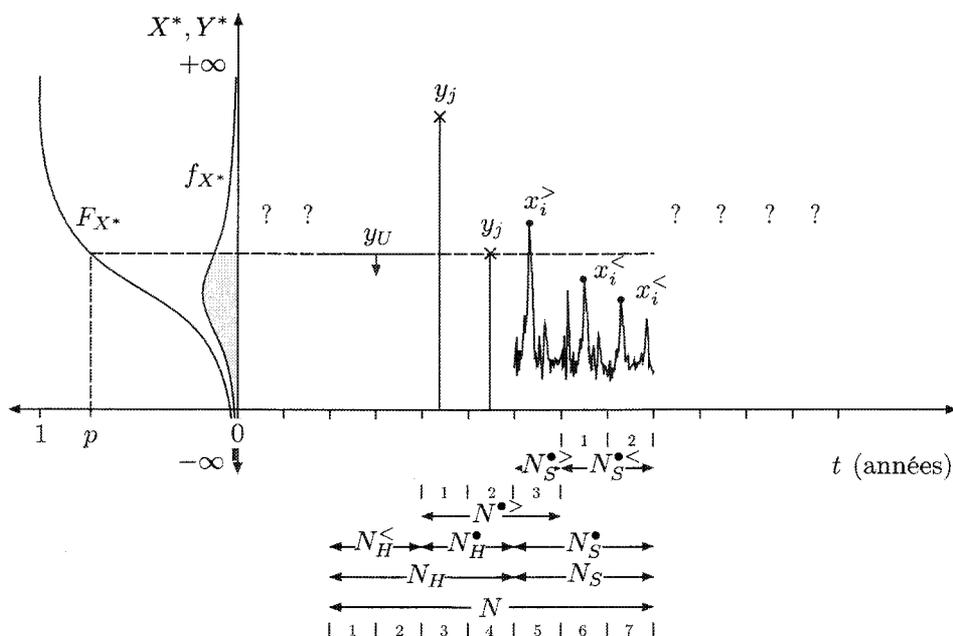


FIG. 3.3 – Schéma de principe de la méthode HWM

Kirby (1981) a développé les bases théoriques de cette méthode. Les crues de la période systématique sont :

- soit supérieures au seuil de perception y_U et notées $x_i^>$ (nombre de valeurs $N_S^{\bullet>}$),
- soit inférieures au seuil de perception y_U et notées $x_i^<$ (nombre de valeurs $N_S^{\bullet<}$).

On dénombre :

- toutes les crues supérieures au seuil de perception y_U , sur la période historique et systématique $N^{\bullet>} = N_H^{\bullet>} + N_S^{\bullet>}$,
- toutes les crues inférieures au seuil de perception y_U , sur la période systématique $N^{\bullet<} = N_S^{\bullet<}$.

On note p la probabilité au non-dépassement du seuil y_U :

$$\Pr[X^* < y_U] = \Pr[Y^* < y_U] = p$$

Par ailleurs, la probabilité empirique au dépassement de toutes les crues supérieures au seuil est $\frac{N^{\bullet>}}{N}$. Ainsi la probabilité p sera estimée par la valeur $\hat{p} = 1 - \frac{N^{\bullet>}}{N}$.

On calcule ensuite la moyenne de toutes les crues d'intensité connue :

- supérieures au seuil y_U (période historique et systématique) :

$$m_{\bullet>} = \frac{1}{N^{\bullet>}} \left(\sum_{j=1}^{N_H^{\bullet>}} y_j + \sum_{i=1}^{N_S^{\bullet>}} x_i^> \right) \quad (3.63)$$

– inférieures au seuil y_U (période systématique seulement) :

$$m_{\bullet <} = \frac{1}{N_S^{\bullet <}} \left(\sum_{i=1}^{N_S^{\bullet <}} x_i^{\bullet <} \right) \quad (3.64)$$

La moyenne empirique sur l'échantillon global, appelée moyenne pondérée historiquement et notée \tilde{m} , est obtenue en pondérant les deux moyennes obtenues précédemment ($m_{\bullet >}$ et $m_{\bullet <}$) par leur probabilité d'occurrence :

$$\begin{aligned} \tilde{m} &= \hat{p} \cdot m_{\bullet <} + (1 - \hat{p}) \cdot m_{\bullet >} \\ \tilde{m} &= \frac{1}{N} \left(\frac{N - N^{\bullet >}}{N_S^{\bullet <}} \sum_{i=1}^{N_S^{\bullet <}} x_i^{\bullet <} + \sum_{j=1}^{N_H^{\bullet >}} y_j + \sum_{i=1}^{N_S^{\bullet >}} x_i^{\bullet >} \right) \\ \tilde{m} &= \frac{1}{N} \left(W \sum_{i=1}^{N_S^{\bullet <}} x_i^{\bullet <} + \sum_{i=1}^{N_S^{\bullet >}} x_i^{\bullet >} + \sum_{j=1}^{N_H^{\bullet >}} y_j \right) \end{aligned} \quad (3.65)$$

avec le facteur de pondération $W = \frac{N - N^{\bullet >}}{N_S^{\bullet <}} > 1$

Ainsi, les crues de la période systématique qui dépassent le seuil sont traitées de la même manière que les crues historiques. On attribue dans l'expression (3.65) :

- un facteur de pondération W aux $N_S^{\bullet <}$ débits maxima annuels $x_i^{\bullet <}$ de la période d'enregistrement continu pour les sur-représenter artificiellement et combler les $N_H^{\bullet <}$ années tronquées,
- un facteur de pondération de 1 aux $N^{\bullet >}$ événements supérieurs au seuil de perception.

L'hypothèse sous-jacente est que les crues connues inférieures au seuil, et au-delà leur moments empiriques, sont représentatives des crues censurées de la période historique. Sur l'exemple de la figure (3.3), p. 72, on a :

$$\begin{aligned} N = 7, \quad N^{\bullet >} = 3, \quad N_S^{\bullet <} = 2, \text{ soit :} \\ W = \frac{7 - 3}{2} = 2 \end{aligned}$$

On va donc sur-représenter $W = 2$ fois la somme des débits des crues systématiques inférieures au seuil pour venir combler les $N_H^{\bullet <} = 2$ années historiques censurées.

Des arguments identiques à ceux énoncés pour la justification de la moyenne \tilde{m} conduisent aux moments d'ordre supérieur. Les expressions débiaisées de la variance et du coefficient d'asymétrie historiquement pondérés sont données par :

$$\tilde{s}^2 = \frac{1}{N - 1} \left[W \sum_{i=1}^{N_S^{\bullet <}} (x_i^{\bullet <} - \tilde{m})^2 + \sum_{i=1}^{N_S^{\bullet >}} (x_i^{\bullet >} - \tilde{m})^2 + \sum_{j=1}^{N_H^{\bullet >}} (y_j - \tilde{m})^2 \right] \quad (3.66)$$

$$\tilde{C}_s = \frac{N}{\tilde{s}^3 (N-1)(N-2)} \left[W \sum_{i=1}^{N_s^{<}} (x_i^{<} - \tilde{m})^3 + \sum_{i=1}^{N_s^{>}} (x_i^{>} - \tilde{m})^3 + \sum_{j=1}^{N_H} (y_j - \tilde{m})^3 \right] \quad (3.67)$$

Le Bulletin 17B (Interagency Advisory Committee On Water Data, 1982) recommande d'utiliser la méthode HWM avec la loi log Pearson Type III (LP3) ajustée par la méthode indirecte des moments (MIM), c'est à dire d'estimer les paramètres d'une loi Pearson type III, par la méthode des moments, sur l'échantillon constitué du logarithme des observations. Des valeurs tabulées sont également fournies pour calculer la *variance asymptotique* des quantiles de la loi LP3. On note cependant que seules les incertitudes sur la moyenne et la variance dues à l'erreur d'échantillonnage sont prises en compte dans le développement limité. Les erreurs sur le coefficient d'asymétrie n'interviennent pas, alors qu'elles peuvent être importantes (Chowdhury et Stedinger, 1991). On remarquera également que la méthode directe des moments (MDM, Bobée et Ashkar, 1991) est préférable pour la loi LP3 puisqu'elle conserve les moments du débit qui suit la loi LP alors que la méthode MIM conserve les moments du log du débit qui suit la loi P et non les moments des observations, ce qui n'est pas équivalent en terme d'estimation des paramètres pour la méthode des moments.

La méthode HWM a été reprise pour d'autres distributions :

- loi LP3, par Tasker et Thomas (1978), Cohn et al. (1997) ;
- loi LN3 (log Normale à 3 paramètres), par Condie et Lee (1982) ainsi que Cohn et Stedinger (1987) ;
- loi LN2 (log Normale à 2 paramètres), par Cohn (1984, 1986) et Stedinger et Cohn (1986) ;
- loi EV1 (Gumbel), par Guo et Cunnane (1991).

3.3.3 Méthodes des moments partiels de probabilité pondérés (PPWM)

Wang (1990a) présente le concept des moments partiels de probabilité pondérés (*Partial Probability Weighted Moment* : PPWM). Il s'agit d'une adaptation à un échantillon censuré de la méthode des moments de probabilité pondérés (PWM, cf. §3.2.3).

On définit une nouvelle variable Z^* qui correspond aux crues maximales annuelles sur l'ensemble des deux périodes (historique et systématique). Comme pour la méthode HWM, la méthode PPWM raisonne sur les crues supérieures et inférieures à un seuil de perception unique au cours du temps, dans ce cas noté z_U , les crues systématiques ne peuvent également pas être censurées. Wang (1990b) propose de scinder les PWM en deux PPWM tels que :

$$\beta_r = \int_0^1 z(F_{Z^*}) \cdot F_{Z^*}^r \cdot dF_{Z^*} \quad (3.68)$$

$$= \beta_r'' + \beta_r' \quad (3.69)$$

avec :

$$\beta_r'' = \int_0^{F_{Z^*}(z_U)} z(F_{Z^*}) \cdot F_{Z^*}^r \cdot dF_{Z^*} \tag{3.70}$$

$$\beta_r' = \int_{F_{Z^*}(z_U)}^1 z(F_{Z^*}) \cdot F_{Z^*}^r \cdot dF_{Z^*} \tag{3.71}$$

On utilise toujours la même notation (cf. figure 3.4), à savoir :

- N : le nombre total d'années (période systématique et historique),
- N_S : le nombre total d'années de la période systématique,
- $N_S^{\bullet <}$: le nombre d'années de la période systématique où la crue est inférieure au seuil z_U ,
- $N^{\bullet >}$: le nombre total d'années (période systématique et historique) où la crue est supérieure au seuil z_U .

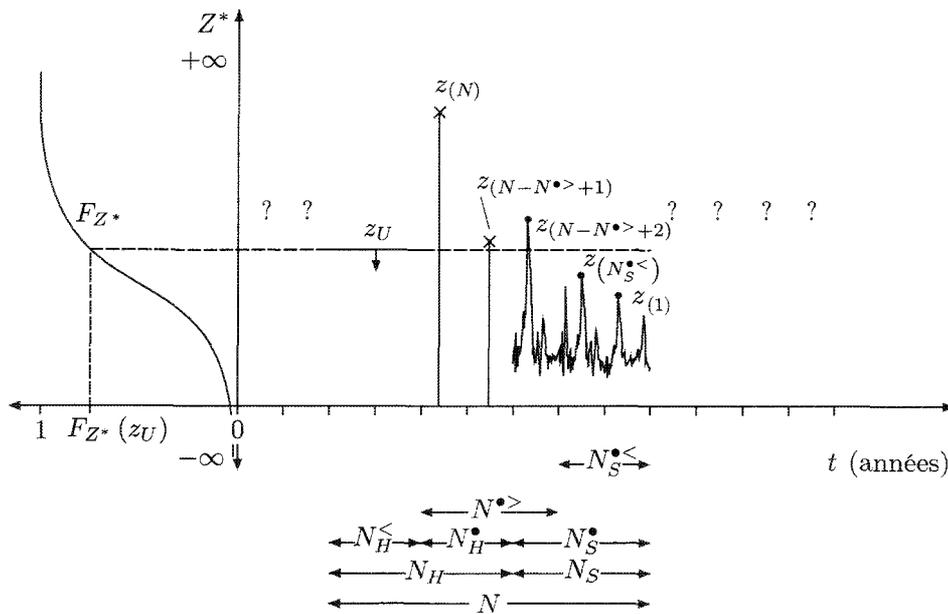


FIG. 3.4 – Schéma de principe de la méthode PPWM

Si on classe l'échantillon complet par ordre croissant :

$$z_{(1)} \leq z_{(2)} \leq \dots \leq z_{(N_S^{\bullet <})} \leq z_U < z_{(N-N^{\bullet >}+1)} \leq z_{(N-N^{\bullet >}+2)} \leq \dots \leq z_{(N)}$$

i) alors la statistique suivante est un estimateur non biaisé du moment partiel de probabilité pondéré β_r'' (Wang, 1990a, démonstration en annexe p. 111) :

$$b_r'' = \frac{1}{N_S} \sum_{i=1}^{N_S^{\bullet <}} \frac{(i-1)(i-2)\dots(i-r)}{(N_S-1)(N_S-2)\dots(N_S-r)} z_{(i)} \tag{3.72}$$

ii) et un estimateur non biaisé de β'_r est donné par :

$$b'_r = \frac{1}{N} \sum_{j=N-N^{\bullet} > +1}^N \frac{(j-1)(j-2)\dots(j-r)}{(N-1)(N-2)\dots(N-r)} z^{(j)} \quad (3.73)$$

Enfin, puisque b'_r et b''_r sont des estimateurs non biaisés respectivement de β'_r et β''_r ,

$$b_r = b'_r + b''_r \quad (3.74)$$

est un estimateur non biaisé de β_r .

L'ensemble $\hat{\Theta}$ des paramètres estimés est obtenu de la même manière que par la méthode des moments classique, en résolvant le système d'équations formé en posant l'égalité entre ces moments empiriques b_r et les expressions des moments théoriques β_r calculées à partir d'une distribution particulière.

On remarquera que le dénominateur de l'expression (3.72) fait intervenir N_S alors que la sommation est effectuée sur $N_S^{\bullet <}$. En d'autres termes, comme pour la méthode HWM (cf. §3.3.2, p. 71), cela revient à considérer que l'estimateur b''_r est représentatif de l'ensemble des crues inférieures au seuil z_U alors qu'il n'est effectivement déterminé qu'à partir des crues *systématiques* inférieures au seuil.

Wang (1990a, 1990b) a développé cette méthode pour la loi GEV. Kroll (1996) compare la méthode PPWM aux autres avec une loi LN2 ($X^* \sim \mathcal{N}$ avec $X^* = \ln(Q^*)$).

Remarque 3.5 *Comme nous l'avons rappelé au §3.2.4, p. 60, la méthode des L-moments dérive de celle des PWM. A titre d'information on précise que Hosking (1995) présente deux variantes des L-moments, la première qu'il nomme « A-type » pour l'information non censurée et la seconde « B-type » pour l'information censurée. D'après l'auteur, cette dernière peut être compétitive vis à vis de la méthode du maximum de vraisemblance avec information censurée pour les distributions EV1 et GEV. Zafirakou-Koulouris et al. (1998) présentent également une adaptation du diagramme des L-moments pour l'information censurée.*

3.3.4 Méthode de l'algorithme des moments espérés (EMA)

Lane et Cohn (1996) et Cohn et al. (1997) présentent le principe de la méthode de l'algorithme des moments espérés (*Expected Moment Algorithm* : EMA). Comme son nom l'indique, cette méthode repose sur le même principe d'estimation des paramètres que la méthode des moments (MO), à savoir poser l'égalité entre les moments théoriques et les moments empiriques. Il s'agit d'estimer les moments des débits non enregistrés comme les moments espérés d'une forme tronquée de la fonction de densité de probabilité. Aussi puisqu'au départ les paramètres de cette distribution sont inconnus, la démarche est itérative. Les observations systématiques et historiques, contrairement à la méthode HWM, sont utilisées de la même manière, c.-à-d. avec un poids égal. Le traitement des débits maxima annuels manquant se fait suivant une technique qui reconnaît explicitement que ces derniers représentent des valeurs tronquées, comprises dans un intervalle (*troncature de type I*, cf. figure 2.9b, p. 44).

On s'intéresse en premier lieu à la détermination des moments espérés des débits censurés. La probabilité conditionnelle d'observer une crue historique l'année j , sachant

que l'on se trouve dans le domaine censuré des débits $-\infty \leq y_{Lj} < Y^* < y_{Uj} \leq \infty$, s'exprime par :

$$\Pr \{ \{y < Y^* \leq y + dy\} \mid \{y_{Lj} < Y^* < y_{Uj}\} \} = \frac{\Pr \{ \{y < Y^* \leq y + dy\} \cap \{y_{Lj} < Y^* < y_{Uj}\} \}}{\Pr \{y_{Lj} < Y^* < y_{Uj}\}}$$

or comme on ne s'intéresse qu'aux débits censurés, on a par nature $y_{Lj} < Y^* < y_{Uj}$, donc :

$$\Pr \{ \{y < Y^* \leq y + dy\} \cap \{y_{Lj} < Y^* < y_{Uj}\} \} = \Pr \{y < Y^* \leq y + dy\}$$

D'où, en faisant l'hypothèse que les débits maxima annuels des crues historiques et systématiques suivent la même fonction de probabilité $f_{X^*}(\cdot)$:

$$\Pr \{ \{y < Y^* \leq y + dy\} \mid \{y_{Lj} < Y^* < y_{Uj}\} \} = \frac{f_{X^*}(y|\Theta)}{F_{X^*}(y_{Uj}|\Theta) - F_{X^*}(y_{Lj}|\Theta)} dy \quad (3.75)$$

$$\text{avec : } F_{X^*}(y_{Uj}|\Theta) - F_{X^*}(y_{Lj}|\Theta) = \int_{y_{Lj}}^{y_{Uj}} f_{X^*}(y|\Theta) dy$$

Les moments théoriques non centrés de la variable censurée Y^* appartenant à l'intervalle $[y_{Lj}; y_{Uj}]$ peuvent alors être calculés à partir de l'expression (3.75) comme pour la détermination des moments théoriques classiques. On retrouve les trois cas de figure de l'information censurée présentés pour la méthode du maximum de vraisemblance, soit pour les **crues historiques** censurées :

i) *intensité de la crue comprise dans un intervalle $[y_{Lj}; y_{Uj}]$.*

$$\mu_{H,r,j}^{<>} = \frac{1}{F_{X^*}(y_{Uj}|\Theta) - F_{X^*}(y_{Lj}|\Theta)} \int_{y_{Lj}}^{y_{Uj}} y^r f_{X^*}(y|\Theta) dy \quad (3.76)$$

ii) *intensité de la crue supérieure à un seuil y_{Lj} .*

Dans ce cas la borne supérieure de l'intervalle, y_{Uj} , correspond à la limite supérieure du domaine de définition de la fonction de densité de probabilité f_{X^*} . L'expression (3.76) devient :

$$\mu_{H,r,j}^{>} = \frac{1}{1 - F_{X^*}(y_{Lj}|\Theta)} \int_{y_{Lj}}^{+\infty} y^r f_{X^*}(y|\Theta) dy \quad (3.77)$$

iii) *intensité de la crue inférieure à un seuil y_{Uj} .*

Dans ce cas la borne inférieure de l'intervalle, y_{Lj} , correspond à la limite inférieure du domaine de définition de la fonction de densité de probabilité f_{X^*} . L'expression (3.76) devient :

$$\mu_{H,r,j}^{<} = \frac{1}{F_{X^*}(y_{Uj}|\Theta)} \int_{-\infty}^{y_{Uj}} y^r f_{X^*}(y|\Theta) dy \quad (3.78)$$

De la même manière, on obtient les moments non centrés des **crues systématiques** qui peuvent également être censurées (cf. figure 3.2) :

i) *intensité de la crue comprise dans un intervalle $[x_{Lj}; x_{Uj}]$.*

$$\mu_{S,r,i}^{<>} = \frac{1}{F_{X^*}(x_{Uj}|\Theta) - F_{X^*}(x_{Lj}|\Theta)} \int_{x_{Lj}}^{x_{Uj}} x^r f_{X^*}(x|\Theta) dx \quad (3.79)$$

ii) intensité de la crue supérieure à un seuil x_{Lj} .

$$\mu_{S,r,i}^{>} = \frac{1}{1 - F_{X^*}(x_{Li}|\Theta)} \int_{x_{Li}}^{+\infty} x^r f_{X^*}(x|\Theta) dx \quad (3.80)$$

iii) intensité de la crue inférieure à un seuil x_{Uj} .

$$\mu_{S,r,i}^{<} = \frac{1}{F_{X^*}(x_{Ui}|\Theta)} \int_{-\infty}^{x_{Ui}} x^r f_{X^*}(x|\Theta) dx \quad (3.81)$$

Finalement, le calcul des moments empiriques non centrés d'ordre r de l'échantillon total, notés \check{m}'_r , s'obtient à partir :

- i) des sommes des N_S^\bullet et N_H^\bullet données connues (x_i et y_j) comme pour le calcul classique des moments empiriques d'un échantillon non censuré ;
- ii) des sommes des $N_S^{<>}$, $N_S^{>}$, $N_S^{<}$ valeurs espérées $\mu_{S,r,i}^{<>}$, $\mu_{S,r,i}^{>}$, $\mu_{S,r,i}^{<}$ de la période systématique et des $N_H^{<>}$, $N_H^{>}$, $N_H^{<}$ valeurs espérées $\mu_{H,r,j}^{<>}$, $\mu_{H,r,j}^{>}$, $\mu_{H,r,j}^{<}$ de la période historique.

Soit :

$$\check{m}'_r = \frac{1}{N} \left(\sum_{i=1}^{N_S^\bullet} x_i^r + \sum_{i=1}^{N_S^{<>}} \mu_{S,r,i}^{<>} + \sum_{i=1}^{N_S^{>}} \mu_{S,r,i}^{>} + \sum_{i=1}^{N_S^{<}} \mu_{S,r,i}^{<} \right. \\ \left. + \sum_{j=1}^{N_H^\bullet} y_j^r + \sum_{j=1}^{N_H^{<>}} \mu_{H,r,j}^{<>} + \sum_{j=1}^{N_H^{>}} \mu_{H,r,j}^{>} + \sum_{j=1}^{N_H^{<}} \mu_{H,r,j}^{<} \right) \quad (3.82)$$

Cette expression comporte quelques modifications par rapport à celle présentée par Cohn et al. (1997). Elle permet de prendre en compte d'une part tous les types d'informations relatives aux crues présentés à la figure (3.2) et d'autre part des intervalles de censure variables au cours du temps. Ce dernier point a également été rajouté dans une publication récente de Cohn et al. (2001), où la variance asymptotique des quantiles est estimée à partir d'un développement en série du premier ordre de l'expression (3.82). Par souci d'homogénéité avec les formulations proposées par certains pour le maximum de vraisemblance nous avons ajouté le cas de l'information censurée dans un intervalle ($N_S^{<>}$ et $N_H^{<>}$). L'utilisation de ce cas pour représenter les incertitudes de mesure des débits est discutable, nous reviendrons sur ce problème au §3.8, p. 97.

Etant donné que l'expression de \check{m}'_r (3.82) est fonction de l'ensemble Θ des paramètres que l'on cherche à estimer, la méthode va se présenter suivant une démarche itérative illustrée par la figure (3.5).

Lane et Cohn (1996) ont présenté le cadre théorique de la méthode EMA avec un exemple pour une loi normale ajustée au logarithme des débits, Cohn et al. (1997) et Cohn et al. (2001) ont quant à eux adaptés la méthode à la loi log Pearson Type III (LP3). Nous avons pour notre part développé la méthode pour les lois EV1 et GEV (présentées en annexe §B).

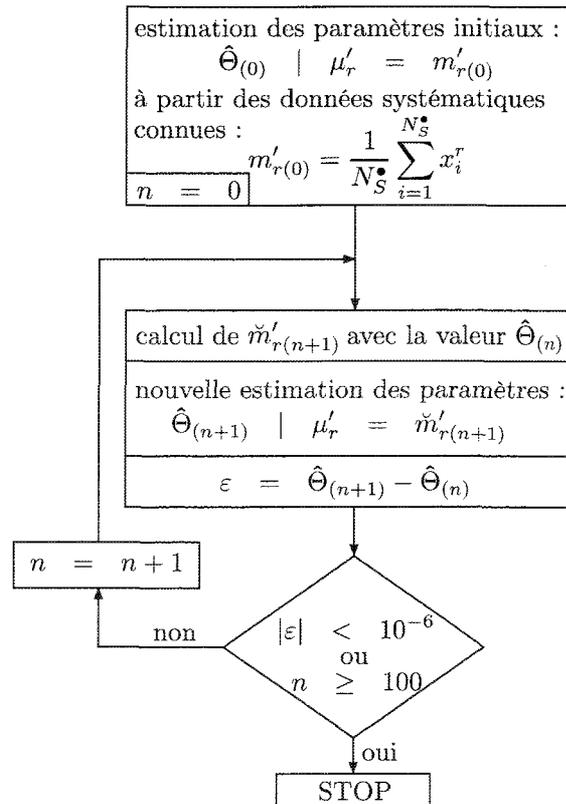


FIG. 3.5 – Schéma de l'algorithme des moments espérés

3.4 Rappel du modèle de dépassement

3.4.1 Principe général

Le principe général du *modèle de dépassement* (*Peaks Over Threshold* model : POT ou *Partial Duration series model* : PD) est de s'intéresser non plus aux débits maximum de chaque année (AM : *Annual Maximum*) mais aux événements dont le maximum a dépassé un certain seuil d'échantillonnage x_s (cf. figure 2.9, p. 44). On va alors s'intéresser à deux aspects :

- le premier va chercher à caractériser le *processus d'occurrence* des crues, c'est à dire celui des dates d'apparition des événements supérieurs au seuil. Il s'agit de la théorie dite du *renouvellement*.
- le second caractérise la distribution des maximum des événements supérieurs au seuil, c'est à dire de la variable aléatoire notée X_s .

3.4.1.1 Méthode du renouvellement

Les premières applications du modèle du renouvellement dans le domaine de l'hydrologie sont à mettre à l'actif de Borgman (1963), Shane et Lynn (1964) et Bernier (1967). La *méthode du renouvellement* s'intéresse à la distribution de la variable aléatoire τ qui représente l'*intervalle de temps* séparant l'apparition successive, aux dates t_i et t_{i+1} , de

crues supérieures à un seuil d'échantillonnage x_s . Les intervalles de temps correspondent donc aux $\tau_i = (t_{i+1} - t_i)$. La méthode du renouvellement s'intéresse également à la distribution du nombre K_t de crues dans l'intervalle $[0; t]$. La figure (3.6), p. 80, illustre les variables en jeu pour trois seuils d'échantillonnage $x_s = x_{s0}, x_{s1}$ et x_{s2} :

- le schéma du haut représente une chronique continue de débits en fonction du temps t , seuillée de façon à en extraire la v.a. X_s , maximum des événements dépassant x_s ,
- le schéma du bas représente le nombre total de crues, noté K_t , sur l'intervalle $[0; t]$. Si on considère que X_s est la réalisation d'un tirage aléatoire, alors K_t est aussi une variable aléatoire, et la courbe en escalier représente une de ses réalisations possibles.

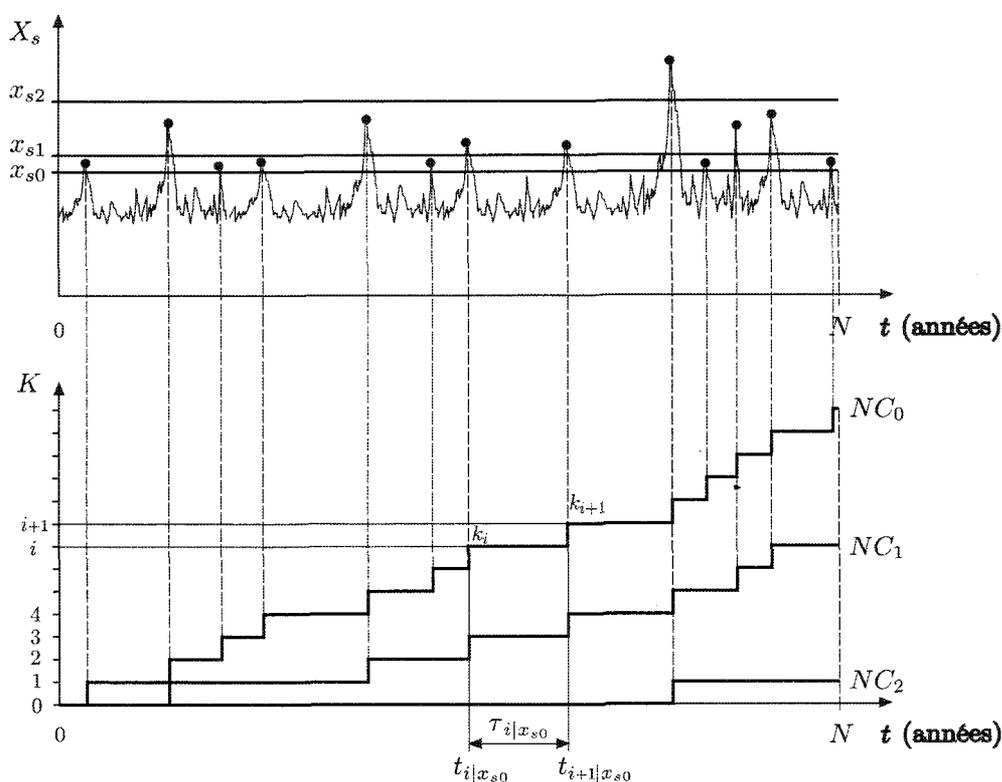


FIG. 3.6 – Définition des variables aléatoires décrivant le processus du renouvellement

La loi de probabilité suivie par la variable aléatoire K_t est notée $h_K(k|[0; t]) = \Pr [K_t = k]$, avec un nombre moyen d'événement $E [K_t]$ sur $[0; t]$. L'intensité du processus sera donnée par :

$$\mu(t) = \frac{dE [K_t]}{dt} \tag{3.83}$$

Cette intensité correspond à la pente de la courbe $E [K_t]$, (la figure 3.6 ne donne qu'une réalisation de K_t). Le processus est également caractérisé par l'indice de dispersion :

$$I_t = \frac{\text{var} (K_t)}{E [K_t]} \tag{3.84}$$

Ce dernier correspond à l'écart quadratique moyen relatif entre la courbe $E[K_t]$ et les réalisations k_i . S'il y a homogénéité des événements dans le temps, c'est à dire :

$$h_K(k|[0;t]) = h_K(k|[t';t'+t]) \quad \forall t'$$

alors le processus ne dépend plus du temps t et il est dit *stationnaire*. L'intensité du processus est donc constante : $\mu(t) = \mu$, et le nombre moyen d'événements sera représenté par une droite d'équation $E[K_t] = \mu \cdot t$.

Différentes lois de probabilité sont utilisées pour représenter la distribution de K_t , la plus couramment employée est la loi de Poisson (P) qui suppose un processus stationnaire. Son indice de dispersion vaut $I_t = 1$ puisque moyenne et variance sont pour cette loi identiques. Cunnane (1979) propose d'ailleurs un test utilisant cet indice pour vérifier l'adéquation du processus à une loi de Poisson. Lorsque l'indice de dispersion est significativement différent de 1, une alternative à la loi de Poisson est d'utiliser une loi binomiale négative ($I_t > 1$) ou une loi binomiale ($I_t < 1$) (Lang et al., 1999). Une synthèse des processus utilisables en hydrologie a été réalisée par Yagouti et al. (2001).

3.4.1.2 Modèle de dépassement

Comme nous l'avons vu, la méthode du renouvellement s'intéresse essentiellement à la répartition des crues dans le temps. On peut cependant caractériser également leur intensité en étudiant la distribution de la v.a. τ pour différents seuils $x_{s0}, x_{s1}, x_{s2}, \dots$ (cf. figure 3.6). On dispose ainsi d'autant d'échantillons que de seuils étudiés ($\tau_{1|x_{s0}}, \tau_{2|x_{s0}}, \dots, \tau_{n|x_{s0}} ; \tau_{1|x_{s1}}, \tau_{2|x_{s1}}, \dots, \tau_{n|x_{s1}} ; \dots$). En théorie, si l'on disposait de grands échantillons, on pourrait obtenir la distribution de τ (et donc son espérance qui correspond à la période de retour du seuil) pour chaque seuil.

En pratique les échantillons disponibles sont trop petits et l'erreur d'échantillonnage devient rédhibitoire pour les seuils élevés (cf. seuil x_{s2} sur la figure 3.6 où l'échantillon ne contient plus qu'une seule crue). Par ailleurs cette technique ne permettrait pas d'extrapoler l'estimation des périodes de retour à des événements supérieurs à la plus forte valeur observée sur la chronique. Aussi on construit un *modèle statistique* (modèle de dépassement) dont l'adéquation avec les observations est bien évidemment à vérifier. Le modèle se décompose en deux parties :

- la première partie rend compte du processus d'occurrence et représente la probabilité $h_K(k|t)$ de dépasser k fois un seuil x_s (fixé aussi bas que les conditions d'homogénéité et d'indépendance des crues le permettent) au cours d'une certaine période t (en général l'année),
- la seconde partie rend compte de la distribution fréquentielle des maximum des événement supérieurs au seuil et représente la probabilité $G_{X_s}(x)$ que la variable aléatoire X_s soit inférieure à un certain quantile x sachant que X , la v.a. débit, est supérieure au seuil x_s .

Dans le cas d'événements indépendants, la distribution du maximum annuel X^* va

donc s'écrire :

$$\begin{aligned}
 F_{X^*}(x) = \Pr [X^* \leq x] = & \Pr [\exists 0 \text{ crue} > x_s \text{ au cours de l'année}] \\
 & + \Pr [\exists 1 \text{ crue} > x_s \text{ au cours de l'année et} < x] \\
 & + \Pr [\exists 2 \text{ crues} > x_s \text{ au cours de l'année et toutes} < x] \\
 & \dots \\
 & + \Pr [\exists k \text{ crues} > x_s \text{ au cours de l'année et toutes} < x] \\
 & \dots \\
 & \infty
 \end{aligned}$$

Soit :

$$F_{X^*}(x) = \sum_{k=0}^{\infty} \Pr [\exists k \text{ crues} > x_s \text{ au cours d'une année et toutes} < x] \quad (3.85)$$

Si on note :

- $h_K(k|1)$ la probabilité de dépasser k fois le seuil x_s au cours d'une année et
- $G_{X_s}(x) = \Pr [X_s \leq x] = \Pr [X \leq x | X > x_s]$ la probabilité que la v.a. X (débit) soit inférieure au quantile x sachant qu'elle supérieure au seuil d'échantillonnage x_s ,

Alors on peut écrire l'expression (3.85) sous la forme :

$$F_{X^*}(x) = \Pr [X^* \leq x] = \sum_{k=0}^{\infty} h_K(k|1) G_{X_s}(x)^k \quad (3.86)$$

3.4.2 Modèle de dépassement avec flux de Poisson

Si le processus d'occurrence des crues, noté ci-avant $h_K(k|t)$, peut être représenté par une loi de Poisson $h_K(k|\mu, t)$, alors la fonction de répartition des maxima annuels X^* ($t = 1$ an) est donnée par :

$$\begin{aligned}
 F_{X^*}(x) = \Pr [X^* \leq x] &= \sum_{k=0}^{\infty} \exp(-\mu) \frac{(\mu)^k}{k!} G_{X_s}(x)^k \\
 F_{X^*}(x) = \Pr [X^* \leq x] &= \exp(-\mu) \sum_{k=0}^{\infty} \frac{[\mu G_{X_s}(x)]^k}{k!}
 \end{aligned} \quad (3.87)$$

On reconnaît le développement en série de *Maclaurin* de $\exp(u) = \sum_{k=0}^{\infty} \frac{u^k}{k!}$. L'Expression (3.87) peut donc s'écrire sous la forme :

$$\begin{aligned}
 F_{X^*}(x) = \Pr [X^* \leq x] &= \exp(-\mu) \exp[\mu G_{X_s}(x)] \\
 F_{X^*}(x) = \Pr [X^* \leq x] &= \exp\{-\mu [1 - G_{X_s}(x)]\}
 \end{aligned} \quad (3.88)$$

Lang et al. (1997) attribuent la première description de l'expression (3.88) à Shane et Lynn (1964).

3.5 Estimation des paramètres avec information censurée, à partir d'échantillons constitués de valeurs supérieures à un seuil (POT)

L'estimation des paramètres du modèle de dépassement *sans information historique*, par les méthodes MO, MLE et PWM, est présentée dans le rapport de Naulet (2002). Dans le cadre du modèle de dépassement *avec information historique* seule la méthode des estimateurs du maximum de vraisemblance (MLE) a été abordée. Nous présentons ci-après les expressions des fonctions de vraisemblance qui ont été développées, comme pour l'approche des maxima annuels (cf. §3.3.1, p. 64), pour les quatre types d'informations rencontrées.

3.5.1 Intensité des crues non connue, censure de type binomiale (MLE_{sbc})

On considère en premier lieu l'ensemble des $n + k$ événements supérieurs au seuil x_s au cours de la période historique de N_H années. On rappelle que ce seuil x_s est celui qui a été utilisé pour l'échantillonnage des crues de la période systématique. La probabilité P_1 d'observer *exactement* k crues supérieures à un seuil fixé y_H (modèle avec une *troncature de type I*, cf. figure 2.9a, p. 44) dans un ensemble de $n + k$ sans connaître *ni leur ordre ni leur intensité* est :

$$\begin{aligned} P_1 &= C_{n+k}^k \cdot [1 - G_{X_s}(\Theta|y_H)]^k \cdot [G_{X_s}(\Theta|y_H)]^n \\ &= \frac{(n+k)!}{k! \cdot n!} \cdot [1 - G_{X_s}(\Theta|y_H)]^k \cdot [G_{X_s}(\Theta|y_H)]^n \end{aligned} \quad (3.89)$$

Maintenant si on considère que les $n + k$ crues supérieures au seuil d'échantillonnage x_s suivent un processus noté h_{K_1} au cours de la période historique de N_H années, alors la vraisemblance de l'échantillon historique est :

$$\begin{aligned} L_{sbc} &= \sum_{n=0}^{\infty} h_{K_1}(n+k|N_H) \cdot P_1 \\ L_{sbc} &= \sum_{n=0}^{\infty} h_{K_1}(n+k|N_H) \frac{(n+k)!}{k! \cdot n!} \cdot [1 - G_{X_s}(\Theta|y_H)]^k \cdot [G_{X_s}(\Theta|y_H)]^n \end{aligned} \quad (3.90)$$

Soit si on peut représenter la variable aléatoire K_1 par un processus de Poisson $h_{K_1}(n+k|\mu_1, N_H)$:

$$L_{sbc} = \sum_{n=0}^{\infty} \exp(-\mu_1 \cdot N_H) \frac{(\mu_1 \cdot N_H)^{n+k}}{(n+k)!} \frac{(n+k)!}{k! \cdot n!} \cdot [1 - G_{X_s}(\Theta|y_H)]^k \cdot [G_{X_s}(\Theta|y_H)]^n$$

en remarquant que $\sum_{n=0}^{\infty} \frac{[\mu_1 \cdot N_H \cdot G_{X_s}(\Theta|y_H)]^n}{n!} = \exp[\mu_1 \cdot N_H \cdot G_{X_s}(\Theta|y_H)]$, on a :

$$L_{sbc} = \exp\{-\mu_1 \cdot N_H [1 - G_{X_s}(\Theta|y_H)]\} \cdot \frac{\{\mu_1 \cdot N_H [1 - G_{X_s}(\Theta|y_H)]\}^k}{k!} \quad (3.91)$$

La fonction de vraisemblance correspond à une loi de Poisson $h_{K_2}(k|\mu_2, N_H)$ de paramètre $\mu_2 = \mu_1 \cdot [1 - G_{X_s}(\Theta|y_H)]$ (c.-à-d. si une v.a. K_1 , nombre d'occurrences de l'événement $[X > x_1]$, suit une loi de Poisson de paramètre μ_1 sur la période t , alors la v.a. K_2 , nombre d'occurrences de l'événement $[X > x_2]$ avec $x_2 > x_1$, suit également une loi de Poisson de paramètre $\mu_2 = \mu_1 \cdot \Pr[X > x_2]$ sur la période t , Lang et al., 1997) :

$$L_{sbc} = h_{K_2}(k|\mu_2, N_H) \quad (3.92)$$

Les estimateurs (paramètres estimés $\hat{\Theta}$) obtenus à partir de cette fonction de vraisemblance seront notés MLE_{sbc} .

3.5.2 Intensité des crues connues au-dessus d'un seuil fixé (MLE_{sc})

Si l'intensité des k crues supérieures au seuil fixé y_H est également connue, la probabilité jointe de ces dernières est (cf. §3.3.1.2, p. 65) :

$$P_2 = \prod_{m=1}^k \frac{g_{X_s}(\Theta|y_m)}{1 - G_{X_s}(\Theta|y_H)} dy_m \quad (3.93)$$

Soit en combinant cette expression avec (3.92) pour un processus de Poisson :

$$L_{sc} = h_{K_2}(k|\mu_2, N_H) \cdot \prod_{m=1}^k \frac{g_{X_s}(\Theta|y_m)}{1 - G_{X_s}(\Theta|y_H)} \quad (3.94)$$

Les estimateurs (paramètres estimés $\hat{\Theta}$) obtenus à partir de cette fonction de vraisemblance seront notés MLE_{sc} .

3.5.3 Intensité des crues située dans un intervalle de censure au-dessus d'un seuil fixé (MLE_{sic})

De la même manière qu'au §3.3.1.3, p. 66, on peut considérer que l'intensité des k crues historiques est comprise dans un intervalle de censure $[y_{Lm}; y_{Um}]$ au dessus du seuil de perception y_H . Dans ces conditions la probabilité de ces dernières est :

$$P_3 = \prod_{m=1}^k \frac{G_{X_s}(\Theta|y_{Um}) - G_{X_s}(\Theta|y_{Lm})}{1 - G_{X_s}(\Theta|y_H)} \quad (3.95)$$

Soit en combinant cette expression avec (3.92) pour un processus de Poisson :

$$L_{sic} = h_{K_2}(k|\mu_2, N_H) \cdot \prod_{m=1}^k \frac{G_{X_s}(\Theta|y_{Um}) - G_{X_s}(\Theta|y_{Lm})}{1 - G_{X_s}(\Theta|y_H)} \quad (3.96)$$

Les estimateurs (paramètres estimés $\hat{\Theta}$) obtenus à partir de cette fonction de vraisemblance seront notés MLE_{sic} .

3.5.4 Intensité des plus fortes crues connues (MLE_{smf})

La probabilité d'observer exactement les k crues ordonnées suivant $y_1 \geq y_2 \geq \dots \geq y_k$ dans un ensemble de $n+k$ crues supérieures au seuil d'échantillonnage x_s , sans connaître précisément leur intensité est :

$$\begin{aligned} P_4 &= A_{n+k}^k \cdot [1 - G_{X_s}(\Theta|y_k)]^k \cdot [G_{X_s}(\Theta|y_k)]^n \\ &= \frac{(n+k)!}{n!} \cdot [1 - G_{X_s}(\Theta|y_k)]^k \cdot [G_{X_s}(\Theta|y_k)]^n \end{aligned} \quad (3.97)$$

Par ailleurs si on connaît les intensités des k crues on a (cf. §3.5.2, p. 84) :

$$P_5 = \prod_{m=1}^k \frac{g_{X_s}(\Theta|y_m)}{1 - G_{X_s}(\Theta|y_k)} dy_m \quad (3.98)$$

Soit en combinant P_4 et P_5 :

$$\begin{aligned} P_6 &= P_4 \cdot P_5 \\ &= \frac{(n+k)!}{n!} \cdot [1 - G_{X_s}(\Theta|y_k)]^k \cdot [G_{X_s}(\Theta|y_k)]^n \\ &\quad \cdot \prod_{m=1}^k \frac{g_{X_s}(\Theta|y_m)}{1 - G_{X_s}(\Theta|y_k)} dy_m \end{aligned} \quad (3.99)$$

Maintenant si on considère que les $n+k$ crues supérieures au seuil d'échantillonnage x_s suivent un processus noté h_{K_1} au cours de la période historique de N_H années, alors la vraisemblance de l'échantillon historique est :

$$L_{smf} = \sum_{n=0}^{\infty} h_{K_1}(n+k|N_H) \cdot P_6 \quad (3.100)$$

Soit en représentant la variable K_1 par un processus de Poisson et en effectuant les mêmes observations qu'au §3.5.1, p. 83, il vient :

$$L_{smf} = k! \cdot h_{K_2}(k|\mu_3, N_H) \cdot \prod_{m=1}^k \frac{g_{X_s}(\Theta|y_m)}{1 - G_{X_s}(\Theta|y_k)} \quad (3.101)$$

$$\text{avec : } \mu_3 = \mu_1 \cdot [1 - G_{X_s}(\Theta|y_k)] \quad (3.102)$$

Cette dernière expression a été présentée sous une forme différente par Miquel (1984, p. 137) et Lang et al. (1998). Les estimateurs (paramètres estimés $\hat{\Theta}$) obtenus à partir de cette fonction de vraisemblance seront notés MLE_{smf} .

3.6 Quelques remarques sur les probabilités empiriques (*plotting position*)

3.6.1 Probabilités empiriques sans information censurée

Cunnane (1978) a effectué une revue des principales formules de probabilités empiriques sans information historique. Ces formules diffèrent suivant (a) le choix des statistiques d'ordre étudiées ($F_{(i)}$ les valeurs de probabilité au non dépassement, ou $Y_{(i)}^*$ la variable réduite de $X_{(i)}^*$, le débit, dépendant de la loi choisie) et (b) la mesure de la tendance centrale prise en considération (moyenne, médiane ou mode).

Soit un échantillon $(x_1, x_2, \dots, x_{N_S^*})$ de débits *maxima annuels* systématiques (ou de NC_S débits supérieurs à un seuil). Ces valeurs peuvent être vues comme des réalisations de N_S^* variables aléatoires continues $X_1^*, X_2^*, \dots, X_{N_S^*}^*$ indépendantes et identiquement distribuées (*iid*) suivant une distribution de fonction de densité f_{X^*} et de fonction de répartition F_{X^*} . Une fois l'échantillon de v.a. ré-ordonné suivant $X_1'^* \leq X_2'^* \leq \dots \leq X_{N_S^*}'^*$, on définit la i -ème *statistique d'ordre* notée $X_{(i)}^*$ ou $X_{i:N_S^*}^*$ par $X_i'^*$. La fonction de densité de cette dernière peut être déterminée suivant :

$$\begin{aligned} f_{X_{(i)}^*}(x) dx &= \Pr [x < X_{(i)}^* \leq x + dx] = \Pr [X_{(i)}^* \in dx] \\ &= N_S^* \cdot \Pr [X_i^* \in dx] \cdot \Pr [\text{exactement } (i-1) \text{ parmi } (N_S^* - 1) < x] \\ &= N_S^* \cdot f_{X^*}(x) dx \cdot C_{N_S^*-1}^{i-1} \cdot [F_{X^*}(x)]^{i-1} \cdot [1 - F_{X^*}(x)]^{N_S^*-i} \end{aligned}$$

Soit finalement :

$$f_{X_{(i)}^*}(x) = \frac{N_S^*!}{(i-1)!(N_S^*-i)!} \cdot [F_{X^*}(x)]^{i-1} \cdot [1 - F_{X^*}(x)]^{N_S^*-i} \cdot f_{X^*}(x) \quad (3.103)$$

Les critères proposés par Cunnane (1978) pour l'établissement d'une formule de probabilités empiriques sont :

- capacité de juger si un échantillon donné peut raisonnablement être issu de la loi théorique choisie (*capacité descriptive*),
- capacité d'estimer les quantiles en traçant une courbe à travers les points (*capacité prédictive*).

Etant donné le développement des méthodes analytiques d'ajustement, le deuxième point ne semble plus vraiment essentiel. Quoiqu'il en soit le premier, qui se traduit par des probabilités empiriques non biaisées en intensité, reste d'actualité pour un premier jugement visuel. Comme le rappelle Wang (1991), la plupart des hydrologues préfère avoir une représentation graphique pour un examen visuel. En retenant par conséquent le premier point, la formule de probabilités empiriques sera obtenue de telle sorte que l'espérance (les autres mesures de la tendance centrale sont plus difficilement manipulées) de la i -ème statistique d'ordre se trouve sur la loi théorique. Soit :

$$F_i = F_{X^*}(E[X_{(i)}^*]) \quad \text{avec : } E[X_{(i)}^*] \equiv \mu_{X_{(i)}^*} = \int_{-\infty}^{+\infty} x \cdot f_{X_{(i)}^*}(x) \cdot dx$$

Les expressions de F_i proposées dans la littérature sont de la forme générale suivante :

$$\hat{F}_i = \Pr [X^* \leq X_{(i)}^*] = \frac{(i - \alpha)}{(N_S^* + 1 - 2\alpha)} \quad i = 1, \dots, N_S^* \quad (3.104)$$

On les note \hat{F}_i car il s'agit d'approximations. En effet même si une expression analytique de $E [X_{(i)}^*]$ peut être déterminée, F_i va dépendre de la taille de l'échantillon. A titre d'exemple, Gringorten (1963) a établi une estimation de α pour la N_S^* -ème statistique d'ordre d'après l'expression analytique de $E [X_{(i)}^*]$ initialement développée par Kimball (1946) pour la loi EV1. On voit sur la figure (3.7), p. 87, que la valeur théorique varie en fonction de la taille de l'échantillon. Par ailleurs la figure (3.8), p. 88, montre bien que l'approximation \hat{F}_i (croix) est valide pour la N_S^* -ème statistique d'ordre mais qu'au fur et à mesure que l'on s'éloigne du dernier point, cette approximation s'éloigne des valeurs théoriques (ronds pleins). Au lieu de déterminer une approximation sur la dernière statistique d'ordre Arnell et al. (1986) présentent, pour la loi GEV, une évaluation de α pour des tailles données d'échantillon, établie par la méthode des moindres carrés sur l'ensemble des statistiques d'ordre.

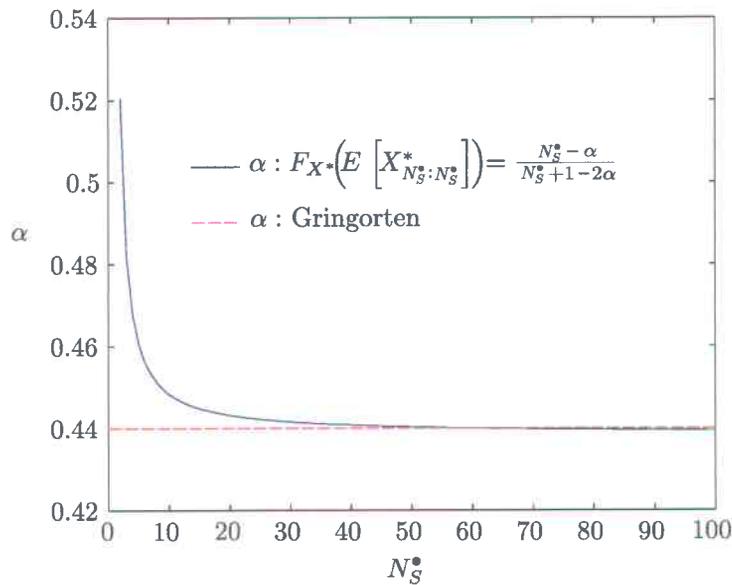


FIG. 3.7 - Estimation de α pour la loi EV1

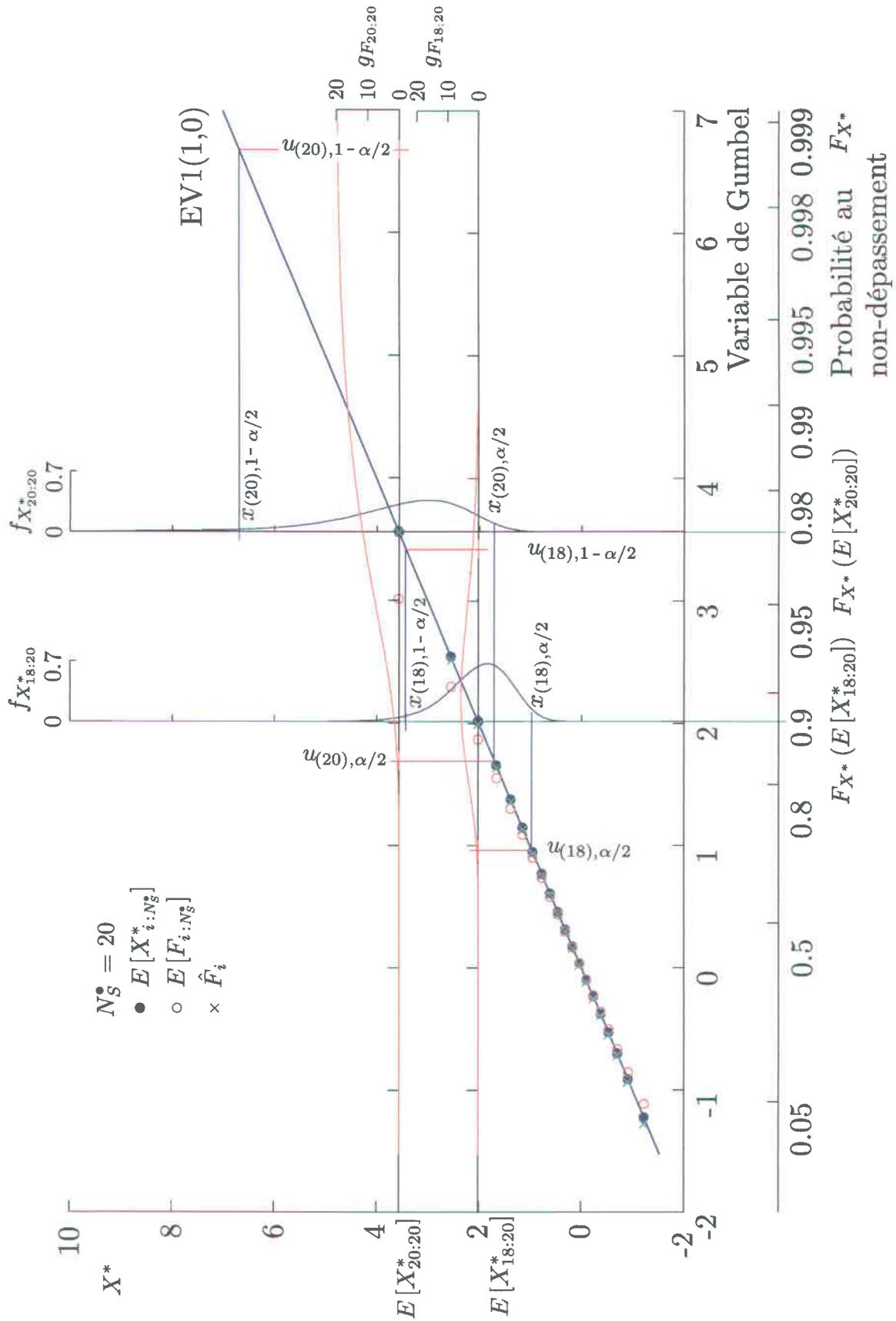


FIG. 3.8 – Illustration des formules de probabilités empiriques, cas de la loi EV1

Comme nous l'avons dit ces expressions \hat{F}_i dépendent de la distribution choisie pour représenter les débits. Pour les lois à deux paramètres on peut travailler sur une variable réduite $Y^* = \frac{X^*-b}{a}$ qui ne dépend plus des paramètres de position et d'échelle puisque $E[Y^*] = \frac{E[X^*]-b}{a}$. Les différentes valeurs de α pour la formule générale (3.104) sont dans ce cas illustrées au tableau (3.1). La formule qui est restée comme celle de Cunnane est présentée comme le meilleur compromis en terme d'indépendance de la distribution parentale (*distribution free formula*). Pour les lois à trois paramètres la v.a. Y^* va dépendre du paramètre de forme. La loi GEV en est un exemple pour lequel Guo (1990) a effectué une comparaison par le biais de simulation Monte Carlo des formulations de Cunnane (1978), Arnell et al. (1986) et de In-na et Nguyen (1989) (cette dernière prend explicitement en compte le paramètre de forme dans sa formulation par l'introduction du coefficient d'asymétrie). En terme de capacité descriptive il ressort de ses résultats que l'expression de Cunnane (1978) est la moins biaisée sur les valeurs extrêmes (fortes et faibles). Elle est également la meilleure au niveau d'estimateurs de biais et *RMSE globaux* (ordre 1 à N_S^*) pour des paramètres de forme positifs ou négatifs. A ce sujet l'approximation proposée par Arnell et al. (1986) pour la loi GEV s'avère être particulièrement mauvaise.

TAB. 3.1 – Valeurs de α pour la formule des probabilités empiriques

α	Formule de	Stat. d'ordre estim. tendance centrale	Lois de Y^*
0	Weibull	$E[F_{(i)}]$	-
0.31	Beard ou Chegodayev	$Med[Y_{(i)}^*]$	-
3/8	Blom	$E[Y_{(i)}^*]$	Normale (N2)
0.4	Cunnane	-	« <i>distribution free</i> »
0.44	Gringorten	$E[Y_{(i)}^*]$	Exponentielle (EXP) Gumbel (EV1)
0.5	Hazen	-	-
1	Beard	$Mode[F_{(i)}]$	-

Au lieu de travailler avec $X_{(i)}^*$, Beard (1943) et Weibull (1939) se sont intéressés à la statistique d'ordre $F_{(i)} = F_{X^*}(X_{(i)}^*)$, $0 \leq F_{(1)} \leq F_{(2)} \leq \dots \leq F_{(N_S^*)} \leq 1$. Dans ce cas la fonction de densité $g_{F_{(i)}}$ s'obtient de la même manière que pour la statistique d'ordre $X_{(i)}^*$ (expression 3.103). Puisque la v.a. $F \sim \text{Uniforme}(0,1)$ alors $F_{(i)} \sim \text{Beta}(\alpha, \beta)$ avec $\alpha = i$ et $\beta = N_S^* - i + 1$:

$$g_{F_{(i)}}(f) = \frac{1}{B(\alpha, \beta)} \cdot f^{\alpha-1} \cdot (1-f)^{\beta-1} \cdot I_{[0,1]}(f) \tag{3.105}$$

avec la fonction *Beta* donnée par :

$$\begin{aligned} B(\alpha, \beta) &= \int_0^1 u^{\alpha-1} \cdot u^{\beta-1} \cdot du \\ &= \frac{\Gamma(\alpha) \Gamma(\beta)}{\Gamma(\alpha + \beta)} = \frac{(i-1)! (N_S^* - i)!}{N_S^*!} \end{aligned} \tag{3.106}$$

Les deux premiers moments et le mode de cette distribution sont bien connus :

$$\mu_{F_{(i)}} \equiv E [F_{(i)}] = \frac{\alpha}{\alpha + \beta} = \frac{i}{N_S^* + 1} \quad (3.107)$$

$$\sigma_{F_{(i)}}^2 \equiv \text{var} [F_{(i)}] = \frac{\alpha\beta}{(\alpha + \beta)^2 (\alpha + \beta + 1)} = \frac{i(N_S^* - i + 1)}{(N_S^* + 1)^2 (N_S^* + 2)} \quad (3.108)$$

$$\text{Mode} [F_{(i)}] = \frac{\alpha - 1}{\alpha + \beta - 2} = \frac{i - 1}{N_S^* - 1} \quad (3.109)$$

Les expressions (3.107) et (3.109) correspondent aux formulations respectivement proposées par Weibull (1939) et Beard (1943). Le principal avantage de cette approche réside dans le fait que le tracé des probabilités empiriques ne dépend plus du choix *a priori* d'une distribution parentale. Par contre, comme le montre clairement la figure (3.8), p. 88, pour un échantillon de taille $N_S^* = 20$ issu d'une loi de Gumbel, lorsque l'on considère la statistique d'ordre $F_{(i)}$ le premier critère de Cunnane (1978) ne peut pas être respecté : les ronds vides qui représentent $E [F_{(i)}]$ se situent bien au dessus de la distribution théorique pour les fréquences rares. On obtient un graphique des probabilités empiriques *biaisé en intensité*. A ce sujet Guo (1990) rappelle que l'approche qui utilise $E [Y_{(i)}^*]$ doit être considérée comme la meilleure.

Nous avons également représenté sur la figure (3.8), p. 88, les fonctions de densité des statistiques d'ordre $X_{18:20}^*$, $X_{20:20}^*$ et $F_{18:20}$, $F_{20:20}$. Les bornes des intervalles de confiance au niveau $(1 - \alpha) = 0.95$, notées respectivement $(x_{(i),\alpha/2}, x_{(i),1-\alpha/2})$ et $(u_{(i),\alpha/2}, u_{(i),1-\alpha/2})$, sont également indiquées. Pour la loi EV1 ces dernières sont déterminées par intégration numérique de l'expression (3.103) et inversion par une méthode de Newton. Pour la loi Beta les bornes sont déterminées par une fonction de Matlab (version 5.3.1) issue de Abramowitz et Stegun (1965).

Il est intéressant de remarquer que les bornes des intervalles de confiance de $X_{(i)}^*$ coïncident avec celles de $F_{(i)}$. En effet d'après les expressions (3.103) et (3.105) on peut écrire :

$$p_1 = \Pr [X_{(i)}^* \leq x_{(i),p_1}] = \int_{-\infty}^{x_{(i),p_1}} f_{X_{(i)}^*}(x) \cdot dx \quad (3.110)$$

$$p_2 = \Pr [F_{(i)} \leq u_{(i),p_2}] = \int_0^{u_{(i),p_2}} g_{F_{(i)}}(u) \cdot du \quad (3.111)$$

En posant dans p_2 : $u = F_{X^*}(x)$ soit $\frac{du}{dx} = \frac{dF_{X^*}(x)}{dx} = f_{X^*}(x)$ il vient :

$$p_2 = \int_{-\infty}^{F_{X^*}^{-1}(u_{(i),p_2})} g_{F_{(i)}}[F_{X^*}(x)] \cdot f_{X^*}(x) \cdot dx \quad (3.112)$$

or en remplaçant f par $F_{X^*}(x)$ dans l'expression (3.105), p. 89, on constate d'après l'expression (3.103), p. 86, que :

$$g_{F_{(i)}}[F_{X^*}(x)] \cdot f_{X^*}(x) = f_{X_{(i)}^*}(x) \quad (3.113)$$

L'expression (3.112) de p_2 peut donc s'écrire :

$$p_2 = \int_{-\infty}^{F_{X^*}^{-1}(u_{(i),p_2})} f_{X_{(i)}^*}(x) \cdot dx \quad (3.114)$$

Ainsi on remarque d'après les expressions (3.110) et (3.114) que si $p_2 = p_1$ alors $x_{(i),p_1} = F_{X^*}^{-1}(u_{(i),p_2})$. Ainsi même s'il est important de prendre en compte la distribution a priori des débits dans la formule des probabilités empiriques, on pourra s'en affranchir lors de l'estimation des intervalles de confiance. Par la suite, et sauf mention contraire, nous retiendrons l'expression (3.104), p. 87, avec $\alpha = 0.4$ (formule de Cunnane).

3.6.2 Probabilités empiriques avec information censurée

Benson (1950) a proposé une méthode permettant d'incorporer l'information non systématique pour des séries de maxima annuels. Il rappelle que la méthode intuitive qui consiste à considérer d'une part les crues historiques $y_{(i)}$, lorsqu'elles sont toutes supérieures à la plus forte crue systématique $x_{(1)}$, comme un échantillon censuré par le bas sur une période totale de N années et d'autre part les crues systématiques comme un échantillon complet sur une période de $N_S < N$ années, conduit à des inconsistances en termes de probabilités empiriques. Pour illustrer ce problème on peut supposer une période totale de N années durant laquelle trois crues historiques supérieures au seuil de perception ont été observées et une période systématique d'une durée de $N_S = \frac{N}{2}$ années. En première approximation la probabilité empirique au dépassement des crues de rang i classées par ordre décroissant est $\hat{p}_{i,H} = \frac{i}{N}$ pour les crues historiques et $\hat{p}_{i,S} = \frac{2i}{N}$ pour les crues systématiques. Dans ces conditions on a $\hat{p}_{3,H} = \frac{3}{N} < \hat{p}_{1,S} = \frac{2}{N}$ ce qui est incohérent puisque $y_{(3)} > x_{(1)}$ (cf. figure 3.9).

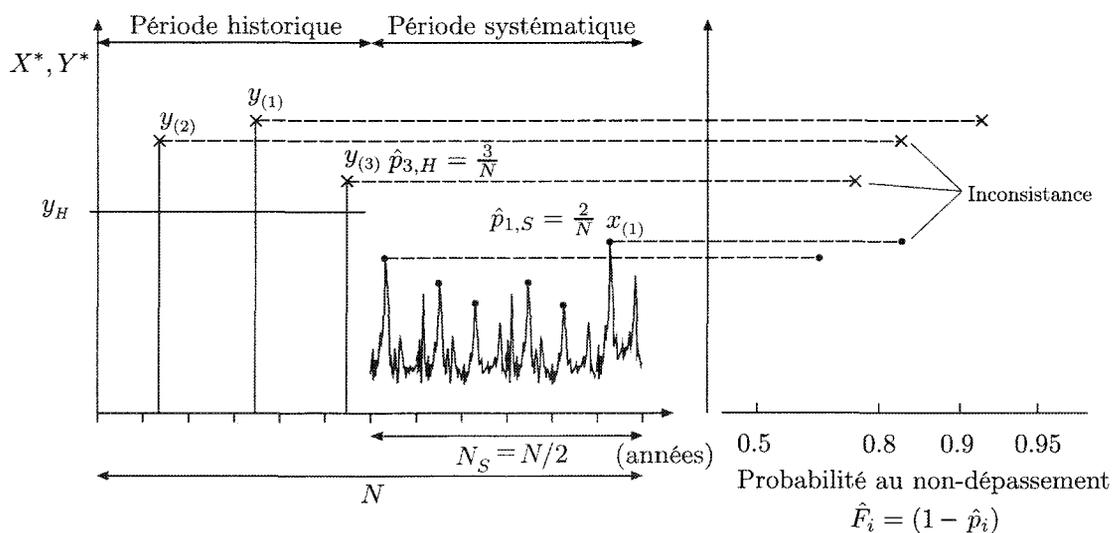


FIG. 3.9 – Illustration de l'inconsistance du traitement des crues historiques par le calcul des probabilités empiriques sur différentes périodes

Pour remédier à ce problème Benson (1950) propose une méthode dont le concept a été repris dans le bulletin 17 de l'United States Water Ressources Council (1976) et sa version révisée (Interagency Advisory Committee On Water Data, 1982), pour l'élaboration de la méthode des moments pondérés historiquement que nous avons explicitée au §3.3.2, p. 71. Zhang (1982) présente une formule, non biaisée en probabilité (probabilités empiriques déterminées à partir de $E[F_{(i)}]$), qui repose sur un concept de « dépassement »

(estimation de la probabilité au dépassement du seuil $p_e = \Pr[X^* \geq y_H]$) dû à Qian (1964). Hirsch et Stedinger (1987), ont effectué une revue des différentes formules de probabilités empiriques utilisées pour les crues historiques et proposent deux formulations. La première utilise une approche de « dépassement » (cf. principe à la figure 3.10, p. 94) cohérente avec la méthode du maximum de vraisemblance avec information censurée (cf. §3.3.1, p. 64), la deuxième approche s'insère dans le cadre bayésien qui suppose la connaissance de l'information a priori sur les paramètres de la loi Beta. Après avoir étudié le biais et la précision (en terme de probabilité), ils concluent qu'il est impossible de faire une estimation très précise des probabilités au dépassement $p_{(i)}$ et ajoutent qu'elles sont si imprécises qu'il devient important de considérer l'intervalle de vraisemblance de $p_{(i)}$. Afin de réduire le biais en intensité, Hirsch (1987) a ensuite introduit une modification de la formule de « dépassement » initialement établie en raisonnant sur $E[F_{(i)}]$. Les biais restent relativement forts mais sont sans comparaison par rapport aux variances.

Pour les représentations graphiques des probabilités empiriques dans la suite du document nous avons retenu l'approche de dépassement développée par Hirsch et Stedinger (1987) avec quelques modifications que nous présentons ci-après. Les données sont modélisées suivant le schéma général de la figure (3.2), p. 64, en raisonnant sur la variable Z^* qui correspond à la valeur maximale annuelle sur l'ensemble des deux périodes (historiques et systématiques).

i) On classe par ordre décroissant l'échantillon des N^\bullet crues ($z_1 \geq z_2 \geq \dots \geq z_{N^\bullet}$) constitué :

- des N_S^\bullet et N_H^\bullet crues systématiques x_i et historiques y_i d'intensité connue.
- des valeurs moyennes de chaque crue comprise dans les intervalles $[x_L, x_U)$ et $[y_L, y_U)$ lorsque les bornes sont telles que $x_L \neq -\infty$ & $x_U \neq +\infty$ et $y_L \neq -\infty$ & $y_U \neq +\infty$ (hypothèse simplificatrice où $\frac{L+U}{2}$ représente le maximum de densité).

ii) On classe par ordre croissant l'échantillon des m seuils de perception *différents* ($y_{H_1} = 0 < y_{H_2} < \dots < y_{H_m} < y_{H_{m+1}} = \infty$) constitué des bornes supérieures des intervalles du type $(-\infty, x_U)$ et $(-\infty, y_U)$. Chaque seuil y_{H_j} s'applique sur $N_j^<$ années.

iii) On calcule la probabilité au dépassement de chaque seuil $\hat{p}_{e_j} = \Pr[Z^* \geq y_{H_j}]$ soit :

- par une méthode issue de Hirsch et Stedinger (1987) avec une modification de l'estimation \hat{p}_{e_j} de la probabilité conditionnelle

$$p_{c_j} = \Pr [y_{H_j} \leq Z^* < y_{H_{j+1}} | Z^* < y_{H_{j+1}}].$$

$$\hat{p}_{e_j} = \hat{p}_{e_{j+1}} + \hat{p}_{c_j} (1 - \hat{p}_{e_{j+1}}) \quad j = m, m-1, \dots, 1 \quad (3.115)$$

$$p_{e_{m+1}} = 0 \text{ puisque } y_{H_{m+1}} = \infty$$

$$p_{e_1} = 1 \text{ puisque } y_{H_1} = 0$$

cf. figure (3.10), p. 94.

avec la probabilité conditionnelle estimée par

$$\hat{p}_{c_j} = \frac{A_j}{A_j + B_j + C_j} \quad j = 1, \dots, m$$

A_j : nombre de crues connues $y_{H_j} \leq z < y_{H_{j+1}}$
 B_j : nombre de crues connues $z < y_{H_j}$
 $C_j = \sum_{k=1}^j N_k^<$
 $C_j = 0$ dans Hirsch et Stedinger (1987) qui, dans le cas de $m > 1$ seuils, ne prennent pas en compte les $N_j^<$ années durant lesquelles les seuils de perception y_{H_j} ne sont pas dépassés.

$$(3.116)$$

- par une méthode analytique comme le suggère Wang (1991) qui a démontré que les formules de probabilités empiriques existantes introduisaient des biais assez larges. La probabilité de dépassement de chaque seuil \hat{p}_{e_j} est obtenue à partir de l'ajustement réalisé pour une loi et une méthode d'estimation déterminée. Dans ce cas le graphique des probabilités empiriques perd toutefois son intérêt pour le contrôle de l'ajustement analytique.

iv) Finalement, pour chacun des m seuils, les probabilités empiriques au dépassement $\hat{p}_i = (1 - \hat{F}_i)$ des A_j crues comprises entre les seuils $[y_{H_j}; y_{H_{j+1}})$ sont calculées suivant :

$$\hat{p}_i = p_{e_{j+1}} + (p_{e_j} - p_{e_{j+1}}) \cdot \left(\frac{i - \alpha}{A_j + 1 - 2\alpha} \right) \quad \begin{array}{l} j = m, m-1, \dots, 1 \\ i = 1, \dots, A_j \end{array} \quad (3.117)$$

Si aucun seuil de perception n'existe on a $m = 1$ et $A_1 = N_S^*$ crues comprises entre $y_{H_1} = 0$ et $y_{H_{m+1}} = \infty$ ($p_{e_1} = 1$ et $p_{e_{m+1}} = 0$). L'expression (3.117) se réduit alors à celle qui ne prend pas en compte l'information historique (cf. expression 3.104, p. 87, qui présente dans ce cas les probabilités empiriques au *non dépassement* car l'échantillon est classé dans l'ordre inverse).

Des recherches restent à effectuer sur la prise en compte des intervalles emboîtés et sur ceux du type $[x_{LB}, \infty)$. On présente aux figures (3.11 à 3.14), p. 95, les probabilités empiriques estimées pour l'exemple de la Big Sandy River à Bruceton (station USGS n°03606500, BV=330 km²). Les données sont issues du rapport de l'Interagency Advisory Committee On Water Data (1982) : on dispose de 44 années de débits maxima annuels systématiques (1930-1973) et de trois crues historiques supérieures à un seuil unique $y_{H_2} = 523$ m³/s ($y_{H_1} = 0$) sur la période 1897-1929 (cf. figure 3.11). Les figures (3.12), (3.13) et (3.14) correspondent aux probabilités empiriques déterminées par la formule (3.117), avec $\alpha = 0.4$, respectivement par (a) la formule de Hirsch et Stedinger

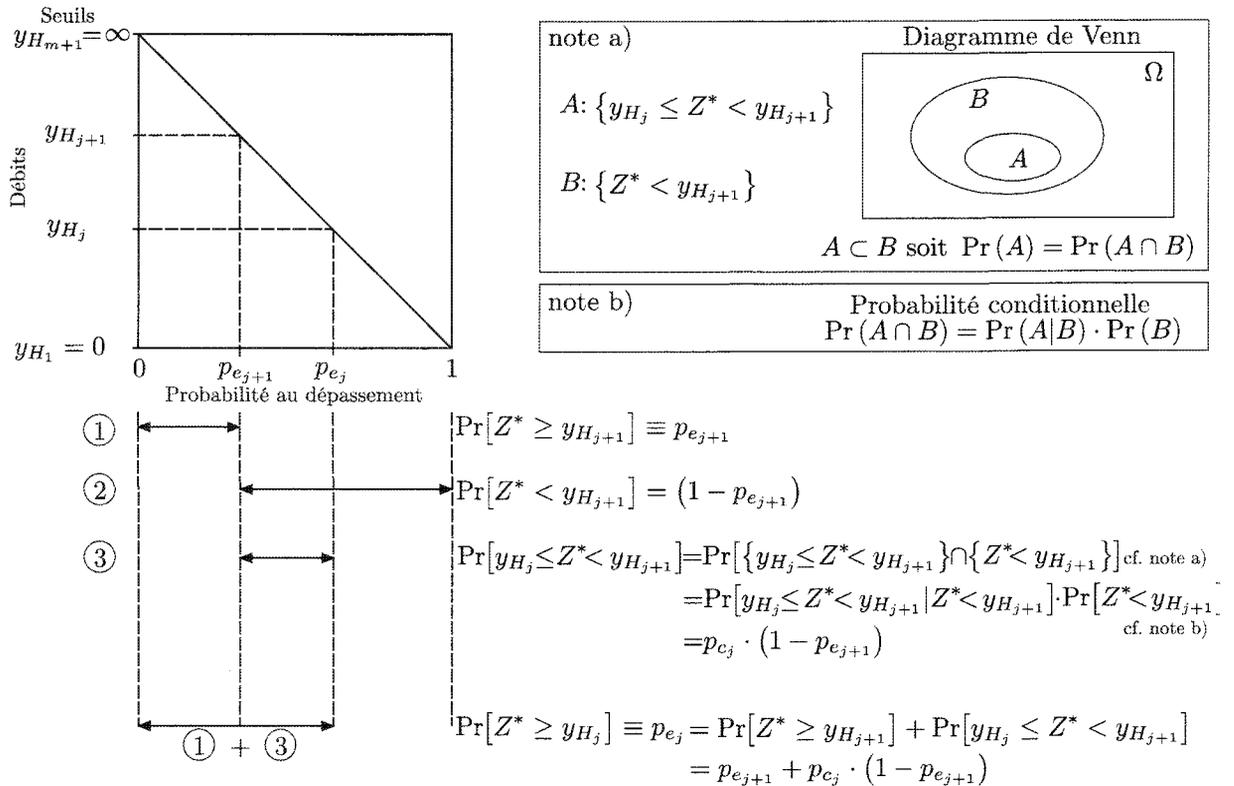


FIG. 3.10 – Illustration de la détermination des probabilités au dépassement des seuils

(1987) ($C_j = 0$), (b) la formule modifiée ($C_j \neq 0$) et enfin (c) à partir de l'estimation de la probabilité au dépassement du seuil \hat{p}_{e_2} par une méthode analytique (loi GEV ajustée par la méthode MLE_G , cf. §3.3.1.5, p. 68). On remarquera l'importance majeure de l'estimation des probabilités conditionnelles \hat{p}_{c_j} qui vont influencer l'ensemble des probabilités empiriques.

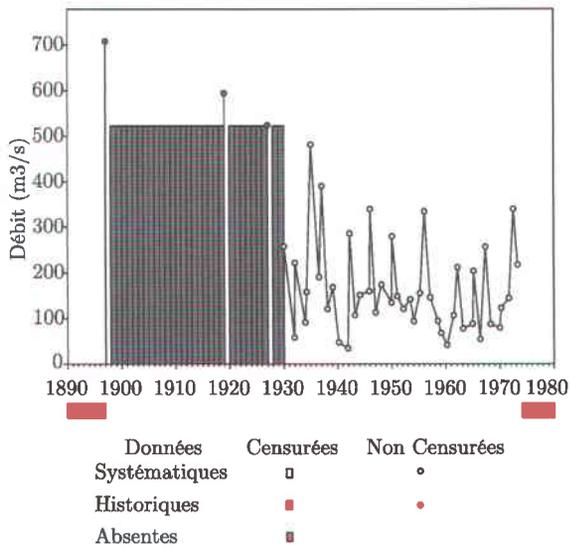


FIG. 3.11 - Série des maxima annuels de la Big Sandy River à la station de Bruceton

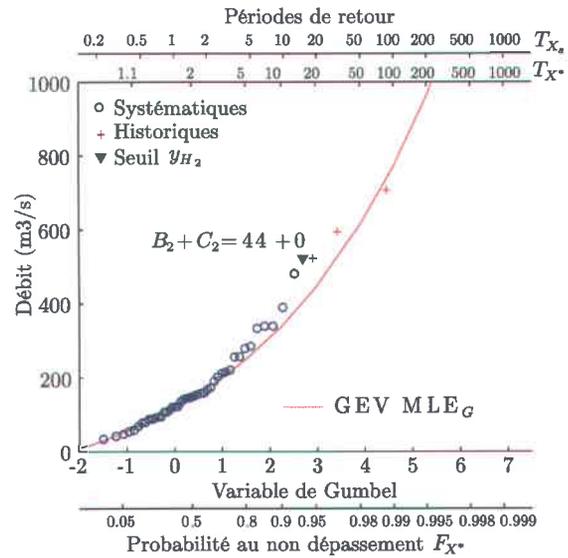


FIG. 3.12 - Probabilités empiriques par la formule de Hirsch et Stedinger (1987)

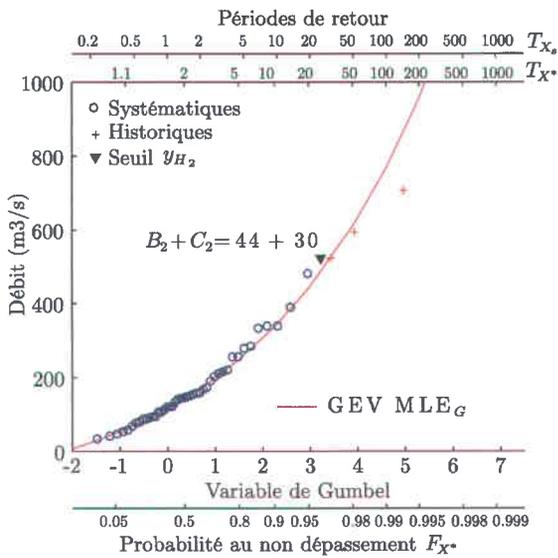


FIG. 3.13 - Probabilités empiriques par la formule modifiée

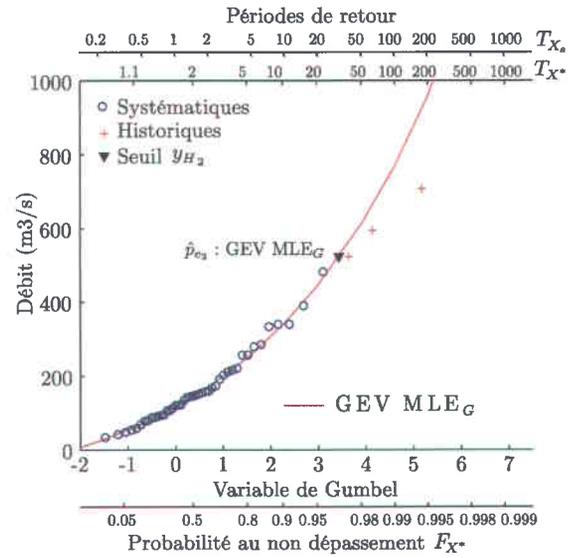


FIG. 3.14 - Probabilités empiriques avec probabilité de dépassement du seuil estimé par la méthode analytique

3.7 Réduction de l'incertitude d'échantillonnage grâce à l'information historique

De nombreux auteurs ont pu mettre en évidence une réduction importante, jusqu'à 50 % et plus, des incertitudes d'échantillonnage sur les quantiles estimés lorsque l'information historique est exploitée (Leese, 1973; Condie et Lee, 1982; Cohn, 1984, 1986; Miquel, 1984; Condie, 1986; Hosking et Wallis, 1986a, 1986b; Stedinger et Cohn, 1986; Cohn et Stedinger, 1987; Phien et Fang, 1989; Wang, 1990b; Guo et Cunnane, 1991; Kuczera, 1992; Pilon et Adamowski, 1993; Francés et al., 1994; Cohn et al., 1997; Francés, 1998; Cohn et al., 2001; Martins et Stedinger, 2001b). Cette réduction, étudiée par le biais de simulations Monte Carlo ou le calcul analytique de la variance asymptotique, est observée quelles que soient :

- les types d'information historique (binomiale: BC, censurée: C, censurée dans un intervalle : IC, crues maximales: MF),
- les approches (série de maximum annuels: AM, série de valeurs supérieures à un seuil: POT),
- les méthodes d'estimation (maximum de vraisemblance: MLE, moments pondérés historiquement: HWM, moments partiels de probabilité pondérés: PPWM, algorithme des moments espérés: EMA),
- les distributions et leurs paramètres.

De manière générale on constate, d'après ces différentes études, que la meilleure méthode (en terme de réduction de la variance) est celle du maximum de vraisemblance avec information censurée (C), dans ce cas le gain augmente avec le rapport N_H/N_S . Le gain est également plus important lorsque la période de retour du quantile d'intérêt est élevée. Lorsque la période de retour du seuil de perception est élevée la différence de gain entre l'information C et IC est faible.

Martins et Stedinger (2001b) sont les seuls à comparer les approches AM et POT avec incorporation de l'information historique (comparaison EV1 / Poisson + EXP et GEV / Poisson + GPA). Ils concluent que, même avec un nombre moyen de crues par an important ($\mu = 5$), les deux approches sont comparables, d'autant plus que la période de retour du seuil de perception est élevée. On note toutefois un léger avantage pour l'approche POT.

3.7 Réduction de l'incertitude d'échantillonnage grâce à l'information historique

De nombreux auteurs ont pu mettre en évidence une réduction importante, jusqu'à 50 % et plus, des incertitudes d'échantillonnage sur les quantiles estimés lorsque l'information historique est exploitée (Leese, 1973; Condie et Lee, 1982; Cohn, 1984, 1986; Miquel, 1984; Condie, 1986; Hosking et Wallis, 1986a, 1986b; Stedinger et Cohn, 1986; Cohn et Stedinger, 1987; Phien et Fang, 1989; Wang, 1990b; Guo et Cunnane, 1991; Kuczera, 1992; Pilon et Adamowski, 1993; Francés et al., 1994; Cohn et al., 1997; Francés, 1998; Cohn et al., 2001; Martins et Stedinger, 2001b). Cette réduction, étudiée par le biais de simulations Monte Carlo ou le calcul analytique de la variance asymptotique, est observée quelles que soient :

- les types d'information historique (binomiale: BC, censurée: C, censurée dans un intervalle : IC, crues maximales : MF),
- les approches (série de maximum annuels: AM, série de valeurs supérieures à un seuil: POT),
- les méthodes d'estimation (maximum de vraisemblance: MLE, moments pondérés historiquement: HWM, moments partiels de probabilité pondérés: PPWM, algorithme des moments espérés: EMA),
- les distributions et leurs paramètres.

De manière générale on constate, d'après ces différentes études, que la meilleure méthode (en terme de réduction de la variance) est celle du maximum de vraisemblance avec information censurée (C), dans ce cas le gain augmente avec le rapport N_H/N_S . Le gain est également plus important lorsque la période de retour du quantile d'intérêt est élevée. Lorsque la période de retour du seuil de perception est élevée la différence de gain entre l'information C et IC est faible.

Martins et Stedinger (2001b) sont les seuls à comparer les approches AM et POT avec incorporation de l'information historique (comparaison EV1 / Poisson + EXP et GEV / Poisson + GPA). Ils concluent que, même avec un nombre moyen de crues par an important ($\mu = 5$), les deux approches sont comparables, d'autant plus que la période de retour du seuil de perception est élevée. On note toutefois un léger avantage pour l'approche POT.

3.8 Prise en compte des erreurs de reconstitution des débits dans les méthodes d'estimation

On remarquera que les conclusions précédentes ne prennent pas en compte les erreurs de mesure des débits de crues, qu'elles soient historiques ou systématiques. Hosking et Wallis (1986a, 1986b) effectuent des simulations en incorporant une erreur de mesure mais n'en tiennent pas compte dans l'expression du maximum de vraisemblance. Kuczera (1992) est le seul à prendre en compte explicitement cette erreur dans une expression du maximum de vraisemblance pour l'information historique de type BC. Il reprend le modèle proposé par Potter et Walker (1981) qui suppose une erreur pour les débits systématiques et historiques supérieurs à un certain seuil.

Les simulations Monte Carlo effectuées par Kuczera (1992) montrent sans ambiguïté que, pour la loi log Normale (LN2), la prise en compte d'une erreur de mesure détériore significativement l'intérêt de l'information historique en terme d'erreur quadratique moyenne (RMSE). Il peut même être plus intéressant de ne pas utiliser l'information historique si l'erreur de mesure n'est pas prise en compte explicitement dans la fonction de vraisemblance.

Il n'est pas opportun de représenter une erreur de mesure sur un débit par une donnée censurée dans un intervalle (IC). En effet cette dernière est réservée aux cas où deux bornes physiques existent. Par exemple les dépôts d'une crue historique sont présents dans une grotte située à un niveau donné (débit y_L) alors qu'ils sont absents d'une autre grotte située à un niveau supérieur (débit y_U).

Une erreur de mesure sur un débit possède sa propre distribution et doit être prise en compte explicitement dans l'expression du maximum de vraisemblance. Dans le cas d'un échantillon systématique de n valeurs, en supposant un modèle simple où les erreurs sont indépendantes, cette expression va s'écrire :

$$L(\Theta|\mathbf{w},\beta) = \prod_{i=1}^n \int_{-\infty}^{\infty} g(w_i|x,\beta) \cdot f_X(x|\Theta) \cdot dx \quad (3.118)$$

avec Θ le vecteur des paramètres recherchés, \mathbf{w} le vecteur des débits estimés, $g(w|x,\beta)$ la fonction de densité des erreurs conditionnée par les vrais débits x inconnus et le vecteur β des paramètres connus de la fonction de densité des erreurs.

La figure (3.15), p. 98, présente des exemples d'ajustement d'une loi EV1 à partir des données systématiques de la station de Vallon (cf. tableau 5.8, colonne Q, p. 200). Quatre cas sont traités : (a) utilisation de l'expression (3.2) du maximum de vraisemblance sans prise en compte de l'erreur, (b) utilisation de l'expression (3.118) avec prise en compte d'une erreur normale où 95 % des valeurs sont entre $\pm 0.25w_i$ ($2\sigma = 0.25$), (c) identique au cas précédent mais avec $2\sigma = 0.4$, (d) utilisation de l'expression MLE_G en considérant toutes les données dans des intervalles [$w_i \times (1 - 0.4)$; $w_i \times (1 + 0.4)$].

Les résultats amènent plusieurs remarques :

- i) les courbes c et d ne sont pas identiques ce qui montre en effet que les données censurées dans un intervalle (IC) ne sont pas adaptées pour représenter les erreurs de mesure. Lorsqu'on envisage une erreur de mesure sur un débit, il est généralement sous entendu une distribution avec un maximum de densité de probabilité (par exemple une distribution symétrique telle que la loi normale). Or en représentant

l'erreur de mesure par une donnée de type IC on ne fixe pas de maximum de densité de probabilité pour le débit.

- ii) Lorsque l'erreur n'est pas prise en compte, ce qui est le cas pour la majorité des expressions présentées dans la littérature, un biais positif est observé pour la loi EV1 (courbe a, surestimation des quantiles). Ce biais augmente avec la variance σ^2 de l'erreur.

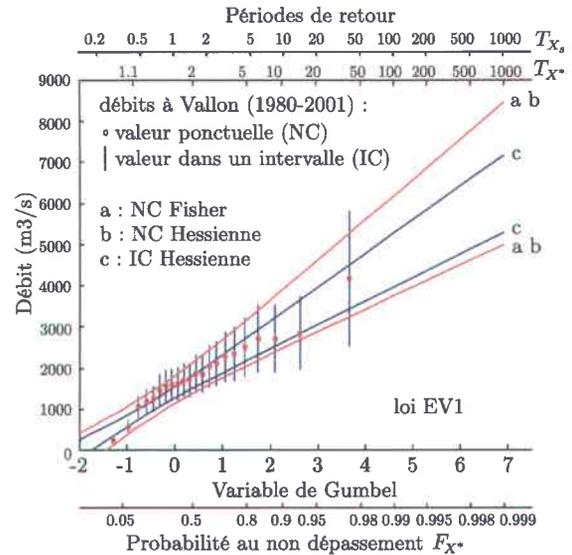
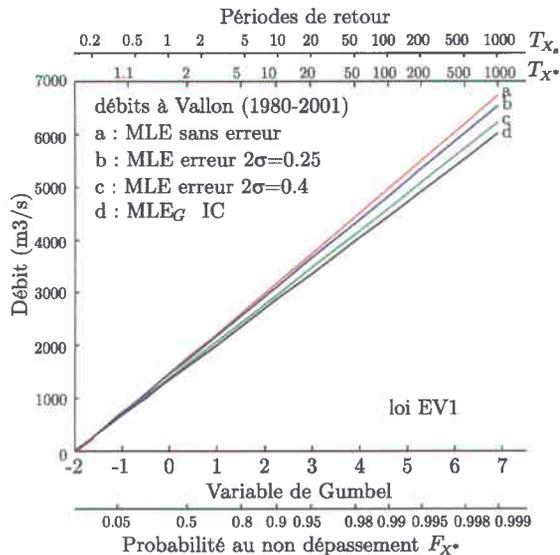


FIG. 3.15 – Influence de l'erreur de mesure sur l'estimation des quantiles

FIG. 3.16 – Estimation de l'intervalle de confiance à 95 % avec débits ponctuels (a et b) ou compris dans un intervalle (c)

Un autre point délicat est lié au calcul de la variance asymptotique des quantiles, et au-delà à celui des intervalles de confiance, lorsque l'information censurée dans un intervalle (IC) est prise en compte. Ce problème est différent du point précédent qui avait trait uniquement à l'estimation en présence d'erreur de mesure (problème de biais). Il est toutefois abordé ici car nous pensions initialement pouvoir représenter les erreurs de mesure des débits par des données de type IC. Il semble, dans le cas de la méthode du maximum de vraisemblance, que la variance asymptotique ne puisse pas être calculée à partir de la matrice Hessienne lorsque des données de type IC sont prises en compte. Ce type d'information est problématique et on notera dans ce sens que les travaux de Cohn et al. (2001), sur le calcul de la variance asymptotique des quantiles estimés par la méthode EMA, ne permettent pas de traiter le cas de l'information IC (les crues sont soit connues, soit supérieures ou inférieures à un seuil).

Cette observation, pour la méthode du maximum de vraisemblance, est illustrée par la figure (3.16), p. 98. Les débits correspondent aux données systématiques de la station de Vallon (cf. tableau 5.8, valeurs ponctuelles : colonne Q, bornes supérieures et inférieures des intervalles : colonnes Qsup et Qinf, p. 200). Des lois EV1 sont ajustées dont seuls

les intervalles de confiance à 95 % sont présentés (distribution des quantiles supposée normale).

Trois cas sont traités :

(a) utilisation des valeurs ponctuelles (NC) et détermination de la variance asymptotique à partir de l'inverse de la *matrice d'information de Fisher* (Leese, 1973 ; Naullet, 2002). En effet d'après Kendall et Stuart (1987), la matrice de variance-covariance \mathbf{V} des estimateurs des paramètres déterminés par la méthode du maximum de vraisemblance, appelée matrice de dispersion, est obtenue en inversant la matrice d'information de Fisher \mathbf{R} :

$$\mathbf{V} = \mathbf{R}^{-1} \quad (3.119)$$

avec les éléments de \mathbf{R} données par :

$$r_{ij} = -E \left(\frac{\partial^2 LL}{\partial \theta_i \partial \theta_j} \right) \quad (3.120)$$

où LL est le logarithme de la fonction de vraisemblance.

(b) utilisation des valeurs ponctuelles (NC) et détermination de la variance asymptotique à partir de l'inverse de la *matrice Hessienne* évaluée au niveau des paramètres estimés (dérivées secondes de la fonction MLE_G , cf. annexe B.4, p. 236). D'après Lubès et al. (1994), lorsque l'espérance mathématique des dérivées secondes de la fonction de vraisemblance est difficilement calculable, on peut utiliser l'approximation suivante :

$$\hat{r}_{ij} = - \left(\frac{\partial^2 LL}{\partial \theta_i \partial \theta_j} \right)_{\theta_i = \hat{\theta}_i, \theta_j = \hat{\theta}_j} \quad (3.121)$$

La matrice de dispersion est donc obtenue suivant :

$$\mathbf{V} = -\mathbf{H}_*^{-1} \quad (3.122)$$

avec \mathbf{H}_* la *matrice Hessienne* (dérivées secondes du logarithme de la fonction de vraisemblance) calculée au niveau des paramètres estimés.

(c) identique au cas b mais avec des valeurs censurées dans un intervalle (IC).

On constate :

(1) que les estimations a et b sont très proches (courbes superposées), c'est à dire que pour la loi de Gumbel l'approximation est relativement bonne. On rapproche ce résultat de ceux de Phien et Fang (1989) qui montrent par des simulations Monte Carlo que l'approximation par la matrice Hessienne calculée au niveau des paramètres estimés est même préférable pour la loi GEV.

(2) que l'intervalle de confiance du cas c est inférieur aux deux autres alors qu'a priori il doit être supérieur.

3.9 Conclusion

Nous avons abordé dans ce chapitre l'analyse fréquentielle des crues avec données historiques. Les méthodes paramétriques adaptées aux séries de maxima annuels (AM) ont été étudiées en premier lieu. Le tableau (3.2) dresse un bilan des différentes méthodes permettant de traiter l'information historique. Ceci nous a conduit à proposer une formulation généralisée pour la méthode du maximum de vraisemblance (MLE_G).

TAB. 3.2 – Propriétés des méthodes statistiques d'exploitation des données historiques

	Méthodes	Auteurs	Principes	Avantages	Inconvénients
Série de Maxima Annuels (AM)	moments pondérés historiquement HWM	USWRC 1976	Idem moments Pondération des moments empiriques	simple	Un seuil unique au cours du temps Sur-représentation artificielle des crues systématiques inférieures au seuil Non représentation de l'information binomiale EQM supérieur à la méthode MLE
	moments partiels de probabilité pondérés PPWM	Wang 1990	Idem moments de probabilité pondérés (PWM)		
	Algorithme des moments espérés EMA	Lane et Cohn 1996	Itérative moments empiriques de la v. a. censurée	converge	EQM supérieur à la méthode MLE
	Maximum de vraisemblance MLE	Leese 1973	Maximiser la vraisemblance de l'échantillon	Tous types d'information censurée Seuils multiples possibles	
POT	Maximum de vraisemblance MLE	Miquel 1984 Martins et Stedinger 2001		EQM inférieur à l'approche AM si μ voisin de 5	Problèmes de convergence

POT : Série de valeurs supérieures à un seuil (Peak Over Threshold)

EQM : Ecart quadratique moyen

μ : nombre moyen de crues par an supérieures au seuil d'échantillonnage

Cette formulation a l'avantage de pouvoir représenter : (a) les quatre types d'information (binomiale : BC, censurée : C, censurée dans un intervalle : IC, crues maximales : MF), (b) une information censurée aussi bien sur la période systématique que sur la période historique (S ou H), (c) des seuils de perception successifs différents au cours du temps. Le fait de considérer uniquement des périodes successives d'une année ne permet pas par contre de calculer la matrice d'information de Fisher. Ainsi la variance asymptotique (*Cramer-Rao Lower Bound*, *CRLB*) des quantiles estimés par la méthode MLE_G ne peut être déterminée qu'à partir de la matrice Hessienne évaluée au niveau des paramètres estimés (*observed information matrix*).

L'approche exploitant les valeurs supérieures à un seuil (POT) a été étudiée en second lieu. Les méthodes qui utilisent l'expression du maximum de vraisemblance ont été privilégiées car elles permettent de traiter relativement facilement l'information hétérogène et, au regard de la littérature, montrent des variances d'échantillonnage plus faibles que

les autres méthodes. Le tableau (3.3), p. 101, présente une synthèse des fonctions de vraisemblance pour les différents types d'information historique (BC, C, IC et MF) suivant les approches. Il met en évidence la similitude entre les expressions de l'approche de type maxima annuel (AM), où l'occurrence des crues supérieures au seuil de perception est représentée par une loi binomiale, et celles de l'approche de type valeur supérieure à un seuil (POT), où l'occurrence des crues supérieures au seuil de perception est représentée ici par une loi de Poisson.

TAB. 3.3 – Synthèse des fonctions de vraisemblance pour les différents types d'information historique (BC, C, IC et MF) suivant les approches maxima annuel (AM) ou valeur supérieure à un seuil (POT)

Approche de type Maxima Annuel (AM) - (B : loi binomiale)

$$L_{bc} = B(k, N_H, F_{X^*}(\Theta|y_H)) = C_{N_H}^k \cdot [1 - F_{X^*}(\Theta|y_H)]^k \cdot [F_{X^*}(\Theta|y_H)]^{N_H - k} \quad (\text{cf. eq. 3.34})$$

$$L_c = B(k, N_H, F_{X^*}(\Theta|y_H)) \cdot \prod_{m=1}^k \frac{f_{X^*}(\Theta|y_m)}{1 - F_{X^*}(\Theta|y_H)} \quad (\text{cf. eq. 3.37})$$

$$L_{ic} = B(k, N_H, F_{X^*}(\Theta|y_H)) \cdot \prod_{m=1}^k \frac{[F_{X^*}(\Theta|y_{U_m}) - F_{X^*}(\Theta|y_{L_m})]}{1 - F_{X^*}(\Theta|y_H)} \quad (\text{cf. eq. 3.40})$$

$$L_{mf} = k! \cdot B(k, N_H, F_{X^*}(\Theta|y_k)) \cdot \prod_{m=1}^k \frac{f_{X^*}(\Theta|y_m)}{1 - F_{X^*}(\Theta|y_k)} \quad (\text{cf. eq. 3.41})$$

Approche de type valeur supérieur à un seuil (POT) - (h_{K_2} : loi de Poisson)

$$L_{sbc} = h_{K_2}(k|\mu_2, N_H) \text{ avec : } \mu_2 = \mu_1 \cdot [1 - G_{X_s}(\Theta|y_H)] \quad (\text{cf. eq. 3.92})$$

$$L_{sc} = h_{K_2}(k|\mu_2, N_H) \cdot \prod_{m=1}^k \frac{g_{X_s}(\Theta|y_m)}{1 - G_{X_s}(\Theta|y_H)} \quad (\text{cf. eq. 3.94})$$

$$L_{sic} = h_{K_2}(k|\mu_2, N_H) \cdot \prod_{m=1}^k \frac{[G_{X_s}(\Theta|y_{U_m}) - G_{X_s}(\Theta|y_{L_m})]}{1 - G_{X_s}(\Theta|y_H)} \quad (\text{cf. eq. 3.96})$$

$$L_{smf} = k! \cdot h_{K_2}(k|\mu_3, N_H) \cdot \prod_{m=1}^k \frac{g_{X_s}(\Theta|y_m)}{1 - G_{X_s}(\Theta|y_k)} \quad (\text{cf. eq. 3.101})$$

avec : $\mu_3 = \mu_1 \cdot [1 - G_{X_s}(\Theta|y_k)]$

k : nombre de crues historiques, N_H : nombre d'années historiques,

y : crue historique d'intensité connue

y_H : seuil de perception des crues historiques

y_k : plus faible des crues historiques classées

y_U, y_L : borne supérieure et inférieure d'une crue historique comprise dans un intervalle

f_{X^*}, F_{X^*} : fonctions de densité et de répartition des AM

g_{X_s}, G_{X_s} : fonctions de densité et de répartition des POT

Après avoir rappelé le principe de détermination des probabilités empiriques sans information historique, nous avons repris le modèle d'incorporation de l'information censurée développé par Hirsch et Stedinger (1987). Une modification a été introduite pour le cas où différents seuils de perception existent au cours du temps.

Enfin nous avons mis en lumière les problèmes liés notamment à l'erreur de mesure. Si

l'ensemble des auteurs conclue à l'intérêt de l'information historique lorsque les données sont supposées sans erreur, il semble que ce résultat soit à nuancer lorsque les erreurs de mesure des débits sont prises en compte. Nous avons uniquement présenté un exemple d'incorporation de cette erreur dans la fonction de vraisemblance pour le cas de la loi EV1, sans prise en compte de l'information historique. Des problèmes de convergence numérique ont été rencontré avec la loi GEV.

Sans prise en compte de l'erreur de mesure, les travaux de Cohn et Stedinger (1987) et de Martins et Stedinger, (2001b), respectivement pour les approches AM et POT, montrent que l'intérêt de l'information historique est plus important pour les lois à trois paramètres plutôt que celles à deux paramètres. Il serait intéressant, en terme de perspective, que des études comparables à celles de Kuczera (1992), qui a travaillé sur la prise en compte des erreurs de mesure avec une loi à deux paramètres, soient effectuées avec des lois à trois paramètres. A cet effet l'approche bayésienne semble plus prometteuse pour contourner les problèmes numériques. On notera dans ce sens les travaux de Martins et Stedinger (2000, 2001a) qui, sans effectuer une analyse bayésienne complète, considèrent des distributions a priori pour restreindre le domaine des paramètres de forme des lois GEV et GPA dans une gamme plausible.

3.10 Bibliographie

- Adamowski, K. et Feluch, K. (1990). Nonparametric flood-frequency analysis with historical information, *Journal of Hydraulic Engineering. ASCE*, 116 (8) : 1035-1047.
- Adamowski, K., Liang, G. C. et Patry, G. G. (1998). Annual maxima and partial duration flood series analysis by parametric and non-parametric methods, *Hydrological Processes*, 12 (10/11) : 1685-1699.
- Abramowitz, M. et Stegun, I. A. (1965). Handbook of Mathematical Functions, *Applied Math*, Vol. 55, chapter 6.5, National Bureau of Standards, Dover Publications.
- Arnell, N. W., Beran, M. et Hosking, J. R. M. (1986). Unbiased plotting positions for General Extreme Value distribution, *Journal of Hydrology*, 86 : 59-69.
- Ashkar, F. et Bobée, B. (1987). The generalized method of moments as applied to problems of flood frequency analysis : some practical results for the log-Pearson type 3 distribution, *Journal of Hydrology*, 90 : 199-217.
- Ashkar, F. et Ouarda, T. B. M. J. (1996). On some methods of fitting the generalized Pareto distribution, *Journal of Hydrology*, 177 : 117-141.
- Bardsley, W. E. (1989). Using historical data in nonparametric flood estimation, *Journal of Hydrology*, 108 (1/4) : 249-255.
- Beard, L. R. (1943). Statistical analysis in hydrology, *Trans. Am. Soc. Civ. Eng.*, 108 : 1110-1160.
- Benson, M. A. (1950). Use of historical data in flood frequency analysis, *American Geophysical Union*, 31 (3) : 419-424.
- Bernier, J. (1967). Sur la théorie du renouvellement et son application en hydrologie, *Rapport technique*, HYD 67, n°10, EDF.
- Bernier, J. (1981). Eléments de statistique bayésienne, *Rapport technique*, HE 40/81.09, EDF.
- Bernier, J. , Parent, E. et Boreux, J. J. (2000). *Statistique pour l'environnement : traitement bayésien de l'incertitude*. Ed. Tec & Doc, 363p.
- Bobée, B. (1999). Estimation des événements extrêmes de crue par l'analyse fréquentielle : une revue critique, *La Houille Blanche* (7/8) : 100-105.
- Bobée, B. et Ashkar, F. (1991). *The Gamma family and derived distributions applied in hydrology*, Water Ressources Publications.
- Borgman, L. E. (1963). Risk criteria, *Proc. of ASCE*, 89 (WW3) : 1-35.
- Chowdhury, J. U. et Stedinger, J. R. (1991). Confidence intervals for design flood with estimated skew coefficient, *Journal of Hydraulic Engineering. ASCE*, 117 (7) : 811-831.
- Cohn, T. A. (1984). *The incorporation of historical information in flood frequency analysis*, Master of Science, Faculty of the Graduate School of Cornell University, Cornell, aug.
- Cohn, T. A. (1986). *Flood frequency analysis with historical flood information*, PhD thesis, Faculty of the Graduate School of Cornell University, Cornell, jun.
- Cohn, T. A., Lane, W. L. et Baier, W. G. (1997). An algorithm for computing moments-based flood quantile estimates when historical flood information is available, *Water Resources Research*, 33 (9) : 2089-2096.

- Cohn, T. A., Lane, W. L. et Stedinger, J. R. (2001). Confidence intervals for expected moments algorithm flood quantile estimates, *Water Resources Research*, 37 (6): 1695-1706.
- Cohn, T. A. et Stedinger, J. R. (1987). Use of historical information in a maximum-likelihood framework, *Journal of Hydrology*, 96 (1/4): 215-223.
- Condie, R. (1986). Flood samples from a three-parameter lognormal population with historic information: the asymptotic standard error of estimate of the T-year flood, *Journal of Hydrology*, 85: 139-150.
- Condie, R. et Lee, K. A. (1982). Flood frequency analysis with historic information, *Journal of Hydrology*, 58: 47-61.
- Cunnane, C. (1978). Unbiased plotting positions, a review, *Journal of Hydrology*, 37: 205-222.
- Cunnane, C. (1979). A note on the Poisson assumption in partial duration series models, *Water Resources Research*, 15 (2): 489-494.
- Cunnane, C. et Nash, J. E. (1971). Bayesian estimation of frequency of hydrologic events, *Proceeding of the Warsaw Symposium - Mathematical models in hydrology*, Vol. 1, jul, pp. 47-55.
- Francés, F. (1998). Using the TCEV distribution function with systematic and non-systematic data in a regional flood frequency analysis, *Stochastic Hydrology and Hydraulics*, 12: 267-283.
- Francés, F. (2001). Incorporating non-systematic information to flood frequency analysis using the maximum likelihood estimation method, in Glade, T., Albin, P. et Francés, F. (ed.), *The Use of Historical Data in Natural Hazard Assessments*, Vol. 17 of *Advances in Natural and Technological Hazards Research*, chapter B: Flooding, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, oct., 89-99.
- Francés, F., Salas, J. D. et Boes, D. C. (1994). Flood frequency analysis with systematic and historical or paleoflood data based on the two-parameter general extreme value models, *Water Resources Research*, 30 (6): 1653-1664.
- Goffe, W. L., Ferrier, G. D. et Rogers, J. (1994). Global Optimization of Statistical Functions with Simulated Annealing, *Journal of Econometrics*, 60 (1/2): 65-100.
- Greenwood, J. A., Landwehr, J. M., Matalas, N. C. et Wallis, J. R. (1979). Probability Weighted Moments, *Water Resources Research*, 15 (5).
- Gringorten, I. I. (1963). A plotting rule for extreme probability paper, *J. Geophys. Res.*, 63 (3): 813-814.
- Guo, S. L. (1990). A discussion on unbiased plotting positions for the general extreme value distribution, *Journal of Hydrology*, 121 (1-4): 33-44.
- Guo, S. L. (1991). Nonparametric variable kernel estimation with historical floods and paleoflood information, *Water Resources Research*, 27 (1): 91-98.
- Guo, S. L. et Cunnane, C. (1991). Evaluation of the usefulness of historical and palaeological floods in quantile estimation, *Journal of Hydrology*, 129 (1/4): 245-262.
- Haktanir, T. et Bozdoğan, A. (1995). A study on sensitivity of the probability-weighted moments method on the choice of the plotting position formula, *Journal of Hydrology*, 168: 265-281.
- Hirsch, R. M. (1987). Probability plotting position formulas for flood records with historical information, *Journal of Hydrology*, 96 (1/4): 185-199.

- Hirsch, R. M. et Stedinger, J. R. (1987). Plotting positions for historical floods and their precision, *Water Resources Research*, 23 (4) : 715-727.
- Hosking, J. R. M. (1989). Some theoretical results concerning L-moments, *Research Report*, RC14492, IBM Research Division, Yorktown Heights, N.Y., march.
- Hosking, J. R. M. (1990). L-Moments: Analysis and estimation of distributions using linear combinations of order statistics, *Journal of the Royal Statistical Society*, B (52) : 105-124.
- Hosking, J. R. M. (1995). The use of L-moments in the analysis of censored data, in Balakrishnan, N. (ed.), *Recent advances in life-testing and reliability*, CRC Press, Boca Raton, pp. 545-564.
- Hosking, J. R. M. et Wallis, J. R. (1986a). Paleoflood hydrology and flood frequency analysis, *Water Resources Research*, 22 (4) : 543-550.
- Hosking, J. R. M. et Wallis, J. R. (1986b). The value of historical data in flood frequency analysis, *Water Resources Research*, 22 (11) : 1606-1612.
- Hosking, J. R. M. et Wallis, J. R. (1997). *Regional frequency analysis: an approach based on L-moments*, Cambridge University Press, Cambridge, U.K.
- Hosking, J. R. M., Wallis, J. R. et Wood, E. F. (1985). Estimation of the Generalized Extreme-Value Distribution by the Method of Probability-Weighted Moments, *Technometrics*, 27 (3) : 251-261.
- In-na, N. et Nguyen, V. T. V. (1989). An unbiased plotting position formula for the general extreme value distribution, *Journal of Hydrology*, 106 : 193-209.
- Interagency Advisory Committee On Water Data (1982). Guidelines for determining flood flow frequency, Hydrology Subcommittee, US Department of the interior Geological Survey Office of Water Data Coordination, Washington, DC.
- Kendall, M. G. et Stuart, A. (1987). *The advanced theory of statistics*, 5^e édition, Griffin and Co, London
- Kimball, B. F. (1946). Assignment of frequencies to a completely ordered set of sample data, *Trans. Am. Geophys. Union*, 27 (6) : 843-846.
- Kirby, W. H. (1981). Instructions for peak flow file, *Technical Report 79-1336-1*, U.S. Geol. Surv. Open File Rep.
- Kroll (1996). Estimation of Moments and Quantiles With Censored Data, *Water Resources Research*, 32 (4) : 1005-1012.
- Kuczera, G. (1992). Uncorrelated Measurement Error in Flood Frequency Inference, *Water Resources Research*, 28 (1) : 183-188.
- Landwehr, J. M., Matalas, N. C. et Wallis, J. R. (1979). Probability Weighted Moments compared with some traditional techniques in estimating Gumbel parameters and quantiles, *Water Resources Research*, 15 (5) : 1055-1064.
- Lane, W. L. et Cohn, T. A. (1996). Expected Moments Algorithm for flood frequency analysis, *North American water and Environment Congress '96*, Anaheim, California, USA, jun, 6 p.
- Lang, M., Coeur, D., Lallement, C., Nautlet, R. et Boudou, G. (1998). Historisque-Guiers - Utilisation de l'information historique pour une meilleure définition du risque inondation, *Rapport technique*, Pôle Grenoblois d'Etude et de Recherche pour la Prévention des Risques Naturels, jun.

- Lang, M., Ouarda, T. B. M. J. et Bobée, B. (1999). Towards operational guidelines for over-threshold modeling, *Journal of Hydrology*, 225 : 103-117.
- Lang, M., Rasmussen, P. F., Oberlin, G. et Bobée, B. (1997). Echantillonnage par valeurs supérieures à un seuil : modélisation des occurrences par la méthode du renouvellement. Over-threshold sampling : Modeling of occurrences by renewal processes, *Revue des Sciences de l'Eau*, 10 (3) : 279-320.
- Leese, M. N. (1973). Use of censored data in the estimation of Gumbel distribution parameters for annual maximum flood series, *Water Resources Research*, 9 (6) : 1534-1542.
- Lehmann, E. L. (1983). *Theory of Point Estimation*, Wiley, New York.
- Lubès, H., Masson, J. M., Raous, P. et Tapiou, M. (1994). *Safarhy : logiciel de calculs statistiques et d'analyse fréquentielle adapté à l'évaluation du risque en hydrologie*, Manuel de référence, version 2.111, ORSTOM, Université Montpellier II.
- Martins, E. S. et Stedinger, J. R. (2000). Generalized-maximum likelihood generalized extreme-value quantile estimators for hydrologic data, *Water Resources Research*, 28 (3) : 737-744.
- Martins, E. S. et Stedinger, J. R. (2001a). Generalized maximum likelihood Pareto-Poisson estimators for partial duration series, *Water Resources Research*, 37 (10) : 2551-2557.
- Martins, E. S. et Stedinger, J. R. (2001b). Historical information in generalized maximum likelihood framework with partial duration and annual maximum series, *Water Resources Research*, 37 (10) : 2559-2567.
- Miquel, J. (1984). *Guide pratique d'estimation des probabilités de crues*, Vol. 53, *Collection de la Direction des Etudes et Recherches d'Electricité de France*, Eyrolles, Paris.
- Morlat, G., Billiet, A. et Bernier, J. (1956). Les crues de la Haute Durance et la théorie statistique des valeurs extrêmes, Vol. 42, AISH, Symposia Darcy, Dijon.
- Musy, A. (2001). Cours d'Hydrologie générale (en hypertexte sur Internet), EPFL, <http://dgrwww.epfl.ch/HYDRAM/e-drologie>, non publié.
- Naulet, R. (2002). Eléments de statistique appliqués à l'hydrologie, *Rapport technique*, Cemagref, Lyon, 123p.
- Nelder, J. A. et Mead, R. (1965). A Simplex Method for Function Minimization, *Computer Journal*, 7 : 308-313.
- O'Connell, D. (1999). *FLDFRQ3 Three-parameter maximum likelihood flood-frequency estimation with optimal probability regions using parameter grid integration : User's Guide (Release 1.1)*, U.S. Bureau of Reclamation, Denver, CO, feb. (<ftp://ftp.seismo.usbr.gov/pub/outgoing/geomagic/src/fldfqr3/userman.pdf>)
- O'Connell, D., Levish, D. et Ostenaar, D. (1996). Bayesian flood frequency analysis with paleohydrologic bounds for late Holocene paleofloods, Santa Ynez river, California, in Gruntfest, E. (ed.), *Twenty Years Later What We Have Learned Since the Big Thompson Flood of Special Publication*, Vol. 33, Natural Hazards Research and Applications Information Center, University of Colorado, Boulder, Colorado, USA, pp. 183-196.
- O'Connell, D., Levish, D. et Ostenaar, D. (1999a). Exploiting Observed Limits of Extreme Flooding : Bayesian Flood-Frequency Analyses Using Paleoflood Information and Data Uncertainties, *Journal of Water Resources Environment ASCE* .

- O'Connell, D., Levis, D. et Ostenaar, D. (1999b). The value of paleohydrologic information in dam safety decision-making, *ASDSO, 1999 Annual Conference Proceedings*, Association of State Dam Safety Officials, St. Louis, Missouri, USA, oct.
- Ouarda, T. B. M. J., Rasmussen, P. F., Bobée, B. et Bernier, J. (1998). Utilisation de l'information historique en analyse hydrologique fréquentielle, *Revue des Sciences de l'Eau* (spécial): 41-49.
- Ouarda, T. B. M. J., Rasmussen, P. F., Haché, M., Bobée, B., Bruneau, P. et Fagherazzi, L. (1997). Analyse fréquentielle des apports naturels au lac Kénogami avec de l'information historique, *rapport de recherche confidentiel*, R-496, INRS-Eau.
- Phien, H. N. et Fang, T.-S. E. (1989). Maximum likelihood estimation of parameters and quantiles of general extreme-value distribution from censored samples, *Journal of Hydrology*, 105: 139-155.
- Pilon, P. J. et Adamowski, K. (1993). Asymptotic variance of flood quantile in log Pearson type III distribution with historical information, *Journal of Hydrology*, 143 (3/4): 481-503.
- Potter, K. W. et Walker, J. F. (1981). A model of discontinuous measurement error and its effects on the probability distribution of flood discharge measurements, *Water Resources Research*, 17 (5): 1505-1509.
- Qian, T. (1964). The determination of plotting position of the flood in presence of historical flood data (in chinese), *Shui Li Xuebao*, 2: 50-54.
- Shane, R. M. et Lynn, W. R. (1964). Mathematical model for flood risk evaluation, *Journal of the Hydraulics Division. ASCE*, 90 (HY6): 1-20.
- Shannon, C. E. (1948). A mathematical theory of communication, *Bell System Technical Journal*, 27: 379-423.
- Stedinger, J. R. et Cohn, T. A. (1986). Flood frequency analysis with historical and paleoflood information, *Water Resources Research*, 22 (5): 785-793.
- Sutcliffe, J. V. (1987). The use of historical records in flood frequency analysis, *Journal of Hydrology*, 96 (1/4): 159-171.
- Tarantola, A. (1987). *Inverse problems theory: Methods for data fitting and model parameter estimation*.
- Tasker, G. D. et Thomas, W. O. (1978). Flood-frequency analyses with prerecord information, *ASCE Proceedings, Journal of the Hydraulics Division. ASCE*, Vol. 104, feb, pp. 249-259.
- United States Water Resources Council (1976). Guidelines for determining flood flow frequency, Washington, DC, march.
- Vogel, R. M. et Fennessey, N. M. (1993). L-moment diagrams should replace product-moment diagrams, *Water Resources Research*, 29: 1745-1752.
- Wang, Q. J. (1990a). Estimation of the GEV distribution from censored samples by method of partial probability weighted moments, *Journal of Hydrology*, 120 (1/4): 103-114.
- Wang, Q. J. (1990b). Unbiased estimation of probability weighted moments and partial probability weighted moments from systematic and historical flood information and their application to estimating the GEV distribution, *Journal of Hydrology*, 120 (1/4): 115-124.

- Wang, Q. J. (1991). Unbiased plotting positions for historical flood information, *Journal of Hydrology*, 124 (3/4): 197-205.
- Wang, Q. J. (1997). LH moments for statistical analysis of extreme events, *Water Resources Research*, 33 (12): 2841-2848.
- Weibull, W. (1939). *A statistical theory of strenght of materials*, Ing. Vet. Ak. Handl., Stockholm.
- Yagouti, A., Abi-Zeid, I., Ouarda, T. B. M. J. et Bobée, B. (2001). Revue de processus ponctuels et synthèse de tests statistiques pour le choix d'un type de processus, *Revue des Sciences de l'Eau* (14/3): 323-361.
- Zafirakou-Koulouris, A., Habermeier, J., Craig, S. M. et Vogel, R. M. (1998). L-moment diagrams for censored observations, *Water Resources Research*, 34: 1241-1249.
- Zhang, Y. (1982). Plotting positions of annual flood extremes considering extraordinary values, *Water Resources Research*, 18 (4): 859-864.

Chapitre 4

Collecte des données historiques sur les inondations : méthodologie et résultats sur les crues de l'Ardèche

Sommaire

4.1	Introduction	110
4.2	Présentation du bassin versant étudié	111
4.3	Inventaire et collecte des informations sur les crues historiques	116
4.3.1	Aspects généraux de la méthodologie	116
4.3.2	Déroulement de la démarche	117
4.3.2.1	Etat Général des Sources (EGS)	119
4.3.2.2	Collation des données	121
4.3.2.3	Elaboration des différents historiques	122
4.4	Principaux résultats concernant les historiques	125
4.4.1	Rapide historique des services producteurs de données techniques sur les cours d'eau	125
4.4.1.1	Données topographiques	126
4.4.1.2	Données hydrométriques	130
4.4.1.3	Données météorologiques	133
4.4.2	Valeurs remarquables de pluies et de cotes de crues de l'Ardèche issues de l'enquête historique	135
4.4.2.1	Valeurs remarquables de pluies	135
4.4.2.2	Valeurs remarquables de cotes de crue	137
	Données historiques du Service d'Annonce des Crues (SAC)	137
	Données historiques antérieures au SAC	140
	Données systématiques	148
4.5	Conclusion	153
4.6	Bibliographie	154

4.1 Introduction

Ce chapitre aborde la collecte des données historiques sur les inondations à travers l'étude de cas de la rivière Ardèche (France). Après une présentation succincte des principales caractéristiques du bassin versant étudié (§4.2, p. 111), nous détaillons la méthodologie mise en oeuvre pour l'inventaire et la collecte de l'information historique (§4.3, p. 116).

Cette méthodologie, dénommée HISTORISQUE, a été établie pour répondre aux problèmes soulevés au chapitre 2. Elle revêt un caractère novateur de part son cadre interdisciplinaire qui voit une collaboration entre historiens et hydrologues (Coeur et Lang, 2000; Naulet et al., 2001). Nous abordons successivement dans cette partie les aspects généraux de la méthodologie (§4.3.1, p. 116) et le déroulement de la démarche (§4.3.2, p. 117). Le cas de l'Ardèche est pris comme support pour illustrer l'état d'avancement des travaux. Ces derniers synthétisent également l'expérience acquise lors des études sur le Guiers (Lang et al., 1998a, 1998b, 1999) et l'Isère (Brochot et al., 2000; Coeur et al., 1998; Coeur et Lang, 2000), ils se poursuivent dans le cadre du projet européen SPHERE (Benito et al., 2000).

La dernière partie a trait aux principaux résultats obtenus à l'issue de l'enquête historique (§4.3, p. 116). Nous présentons en premier lieu des historiques des services producteurs de données techniques sur les cours d'eau (§4.4.1, p. 125) : données topographiques, hydrométriques et météorologiques. Ces différents historiques étant relativement universels, ils sont facilement exploitables sur d'autres cours d'eau français bien que certains éléments soient spécifiques à l'Ardèche. Les valeurs remarquables de pluies et de cotes de crues de l'Ardèche issues de l'étude historique sont présentées en second lieu (§4.4.2, p. 135).

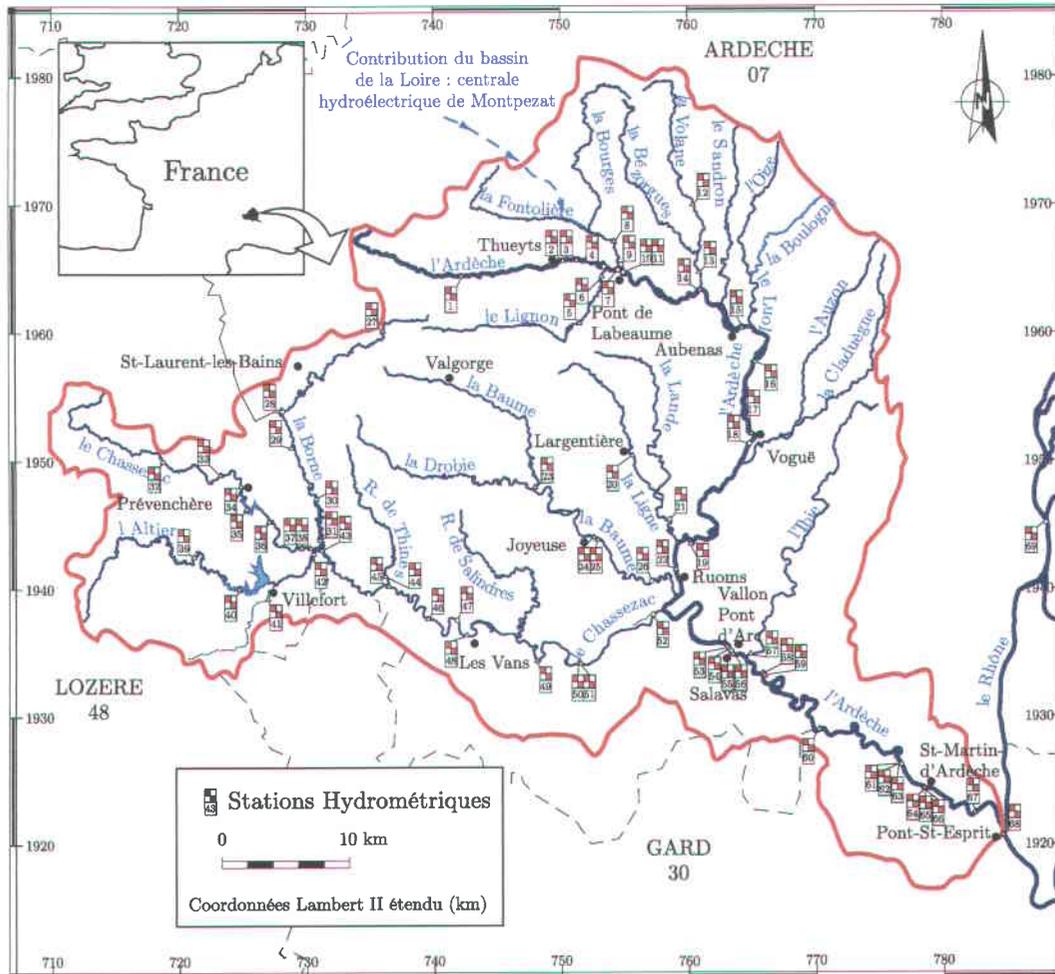
4.2 Présentation du bassin versant étudié

Le bassin versant de l'Ardèche (cf. figure 4.1, p. 112) est l'objet de crues d'intensités remarquables liées à la synergie entre les facteurs météorologiques, hydrographiques, géologiques et topographiques propices à l'écoulement rapide des crues (cf. figure 4.3, p. 113, hydrogrammes de quelques crues récentes à la station de Sauze St-Martin, n° 61).

Le bassin subit à la fois l'influence de perturbations d'origines océanique et méditerranéenne. Ces dernières produisent des averses dites *cévenoles* caractérisées par leurs fortes intensités et une période préférentielle d'occurrence en automne (cf. figure 4.4, p. 113, pour une représentation du régime de l'Ardèche à la station de Sauze St-Martin, n° 61). A titre d'illustration, le recensement par Météo-France (Deblaère et Fabry, 1998) des épisodes de pluies diluviennes (cumul supérieur à 190 mm) en Auvergne, Bourgogne et Rhône-Alpes, pour la période 1961-1996, conduit à la mise en évidence de 76 épisodes, dont 66 intéressent le seul département de l'Ardèche. Le seuil de 400 mm a été dépassé à sept reprises sur l'Ardèche, avec notamment 710 mm de précipitations mesurées au poste de Mayres, épisode du 10-12 novembre 1996, et 579 mm au poste de Mazan-l'Abbaye, épisode du 20-21 septembre 1980 (cf. figure 4.5, p. 114, pour la localisation des pluviomètres). Guillot (1959) présente les aspects hydrométéorologiques des crues cévenoles et détaille la situation météorologique à l'origine des crues remarquables du 30 septembre et 4 octobre 1958. Le schéma général conduisant à ce type de crue est la présence d'une perturbation (dépression) sur les côtes atlantiques (entre le nord du Portugal et la Scandinavie) et d'un anticyclone (hautes pressions) centré sur l'Italie. Cette situation génère un flux de sud sud-est canalisé dans la vallée du Rhône qui pénètre ensuite les affluents cévenols. Au contact des reliefs des Cévennes, cette masse d'air chaud et humide est forcée de s'élever provoquant des pluies orographiques dont l'intensité peut être décuplée, si de surcroît, elle se heurte à un front froid océanique.

Le réseau hydrographique de l'Ardèche (cf. figure 4.1, p. 112) est caractérisé dans sa partie supérieure par de fortes pentes : plusieurs dizaines de mètres par kilomètre jusqu'à Thueyts (cf. figure 4.5, p. 114, topographie issue du MNT à maille kilométrique Sauquet, 2000 ; et figure 4.2, p. 113, profil en long). Son cours supérieur coule d'ouest en est dans une vallée étroite, creusée dans des roches cristallines propices au ruissellement rapide (granites puis gneiss rubanés, cf. figure 4.7, p. 114). La rivière traverse ensuite des formations basaltiques puis schisteuses dans la direction nord-sud avec une pente de quelques mètres par kilomètre. L'Ardèche reprend son orientation initiale (ouest-est) à partir de Vallon-Pont-d'Arc (Vallon) et coule avec une faible pente au sein de gorges traversant un plateau calcaire avant de rejoindre le Rhône à une altitude de 34 mètres.

Plus d'un sixième du bassin versant est situé en moyenne montagne (altitude supérieure à 1000 m , cf. courbe hypsométrique, figure 4.6, p. 114) avec des points culminants vers 1600 mètres. Les deux affluents principaux de l'Ardèche, le Chassezac et la Baume, convergent sensiblement en un même point de son cours moyen, le pourcentage de la surface drainée du bassin passe ainsi brusquement de 40 à 80 % en aval de Ruoms (cf. figure 4.2, p. 113). Ces trois sous bassins sont cloisonnés par des contreforts élevés (1200 à 1500 mètres d'altitude), aux versants abrupts (chute de 900 mètres en quelques kilomètres). Cette structure en trident confère au bassin versant de l'Ardèche un régime hydrologique particulier. Avec des temps de concentrations quasi-identiques, la concomitance des crues génère des débits de pointe particulièrement élevés.



N°	NOMS des STATIONS	GESTIONNAIRES	PERIODES	N	NOMS des STATIONS	GESTIONNAIRES	PERIODES
1	Pont de Mayres	SAC 07	1857-1861	35	Le Rachas (Chassezac)	SAC 07, EDF	1929-1968 1966-act. ?
2	Thueyts	SAC 07	1891-1937	36	Albepeyre (Chassezac)	EDF	1955-1965
3	Neyrac les Bains	SAC 07	1937-1968 et plus ?	37	Pied de Borne (Chassezac)	SAC 07, EDF (var. de rés.)	1921-1968 1966-1969
4	Pont de Barutel	DIREN-RA (SEMA)	1984-activité	38	La Rouvière (Chassezac)	SAC 07	1929-1968 et plus ?
5	Jaujac (Lignon)	SAC 07	1892-1964 arrêté en ?	39	La Goulette (Altier)	DIREN-LR	1975-activité
6	La Taillade (Lignon)	SAC 07	1954-arrêté en ?	40	Pont Castanet (Altier)	EDF	1955-1963
7	Pont de Rolandy	4° CE, SHC, AFB-RMC, DIREN-RA	av 1964-1977	41	Villefort (Altier)	EDF	1956-activité
8	Chirois (Fontolière)	SAC 07	1892-1964 et plus ?	42	St Marguerite (Altier)	SAC 07, S. des F. Hydraul.	1921-1968 et plus ?
9	Pont de Pourtalou (Fontolière)	DIREN-RA (SEMA)	1978-1986	43	St Marguerite (Chassezac)	S. des F. Hydraul., EDF	1919-1946 1966-1969
10	Pont de Labeaume	4° CE, 6° CE, SHC, AFB-RMC, DIREN-RA	1959-activité	44	Pont de Gourmier (R. Thines)	EDF	1997-activité
11	Pont de Labeaume	SAC 07	1857-1862 1958-act.	45	Thinettes (Chassezac)	6° CE	1955-1966
12	Lazuel (Volane)	EDF	1952-1961	46	Gravières (Chassezac)	SAC 07 remp. Chambonas	1990-activité
13	Vals les Bains (Volane)	SAC 07	1892-activité	47	Les Bertrones (Chassezac)	EDF	1970-activité
14	Pont de Labégude	SAC 07	1861-1875	48	Chambonas-Les Vans (Chassezac)	SAC 07,	1857-1875 1892-1990
15	Pont d'Aubenas - Ucel	SAC 07	1857-1860 1878-1885	49	Mazet Plage (Chassezac)	4° CE	1962-1966
16	Pont de Ville	SAC 07	1891-1964 et plus ?	50	Pt de la maison-neuve (Amont - Chassezac)	dans banque hydro ?	1857-1860
17	Voguë	SAC 07	1857-1860	51	Pt de la maison-neuve (Aval - Chassezac)	SAC 07	1857-1860
18	Voguë	SAC 07, 6° CE, SHC, AFB-RMC, DIREN-RA	1857-1860 1892-1991	52	St Alban Auriolles (R. des Fontaines)	DIREN-RA	1984-activité
19	Pont de Chauzon	S. des Forces Hydrauliques	1922-perte arch. 1942	53	Moulin de Salavas	SAC 07, inconnu	1857-1860 (1644-1890) existe de 1994-2000
20	Pont de Barrante (Ligne)	SAC 07	1857-1861	54	Seuil amont Pont de Salavas	CGE	1921-1926
21	Gourami (Ligne)	DIREN-RA	1968-1990	55	Pont de Salavas-Vallon	SAC 07, CNR	1857-1876 1892-act.
22	Pont de Ruoms	SAC 07	1857-1876	56	Limnigraphie de Vallon	SAC 07, 4° CE, 6° CE, AFB-RMC, SHC	1961-1970 arrêté en ?
23	Les Deux Aigues (Baume)	SAC 07	1959-1964 et plus ?	57	Pont d'Ibie (L'Ibie)	SAC 07	1857-1861
24	Pont de Joyeuse (amont - Baume)	SAC 07	1857-1861	58	Pont d'Arc (Amont - arche)	SAC 07	1857-1860
25	Joyeuse - Rosières (aval - Baume)	SAC 07	1857-1861 1892-act.	59	Pont d'Arc (Aval - arche)	SAC 07	1857-1860
26	Auriolles (Baume)	DIREN-RA	1966-1981	60	Maison Gourmier	SAC 07	1857-1860
27	Les Chambons (Borne)	EDF	1956-1965	61	Sauze St-Martin	CGE,	1921-1927
28	Pont de Nicoulaud (Borne)	EDF	1964-activité			4° CE, 6° CE, AFB-RMC, SHC, DIREN-RA	1965-activité
29	La Madelaine (Borne)	SAC (LOZERE ?)	1921-1968				
30	Charais (Borne)	EDF	1997-activité	62	Sauze St-Martin	CNR	1991-activité
31	St-Marguerite (Borne)	S. des Forces Hydrauliques,	?	63	Sauze St-Martin	EDF	1991-activité
32	Le Mas (Chassezac)	EDF	1956-1996	64	St-Martin d'Ardèche	SAC 07	1857-1860 1892-act.
33	Barrage de Puy-laurent (Chassezac)	EDF	1956-1994	65	St-Martin d'Ardèche	4° CE, 6° CE, AFB-RMC	1955-1991
34	Prévenchère (Chassezac)	EDF (déversés du barrage)	1995-activité	66	St-Martin d'Ardèche	CNR	1970-1992
		SAC 07,	1892-1964 arrêté en ?	67	Pont de St-Just	SAC 07, S. des Ch. de Fer	1857-1861 1921-1957
		S. des Forces Hydrauliques		68	Pont St-Esprit (Rhône)	SAC 07	1857-1861
				69	Viviers (Rhône)	Serv. du Rhône, CNR	1919-activité

FIG. 4.1 – Détail des stations hydrométriques du bassin versant de l'Ardèche depuis 1857

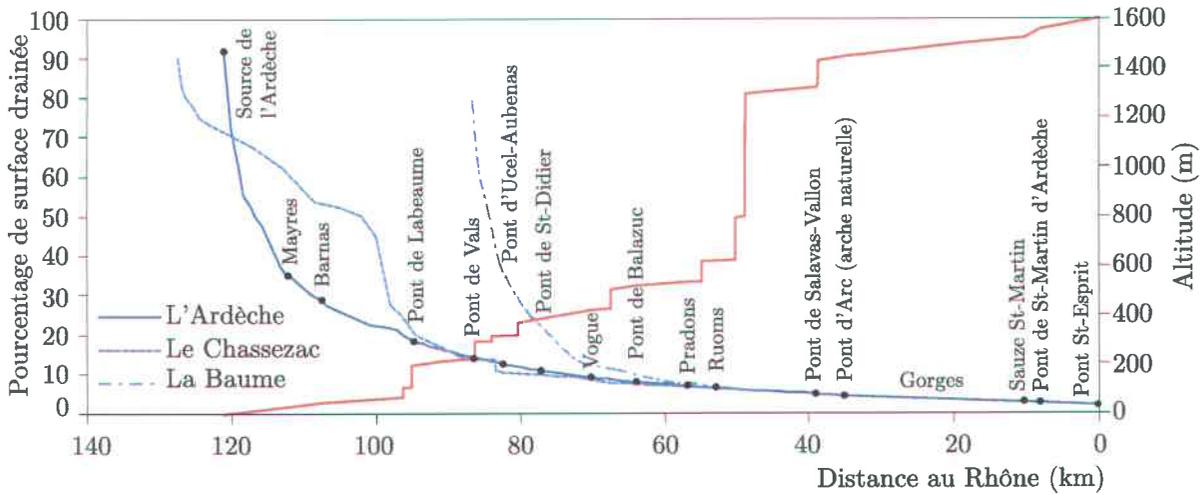


FIG. 4.2 - Profil en long de l'Ardèche et surface drainée

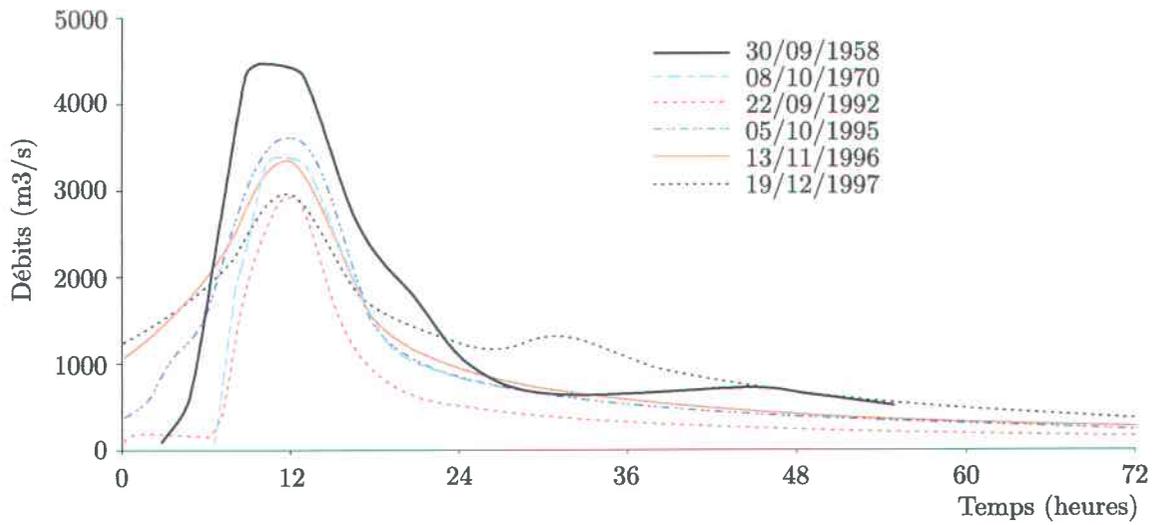


FIG. 4.3 - Hydrogrammes de quelques crues à la station de Sauze St-Martin (n° 61)

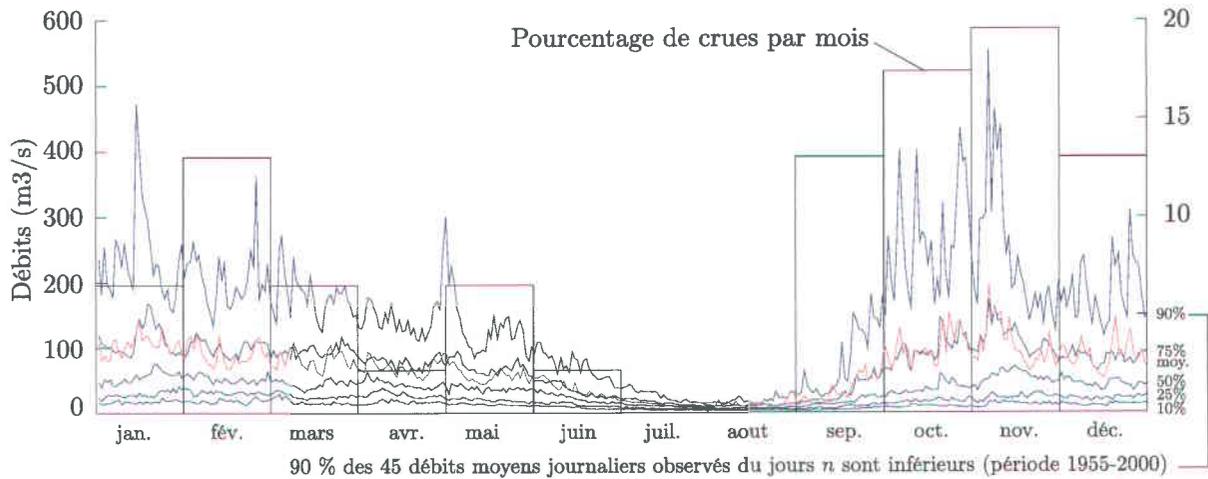


FIG. 4.4 - Répartition des débits moyens journaliers suivant l'époque de l'année à la station de Sauze St-Martin (n° 61) - Régime pluvial cévenol

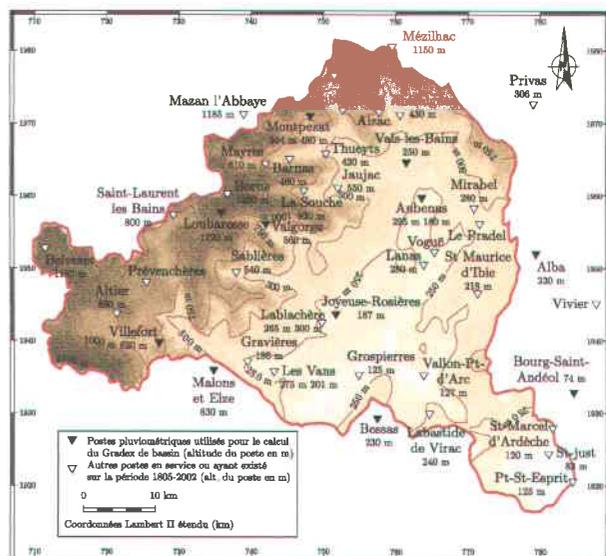


FIG. 4.5 – Topographie et pluviomètres du bassin de l'Ardèche

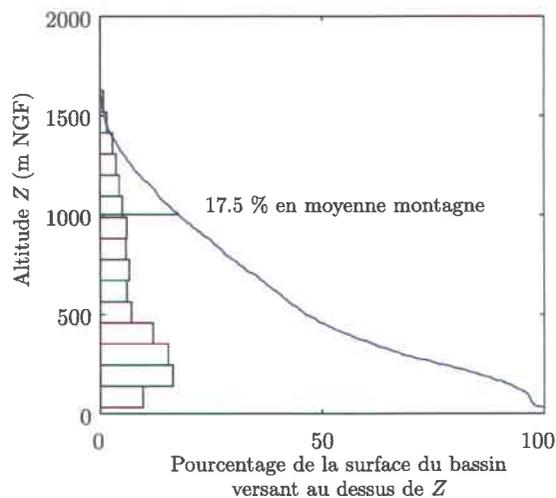


FIG. 4.6 – Courbe hypsométrique du bassin de l'Ardèche

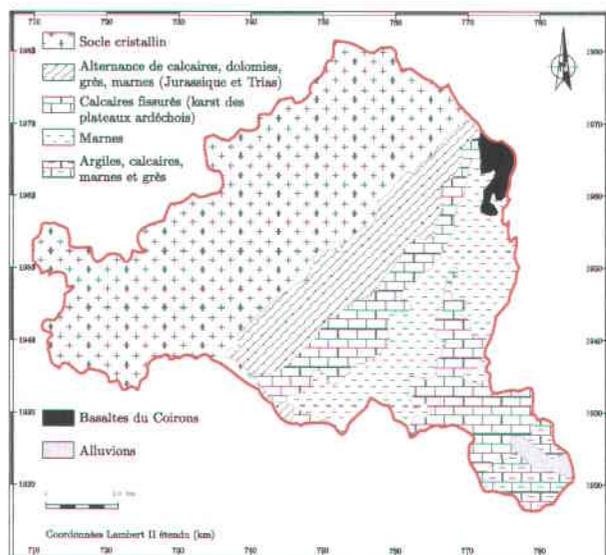


FIG. 4.7 – Structures géologiques du bassin de l'Ardèche (d'après Comité de bassin RMC, 1995)

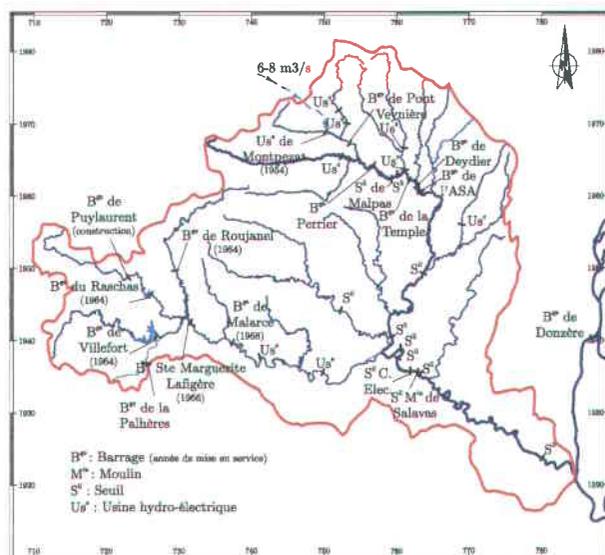


FIG. 4.8 – Aménagements hydrauliques

Duband (1994) a recensé quelques valeurs remarquables de débits spécifiques de crue de rivières françaises, parmi lesquelles, l'Ardèche figure en bonne position : le débit de pointe à la station de Vallon (1930 km², cf. n° 55, figure 4.1, p. 112) a dépassé à trois reprises la valeur de 2 m³/s.km² depuis la mise en place d'un limnigraphe en 1955 (pointes estimées à 4550, 4300 et 3900 m³/s, respectivement les 30/09/1958, 23/10/1977 et 08/11/1982).

Le réseau hydrographique de l'Ardèche compte de nombreux aménagements hydrauliques, la plupart au fil de l'eau et liés historiquement aux activités de filature de la soie (cf. figure 4.8, p. 114). A partir des années cinquantes, des ouvrages hydro-électriques d'importance ont été réalisés par EDF. En 1954 l'usine souterraine de Montpezat est mise en service. Elle prélève environ 234 millions de m³ d'eau par an au bassin de la Loire à partir des barrages de la Palisse, du Gage et du lac d'Issarlès et les restitue dans la Fontaulière, un affluent de l'Ardèche (soit un apport moyen de 6 à 8 m³/s). Les autres ouvrages ayant des retenues importantes ont été établis sur le Chassezac, ils sont gérés par EDF/UP Rhône-Auvergne et sont présentés au tableau (4.1).

TAB. 4.1 – *Caractéristiques des principaux barrages sur l'Ardèche*

Nom	cours d'eau	volume à R.N. ⁽¹⁾	évacuateur de crue	Type	Mise en service
Villefort	Altier	36 hm ³	1100 m ³ /s	voûte mince	1964
Raschas	Chassezac	1.6 hm ³	1020 m ³ /s	voûte en béton	1964
Roujanel	Borne	6.7 hm ³	1200 m ³ /s	voûte en béton	1964
Ste-Margueritte- Lafigère	Chassezac	0,59 hm ³	3700 m ³ /s	voûte en béton	1966
Malarce	Chassezac	3.7 hm ³	4100 m ³ /s	voûte en béton	1968

(1)- Volume au niveau de la retenue normale

4.3 Inventaire et collecte des informations sur les crues historiques

Le suivi chronologique des crues extrêmes sur le bassin versant de l'Ardèche s'est appuyé sur une enquête historique détaillée. Nous présentons dans cette partie la méthodologie générale qui a été suivie pour l'inventaire et la collecte de l'information historique dans le cadre de la démarche HISTORISQUE-Ardèche (cf. §4.3.1, p. 116 et §4.3.2, p. 117). Cette méthodologie a également été exposée par Brochot et al. (2000), Coeur et Lang (2000), Naulet et al. (2001) et Coeur et al. (2001).

4.3.1 Aspects généraux de la méthodologie

L'originalité de la démarche HISTORISQUE réside dans la collaboration entre historiens et hydrologues pour la collecte et la critique des données afin d'éviter deux écueils courants dans le domaine de l'étude des crues historiques, à savoir : premièrement une collecte principalement descriptive et qualitative ne permettant pas à l'hydrologue d'exploiter statistiquement cette information, deuxièmement un inventaire hydrologique incomplet faute d'avoir su tirer parti de la diversité des sources d'archives.

D'après Brochot et al. (2000, p. 12) : « *L'attention portée ici à la phase de repérage et de collecte des données historiques n'est pas le fruit d'un simple rapprochement interdisciplinaire de circonstance. En matière d'étude des crues, hydrologues et hydrauliciens font l'hypothèse d'élargir de plusieurs décennies, voire de plusieurs siècles, le champ chronologique des informations disponibles, tout en garantissant leur homogénéité et leur qualité. Quand on connaît l'éclatement et la diversité des supports de l'information technique sur les rivières avant le milieu du XX^e siècle et plus encore avant les années 1900, le premier des soucis est bien d'établir une véritable carte documentaire qui servira à terme de référence* ».

« *Pour chaque terrain et/ou objet d'étude il convient donc de s'informer sur les témoignages, leurs auteurs, les techniques utilisées, l'état topographique des lieux avant événement, etc. Ce travail de reconstitution, qui forme en quelque sorte l'appareillage critique de l'étude, nécessite une connaissance précise et une maîtrise élargie des sources documentaires disponibles. En apparaissant clairement dans le rendu final, ce travail d'enquête et d'analyse documentaire, facilitera critiques et comparaisons. C'est là un élément méthodologique essentiel à nos yeux* ».

« *On comprend ainsi que pour des raisons pratiques et techniques évidentes, une telle approche ait toujours été sinon purement et simplement absente du moins très négligée dans les travaux d'ingénieur consacrés aux crues historiques. L'approche documentaire s'est jusqu'à nos jours toujours faite en dehors d'une véritable recherche en ingénierie environnementale. Le plus bel exemple est sans aucun doute en France le travail mené, au XIX^e siècle, par Maurice Champion sur les inondations. Cet ouvrage constitue encore une référence incontournable en la matière bien que l'approche suivie se résume essentiellement à une compilation de faits (Champion, 1858, 1859, 1861, 1862, 1863, 1864)* ».

4.3.2 Déroulement de la démarche

La figure (4.9), p. 118, présente le déroulement de la méthodologie développée pour réaliser l'inventaire, la collecte et la validation des informations historiques. On distingue trois étapes principales :

- i*) La première mobilise essentiellement les historiens qui constituent un *Etat Général des Sources (EGS)* disponibles dans les divers fonds d'archives concernant les données hydrologiques historiques (cf. n^{os} 1 et 2, figure 4.9). Cette étape est détaillée au §4.3.2.1, p. 119.
- ii*) Ensuite, à partir de cet « état des lieux », les hydrologues entament la seconde étape de *collation des données*, c.-à-d. d'exploitation de l'EGS (cf. n^o 3, figure 4.9). Cette phase consiste à consulter l'ensemble des documents contenus dans les cotes ciblées ci-avant et à enregistrer dans une *base de données des références* ceux qui ont un intérêt du point de vue de l'étude des crues historiques. Cette étape est détaillée au §4.3.2.2, p. 121.
- iii*) Enfin, la troisième étape, présentée au §4.3.2.3, p. 122, est relative à l'élaboration des différents *historiques* (cf. n^o 4, figure 4.9). La base de données des références est interrogée par mots clé pour constituer :
 - un *historique des producteurs de données* permettant notamment de cibler d'autres sources éventuelles d'informations que celles identifiées lors de l'EGS (cf. flèche de retour au n^o 1 sur la figure 4.9),
 - un *historique des événements du bassin* (hauteurs atteintes, topographie, évolution de l'aménagement du bassin,...).

Comme le montre la figure (4.9), nous mettons en avant le fait qu'il s'agit d'une démarche itérative, avec échange permanent entre historiens et hydrologues, et un retour à la première étape au fur et à mesure que les connaissances se précisent par la réalisation des différents historiques.

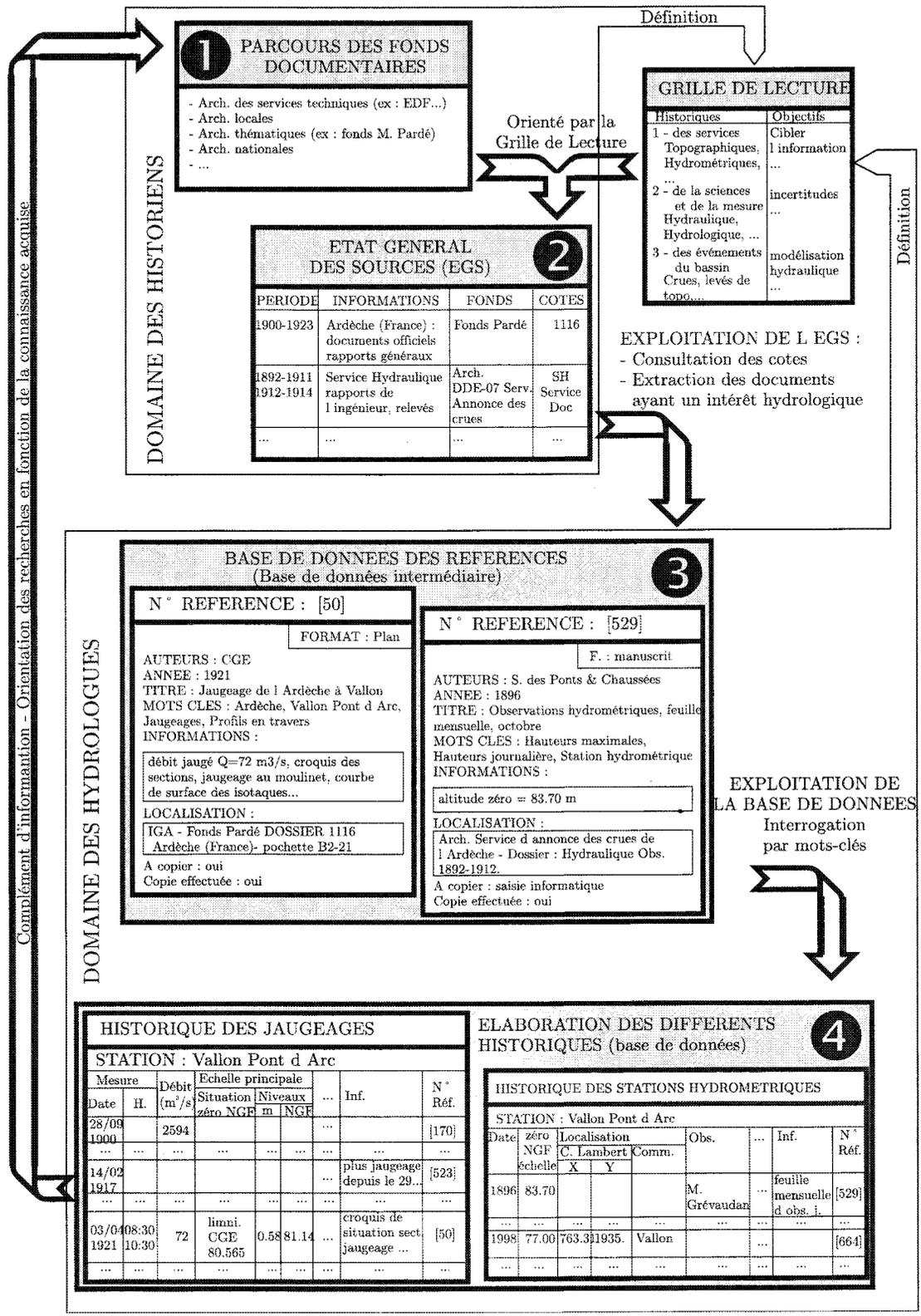


FIG. 4.9 – Les différentes étapes de la collecte et de la validation des informations historiques

4.3.2.1 Etat Général des Sources (EGS)

L'étape de l'EGS est essentielle étant donnée la grande dispersion des sources d'informations relatives aux crues historiques : pièces imprimées et manuscrites versées dans les fonds d'archives publiques ou des bibliothèques, mais aussi documents conservés au sein des administrations ou des établissements publics. La démarche de recherche d'informations englobe deux composantes continues, l'une spatiale : du niveau local jusqu'au niveau national, l'autre temporelle : des données récentes à celles anciennes. Le phasage que nous avons adopté est proche de celui présenté au §2.2.2.1, p. 33. : (1) recherche des études hydrologiques récentes, (2) investigations dans les fonds des administrations et opérateurs locaux en charge de l'hydrométrie (pour la gestion de la ressource ou la production énergétique) et de l'annonce des crues, (3) dans les *fonds spécifiques* (scientifiques, groupes d'historiens locaux, cf. fonds Maurice Pardé), (4) recherche au niveau national.

Ce travail a été réalisé par un historien, Denis Coeur (ACTHYS-Diffusion, Grenoble). La démarche est guidée par un souci de continuité entre, d'une part, les données actuellement disponibles couvrant en général les deux ou trois dernières décennies et, d'autre part, celles relatives aux périodes immédiatement antérieures. Les premières études réalisées dans le cadre du projet HISTORISQUE-*Guiers* (Lang et al., 1998a, 1998b, 1999) ont en effet mis en évidence des lacunes importantes sur la période récente, ces dernières ont par la suite pénalisé le déroulement de la démarche dans son intégralité, c.-à-d. jusqu'à l'exploitation fréquentielle. En matière de relevés hydrométriques par exemple, on veillera à compléter les bases de données existantes par un suivi historique précis des stations de mesure en place le long des cours d'eau. En ce qui concerne les documents planimétriques ou cartographiques de référence, autre exemple, rares sont les services actifs qui connaissent aujourd'hui l'existence des grandes études antérieures aux années 1950, et ce même sur des cours d'eau importants. Ces documents comportent des états des lieux de la rivière souvent très détaillés (P.-V. de visite, cartes) et autorisent ainsi des études comparatives de qualité à plusieurs décennies de distance (cf. les études des ingénieurs des Ponts et Chaussées Combiér, Perret, de Mardigny, Marcheguy sur l'Ardèche à la fin des années 1850, §4.4.2.2, p. 137).

D'après Coeur et al. (2001) : « *Le champ chronologique embrassé a toutefois ses limites. C'est pour cette raison que nous avons fixé la borne chronologique supérieure de notre enquête à l'année 1800 (il s'agit de la borne de recherche pour l'établissement de l'EGS, les informations qui en seront extraites peuvent embrasser une période plus importante). Non pas que nous rejetions toute information antérieure car l'analyse statistique des crues extrêmes intègre avec grand intérêt les données plus anciennes, avec toutefois une contrainte liée à la stationnarité des phénomènes climatiques (cf. petit âge glaciaire XVII^e et XVIII^e siècles). La fin du XVIII^e et le début du XIX^e siècle marque aussi un tournant dans l'histoire administrative française. La production de documents techniques relatifs à l'aménagement du territoire en général et à celui des cours d'eau en particulier, n'a cessé d'augmenter et de se diversifier à partir de cette époque : mise en place des services préfectoraux, des services des Ponts et Chaussées qui comptent dès 1804 des Services Spéciaux tels que le Service Spécial de la Loire puis, dans chaque département, en 1848 les Services Hydrauliques et à partir de 1854 les premiers Services d'Annonce des Crues. Parallèlement, la Révolution crée dans chaque département un poste d'archiviste chargé de centraliser la documentation produite par les différentes administrations de l'Etat du département et des collectivités (cf. mise en place du cadre actuel de classement dans les*

années 1830). *Sous l'Ancien Régime la production et surtout la conservation des documents étaient plus aléatoires. A contrario, il existe entre la première moitié du XIX^e siècle et l'époque contemporaine une assez grande continuité, sinon une homogénéité, dans la production et surtout la conservation des documents* ».

D'une manière générale, les premières et plus importantes des séries d'archives à inventorier sont donc, lorsqu'elles existent, celles des *administrations et opérateurs locaux* en charge d'opérations d'hydrométrie (pour la gestion de la ressource ou la production énergétique) et de l'annonce des crues. Les archives des administrations locales sont en principe versées régulièrement aux Archives Départementales. Il est cependant fréquent qu'une grande partie des fonds contemporains soit encore conservée dans les services actifs, parfois sans inventaire ni classement. Les Archives Départementales seront ainsi investies pour récupérer des données plus anciennes. Les *fonds spécifiques* sont inventoriés dans un deuxième temps. Il s'agit de sources d'informations assez aléatoires, dans le sens où leur existence n'est pas garantie sur le secteur géographique d'étude, mais qui peuvent s'avérer très productives, parfois autant, sinon plus, que les administrations en charge de la gestion des cours d'eau. Ils peuvent venir combler des lacunes dans les données des administrations. Enfin dans un troisième temps des investigations sont réalisées au *niveau national*. Soit dans des fonds d'archives tels que les Archives Nationales qui peuvent également venir compléter les séries au niveau local, soit dans les bibliothèques qui détiennent des documents édités plus ou moins rares : Bibliothèque Nationale, bibliothèque de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées (ENPC), bibliothèque de la Société Hydrotechnique de France (SHF, association loi 1901). L'ENPC édite la revue des Annales des Ponts et Chaussées depuis 1831, elle fut au XIX^e siècle l'un des principaux organes de publication des sciences et techniques de l'ingénieur, des questions hydrauliques en particulier. La SHF publie entre autres la revue La Houille Blanche depuis 1902. Outre l'intérêt que représentent ces deux sources d'un point de vue de l'histoire des « sciences » hydrauliques et hydrologiques, elles contiennent par ailleurs des études anciennes sur les crues de différents cours d'eau (Ardèche, Seine, Loire, Pô, etc.). Ces dernières établissent un bilan des crues connues à l'époque et indiquent souvent leurs sources d'information. **A ce titre elles sont d'un intérêt majeur et devront être consultées en priorité** (les annexes §C.3.7.2 , p. 284, et §C.3.8.1 , p. 296, présentent 68 références relatives à différentes rivières).

Pour effectuer les recherches, on dispose d'instruments tels que les guides des fonds d'archives et les inventaires qui détaillent plus ou moins bien les informations contenues dans chaque cote. On notera que le nombre de documents distincts contenus dans une cote est très variable (1 à 1500 environ). On peut estimer que globalement les cotes répertoriées pour l'étude de l'Ardèche représentent un volume d'environ 500 000 à 1 000 000 de feuilles. Il est par ailleurs rare de disposer de tels outils de recherche lorsque les archives sont encore conservées dans les services actifs, ce qui complique considérablement la tâche. On conçoit alors que ce travail est relativement délicat et requiert pour être rapide et efficace les compétences d'un historien. Il s'agit : (a) de s'orienter dans une masse considérable d'archives dont le classement, lorsqu'il existe, suit un cadre logique propre à chaque fonds et parfois très éloigné des attentes des hydrologues, (b) d'opérer une sélection restreinte de cotes susceptibles de contenir des informations hydrologiques d'intérêt, sans toutefois écarter des documents importants. On renvoie à l'annexe §C.1, p. 249, pour quelques remarques complémentaires et la présentation, par fonds, des différents outils disponibles

qui se sont enrichis dernièrement des moyens de consultation en ligne via internet.

Afin d'harmoniser les critères des hydrologues avec la démarche des historiens nous avons contribué à la mise au point d'une *grille de lecture*, développée et améliorée au cours des projets HISTORISQUE Guiers, Isère et Ardèche. Cette grille reprend, par *mots clé*, l'ensemble des informations susceptibles d'avoir un intérêt d'un point de vue hydrologique et permet d'orienter la recherche à travers les fonds documentaires. L'annexe §C.2, p. 251, présente cette grille de lecture : elle est organisée en trois parties correspondant aux résultats escomptés (historique des producteurs de données, de la mesure et de la « science », des événements du bassin), les mots clés sont en italique, les objectifs poursuivis sont précisés dans la colonne de droite. Cet outil de travail commun s'est avéré indispensable au début de la démarche, l'investissement des historiens dans l'histoire et la mémoire des risques naturels d'un point de vue opérationnel étant assez récent.

Le tableau 4.2, p. 122, présente les neuf fonds inventoriés dans le cadre du projet d'étude HISTORISQUE-Ardèche et classés par ordre de priorité : 1/ les archives de la Direction Régionale de l'Environnement Rhône-Alpes (DIREN-RA) ; 2/ le fonds Maurice Pardé archivé à l'Institut de Géographie Alpine (IGA) ; 3/ les archives de la Direction Départementale de l'Équipement de l'Ardèche (DDE07), anciennement service départemental des Ponts et Chaussées ; 4/ les Archives Départementales de l'Ardèche (ADA) ; 5/ les Archives Communales (AC) ; 6/ les Archives Nationales (AN) ; 7/ la bibliothèque de l'École Nationale des Ponts et Chaussées (ENPC) ; 8/ la bibliothèque de la Société Hydrotechnique de France (SHF) ; 9/ la Bibliothèque Nationale (BN). L'annexe §C.3, p. 253, détaille les spécificités de chaque fonds ainsi que l'ensemble des cotes répertoriées. Des informations nous ont par ailleurs été communiquées par la Compagnie Nationale du Rhône (CNR), cependant cette dernière étant un acteur relativement récent sur l'Ardèche (1970), ce fonds d'archives n'a pas fait l'objet d'un inventaire. De même pour Electricité de France (EDF) qui gère des stations majoritairement situées sur le Chassezac, un affluent aménagé de l'Ardèche. Le nombre total de cotes ou dossiers ciblés au cours de l'étape de l'EGS est de 766 (12 jours-personne).

4.3.2.2 Collation des données

Les hydrologues en collaboration avec les historiens sélectionnent les documents issus des cotes de l'Etat Général des Sources ayant un intérêt du point de vue de l'étude des crues historiques (cf. nos 2 à 3 figure 4.9, p. 118). Le tableau 4.2, p. 122, montre notamment les références extraites lors de l'étape 2 de collation des données dans le cadre du projet HISTORISQUE-Ardèche. Celles-ci ne représentent environ que 2 % de l'ensemble des documents consultés (en considérant un nombre moyen de documents distincts par cote de 80). Cette étape est en effet relativement longue et fastidieuse bien que l'EGS soit déjà ciblé (52 jours-personne soit environ 2.5 mois). Ce tableau fait également apparaître le rendement R pour les fonds d'archives (les documents édités, regroupés sous le terme bibliothèque dans le tableau, ne sont pas des archives au sens propre du terme et ne sont pas pris en compte). Ce rendement met nettement en évidence les ordres de priorité à appliquer dans l'inventaire des fonds, il permet également de juger la qualité et l'efficacité du ciblage de l'EGS.

Ces références sont ensuite saisies dans une base de données intermédiaire sous EndNote 4.0 : la *base de données des références* (cf. n° 3, figure 4.9, p. 118). Au total cette base qui ne compte pas les doublons des différents fonds regroupe 1256 références à ce jour. Afin

TAB. 4.2 – Fonds inventoriés dans le cadre du projet HISTORISQUE-Ardèche

Fonds	Etape 1 – Etat Général des Sources (EGS)		Etape 2 – Collation des données		R ¹
	Nb	Nb	Nb	Nb	
	cotes	j/pers.	réf.	j/pers.	
1 DIREN-RA Archives	17	1	99	2.5	5.8
2 IGA Archives - Fonds Pardé Bib. - Périodiques Bib. - Ouvrages	36	1.5	207	6	5.8
	30		30		
	7		12		
3 DDE07 Archives Bib. - Articles Bib. - Etudes	73	2	299	15	4.1
	10		10		
	55		55		
4 ADA Archives exploitées Archives non exploitées Bibliothèque	6	2	78	15	1.7
	93				
	4		4		
5 AC Archives	19	1	0	0	0
6 AN Archives	44	1.5	9	5	0.2
7 ENPC Bibliothèque	250	1	250	4	
8 SHF Bibliothèque	122	1	122	4	
9 BN Bibliothèque	124	1	124	0.5	
TOTAL	766	12	1299	52	

1- Rendement : $R = \frac{\text{Nb référence extraites}}{\text{Nb références exploitées}}$

de gérer cette masse importante d'informations, nous nous sommes par ailleurs attachés à définir des mots clé (ceux de la grille de lecture, cf. annexe §C.2, p. 251) qui soient représentatifs de l'ensemble des données recherchées dans l'espace (localisation, étendue) et le temps. La consultation sélective des différentes informations collectées s'effectue par le biais de requêtes basées sur l'ensemble des champs (mots-clé, auteurs, titres, localisation des archives, etc.). Le produit des requêtes permet entre autres d'accéder au résumé de chaque document, avec la mention des informations remarquables (hauteur de crue, altitude du zéro d'une échelle,...), la localisation exacte du document en archive et de l'existence d'une copie éventuelle au *Cemagref*.

Une partie de cette base de données a été transférée sous Access dans le cadre du projet pilote *Base-In* financé par le Ministère de l'Aménagement du Territoire et de l'Environnement (MATE). Le bureau d'étude *Gipea-Consultants* s'est chargé de réaliser une structuration simplifiée de la base de données. Le produit final répond aux attentes en terme de mise à disposition de l'information historique mais ne permet pas une aussi grande souplesse que la base sous EndNote en mode exploitation (nombre de requêtes limité, cf. remarque 4.1, p. 123).

4.3.2.3 Elaboration des différents historiques

L'exploitation de la base de données des références permet finalement de constituer différents historiques (voir figure 4.9 point 4) :

- i) En premier lieu un historique des « producteurs » de données en matière d'inonda-

tion, à savoir : les services en charge de la topographie, de l'hydrologie et de l'annonce des crues, de la météorologie et enfin de l'aménagement du territoire. Cet historique permet d'établir le cadre contextuel des données et de cibler d'éventuelles sources d'informations qui n'auraient pas été ciblées lors de l'EGS.

- ii) On réalise en second lieu un historique des événements du bassin qui intègre les aménagements (constructions et destructions), les opérations de topographie (levés de plans, de profils en long et en travers), l'hydrométrie (relevés des hauteurs aux stations ou de laisses de crues, opérations de jaugeages), la pluviométrie.

Remarque 4.1 *Cette phase d'exploitation de la base de données est relativement longue et délicate. On observe un phénomène de seuil : il faut un certain niveau de connaissance globale des informations contenues dans la base (et dans les documents liés) avant de pouvoir les mettre en cohérence entre elles. Même si les mots-clés ont été correctement définis lors de la saisie des références, ils ne peuvent à eux seuls permettre l'élaboration des différents historiques (d'où la nécessité de disposer d'une base de données des références acceptant des combinaisons de requêtes sur l'ensemble des champs). Il s'agit d'un véritable travail d'enquête et de reconstitution faisant appel à une connaissance étendue de l'objet étudié notamment pour juger de la probabilité des hypothèses échafaudées. Il faudra par exemple pour compléter des éléments manquants sur la localisation d'une donnée : (1) reconnaître l'auteur d'un courrier par sa signature, (2) connaître l'affectation de cette personne, et enfin (3) choisir entre différents scénarii en évaluant leur vraisemblance hydrologique (ex : télégrammes des différentes échelles du SAC de l'Ardèche). On voit clairement que l'obtention d'une donnée hydrologique d'intérêt peut être le fruit de rapprochement de faits assez subtils. A ce titre l'utilisation de cette base de données des références intermédiaire lors de l'étape 2 de collation des informations semble indispensable à nos yeux.*

Remarque 4.2 *Nous avons choisi d'utiliser le numéro d'enregistrement (unique) dans la base de données EndNote comme identifiant (cf. nos 3 et 4, figure 4.9, p. 118 : N° Réf. [50], [529],...). Ces derniers sont repris au niveau des différents historiques, ils servent à justifier chaque information et permettent de revenir facilement au document source d'une donnée. On notera que la relation entre ces numéros d'enregistrement et les informations situées dans les historiques n'est pas une bijection. D'une part un document (c.-à-d. un numéro d'enregistrement) peut apporter différentes données au sein des historiques. D'autre part, une donnée peut être issue de la conjugaison/agrégation de différents documents (donc plusieurs numéros d'enregistrement). En rendant possible la « traçabilité » de l'information tout au long de sa transformation en donnée hydrologique exploitable à proprement parler, ce système est une garantie de la validité et de la qualité de la méthodologie.*

Remarque 4.3 *Compte tenu des deux remarques ci-avant, il semble important dans les développements futurs, notamment celui du projet SPHERE (Workpackage 2 : Data collection on historical floods et Workpackage 5 : Data Integration & Dissemination), d'adopter un phasage proche de celui présenté à la figure 4.9, p. 118. Un passage direct de l'EGS à une base de données finale couplée à un SIG risque de poser plusieurs problèmes : (1) Il est peu probable qu'une donnée reconstituée à partir de différents documents soit à jamais figée et définitive. On doit alors, lorsqu'une nouvelle information historique arrive, être en mesure de mettre à jour la donnée en retrouvant l'ensemble des documents qui avaient*

contribué à la produire. Dans le cas contraire la base de données deviendra rapidement obsolète. (2) Le travail de recomposition et de mise en cohérence des divers informations doit être transparent au risque de se résumer à une démarche d'expert difficilement transférée.

4.4 Principaux résultats concernant les historiques

Cette partie synthétise les principaux résultats à l'issue de l'enquête historique sur le bassin versant de l'Ardèche. Nous présentons en premier lieu un historique des services producteurs de données relatives aux cours d'eau (§4.4.1, p. 125). Les valeurs remarquables de pluies et de cotes de crues sont répertoriées en second lieu (§4.4.2, p. 135).

4.4.1 Rapide historique des services producteurs de données techniques sur les cours d'eau

Cette section présente un historique des producteurs de données ayant un intérêt pour l'étude HISTORISQUE, à savoir les services producteurs de données topographiques (cf. §4.4.1.1, p. 126), de données hydrométriques (cf. §4.4.1.2, p. 130) et enfin de données météorologiques (cf. §4.4.1.3, p. 133). En préambule nous rappelons le contexte historique avec la mise en place de deux structures importantes : l'*Académie des Sciences* et l'administration des *Ponts et Chaussées*, cette dernière étant le principal acteur dans le domaine de l'aménagement du territoire, de l'hydraulique et de l'hydrologie au cours du XIX^e siècle et jusqu'au milieu du XX^e siècle.

L'*Académie Royale des Sciences* est créée en 1666, l'*Observatoire Royal* (future Observatoire de Paris), construit en 1667, est destiné à servir de centre de travail pour les académiciens (salles des séances, laboratoires). Cette vocation pluridisciplinaire ne sera effective qu'après la Révolution (système métrique en 1799, météorologie en 1854 avec Le Verrier cf. §4.4.1.3, p. 133). Avant cela l'Observatoire Royal est essentiellement occupé par des astronomes à l'origine des premiers travaux de topographie (cf. §4.4.1.1, p. 126).

Le corps des *Ponts et Chaussées* voit le jour au début du siècle des lumières (1715-1799). La mission confiée par l'arrêté du Conseil en date du 1 février 1716 est « d'adapter les parcs et les routes aux besoins du siècle » Vignon (1862). En 1744 Charles-Daniel Trudaine fonde le *Bureau des dessinateurs du Roi* pour lever les cartes et les plans du royaume. Ce « bureau » est transformé en école le 14 février 1747 (future *Ecole des Ponts et Chaussées*), dirigée par Jean Rodolphe Perronet qui met en place une formation spécifique des géomètres et dessinateurs de plans et cartes. A cette époque, les professionnels de la voirie n'existent pas encore, jusque là, ce sont surtout des architectes qui ont supervisé les travaux, et la corvée qui a fourni la main d'oeuvre. L'école prendra son nom définitif d'*école royale des Ponts et Chaussées* en 1775. L'enseignement, fondé sur l'apprentissage mutuel des différents élèves, subit quelques modifications (enseignement magistral, organisation de l'enseignement scientifique) suite à la Révolution et la création de l'Ecole Polytechnique (en 1794). L'école jouera un rôle majeur dans le développement des sciences de l'ingénieur au XIX^e siècle, c'est d'ailleurs en 1831 que sort le premier numéro des *Annales des Ponts et Chaussées*. L'organisation du corps des Ponts et Chaussées a subi quelques changements au cours XIX^e siècle mais globalement la structure est la suivante : des *Inspecteurs Généraux des Ponts et Chaussées* (IGPC) résidant à Paris, des *Ingénieurs en chef* (ICPC), chargés soit des *services ordinaires* (ex. : Service Hydraulique en 1848, Service d'Annonce des Crues) de chaque département, soit des *services spéciaux* (ex. : Service Spécial de la Loire). Sous les ordres des ingénieurs en chef se trouvent des *Ingénieurs ordinaires* (IOPC, un par arrondissement) et enfin des *Conducteurs* des Ponts et Chaussées (CPC).

4.4.1.1 Données topographiques

La carte de *Cassini* (échelle d'une ligne pour cent toises soit 1 :86 400), initiée par Louis XV, s'appuie sur les travaux de l'astronome Jean Picard (1684) qui, ayant mis au point des appareils optiques de mesure des angles, débute en 1669 la mesure par triangulation du méridien de Paris (la *méridienne*) passant par l'*Observatoire de Paris* (Dunkerque-Perpignan). La méridienne est complétée par un réseau géodésique achevé en 1744 par Jean-Dominique et Jacques Cassini. Les levés des plans sont effectués entre 1760 et 1789 par César François Cassini de Thury et Jacques Dominique Cassini. Les 180 planches de la carte ne sont définitivement publiées qu'en 1815 (en raison de la Révolution) dans l'ancien système de mesure, le système métrique étant pourtant adopté pour les opérations de topographie en 1802. Cette carte ne contient aucune donnée altimétrique précise.

La carte de Cassini est progressivement remplacée entre 1818 et 1881 par les cartes d'*Etat Major* (échelle 1 :80 000), initiées par Napoléon Bonaparte et levées par le *Dépôt de la guerre* (créé en 1688) qui devient ensuite le *Service Géographique des Armées* en 1887. Les nouveautés apportées par cette carte en plus de sa précision sont surtout les représentations du relief par des stries, le détail des routes et des ouvrages (ponts, bacs...). La carte de Cassini continue cependant à être employée au cours XIX^e siècle comme fond de plan par les ingénieurs des Ponts et Chaussées (cf. figure 4.10, p. 127).

Concernant les altitudes, avant la seconde moitié du XIX^e siècle, les plans cotés par les ingénieurs sont généralement exprimés en valeur relative par rapport à un point de référence local, spécifique à chaque chantier ou couvrant une zone plus étendue. Pour l'Ardèche en particulier, le service de la Vallée du Rhône avait son propre système (*système Rhône*). Les altitudes des figures (4.16) à (4.19), pp. 146-147, sont dans ce système. Cette information est confirmée par un courrier de l'IGPC Belin (1857) adressé à de Mardigny, l'ICPC du département de l'Ardèche. Ce dernier récapitule les recommandations techniques sur la mise en oeuvre des études relatives aux inondations (cf. §4.4.1.2, p. 130).

Peu à peu, avec le développement des grands travaux (canaux, chemin de fer) un besoin d'unification se fit sentir. L'ingénieur Collin (ICPC du *Service Spécial de la Loire*) proposait « de rattacher toutes les opérations d'altitude à un plan unique de comparaison qui passerait à 100 m au-dessous d'un repère central à établir dans la cour de l'Observatoire de Paris » (Collin et Bourdalouë, 1855). Finalement une décision ministérielle fixa en 1860 l'origine des altitudes (le zéro) au niveau moyen de la Méditerranée à Marseille, défini, à défaut de détermination précise, par le trait 0.40 m de l'échelle de marée du Fort Saint Jean. Certains plans vont alors directement figurer la valeur du premier Nivellement Général de la France (*NGF-Bourdalouë*) formé de 38 polygones et constitué entre 1857 et 1864 (Bourdalouë et Bonnet, 1858 ; Bourdalouë, 1858, 1864).

La couverture du territoire français est ensuite vérifiée et complétée entre 1884 et 1892 sous la direction de C. Lallemand (*NGF-Lallemand*) qui établit un réseau de 42 polygones. Les enregistrements effectués du 1^{er} février 1885 au 1^{er} février 1889 par le marégraphe installé à Marseille dans l'anse du Port Calvo vont conduire à préciser le niveau moyen de la Méditerranée situé 0.071 m au-dessous du « zéro Bourdalouë » (Ministère des Travaux Publics, 1891). Les altitudes issues de ce nivellement sont dites « orthométriques ». Elles prennent en compte dorénavant la pesanteur et sont définies par la distance entre la surface topographique et la surface équipotentielle passant par le point de référence (le géoïde), comptée le long de l'arc matérialisant la ligne de force du champ de pesanteur. Le *Service du Nivellement Général de la France* (créé en 1884) va engager une série

importante de levés de ligne d'eau sur les cours d'eau alpins et pyrénéens pour le compte du Service des Forces Hydrauliques (cf. §4.4.1.2, p. 130). Ces documents très détaillés sont d'un intérêt majeur, outre le nivellement des lignes de basses eaux, ils représentent les ouvrages hydrauliques, le zéro des échelles hydrométriques ainsi certaines laisses de crues (Lallemand, 1911; Ministère de l'Agriculture, 1911a, 1911c, 1912a, 1913, 1916a, 1917b, 1920a, 1920c, 1923; Prévot et Lallemand, 1920). Pour les secteurs étudiés de l'Ardèche nous avons particulièrement exploité les levés de lignes d'eau d'étiage effectués par l'adjoint technique Morel (1921a et 1921b).

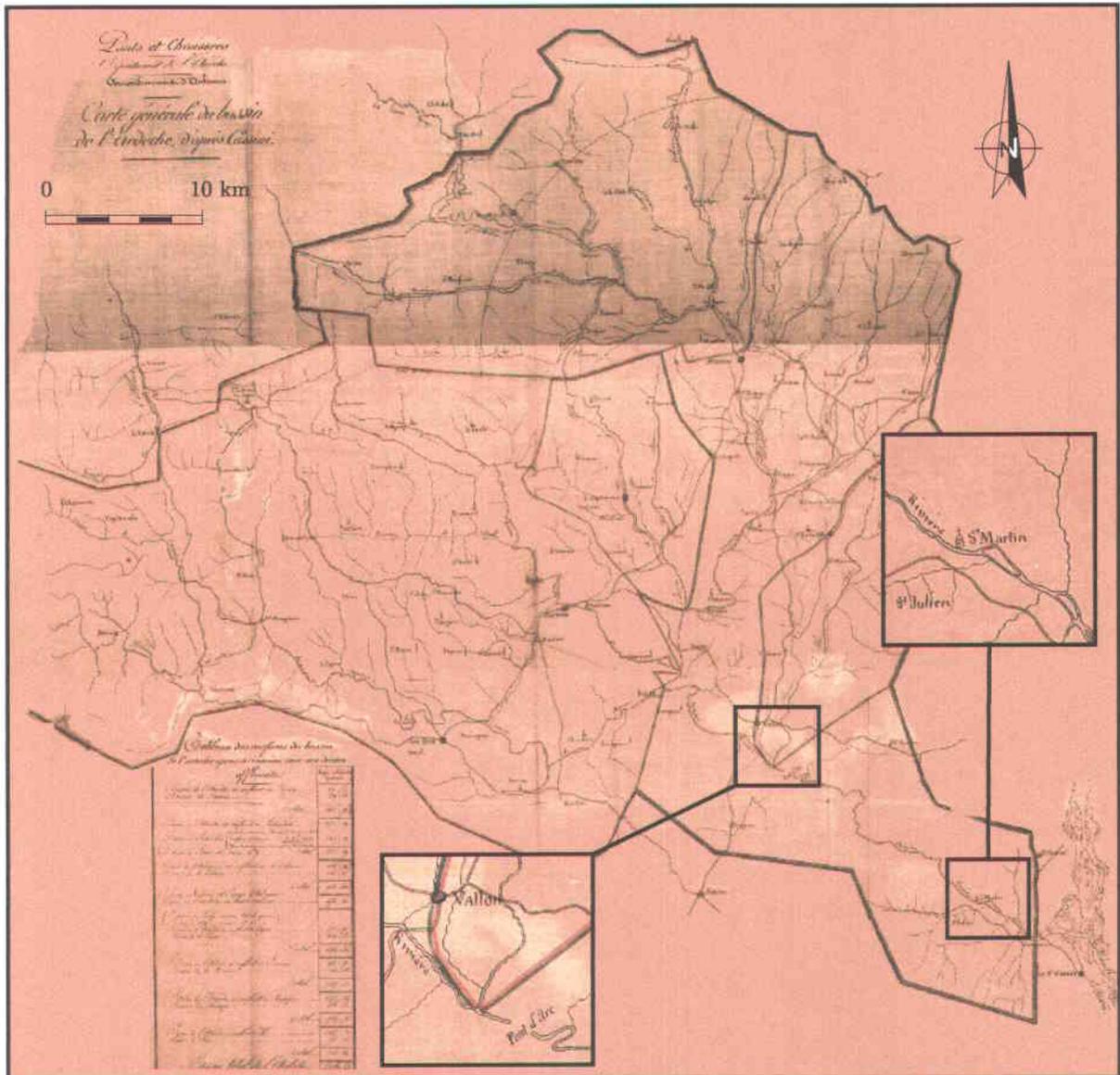


FIG. 4.10 – Surface du bassin versant de l'Ardèche et des sous bassins d'après Cassini (Combier, 1857a)

En 1940 l'*Institut Géographique National* (IGN) remplace le Service Géographique des Armées et le Service du Nivellement Général de la France; il a notamment pour mission d'achever la Nouvelle Triangulation de la France (NTF) débutée en 1889. L'ellipsoïde

Clarke 1880 IGN est associé au système NTF, la projection étant une conique conforme de Lambert (5 zones : I, II, III, IV et II étendu). Le système d'altitude pour la France continentale est le réseau *NGF-IGN69* mis en place de 1962 à 1969 et calculé par compensation en altitudes dynamiques puis par transformation en altitude normale (on renvoie à Heiskanen et Moritz, 1967, principale référence pour les notions de géodésie et notamment le détail du calcul des différents types d'altitudes). Les fiches signalétiques des repères de nivellement (nom du repère, localisation, coordonnées Lambert, altitude normale, année d'observation, etc.) sont disponibles à l'IGN via internet à l'adresse suivante : www.ign.fr/fr/PI/activites/geodesie/fiches.html.

Dernièrement le développement des techniques spatiales et particulièrement des GPS (*Global Positioning System*) a permis de mettre en évidence des déformations importantes de la NTF (Duquenne, 1999). Un nouveau système géodésique, le Réseau Géodésique Français (RGF93), a donc été mis en place en 1993 d'après les recommandations du Conseil National de l'Information Géographique. Ce système, officiel depuis le décret du 26 décembre 2000 (n° 2000-1276), est associé à un nouvel ellipsoïde (IAG-GRS 1980) ainsi qu'une nouvelle projection unique pour tout le territoire (Lambert 93). Le système d'altitude reste le *NGF-IGN69*. On notera que les GPS ne fournissant pas d'altitude mais une hauteur ellipsoïdale, une grille de conversion (RAF98) a été établie à partir du modèle de quasi-géoïde (surface d'altitude normale nulle) de Duquenne (1998) et d'environ 1200 points nivelés du RGF93 en colocation avec des points de la NTF. L'IGN fournit via internet le logiciel Circé 2000 (www.ign.fr/fr/PI/activites/geodesie/rgf93/OUTILS/index.html) qui met en oeuvre cette grille et permet également de convertir les données dans les différents systèmes (systèmes : ED50, NTF, WGS84, RGF93 ; coordonnées : planes, cartésiennes ou géographiques ; projections : Lambert zones, Lambert 93, UTM).

D'un point de vue pratique, on trouve dans la thèse de Landon (1999) des tables permettant de passer d'un système d'altitude à un autre, suivant la région considérée de la France. Le maillage de ces tables, représentées sur le tableau d'assemblage des cartes au 1:50 000, n'est toutefois pas suffisamment précis pour nos travaux (maille de 27x19 km environ). Nous avons donc répertorié les repères proches de nos secteurs d'étude et ayant fait l'objet de nivellements dans les différents systèmes d'altitude, chronologiquement : Système Rhône, NGF-Bourdalouë, NGF-Lallemand et NGF-IGN69. Le tableau (4.3), p. 129, présente les valeurs, en mètre, à ajouter aux altitudes anciennes pour se rattacher aux altitudes normales du système actuel. Celles-ci ont ensuite été utilisées pour rattacher le zéro des échelles limnimétriques ainsi que pour exploiter les levés anciens de lignes d'eau et de topographie dans la modélisation hydraulique du secteur de Vallon-Pont-d'Arc (cf. §5.4.1, p. 183). On notera que la correction de -55 cm permettant de passer du système Rhône au système actuel, calculée à partir de la connaissance, dans ces deux systèmes, des altitudes du seuil de la tour du moulin de Salavas, est en accord avec celles, proches du Rhône, fournies par Paul Bonnetain de l'IGN (-17 à -21 cm) compte tenu de la distance qui les sépare. Cette différence de 30 centimètres entre les corrections à effectuer soit au niveau du Rhône, soit à Vallon, est tout à fait plausible en raison de l'erreur induite par les visées successives en s'éloignant du référentiel. On note d'ailleurs qu'en appliquant cette correction de -55 cm aux plans de 1857, l'altitude de l'étiage représenté au niveau du socle rocheux du pont de Vallon est évaluée à 78.20 m NGF IGN69. On retrouve exactement la même altitude (78.20 m) lorsqu'elle est déterminée à partir d'une laisse de la crue de 1890, située à l'époque 17.3 m au dessus de l'étiage et nivellée récemment à 95.5 m NGF

IGN69 (cf. §5.3.1.1, p. 171, relatif à la critique des données limnimétriques).

TAB. 4.3 – Valeurs en mètre à ajouter aux altitudes anciennes pour les convertir au système NGF-IGN69 dans les secteurs de Vallon Pont d'Arc et St-Martin d'Ardèche

Nom des repères ⁽¹⁾	localisation	NGF	NGF	Système
		Lallemand (alt. orthométrique) obs. de 1884-1921	Bourdaloue obs. de 1857-1864	Rhône obs. avant 1857
V'.b.x3y3 - 12 ex 13	B.-St-Andeol	0.137 ⁽²⁾	-	-0.205 ⁽²⁾
Q'.i.l3 - 4	St-Just	0.134 ⁽²⁾	-	-0.178 ⁽²⁾
Q'.i.l3 - 5	St-Just	0.133 ⁽²⁾	0.095 ⁽³⁾	-0.177 ⁽²⁾
Q'.i.l3 - 8	Pont St-Esprit	0.127 ⁽²⁾	0.085 ⁽³⁾	-0.165 ⁽²⁾
Q'.i.m3 - 49	moulin de Salavas	0.078 ⁽⁴⁾	-	-0.550 ⁽⁵⁾
Q'.i.l3 - 45	300 m amont Ibie	0.095 ⁽⁴⁾	-	-0.550 ⁽⁵⁾
Q'.i.l3 - 42	20 m amont Pont d'Arc	0.096 ⁽⁴⁾	-	-0.550 ⁽⁵⁾
Q'.i.l3 - 41-I	échelle Pont d'Arc	0.093 ⁽⁴⁾	-	-0.550 ⁽⁵⁾
Q'.i.l3 - 38	3.5km aval arche de Pont d'Arc	0.094 ⁽²⁾	-	-
Q'.i.l3 - 37	4km aval arche de Pont d'Arc	0.094 ⁽²⁾	-	-

(1) - Noms sur les fiches signalétiques de l'IGN et sur les profils en long des lignes d'eau d'étiage (Morel, 1921a et 1921b).

(2) - D'après communication personnelle de Paul Bonnetain de l'IGN.

(3) - D'après Ministère des Travaux Publics (1889-1891).

(4) - Correction calculée à partir des fiches signalétiques et des lignes d'eau d'étiage (Morel 1921a et 1921b).

(5) - Correction calculée au niveau du moulin de Salavas à partir des profils de Combiar (1849, 1857e).

4.4.1.2 Données hydrométriques

Mas (de) (1899, p. 85) et Flamant (1900, p. 397) attribuent à Eugène Belgrand (1810-1878, Ing. des Ponts et Chaussées), en 1851, l'initiative de l'établissement des premiers *Services d'Annonces des Crues* (SAC). Il dirige pendant douze ans le *Service Hydrométrique du bassin de la Seine* (créé en 1854), service qui sert de modèle aux autres comparables organisés plus tard dans les autres bassins des grands fleuves de France.

Concernant l'Ardèche en particulier, un règlement arrêté par P. Magne en 1853, alors Ministre de l'Agriculture, du Commerce et des Travaux Publics, porte la création d'un *Service Hydrométrique pour le bassin de la Loire* qui sera situé dans les bureaux du *Service Spécial de la Loire* résidant à Orléans. Cet arrêté précise que les études en opération du bureau hydrométrique s'étendront sur différents départements dont celui de l'Ardèche (MACTP, 1853). Les crues catastrophiques du Rhône et de la Loire de 1856 notamment, incitent définitivement les autorités à intervenir contre les inondations : cf. la lettre de Napoléon (1856) qui initie la *circulaire du 26 juillet relative aux études sur les inondations* adressée par E. Rouher aux préfets et aux ingénieurs (MACTP, 1856). Ainsi les premières échelles d'observation hydrométrique seront mises en place en 1857 sur le cours de l'Ardèche par l'ICPC de Mardigny (1857a). Dès 1860 des contraintes budgétaires vont cependant compromettre le *Service des Inondations* et, sous l'initiative de l'IGPC Belin, les observations hydrométriques ne seront maintenues que lors des crues pour certaines stations uniquement (Joly, 1860).

La synthèse au niveau national des différentes études sur les inondations engagées suite à la circulaire du 26 juillet 1856 est assurée par le *Service Général des Inondations* dont Belin est l'un des quatre inspecteurs généraux (Belin, 1857, 1866). Le 24 juillet 1875 une *Commission d'Annonce des Crues et des Inondations* est mise en place au Ministère des Travaux Publics pour suivre le développement des services d'annonce des crues (SAC). La Commission d'Annonce des Crues du Rhône et de ses affluents torrentiels en particulier, est créée le 20 février 1889 par décision ministérielle après avoir constaté que l'annonce se fait à l'époque « d'après une sorte de tradition et n'est pas réglementée par des décisions officielles » (d'après un rapport des Ingénieurs Auriol et Imbeaux cité par Rose-Pizant et al., 1998). La coordination des différents SAC en France est ensuite assurée à partir de 1910 par le *Service Central Hydrométrique et d'Annonce des Crues* et le *Service Central des Inondations* (SCI). Leur fusion donne naissance en 1962 au *Service Central Hydrologique* (SCH) (Picon et Ribeill, 1993).

Au niveau local, la création officielle du *Service d'Annonce des Crues de l'Ardèche* (SAC 07) n'a lieu qu'en 1896. Les relevés hydrométriques deviennent toutefois systématiques dès 1892 avec l'instauration du Service Provisoire d'Annonce des Crues : décision ministérielle du 15 septembre 1891 initiée par la crue exceptionnelle de 1890 (Lemoine, 1896). Suite à une circulaire du ministre des Travaux Publics datée du 14 septembre 1896, les jaugeages se multiplient en France sur les différentes rivières navigables ou flottables (Ponts et Chaussées, 1908 ; Rose-Pizant et al., 1998). Sur l'Ardèche, les premiers sont réalisés aux flotteurs entre octobre 1897 et novembre 1900 par la méthode Fargue (1896), au niveau du pont de Salavas qui relie les communes de Salavas et de Vallon Pont d'Arc (Bonnet, 1901), et au pont de St-Martin-d'Ardèche (s.n., 1899 ; Delemer, 1904, cf. stations n^{os} 55 et 64 figure 4.1, p. 112). On note cependant dès 1857 un jaugeage des basses eaux à l'arche naturelle de Pont d'Arc (Combiér, 1857c, cf. station n^o 58 figure 4.1, p. 112) et un autre à St-Martin-d'Ardèche (Perret, 1857). Le service des Ponts et Chaussées a continué

à assurer le relevé journalier des échelles limnimétriques, mais il faut attendre 1959 pour retrouver une nouvelle opération de jaugeage à Sauze St-Martin (s.n., 1959, cf. station n° 61 figure 4.1, p. 112). Le SAC de la Direction Départementale de l'Équipement de l'Ardèche (DDE 07, les DDE sont créées en 1967 par regroupement des Services Ordinaires Généraux des Ponts et Chaussées et des Directions Départementales des Constructions) utilise actuellement huit stations limnimétriques pour l'annonce des crues (cf. figure 4.1, p. 112 : Pont de Labeaume, n° 11, Vals les Bains, n° 13, Pont d'Aubenas-Ucel, n° 15, Voguë, n° 18, Rosière, n° 25, Gravières, n° 46, Vallon Pont d'Arc, n° 55, St-Martin d'Ardèche, n° 64).

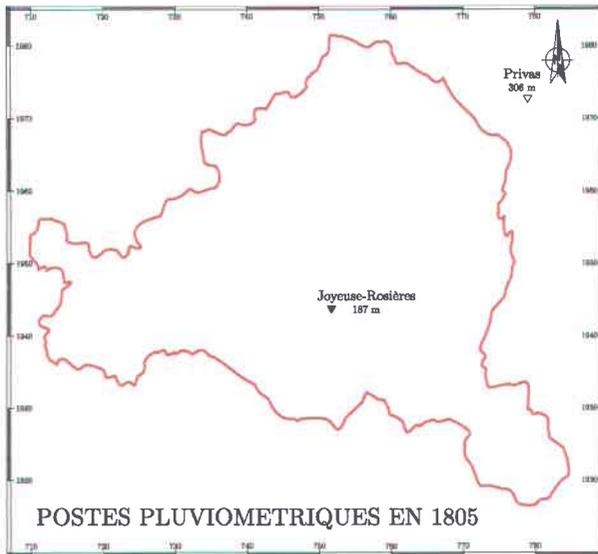
Un tournant essentiel est pris à l'extrême fin du XIX^e siècle grâce aux travaux du *Service des Grandes Forces Hydrauliques*. Il est né d'une volonté d'évaluer le potentiel énergétique des cours d'eau alpins et pyrénéens : arrêté du Ministère de l'Agriculture du 25 mars 1903 (Brosse (de la), 1906, 1911 ; Tavernier, 1907 ; Tavernier et Brosse (de la), 1909). En termes de résultats, on s'aperçoit que les débits mesurés aux différentes stations de jaugeages concernent le plus souvent et c'est naturel, des débits moyens et rarement des débits de crue. Ces données ont fait l'objet de publications périodiques du Ministère de l'Agriculture avant 1920 (Ministère de l'Agriculture, 1905a, 1905b, 1908, 1911b, 1912b, 1916b, 1917a, 1920b). Si la rivière Ardèche est officiellement rattachée aux Forces Hydrauliques du Centre en 1916, les premières données dont nous disposons remontent seulement à 1955 lors de l'installation de limnigraphes par la 4^e *Circonscription Electrique* (CE). Une station a cependant existé sur l'Ardèche au Pont de Chauzon (cf. station n° 19 figure 4.1, p. 112) à partir de 1922, mais les archives détenues en 1942 par les Forces Hydraulique du Sud-Est à Grenoble, ont été perdues (s.n., 1942). A partir du 1^{er} janvier 1965 les stations passent de la 4^e CE à la 6^e CE (devient ensuite CE Sud-Est) et, en 1968, l'*Agence Financière de Bassin Rhône-Méditerranée-Corse* (AFB-RMC) reprend la gestion de plusieurs stations hydrométriques (Pont de Rolandy, Pont de Labeaume, Voguë, Vallon Pont d'Arc, Sauze-St-Martin). Le *Service Hydrologique Centralisateur* (SHC, créé en 1962) reste néanmoins l'opérateur effectif des jaugeages. A partir de 1991, la *Direction Régionale de l'Environnement Rhône-Alpes* (DIREN-RA) reprend la gestion de stations du SHC.

L'histoire de la production des données hydrométriques sur l'Ardèche s'enrichit dès les années 1920 des mesures effectuées par d'autres opérateurs. A partir de 1921 et pour quelques années seulement, des échelles limnimétriques sont installées par la *Compagnie Générale d'Electricité* (CGE) à Vallon Pont d'Arc et Sauze-St-Martin (respectivement stations n°s 54 et 61, cf. figure 4.1, p. 112). Les jaugeages réalisés à Sauze-St-Martin (CGE, 1921a, 1921b, 1922c, 1922d, 1922e, 1926a) et Vallon Pont d'Arc (CGE, 1921c) permettront d'établir des courbes de tarage (CGE, 1922b) utilisées pour publier les débits moyens journaliers de 1921 à 1928 (CGE, 1922a, 1925a, 1925b, 1926b, 1927, 1928, 1931a, 1931b). A compter de 1945, la loi de nationalisation confie à *Electricité de France* (EDF) la production et la distribution de l'énergie électrique. Plusieurs services vont être producteurs de données (cf. création en 1954 du Service Etudes et Mesures Hydrométrique au sein de la DTG). Les données de débit en provenance de toutes les régions de France seront regroupées dans les archives de la DTG à Grenoble (EDF-DTG, 1962). Plus proche de nous, la *Compagnie Nationale du Rhône* (CNR) installe ses propres stations à St-Martin d'Ardèche (1970 à 1992) et à Sauze-St-Martin (station installée en 1991, téléphérique de jaugeage implanté en 1988) ; elle effectue des jaugeages sur différentes stations (Pont

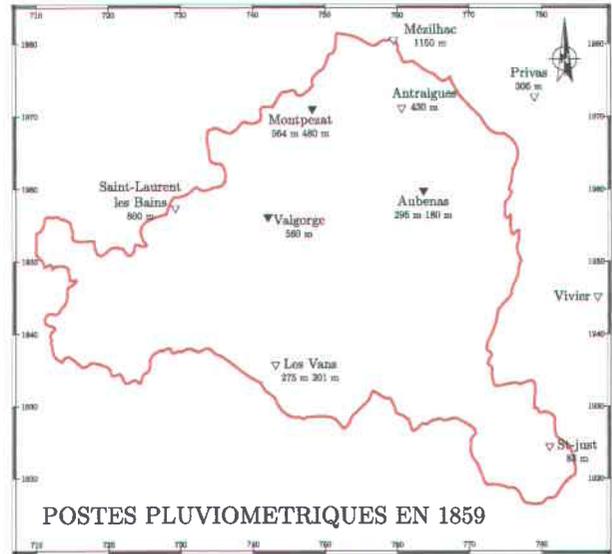
de Labeaume : n°11, Vals les Bains : n°13, Aubenas : n°15, Vogüé : n°18, Joyeuse : n°25, Gravière : n°46, Vallon Pont d'Arc : n°55, cf. figure 4.1, p. 112) pour le compte du SAC de la DDE 07 depuis 1995.

4.4.1.3 Données météorologiques

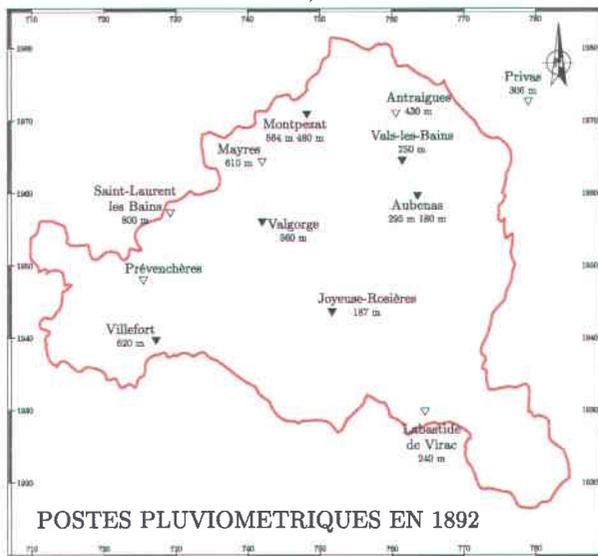
Comme dans nombre de régions, les premières données pluviométriques sur l'Ardèche à caractère quantitatif émanent de « savants » locaux. Un certain M. de Montravel dont les observations à Joyeuse sur la période 1805-1830 sont retranscrites dans le rapport manuscrit de l'ICPC de Mardigny (1857b) (cf. figure 4.11a, p. 133). L'abbé Monot, professeur à Aubenas dont les relevés effectués de 1853 à 1857 sont reproduits dans le rapport manuscrit de l'élève ingénieur Morlière (1857c).



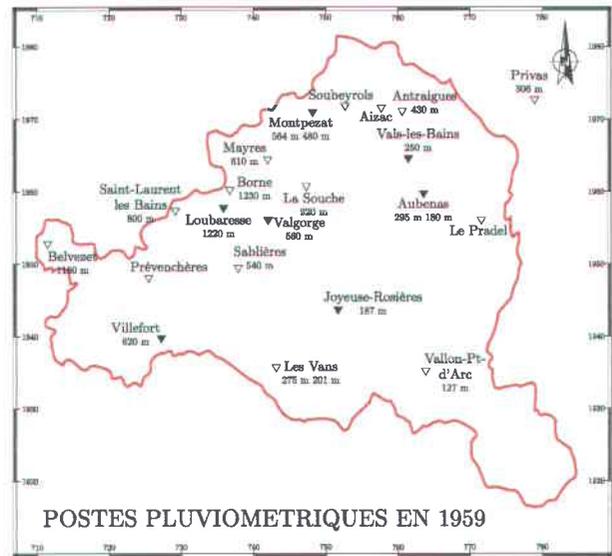
a)



b)



c)



d)

FIG. 4.11 – Evolution du nombre de postes pluviométriques au cours des deux derniers siècles

Au niveau national les années 1850 marquent un tournant dans le domaine de la météorologie avec la fondation, en 1852, de la *Société Météorologique de France* (E. Renou et C. Sainte-Claire Deville), association reconnue d'utilité publique en 1857. En 1854, Le Verrier, alors directeur de l'*Observatoire de Paris*, entreprend l'édification du premier réseau météorologique télégraphique, relié à une douzaine de stations implantées en Europe continentale. Cette création est un effet indirect de la guerre de Crimée (1853-1856) : Le Verrier s'explique auprès de l'Académie des Sciences : « On n'a pas oublié l'ouragan qui, le 14 novembre 1854, causa de si nombreux sinistres dans la mer Noire et amena la perte du vaisseau le Henri IV...Le 16 février 1855, j'eus l'honneur de soumettre à S. M. l'Empereur le projet d'un vaste réseau de météorologie destiné à avertir les marins de l'arrivée des tempêtes. Ce projet, très complet, reçut la haute approbation... » (Fiero, 1991, pp. 110-111). En 1878, ce réseau devient le *Bureau Central Météorologique* (200 stations d'observation en 1900), l'*Office National Météorologique* en 1920 par regroupement des services de différents ministères, puis la *Météorologie Nationale* en 1945 (*Météo-France* depuis).

Les premiers pluviomètres officiellement installés en Ardèche le sont, après les grandes crues de 1857, sur l'initiative de l'ICPC Marchegay (1861). Le service des Ponts et Chaussées gère alors dix postes pluviométriques (cf. figure 4.11b, p. 133). Comme précisé au §4.4.1.2, p. 130, dès 1860 des restrictions budgétaires vont entraîner la suppression du Service des Inondations. Les observations pluviométriques continuent sous la direction de l'IGPC Belin qui recommande d'utiliser le modèle économique de M. Bazin (ingénieur à Dijon) ; certains postes sont supprimés (Joly, 1860). A partir de 1866, un autre « savant », Henry Vaschalde (1890), effectue des relevés pluviométriques à l'établissement thermal de Vals les Bains. Ce dernier devient en 1871 correspondant de l'*Association Scientifique de France*, fondée en 1864 par Le Verrier et fusionnée en 1887 avec l'*Association Française pour l'Avancement des Sciences*. Sous l'impulsion de Belgrand de nouvelles stations sont installées en 1872 par le service des Ponts et Chaussées (remise en service de certaines arrêtées en 1860), les observations seront faites par les directeurs des postes depuis leurs bureaux (Cultil, 1872). Les données sont alors publiées dans le *Bulletin Météorologique* de l'Association Scientifique de France (Lemoine, 1896).

A compter de 1892, le Service Provisoire d'Annonce des Crues de l'Ardèche gère douze stations sur le bassin versant de l'Ardèche (cf. figure 4.11c, p. 133), les relevés sont effectués quotidiennement par des observateurs. Suite à la création du Ministère de l'agriculture en 1881, certains services extérieurs, dont le Service Hydraulique, passent sous sa tutelle. On va alors rencontrer des *Observateurs Forestier* (Météo France, 1995a) exerçant, soit sur des postes du système d'annonce des crues (ex. : M. Fargier à Mayres en 1896, M. Ozil à Labastide en Virac en 1897, cf. figure 4.11c, p. 133), soit sur de nouveaux postes (ex. : M. Midavaine à St-Marcel d'Ardèche en 1897, cf. figure 4.5, p. 114, représentant l'ensemble des postes pluviométriques ayant existé sur le bassin de l'Ardèche de 1805 à 2002). Le réseau de mesure pluviométrique se densifie progressivement au cours du XX^e siècle avec notamment l'implantation de stations gérées par les services d'EDF (cf. figure 4.11d, p. 133). Le bassin versant de l'Ardèche compte 33 postes en 1973 puis 36 actuellement dont 14 font partie du système d'annonce des crues du SAC de la DDE 07, les autres étant gérés par Météo-France (certains conjointement avec EDF).

4.4.2 Valeurs remarquables de pluies et de cotes de crues de l'Ardèche issues de l'enquête historique

4.4.2.1 Valeurs remarquables de pluies

Un inventaire des épisodes de fortes pluies, avec au moins 100 mm en 24 h sur un des postes du département de l'Ardèche, a été réalisé par Météo France (1995a, 1995b) sur la période 1807-1994. Les auteurs ont consulté les archives de Météo-France, les Archives Départementales de l'Ardèche (ADA), celles du Service d'Annonce des Crues de la DDE 07 ainsi que les ouvrages de Vaschalde (1890) et Reynier (1947).

On note qu'à partir de 1901, les données sont suffisamment denses pour que des cartes d'isohyètes puissent être tracées. A titre d'illustration, les caractéristiques des épisodes pluvieux de 1901 à 1950 peuvent être consultées sur le site Internet du Cemagref : www.hh.lyon.cemagref.fr (cf. projet Base-In financé par le MATE, prototype de système d'aide à l'obtention d'informations historiques sur les Inondations, Ardèche et Isère). On remarquera cependant que seules les hauteurs de pluie par poste sont valides. Les isohyètes, tracées par le bureau d'étude *Gipea-Consultants* (partenaire du projet), diffèrent en effet de manière significative de celles présentées dans l'inventaire de Météo France qui reposent sur une meilleure interprétation des phénomènes météorologiques.

A contrario, la période 1805-1900 montre de nombreuses lacunes liées au fait que certaines feuilles d'observateurs, pour les postes installés dès 1857, n'ont pu être retrouvées. L'ensemble des sources d'information disponibles n'a pas été exploité dans l'inventaire de Météo France. Le tableau (4.4), ci-dessous, qui mentionne plusieurs épisodes aux cumuls pluviométriques remarquables, fait notamment apparaître des événements et/ou des postes non recensés (cf. note 5).

TAB. 4.4 – Cumuls de pluie remarquables sur la période 1805-1900

Date	Cumuls de pluie	Postes ⁽¹⁾
9-11 octobre 1827	792 mm en 21 h	Joyeuse ⁽²⁾
9-10 septembre 1857	145 mm en 1 jour	Aubenas ⁽³⁾
14-15 octobre 1859	512 mm en 2 jours	Antraigues ⁽⁴⁾
	468 mm en 2 jours	Montpezat ⁽⁴⁾
	432 mm en 2 jours	Mézilhac ⁽⁴⁾
12 septembre 1875	194 mm en 1 jour	Villefort ⁽⁵⁾
21 octobre 1878	270 mm en 1 jour	Vals les Bains ⁽⁶⁾
18-23 septembre 1890	971 mm en 5 jours	Montpezat ⁽⁴⁾
	578 mm en 3 jours	Villefort ⁽⁵⁾
	514 mm en 3 jours	Prévenchères ⁽⁵⁾
	339 mm en 54 h	Vals les Bains ⁽⁶⁾
21 octobre 1891	185 mm en 1 jour	Villefort ⁽⁵⁾
	188 mm en 1 jour	Prévenchères ⁽⁵⁾
2-3 novembre 1899	508 mm en 1 jour	Villefort ⁽⁴⁾
28-29 septembre 1900	495 mm en 1 jour	Villefort ⁽⁴⁾
	376 mm en 2 jours	Vals les Bains ⁽⁶⁾

Notes du tableau (4.4)

- (1) - cf. figure (4.11), p. 133, pour la localisation des postes pluviométriques.
- (2) - D'après les relevés effectués par M. de Montravel et reproduits dans le rapport manuscrit de l'ICPC de Mardigny (1857b).
- (3) - D'après les relevés effectués par l'abbé Monot et reproduits dans le rapport manuscrit de l'élève ingénieur Morlière (1857c).
- (4) - Postes pluviométriques du service des Ponts et Chaussées, d'après Météo France (1995a).
- (5) - D'après les hauteurs de pluies en 24 heures répertoriées par Lemoine (1896). Valeurs non recensées dans l'inventaire de Météo France (1995a).
- (6) - D'après les observations effectuées par Henry Vaschalde à l'établissement thermal.
-

Remarque 4.4 *Notre étude s'intéressant essentiellement aux crues historiques ; nous n'avons pas cherché à compléter cet inventaire. Nous retiendrons finalement, notamment pour la phase de critique des données limnimétriques au cours de laquelle les informations pluviométriques sont exploitées (cf. §5.3.2.2, p. 181), que seule la période postérieure à 1901 présente une garantie en terme d'exhaustivité des événements pluvieux, dans l'état actuel de l'inventaire.*

4.4.2.2 Valeurs remarquables de cotes de crue

Données historiques du Service d'Annonce des Crues (SAC)

Nous avons comptabilisé une soixantaine d'échelles limnimétriques, certaines ayant fait l'objet de relevés dès 1857 sur des périodes assez courtes (cf. figure 4.1, p. 112). Ces données, encore conservées aux archives du SAC de l'Ardèche, étaient répertoriées sur des feuilles mensuelles d'observateurs puis normalement retranscrites sur des cahiers annuels au niveau de l'ICPC du département. Elles ont fait l'objet d'une saisie sur support informatique (format Hydro II, chronique hauteur/temps : trame CTH) dans le cadre du projet HISTORISQUE-Ardèche. On dispose ainsi des relevés de hauteur journalière sur 15 échelles d'annonce des crues.

Il s'agit de mesures à heure fixe d'une à quatre valeurs par jour (généralement à 7h, 12h et 17h). Le pas des relevés devient normalement variable et plus fréquent pendant les crues (limnigramme détaillé). Ces consignes sont détaillées dans les règlements des SAC (Lemoine, 1896 ; Ministère des Travaux Publics, 1949 ; Ministère des Travaux Publics et des Transports, 1960, 1962 ; Soubeyrand, 1961, 1963 ; Moschetti, 1971). Dès 1847 un programme d'étude, particulièrement détaillé du point de vue technique, avait été engagé suite à l'inondation catastrophique du 17 au 23 octobre 1846 dans le bassin de la Loire (MTP, 1847). Il représente dans nos recherches la première trace d'une organisation officielle de l'observation hydrométrique, ces différents articles¹ posent les bases des pratiques mises en place ultérieurement sur les autres cours d'eau.

Les figures (4.12) et (4.13), p. 138, présentent les cotes brutes pour deux des quinze stations, St-Martin d'Ardèche (St-Martin) et Vallon Pont d'Arc (Vallon), étudiées en particulier par la suite (stations n^{os} 64 et 55, cf. figure 4.1, p. 112). Les hauteurs sont en trait continu lorsqu'au moins une valeur par jour est présente. Les valeurs isolées (points) correspondent soit (a) aux étiages et aux crues de l'année (nombre variable de crues sélectionnées par année, pas de seuil de sélection spécifique non plus) répertoriés dans les rapports annuels d'activité du SAC que nous avons pu retrouver (Ponts et Chaussées, années 1901 à 1909, 1916, 1918, 1920 à 1923), (b) aux *maxima et minima annuels* ainsi qu'aux niveaux et périodes d'étiage reproduits dans des tableaux de synthèse du service couvrant la période 1892-1912 (Ponts et Chaussées, 1912a, 1912b). On remarquera un nombre important de lacunes (barre du bas sur les figures) liées soit au fait que les feuilles mensuelles ont été perdues par le service soit qu'elles n'ont pas pu être localisées lors de la phase de l'EGS.

Remarque 4.5 *Au sujet des lacunes on notera que différents documents font état de copies éventuelles : (a) le règlement évoqué au §4.4.1.2 (MACTP, 1853) précise que l'ICPC*

1. Art. 18 – La hauteur des eaux sera observée à toutes les échelles tous les jours, à midi, tant que les eaux se maintiendront au dessous de 2 mètres en contre-haut de l'étiage ; à huit heures du matin, à midi et à quatre heures du soir, tant que les eaux se maintiendront entre 2 et 4 mètres au dessus de l'étiage ; d'heure en heure, tant que les eaux dépasseront 4 mètres au-dessus de l'étiage. Dans certains cas, lorsque les crues approcheront du maximum de hauteur connue, on devra faire des observations de demi-heure en demi-heure, pour relever exactement la plus forte élévation.

Art. 19 – Les levés et les observations seront inscrits immédiatement sur un registre disposé à cet effet, coté et parafé par l'ingénieur d'arrondissement. Celui-ci tiendra dans son bureau un registre concernant toutes les observations faites à toutes les échelles de sa section. Il sera fait des nivellements en long et en travers sur le fleuve ; les cotes seront prises et inscrites en contre-haut du niveau moyen de la mer.

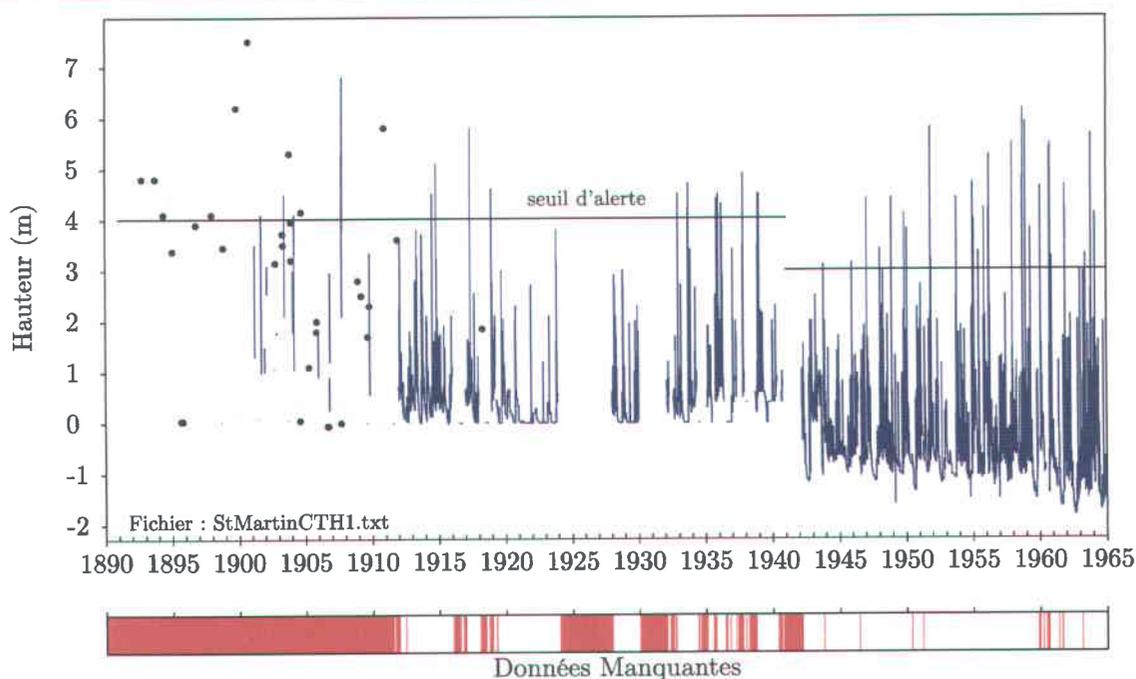


FIG. 4.12 – Chronique hauteurs/temps (CTH) à la station de St-Martin d'Ardèche (n° 64) sur la période 1892-1964

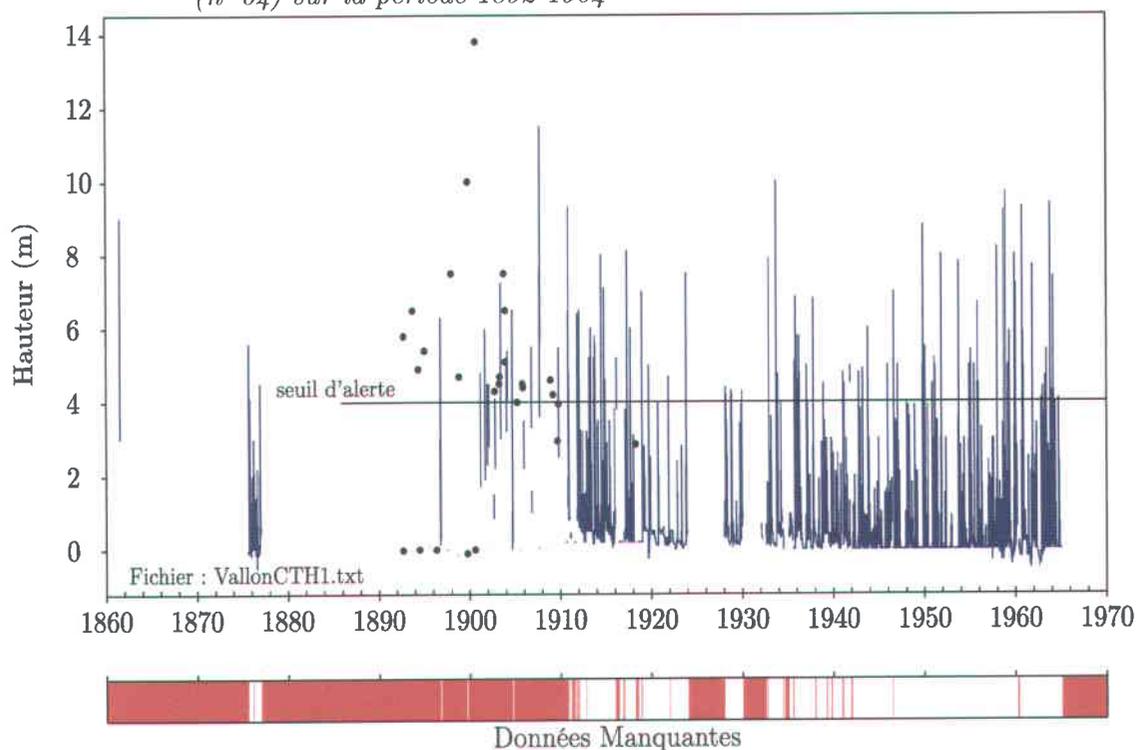


FIG. 4.13 – Chronique hauteurs/temps (CTH) à la station de Vallon Pont d'Arc (n° 55) sur la période 1861-1964

transmettra, à la fin de l'exercice, un résumé mensuel de toutes les observations faites en double expédition (un au dépôt des Cartes et Plans du Ministère de l'Agriculture, du Commerce et des Travaux publics, l'autre servant de base à la publication de documents qui feront une annexe des Annales des Ponts et Chaussées); (b) en 1875 le Ministre

des Travaux Publics E. Caillaux recommande aux ICPC de lui adresser, directement et par voie télégraphique, des bulletins quotidiens de la hauteur des eaux toutes les fois que les circonstances le demandent (MTP, 1875); (c) l'article 5 du règlement annexé à l'essai sur le problème de l'annonce des crues pour l'Ardèche (Lemoine, 1896) précise que l'ICPC du département adressera, chaque année, à l'inspecteur général du contrôle des services hydrométriques et d'annonce des crues pour tout le bassin du Rhône, un rapport rendant compte de la marche du service (cf. rapports annuels d'activité). Nous n'avons malheureusement pas pu localiser ces archives à ce jour.

Remarque 4.6 Le pas de temps des relevés doit en principe, d'après les règlements, devenir variable lors des crues mais cela n'est pas toujours le cas. En effet, pour la station de Vallon, bien que le maxima annuel soit supérieur au seuil d'alerte (4 mètres), on remarque pour certaines années (1928, 1929, 1932, 1938, 1939, 1942 et 1943) que les hauteurs sont seulement relevées à 7h. Il en est de même à la station de St-Martin pour les années 1932, 1933 et 1936 à 1939 alors que le seuil d'alerte était de 4 mètres. Pour les années 1953, 1955 et 1957 les hauteurs, à cette même station, ne sont relevées qu'à 7h, 12h et 17h bien que le seuil d'alerte, établi ensuite à 3 mètres, soit dépassé par les maximum annuels (cf. inventaire des relevés hydrométriques aux stations de Vallon-Pont-d'Arc et de St-Martin-d'Ardèche, annexe §D.3, p. 318). Dans ces conditions il n'est pas évident que la hauteur maximale réelle des crues soit observée. Par ailleurs même si les crues sont détaillées (lettre « D » dans les tableaux D.3 et D.4, pp. 319-320) il n'est pas certains que le maxima soit effectivement observé (ex. : crues des 3 novembre 1914, 8 octobre 1933 et 30 septembre 1958 à Vallon). Ce point est développé au §5.3.2.2, p. 181, relatif à la critique des données limnimétriques.

Données historiques antérieures au SAC

Les données quantitatives antérieures à la création du Service Provisoire d'Annonce des Crues en 1892 ne sont accessibles, le plus souvent, que de façon indirecte. Elles proviennent de rapports de synthèse établis majoritairement par des ingénieurs des Ponts et Chaussées : (a) suite à des crues importantes telles que celles de 1857 et 1890 ; (b) à l'occasion de la mise en place du SAC (elle même plus ou moins directement liée à la grande crue de 1890) ; (c) dans le cadre de rapports de fin d'étude. Bien que certaines échelles hydrométriques datent du milieu du XIX^e siècle, très peu de relevés d'observateurs couvrant la période 1857-1891 ont en effet pu être retrouvés. Ces derniers ont pourtant existé comme en témoigne un courrier de l'IOPC Lancrenon (1875) qui demande aux subdivisionnaires de lui faire parvenir leurs observations à la fin de chaque mois. Ces rapports, qui font la synthèse des crues historiques, sont établis à partir d'enquête de terrain (relevés de topographie et de laisses de crues) et de recueils de témoignages. Un article² du programme d'étude sur la Loire (MTP, 1847) évoqué au paragraphe précédent nous renseigne particulièrement sur les pratiques de l'époque.

Certaines cotes historiques proviennent également de l'exploitation des télégrammes d'annonce des crues. Comme énoncé au §4.4.1.2, p. 130, l'annonce des crues se pratiquait déjà par « tradition », bien qu'il n'y ait pas de service officiel. Par ailleurs, dès 1859, un arrêté du ministre de l'intérieur daté du 9 décembre autorise les ingénieurs et agents des Ponts et Chaussées de tous grades, à transmettre, en franchise, des dépêches relatives à la crue des cours d'eau (s.n., 1865). Les télégrammes ont été exploités soit : (a) directement pour ceux retrouvés aux Archives Départementale de l'Ardèche (ADA), (b) indirectement à partir des notes manuscrites où des travaux édités de Maurice Pardé qui a consulté les ADA avant 1925 et recopié certains télégrammes.

Le tableau (4.5), p. 141, présente l'ensemble des hauteurs brutes *maximales annuelles* au dessus de l'étiage, répertoriées à l'issue de l'enquête historique au droit des échelles de Vallon et de St-Martin (les notes du tableau précisent l'origine de chaque donnée et apportent des renseignements complémentaires ou des remarques d'importance). Ces deux stations ont été retenues car elles sont de loin les plus dotées du bassin en terme de données quantitatives pour la période antérieure à 1892.

On peut déjà souligner le fait, important pour l'analyse fréquentielle des crues (cf. §5.5, p. 203), que ces cotes correspondent à des *maxima annuels*. On remarque en effet que la sélection qui s'opère, au grès des disparitions de documents originaux (relevés d'observateurs, télégrammes), fait que les ingénieurs des Ponts et Chaussées ont essentiellement conservé, au cours du temps, les valeurs maximales de chaque année qu'elles soient élevées ou non (c'est à dire qu'il n'y a pas vraiment de seuil de sélection). Un exemple de cette pratique est donné par le tableau de synthèse du service couvrant la période 1892-1912, évoqué au paragraphe précédent. On présente trois autres exemples ci-dessous :

- i) en 1846 il y eut deux crues. La première, le 20 septembre 1846 (maximum entre 9 et 10h), a atteint 11.75 mètres au dessus de l'étiage au moulin de Salavas (Combiér, 1849). On note cependant que seule la hauteur de la seconde (29 septembre 1846, cf.

2. Art. 33 – Le but que se propose l'administration étant la formation d'une monographie la plus complète de la Loire, les ingénieurs enregistreront toutes les traditions orales ou écrites, toutes les notions historiques, toutes les indications, toutes les observations qu'ils pourront recueillir. Ils les discuteront et apprécieront pour en faire ressortir tout ce qui pourrait être utile pour motiver les combinaisons et les projets ultérieurs.

tableau 4.5) est répertoriée dans les rapports de de Mardigny (1857b, 1860a, 1860b), ces derniers serviront de source pour les auteurs contemporains.

- ii) en 1857 il y eut une seconde crue le 5 octobre 1857 qui s'éleva entre 11.2 et 12.5 mètres au dessus de l'étiage à l'échelle de Vallon (Morlière, 1857a). Cette hauteur n'est pas rapportée par de Mardigny (1860a, 1860b), Lemoine (1896) ensuite ne mentionne même plus le fait qu'il y ait eu deux événements.
- iii) en 1878 Lemoine (1896) cite deux crues (première le 7-8 octobre) mais ne donne que la hauteur du maximum annuel le 22 octobre (cf. tableau 4.5).

Les trois exemples présentés ci-avant montrent que la crue maximale annuelle « masque » en quelque sorte les autres événements ayant eu lieu au sein de la même année même s'ils sont relativement forts. Ainsi il n'y a pas vraiment de seuil de perception lié à une caractéristique physique établie, mise à part pour les événements très forts tels que 1644, 1772, 1827, 1846, 1857, 1878 et 1890.

TAB. 4.5 – *Hauteurs maximales annuelles au-dessus de l'étiage des crues historiques répertoriées à Vallon (n° 55) et St-Martin (n° 64) sur la période 1522-1891*

Date	Vallon	Date	St-Martin	Victimes ⁽¹⁾
mi/09/1522 ⁽²⁾	-	-	-	>600
03/09/1644	16 ⁽³⁾	-	-	-
09/09/1772	14 ⁽³⁾	-	-	-
19/09/1780	2.56 ⁽⁴⁾	-	-	-
09/07/1826	<12.5 ⁽⁵⁾	-	-	-
10/10/1827 à 00h30	16.1 ⁽³⁾	10/10/1827	8.9 ⁽⁶⁾	30
28/10/1840	8 à 10 ⁽⁷⁾ ou 14 ⁽⁸⁾	-	-	-
29/09/1846 à 00h00	13.1 ⁽³⁾	29/09/1846 à 00h30	7.75 ⁽⁶⁾ ou 7.97 ⁽⁹⁾	>2
-	-	29/10/1853 à 13h00	6.25 ⁽⁹⁾	-
07/10/1855	7 ⁽¹⁰⁾	-	-	-
29/05/1856	4.4 ⁽¹⁰⁾	30/05/1856 à 02h00	4.28 ⁽⁹⁾	-
10/09/1857 à 19h30	13.52 ⁽¹¹⁾	10/09/1857 à 22h30	6.06 ⁽¹²⁾ ou 6.5 ⁽¹³⁾ ou 6.6 ⁽¹¹⁾	50
15/10/1859 à 00h00	11.27 ⁽¹⁴⁾	15/10/1859 à 00h00	6.2 ⁽¹⁴⁾	12
15/07/1861 à 22h00	9 ⁽¹⁵⁾	-	-	-
03/10/1872 ⁽¹⁶⁾	10 ⁽¹⁷⁾	-	-	-
13/09/1875 à 13h00	5.6 ⁽¹⁸⁾	-	-	-
15/12/1876 à 16h00	4.5 ⁽¹⁹⁾	-	-	-
22/10/1878 à 00h00	14.5 ⁽²⁰⁾	-	-	5
27/02/1882 à 18h00	5.2 ⁽²¹⁾	-	-	-
14/01/1883 à 07h00	5.4 ⁽²²⁾	-	-	-
25/10/1886 à 12h00	6 ⁽²²⁾	-	-	-
31/12/1888	9.4 ⁽¹⁶⁾	-	-	-
22/09/1890 à 12h00	17.3 ⁽²³⁾	22/09/1890 à 15h00 ⁽²⁴⁾	8.45 ⁽²³⁾	35
21/10/1891 à 07h00 ⁽²⁴⁾	11.1 ⁽²⁰⁾	21/10/1891 à 10h40 ⁽²⁴⁾	6.7 ⁽²⁰⁾	-

Notes du tableau (4.5)

- (1) - Nombre de victimes lors de ces crues d'après un rapport du Service d'Annonce des Crues de l'Ardèche (s.n., 1970).
- (2) - D'après l'IOPC Combier (1857c) qui semble être le premier à avoir consulté les *procès-verbaux des Etats du Vivarais*. Nous mentionnons cette crue bien que nous ne disposions pas de cote car elle est présentée comme très forte et n'ayant laissé aucun pont et moulin intacts contrairement à celle de 1827.
- (3) - A partir des hauteurs de 16.88 m, 14.7 m, 17 m et 13.55 m repérées pour les crues de 1644, 1772, 1827 et 1846 au moulin de Salavas (430 m en amont), d'après Combier (1849, 1857c, 1857d, 1857e, 1857f, 1857g). Les maximums à Vallon Pont d'Arc sont notés, suivant les documents, à 0h30 ou 01h le 10 octobre 1827 et 23h le 28 septembre ou 0h le 29 septembre 1846. Ces données ont été ensuite reprises par l'ICPC de Mardigny dans ses différents rapports (1857b, 1860b, 1860a).
- (4) - Crue répertoriée dans le « Recueil des Crues Historiques dans le Gard » (www.gard.equipement.gouv.fr) à partir de documents sources des Archives Départementales du Gard (ADG, C127 & 1076) : Ardèche 8 pieds (2,56 m) au-dessus de la normale.
- (5) - D'après un courrier de Combier (1857b) adressé à de Mardigny et faisant état de ses recueils de témoignages. Il note : « M. Laffaye, propriétaire riverain de l'Ardèche à Vallon, âgé de 75 ans, a souvenir d'une crue en 1815 ou 1816 qui s'éleva à 4.5 m environ en contrebas de celle de 1827. Ce qui est déjà une crue très remarquable 12.5 m au dessus de l'étiage. Elle eu lieu au mois de juillet puisqu'elle lui emporta des gerbes de blé. » Il ajoute ensuite « Un autre propriétaire fixe au 9 juillet 1926 la crue semblable à celle indiquée par M. Laffaye pour 1816, il lui attribue la hauteur indiquée par M. Laffaye. » La date exacte semble être le 9 juillet 1826 d'après le rapport manuscrit de de Mardigny (1857b). Ce dernier reproduit les observations pluviométriques faites par M. de Montravel à Joyeuse (épisodes entre 1805-1830) qui ne présentent pas d'événement en 1815 ou 1816 ; on note par contre : « Le 9 juillet, il tomba 81 lignes (**183 mm**) d'eau, le 1^{er} septembre 90 (203 mm) et dans la nuit du 19 au 20 septembre il tomba 55 lignes (124 mm) d'eau en moins de 5 heures. Il y eut inondation de notre rivière, mais cela arrive souvent, sans dégâts d'une importance majeure. » *Cet exemple met clairement en évidence que le seuil de perception garantissant l'exhaustivité des crues est relativement élevé pour la période précédant l'installation des échelles hydrométriques (avant 1857).*
- (6) - D'après Combier (1857f) à l'usine Castagne.
- (7) - D'après Pardé (1936).
- (8) - D'après le Directeur de la Vallée du Rhône, ICPC à Valence (s.n., 1841) cette crue est située 2.09 m en dessous de celle de 1827 au moulin de Salavas. Cette indication positionne la crue de 1840 au même niveau que celle de 1772 alors que la première n'a pas été relevée dans l'inventaire de Combier (1857c).
- (9) - D'après l'IOPC de Privas Perret (1857).
- (10) - D'après l'Ing. des Ponts et Chaussées Delemer (1904).
- (11) - D'après l'élève ingénieur Morlière (1857a, 1857b, 1857c).
- (12) - D'après l'ICPC Gros, cité par l'ICPC Lemoine (1896).
- (13) - D'après l'ICPC Marchegay (1861), maximum à 22h20.
- (14) - D'après un rapport du service des Ponts et Chaussées (s.n., 1859).
- (15) - D'après les relevés effectués par l'observateur Julien (1861) : hauteur également représentée à la figure (4.13), p. 138, qui ne répertorie que les données issues directement

des relevés hydrométriques.

(16) - D'après Vaschalde (1890), crue non sélectionnée par Lemoine (1896) qui a pourtant utilisé comme source d'information le document de Vaschalde.

(17) - D'après Météo France (1995a) au moulin de Salavas. Cette hauteur est en fait localisée au pont suspendu de Vallon à Salavas. Après l'installation des échelles en 1857, toutes les hauteurs répertoriées à Vallon correspondent au pont suspendu. La même erreur a été commise dans le rapport de Météo France pour les crues de 1859 et 1891.

(18) - D'après les relevés effectués par l'observateur Julien (1875-1876) : hauteur également représentée à la figure (4.13), p. 138. Des relevés mensuels sont absents mais le maximum annuel (5.6 m) est garanti par l'ICPC Gros, cité par Lemoine (1896).

(19) - D'après les relevés effectués par l'observateur Julien (1875-1876) : hauteur également représentée à la figure (4.13), p. 138. Il manque le relevé du mois de février cependant cette valeur de 4.5 m semble être le maximum annuel puisqu'aucune crue remarquable n'est répertoriée pour l'année 1876 par Lemoine (1896).

(20) - D'après Lemoine (1896).

(21) - D'après les télégrammes d'annonce de crue envoyés par les observateurs (s.n., 1882-1883).

(22) - D'après Pardé (1925b, 1925c).

(23) - D'après Lemoine (1896) qui présente les limnigrammes de la crue et précise une incertitude sur l'heure exacte du maximum à St-Martin d'Ardèche (environ 12h00).

(24) - D'après Pardé (1925a) qui a consulté les Archives Départementales de l'Ardèche et recopié les télégrammes d'annonce de crue envoyés par les observateurs.

Pour les crues intermédiaires ou faibles, le fait qu'elles soient ou non répertoriées, relève soit du *contexte historique*, soit des *aspects aléatoires de la conservation des archives*. Lemoine (1896), par exemple, note la crue du 21 octobre 1891 située à 11.1 mètres au dessus de l'étiage à Vallon alors qu'il ne mentionne pas celles, pourtant supérieures, du 20 septembre 1846 (maxi annuel le 29 septembre) et du 5 octobre 1857 (maxi annuel le 10 septembre). Pour cette crue de 1891 la vigilance de la population et des personnels a été éveillée par la crue exceptionnelle de 1890, le SAC est également en cours de mise en place. Le maximum annuel de 1780 qui est relativement faible (2.56 m à Vallon) est connu car le Gard a subi des inondations importantes. De la même façon l'enregistrement et la conservation de la cote maximale annuelle de 1856 (4.4 m à Vallon) sont liés au fait que le Rhône a enregistré une crue exceptionnelle.

Nous nous sommes finalement attaché à présenter dans le tableau (4.5) tous les maxima annuels connus. Cette démarche est justifiée par deux éléments qui s'opposent : (a) d'une part, au regard des remarques présentées ci-avant, l'exhaustivité des événements ne peut être garantie que pour des seuils élevés, (b) d'autre part, il nous a semblé important de mettre en valeur le maximum d'information recueillie. Les faibles valeurs de maximums annuels ont leur importance puisqu'elles informent sur les hauteurs non dépassées pour une année particulière. Les crues retenues en définitive pour l'analyse fréquentielle ainsi que les critères de choix des seuils de perception seront discutés en détail au chapitre 5, lors de la critique des données limnimétriques. A cette occasion, les informations qualitatives sur les crues survenues dans le bassin de l'Ardèche avant 1830 seront également exploitées. Il s'agit essentiellement de descriptions des phénomènes, avec des observations du type « plus forte crue depuis... » ou « crue maximale de mémoire d'homme », etc. Elles sont

issues pour les plus anciennes de notes, de mémoires de « savants » locaux ou de procès verbaux et compilées par Vaschalde (1873, 1890). Celles relatives à la période 1805-1830 sont tirées des observations générales qui accompagnent les relevés pluviométriques de M. de Montravel (retranscrites dans le manuscrit de de Mardigny, 1857b). Ces informations qualitatives sont présentées et critiquées dans les annexes §D.1, p. 308 et §D.2, p. 313.

Nous présentons à titre d'illustration, aux figures (4.15) à (4.20), pp. 145-147, des reproductions de quelques documents des ingénieurs des Ponts et Chaussées obtenus à l'issue de l'enquête historique (la figure 4.14 présente pour comparaison une vue en plan récente du même secteur). Ces derniers ont notamment fait l'objet d'une exploitation approfondie lors de la phase de modélisation hydraulique permettant de reconstituer les débits des crues historiques (cf. §5.4.1, p. 183).

Remarque 4.7 *Les principaux éléments relatifs aux cotes de crues historiques utilisées dans ce travail ont été tirés des rapports et études techniques réalisées par les ingénieurs des Ponts et Chaussées au cours de la seconde moitié du XIX^e siècle. Ils pourront être complétés en mobilisant les autres sources d'informations recensées par l'EGS : fonds des travaux publics départementaux et communaux, presse, archives communales, dossiers sur les moulinsages, ...*

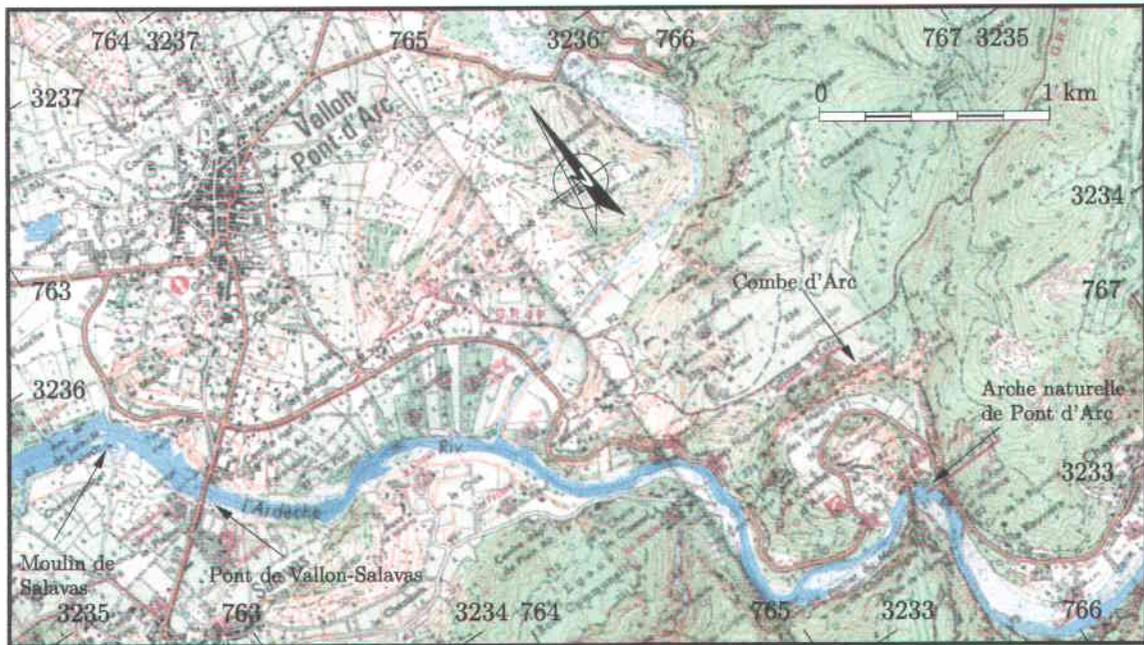


FIG. 4.14 – Carte de l'Ardèche à Vallon-Pont-d'Arc (IGN 1985)

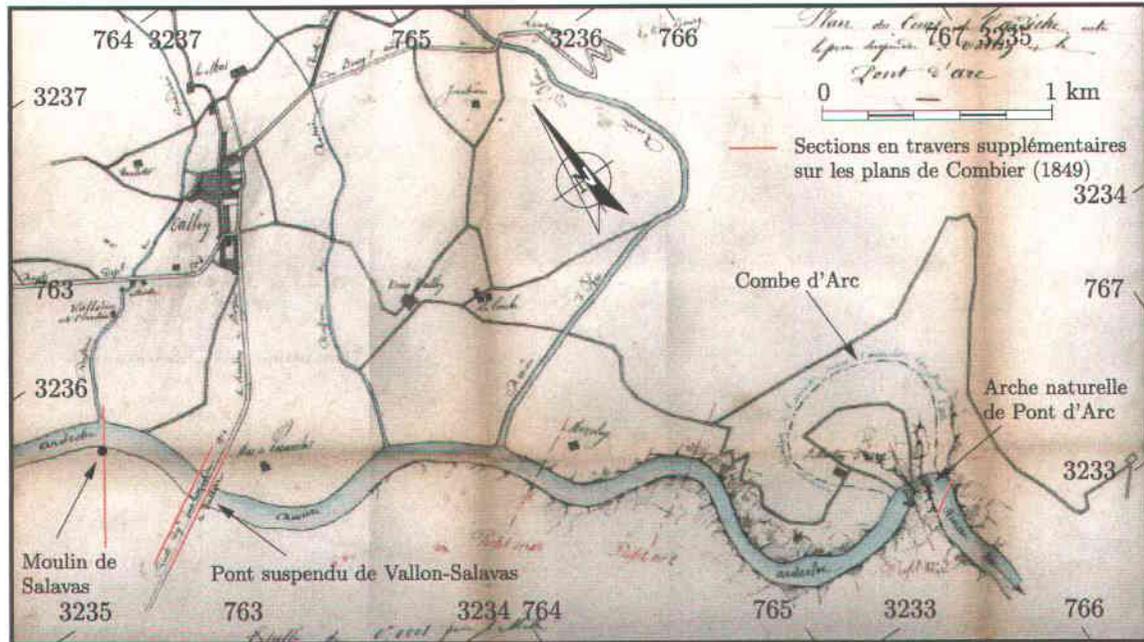


FIG. 4.15 – Carte de l'Ardèche à Vallon-Pont-d'Arc en 1857: localisation des sections en travers (Combiar, 1857d)

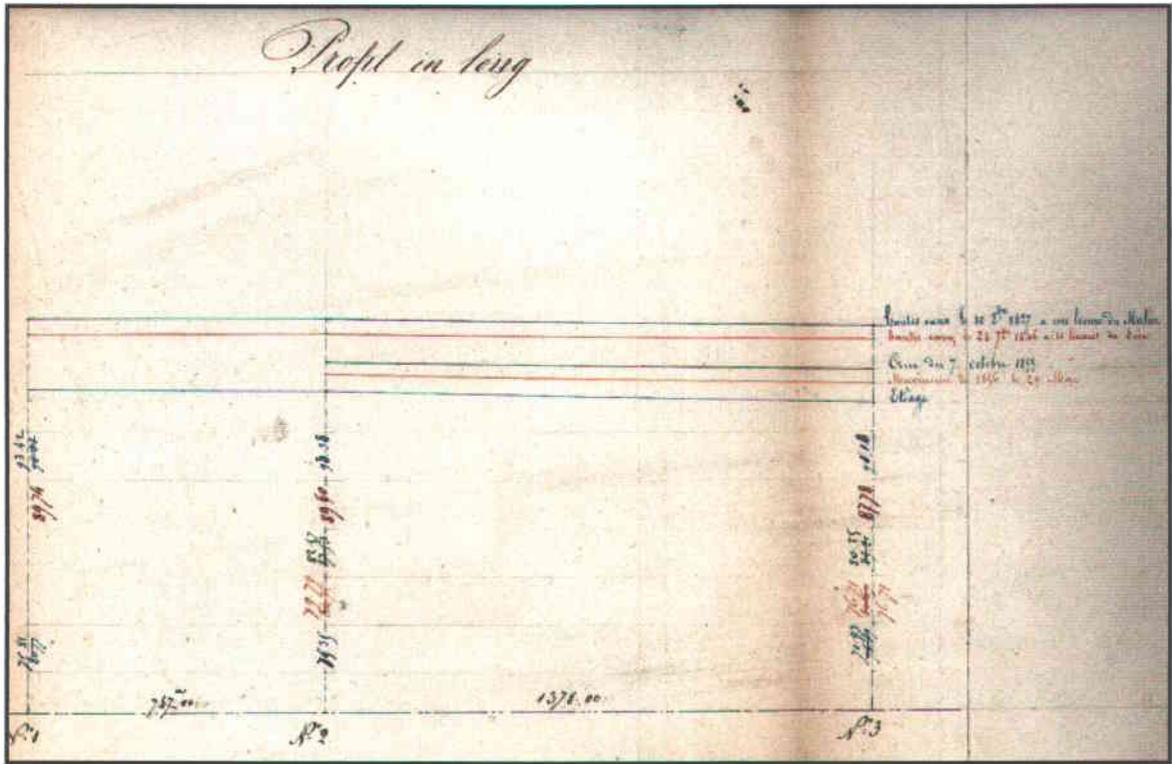


FIG. 4.16 – Profils en long de lignes d'eau de crues de l'Ardèche à Vallon Pont d'Arc (1827, 1846, 1855, 1856) reportés sur un levé topographique de 1849, référence altimétrique système Rhône (correction IGN69 -0.55 m), localisation des profils à la figure 4.15 (Combiér, 1857e)

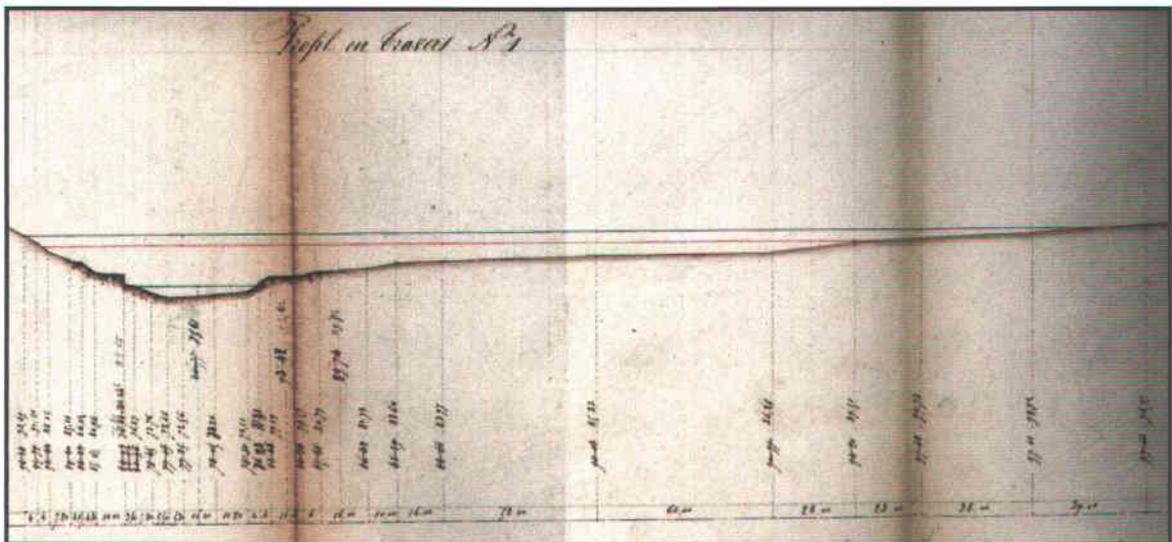


FIG. 4.17 – Profil en travers n° 1 de la figure 4.16, levé topographique de 1849 (Combiér, 1857e)

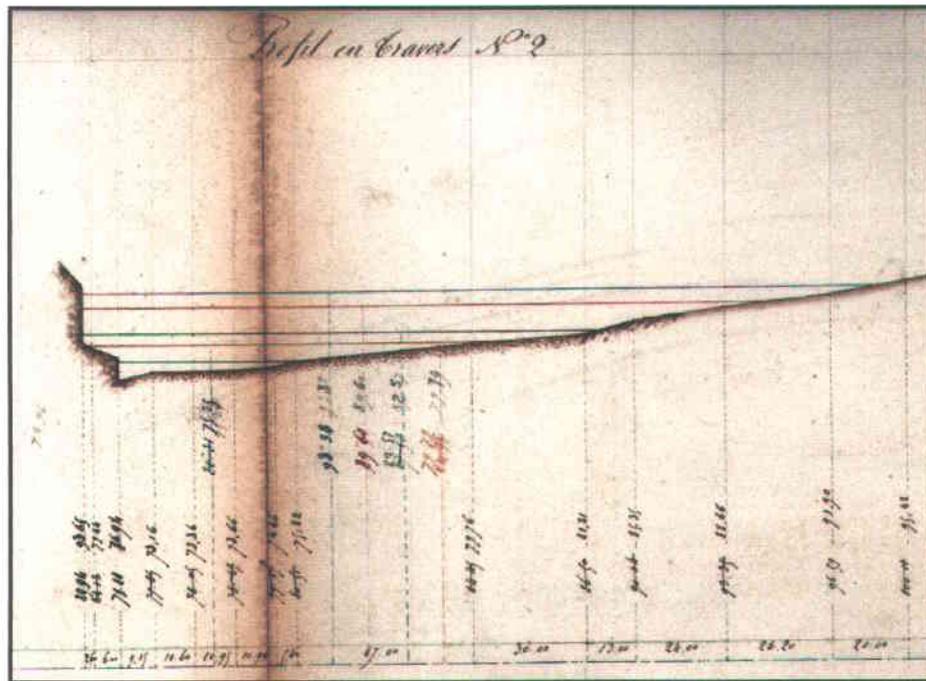


FIG. 4.18 – Profil en travers n° 2 de la figure 4.16, levé topographique de 1849 (Combiér, 1857e)

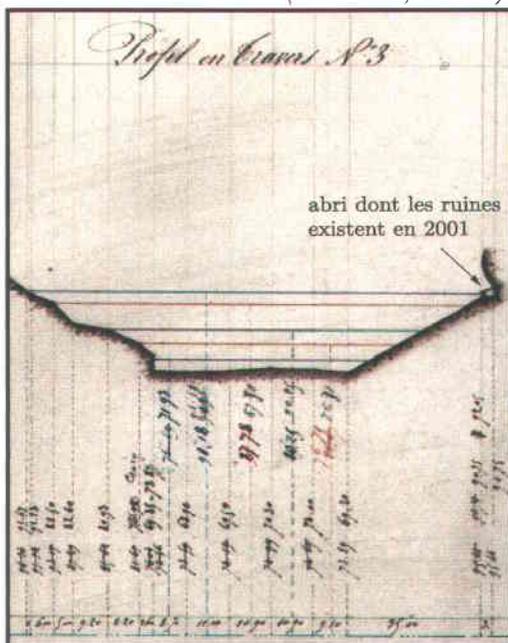


FIG. 4.19 – Profil en travers n° 3 de la figure 4.16, levé topographique de 1849 (Combiér, 1857e)

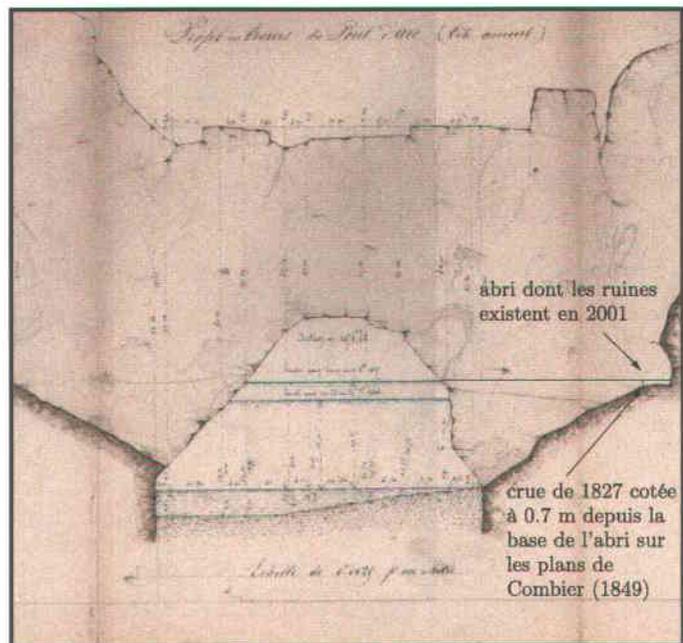


FIG. 4.20 – Plan du débouché de l'arche de Pont d'Arc, levé de 1857, profil n° 3 (idem figure 4.19, changement de la topographie du lit d'étiage : lit sableux) (Combiér, 1857g)

Données systématiques

Les données de la période systématique correspondent à la mise en place des limni-graphes. Comme énoncé au §4.4.1.2, p. 130, le *Service des Grandes Forces Hydrauliques* installe des stations de jaugeage sur certains bassins au début du XX^e siècle. Les débits moyens journaliers seront alors publiés jusqu'en 1920 par le Ministère de l'Agriculture. La publication de ces données, pour un nombre de stations sélectionnées restreint, sera ensuite reprise par la Société Hydrotechnique de France qui édite les *Annuaire Hydrologique de la France* de 1939 à 1968 (SHF, 1939-1968). Ces derniers mentionnent des stations sur le Chassezac (Le Rochas, n° 35, Pied de Borne, n° 37, La Rouvière, n° 38, cf. localisation figure 4.1, p. 112), sur l'Altier (St-Marguerite-Pied de Borne, n° 42) et sur la Borne (La Madelaine, n° 29) mais elles n'ont pas fait l'objet de publication des débits journaliers dans l'annuaire.

Parallèlement le Ministère de l'industrie édite un rapport annuel des *Stations de jaugeages exploitées par les Circonscriptions Electriques* (Ministère de l'Industrie, 1951-1968) qui fait apparaître en 1961 les premières données relatives au bassin de l'Ardèche. Il s'agit des débits journaliers déterminés au limnigraphe de Sauze St-Martin, installé en 1955 (n°61), avec une synthèse de la période 1955-1961 et un historique des données de la Compagnie Générale d'Electricité (CGE) entre 1922 et 1925. On notera que les débits journaliers de la CGE sont déterminés à partir d'une lecture limnimétrique effectuée uniquement deux fois par jour. Les stations de Pont de Rolandy (n° 7), Pont de Labeaume (n° 10) et Vogüé (n° 17) sont également présentées à partir de 1967. Ces publications sont ensuite reprises par différents ministères et organismes sous le titre d'*Annuaire National des débits de cours d'eau* (Ministère de la Protection de la Nature et de l'Environnement et al., 1969-76). On notera que dès lors, en plus des débits moyens journaliers, 3 ou 4 débits maximums instantanés par mois sont spécifiés.

A partir de 1971, la Banque Nationale de Données pour l'Hydrométrie et l'Hydrologie (HYDRO, gérée par le MATE) assure le stockage des données nationales de référence en hydrométrie au format standard SANDRE (Secrétariat d'Administration Nationale des Données Relatives à l'Eau) : couples hauteurs/temps (trame CTH, temps GMT+1), courbes de tarage. Elle permet d'obtenir entre autres : (a) les débits moyens journaliers (trame QJO) qui sont soit calculés à partir des deux données précédentes, soit fournis directement par les gestionnaires, (b) les débits moyens mensuels (trame QME), (c) les hauteurs instantanées maximales mensuelles (trame HMM) et (d) les débits instantanés maximums mensuels (trame QMM).

Les figures (4.21) à (4.25), pp. 149-150, présentent l'ensemble des données disponibles dans la banque HYDRO aux stations de Sauze St-Martin et de Vallon Pont d'Arc :

- Les débits journaliers à Sauze (QJO), cf. figure (4.21), représentent la plus longue chronique systématique sur le bassin de l'Ardèche. Il sont issus d'une part de la saisie des données produites par les différents gestionnaires (4^e CE, 6^e CE et AFB-RMC) sur la période 1955-1979 (code S dans le format SANDRE), et d'autre part du calcul direct à partir des hauteurs à pas de temps variables et des courbes de tarage sur la période 1980-2002 (code C). Le format SANDRE comporte également six codes de validité (0 : validité inconnue, 5 : douteux, 8 : reconstitué bon, 9 : bon, I : valeur inconnue faible, S : valeur inconnue forte). On note un nombre important de données douteuses entre 1955 et 1979, les lacunes, représentées et numérotées en bas des graphiques, sont synthétisées dans le tableau (4.6), p. 152.

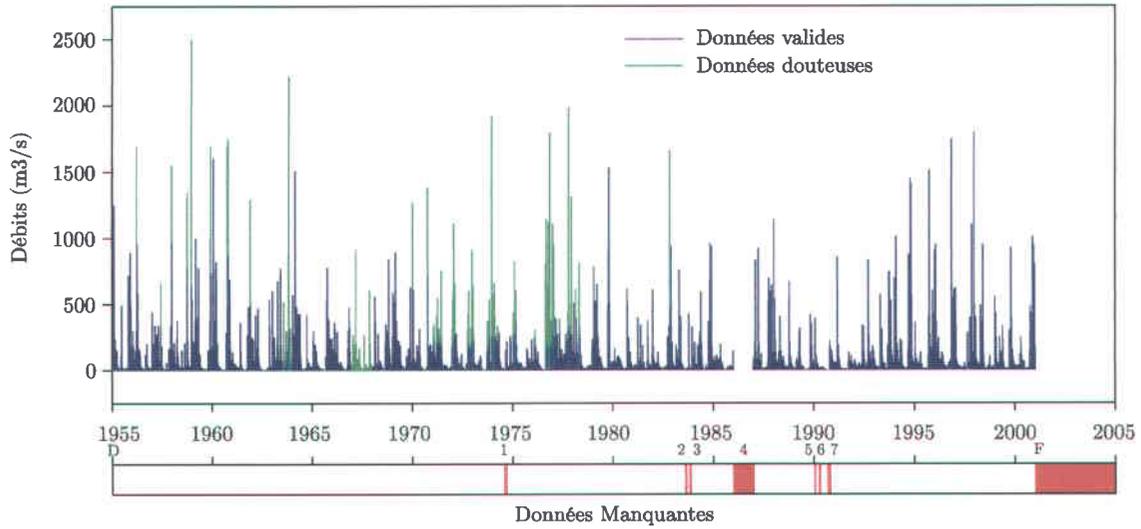


FIG. 4.21 – Chronique de débits moyens journaliers (QJO) à la station de Sauze St-Martin (n° 61)

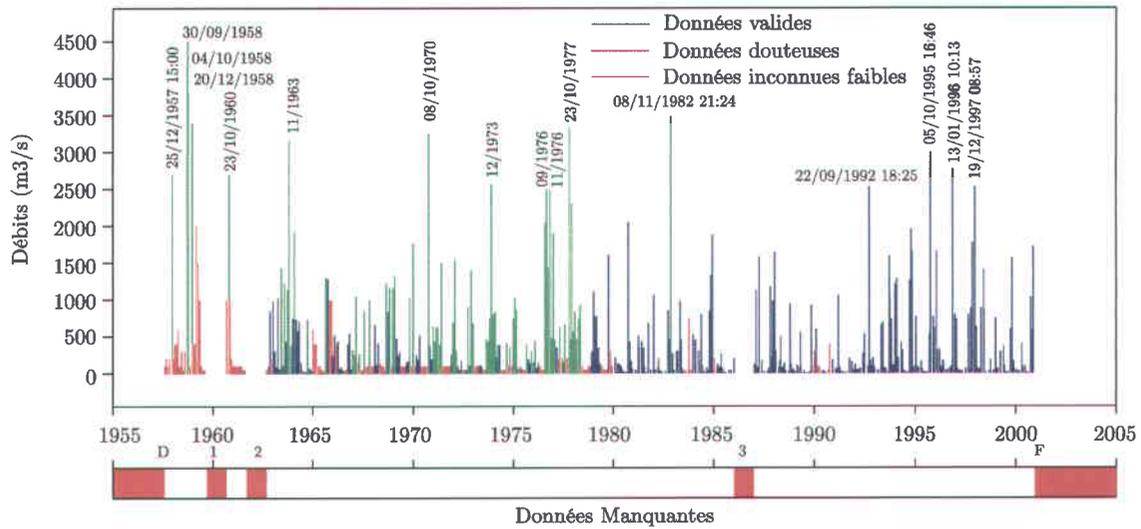


FIG. 4.22 – Chronique de débits instantanés maximum mensuels (QMM) à la station de Sauze St-Martin (n° 61)

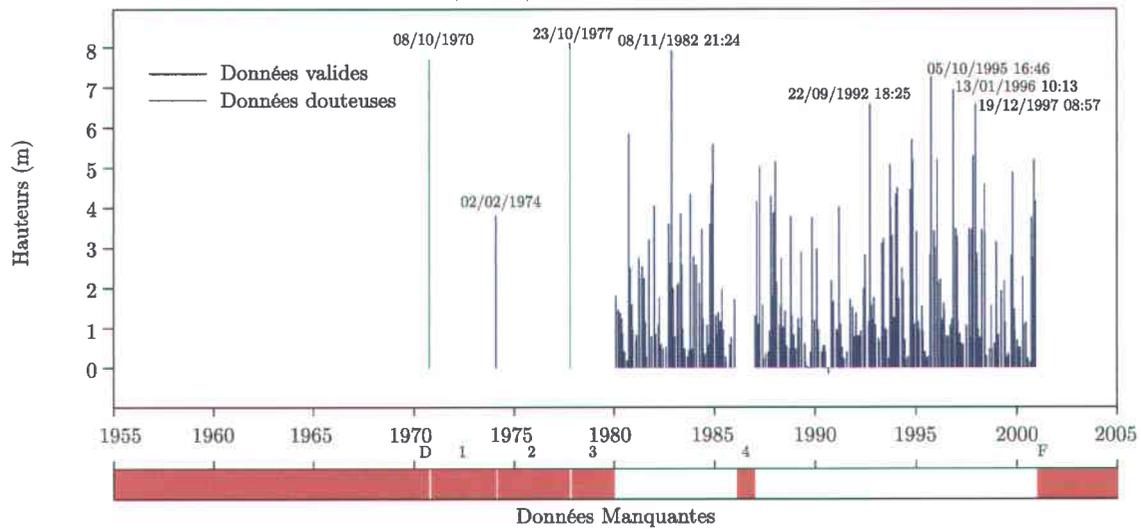


FIG. 4.23 – Chronique de hauteurs instantanées maximales mensuelles (HMM) à la station de Sauze St-Martin (n° 61)

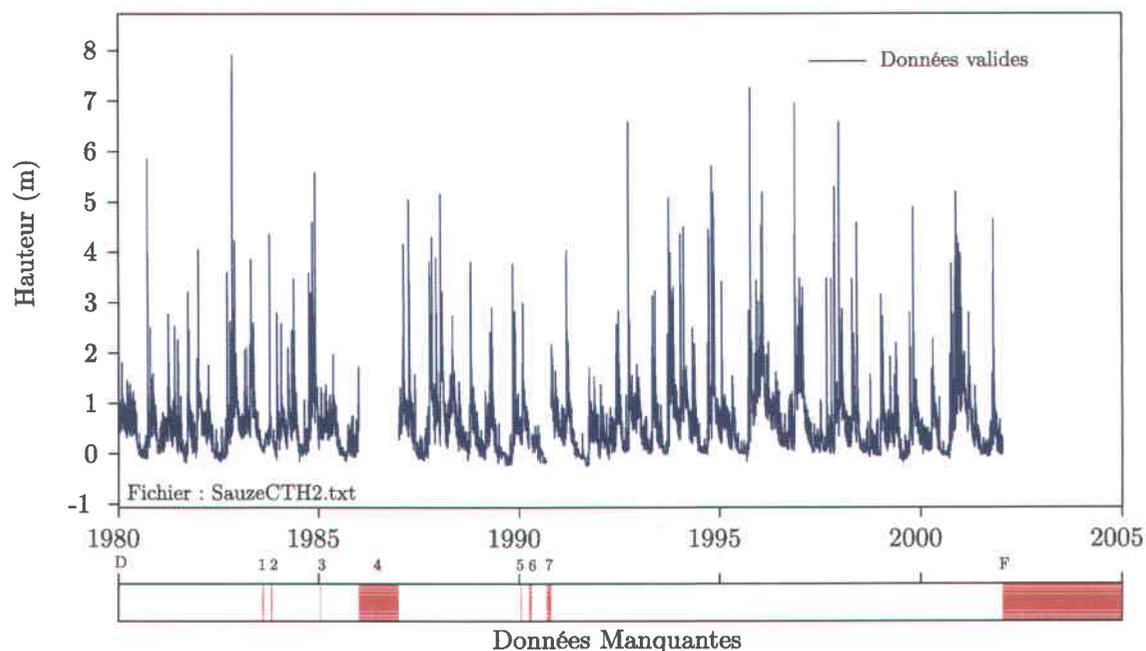


FIG. 4.24 - Chronique hauteurs/temps (CTH) à la station de Sauze St-Martin (n° 61)

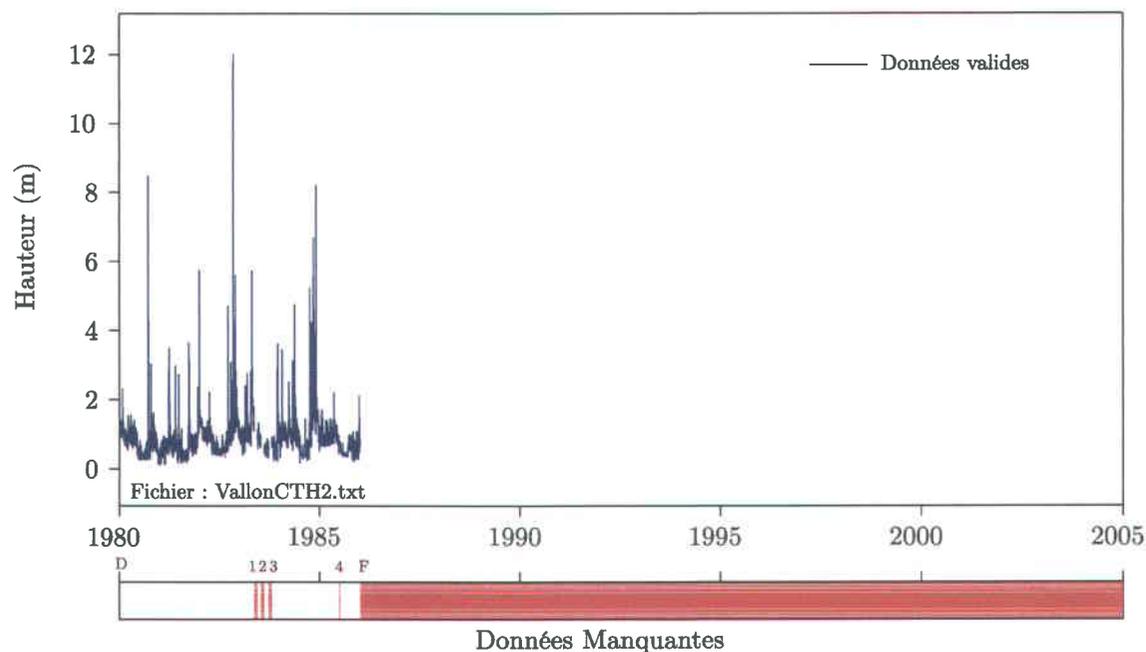


FIG. 4.25 - Chronique hauteurs/temps (CTH) à la station de Vallon Pont d'Arc (n° 55)

- La figure (4.22) présente les débits instantanés maximums mensuels (QMM) à la station de Sauze. La majorité des données de la période 1955-1979 est douteuse. Elles sont issues des annotations des gestionnaires, en marge de leur mission première de publication des débits moyens journaliers. On retrouve par exemple, dans les tableaux des débits journaliers de la 4^e CE, l'observation « maximum le 25/12/1957 vers 15h : 2700 m³/s environ » (4^e CE, 1957), donnée qui a ensuite été saisie dans la banque HYDRO. Les crues sont plus ou moins bien connues, date et heure exacte du maximum (ex. crue du 25/12/1957 15:00) ou uniquement année et mois (ex. : 11/1963). Ces informations renseignent sur le niveau de connaissance de chaque événement et à ce titre, nous avons représenté sur la figure le niveau de précision des dates des crues supérieures à 2500 m³/s (le choix de ce seuil est justifié au chapitre 5). Les données notées avec le code inconnue faible (code I) ont été déterminées, dans la banque HYDRO, en appliquant un rapport de pointe aux débits moyens journaliers variant de 2 à 4 (respectivement pour les QJO de l'ordre de 1000 m³/s à 50 m³/s).
- La figure (4.23) présente les hauteurs instantanées maximales mensuelles (HMM) à la station de Sauze. Sur la période antérieure à 1980 les données, peu nombreuses et douteuses, sont issues directement des rapports spécialement rédigés par les gestionnaires à l'occasion de crues (ex : crue du 08/10/1970 d'après la CNR, 1970).
- La figure (4.24) présente la chronique hauteurs/temps à pas de temps variable à la station de Sauze. Elle débute seulement en 1980 ce qui justifie la présence des nombreuses données douteuses avant cette date sur les autres types de fichier (QJO, QMM, HMM) qui dérivent tous de cette variable de base. On remarquera que, lors de la phase d'inventaire des informations, nous avons pu répertorier un limnigramme de la station de Sauze couvrant la période 1968-1991 et disponible à la DIREN-RA (DIREN Rhône-Alpes, 1991). Il ne semble pas avoir fait l'objet d'un dépouillement et d'une saisie dans la banque HYDRO.
- Enfin la figure (4.25) présente la chronique hauteurs/temps à pas de temps variable à la station de Vallon pour laquelle seules six années sont disponibles. L'altitude du zéro de l'échelle est donnée approximativement à 77.00 m NGF dans ce fichier (nous l'avons estimée à 78.17 m NGF cf. §5.3.1.1, p. 171).

Remarque 4.8 *La phase de l'EGS a permis de mettre en évidence la présence d'autres données pour la période systématique : (a) Un limnigraphe a notamment été installé à Vallon par les services des Ponts et Chaussées le 18 septembre 1961 comme en témoigne un courrier de l'Ing. TPE Bridelle adressé à l'Ing. Barrière de la 4^e CE (Bridelle, 1961) ainsi qu'une série de photos (CNR, 1961). Nous n'avons pas pu localiser les enregistrements papiers de cette station, co-gérée a priori par la 4^e CE et la CNR et en activité au moins jusqu'en 1970 (CNR, 1970). Le courrier du 10 mai 2001, qui nous été adressé suite à une demande de renseignements sur les données relatives à l'Ardèche dont dispose la CNR, ne fait d'ailleurs pas état de cette station (Levasseur, 2001). (b) Ce courrier mentionne l'existence d'un limnigraphe de l'Agence Financière de Bassin Rhône-Méditerranée-Corse (AFB-RMC) à Saint-Martin ayant fonctionné de 1955 à 1981. Ces données n'ont pas été retrouvées. La CNR dispose par contre des enregistrements d'un autre limnigraphe, situé également à Saint-Martin et en activité entre 1970 et 1992. (c) Les données systématiques*

TAB. 4.6 – Synthèse des lacunes des séries disponibles dans la banque HYDRO aux stations de Vallon et Sauze

Station	Sauze								Vallon	
Fichier	QJO		QMM		HMM		CTH		CTH	
D: Deb	01/01/1955		08/1957		10/1970		01/01/1980		31/12/1979	
lacunes	Deb	Fin	Deb	Fin	Deb	Fin	Deb	Fin	Deb	Fin
1	29/07/1974	31/08/1974	09/1959	08/1960	11/1970	01/1974	10/08/1983	18/08/1983	16/05/1983	16/06/1983
2	09/08/1983	18/08/1983	09/1961	08/1962	03/1974	09/1977	24/10/1983	08/11/1983	18/07/1983	17/08/1983
3	24/10/1983	08/11/1983	01/1986	12/1986	11/1977	12/1979	18/01/1985	21/01/1985	26/09/1983	26/10/1983
4	01/01/1986	31/12/1986			01/1986	12/1986	01/01/1986	31/12/1986	27/06/1985	10/07/1985
5	15/10/1990	22/01/1990					15/01/1990	22/01/1990		
6	30/03/1990	23/04/1990					30/03/1990	23/04/1990		
7	06/09/1990	18/10/1990					06/09/1990	18/10/1990		
F: Fin	31/12/2000		11/2000		12/2000		09/01/2002		06/01/1986	

de la station de Sauze St-Martin (cf. figure 4.24) devraient en principe s'étendre de 1955 à aujourd'hui ce qui n'est pas le cas dans la banque HYDRO. Comme énoncé ci-avant, nous avons pu localiser à la DIREN-RA les enregistrements du limnigraphe de Sauze Saint-Martin sur la période 1968-1991 (DIREN Rhône-Alpes, 1991). Il manque cependant ceux couvrant la période 1955-1968.

Remarque 4.9 Compte tenu des nombreuses lacunes que présentent les données, nous avons choisi de retenir comme début de la période systématique non pas 1955 (date de la mise en place des premiers limnigraphes) mais 1980 (date de disponibilité effective d'enregistrements en continus).

4.5 Conclusion

Nous avons abordé dans ce chapitre la collecte des données historiques sur les inondations à travers l'étude de cas de la rivière Ardèche (France). Une méthodologie originale, dénommée HISTORISQUE, a été établie. Elle se déroule dans un cadre interdisciplinaire avec une collaboration entre historiens et hydrologues. Après avoir présenté en première partie les caractéristiques du bassin versant servant de support à l'étude, nous avons abordé en deuxième partie les aspects généraux et le déroulement de la démarche.

Les trois étapes principales de la méthodologie HISTORISQUE ont été détaillées : (1) réalisation d'un *Etat Général des Sources (EGS)* disponibles dans les divers fonds d'archives concernant les données hydrologiques historiques, (2) *collation des données*, à partir de l'EGS, et enregistrement des informations ayant un intérêt du point de vue de l'étude des crues historiques dans une *base de données des références*, (3) élaboration des différents *historiques* (producteurs de données, événements du bassin) en interrogeant par mots clé cette base.

Ce travail de recomposition forme l'appareillage critique de l'étude. Il permet d'obtenir une vision exhaustive des sources d'informations disponibles et au-delà des événements ayant eu lieu sur le bassin versant. Les outils mis en oeuvre garantissent une certaine « traçabilité » en permettant de revenir à la source de chaque information (cf. bibliographie ci-après : localisation du document original et numéro d'enregistrement dans la base de données des références précisés entre parenthèse).

Enfin, nous avons présenté dans la dernière partie les principaux résultats obtenus à l'issue de l'enquête historique. En premier lieu des historiques des services producteurs de données techniques sur les cours d'eau : données topographiques, hydrométriques et météorologiques. En second lieu les valeurs remarquables de pluies et de cotes de crues de l'Ardèche.

4.6 Bibliographie

- 4e CE (1957). Rivière Ardèche - Station Sauze - Année 1957 - Débits journaliers en m³/s, *Rapport technique*, n° 136, (IGA, Fonds Pardé, 1116, B2-22 [3]).
- Belin, E. F. (1857). Etudes relatives aux inondations, *Courrier de l'Inspecteur Général des Ponts et Chaussées adressé à l'Ing. en Chef de Mardigny*, Service Général des Inondations, Bassin particulier de l'Ardèche, Paris, 12 janvier (ADA, 1262W153 [762]).
- Belin, E. F. (1866). Rapport sur les résultats des études de 1862, sur les inondations dans le bassin du Rhône, *Rapport technique*, Paris (ENPC, Fonds Ancien, 801 v. 14973 [740]).
- Benito, G., Bardossy, A., Bobée, B., Coeur, D., Enzel, Y., Francés, F., Lang, M. et Llasat, M. C. (2000). Systematic, Palaeoflood and Historical data for the improvement of flood risk estimation: SPHERE project, *EGS, XXIV General Assembly, Posters session*, session NH4 03: The use of historical data in natural hazard assessment: Floods, Nice, France, 25-29 avril.
- Bonnet, M. (1901). Jaugeages de la rivière d'Ardèche à Vallon, *Rapport du conducteur des Ponts et Chaussées*, Ponts et Chaussées, Département de l'Ardèche, Aubenas, 9 février (dans les notes manuscrites de M. Pardé, IGA, Fonds Pardé, 1116, B2-28 [170]).
- Bourdaloué, P. A. (1858). *Nivellement général de la France. Le Rhône, de la mer à Genève*, Bourges (ENPC, Fonds Ancien, 4322 [739]).
- Bourdaloué, P. A. (1864). *Nivellement général de la France. Résultats des opérations exécutées pour l'établissement du réseau des lignes de base*, Ministère de l'Agriculture du commerce et des travaux publics, Bourges (BNF, V- 47825 [1147]).
- Bourdaloué, P. A. et Bonnet, M. (1858). *Nivellement général de la ville de Lyon, exécuté en 1857*, Bourges (BNF, V- 32875 [1110]).
- Bridelle, A. (1961). Courrier au sujet de l'installation du limnigraphe au Pont de Salavas, *Courrier de l'Ing. TPE adressé à l'Ing. TPE de la 4e CE Barrière, F.*, Ponts et Chaussées, Subdivision de Vallon Pont d'Arc, 1 septembre, (DIREN Rhône-Alpes, dossier: N° 31, Vallon Pont d'Arc, sous-dossier: Pont de Salavas, Correspondance [304]).
- Brochot, S., Coeur, D., Lang, M., Naulet, R. et Richard, D. (2000). Historisque-Isère et torrents affluents: utilisation de l'information historique pour une meilleure définition du risque d'inondation, *Rapport final*, Cemagref, Thème mobilisateur risque et aménagement, nov.
- Brosse (de la), R. (1906). Le Service d'Etude des Forces Hydrauliques de la région des Alpes, *La Houille Blanche (SHF)*: 145-151.
- Brosse (de la), R. (1911). Le Service d'Etude des Grandes Forces Hydrauliques, *La Houille Blanche (SHF)* (3): 72-73.
- CGE (1921a). Jaugeage de l'Ardèche à St-Martin, *Jaugeage du 04/04/1921 effectué par l'Ing. Maillard*, *Rapport technique*, n° 15.245, Services Techniques Hydrauliques, Paris, mai (IGA, Fonds Pardé, 1116, B2-21 [49]).
- CGE (1921b). Jaugeage de l'Ardèche à St-Martin, *Jaugeage du 05/10/1921*, *Rapport technique*, n° 15.364, Services Techniques Hydrauliques, Paris, mars (IGA, Fonds Pardé, 1116, B2-21 [52]).

- CGE (1921c). Jaugeage de l'Ardèche à Vallon, *Jaugeage du 03/04/1921 effectué par l'Ing. Maillard, Rapport technique*, n° 15.244, Services Techniques Hydrauliques, Paris (IGA, Fonds Pardé, 1116, B2-21 [50]).
- CGE (1922a). Chute de l'Ardèche - Lectures limnimétriques et débits de mars 1921 à février 1922, *Rapport technique*, n° 15.361, Services Techniques Hydrauliques, Paris, mars (IGA, Fonds Pardé, 1116, B2-22 [55]).
- CGE (1922b). Débits de l'Ardèche à Vallon et à St-Martin, relation entre les débits et les hauteurs limnimétriques, *Rapport technique*, n° 15.367, Services Techniques Hydrauliques, Paris, mars (IGA, Fonds Pardé, 1116, B2-22 [56]).
- CGE (1922c). Jaugeage de l'Ardèche à St-Martin, *Jaugeage du 10/09/1921 effectué par l'Ing. Maillard, Rapport technique*, n° 15.365, Services Techniques Hydrauliques, Paris, mars (IGA, Fonds Pardé, 1116, B2-21 [51]).
- CGE (1922d). Jaugeage de l'Ardèche à St-Martin, *Jaugeage du 04/11/1921 effectué par l'Ing. Maillard, Rapport technique*, n° 15.363, Services Techniques Hydrauliques, Paris, mars (IGA, Fonds Pardé, 1116, B2-21 [54]).
- CGE (1922e). Jaugeage de l'Ardèche à St-Martin, *Jaugeage du 15/02/1922 effectué par l'Ing. Maillard, Rapport technique*, n° 15.366, Services Techniques Hydrauliques, Paris, mars (IGA, Fonds Pardé, 1116, B2-21 [53]).
- CGE (1925a). Ardèche - Courbe des débits à St-Martin (Sauze) du 15 mars 1921 au 31 décembre 1925, *Rapport technique*, n° 15.534, Services Techniques Hydrauliques, Paris, février (IGA, Fonds Pardé, 1116, B2-21 [59]).
- CGE (1925b). Rivière de l'Ardèche - Débits 1924 - 1925, *Rapport technique*, Services des Distributions d'Énergie, (IGA, Fonds Pardé, 1116, B2-22 [34]).
- CGE (1926a). Chute de l'Ardèche - 3 jaugeages par flotteurs, *Jaugeages du 30/11/1926 effectué par l'Ing. Teyssier, Rapport technique*, n° 50.049, Services Techniques Hydrauliques, St Martin d'Ardèche, décembre (IGA, Fonds Pardé, 1116, B2-22 [60]).
- CGE (1926b). Débits de l'Ardèche à Sauze (près de St-Martin d'Ardèche) - année 1926, *Rapport technique*, Services Techniques, (IGA, Fonds Pardé, 1116, B2-22 [46]).
- CGE (1927). Débits de l'Ardèche à Sauze (près de St-Martin d'Ardèche) - année 1927, *Rapport technique*, Services Techniques, (IGA, Fonds Pardé, 1116, B2-22 [47]).
- CGE (1928). Débits de l'Ardèche à Sauze (près de St-Martin d'Ardèche) - année 1928, *Rapport technique*, Services Techniques, (IGA, Fonds Pardé, 1116, B2-22 [48]).
- CGE (1931a). Rivière de l'Ardèche - Débits mesurés à Sauze (St-Martin) en m³/s - année 1922, *Rapport technique*, Services Techniques, janvier (IGA, Fonds Pardé, 1116, B2-22 [44]).
- CGE (1931b). Rivière de l'Ardèche - Débits mesurés à Sauze (St-Martin) en m³/s - année 1923, *Rapport technique*, Services Techniques, janvier (IGA, Fonds Pardé, 1116, B2-22 [45]).
- Champion, M. (1858). *Les inondations en France depuis le VI^{ème} siècle jusqu'à nos jours*, Vol. I, édition originale Dunod, ré-édition du Cemagref, 2000, Paris.
- Champion, M. (1859). *Les inondations en France depuis le VI^{ème} siècle jusqu'à nos jours*, Vol. II, édition originale Dunod, ré-édition du Cemagref, 2000, Paris.
- Champion, M. (1861). *Les inondations en France depuis le VI^{ème} siècle jusqu'à nos jours*, Vol. III, édition originale Dunod, ré-édition du Cemagref, 2000, Paris.

- Champion, M. (1862). *Les inondations en France depuis le VIème siècle jusqu'à nos jours*, Vol. IV, édition originale Dunod, ré-édition du Cemagref, 2000, Paris.
- Champion, M. (1863). *Les inondations en France depuis le VIème siècle jusqu'à nos jours*, Vol. V, édition originale Dunod, ré-édition du Cemagref, 2000, Paris.
- Champion, M. (1864). *Les inondations en France depuis le VIème siècle jusqu'à nos jours*, Vol. VI, édition originale Dunod, ré-édition du Cemagref, 2000, Paris.
- CNR (1961). Photos du limnigraphe du Pont de Salavas à Vallon Pont d'Arc, *Photos*, (DIREN Rhône-Alpes, dossier: N° 31, Vallon Pont d'Arc, sous-dossier: Pont de Salavas, Correspondance [305]).
- CNR (1970). Crue de l'Ardèche du 7 au 12 octobre 1970, *Rapport de crue*, n° 58.172, , novembre (IGA, Fonds Pardé, 1116, B2-22 [61]).
- Coeur, D. et Lang, M. (2000). L'information historique des inondations: l'histoire ne donne-t-elle que des leçons, *La Houille Blanche* (2): 79-84.
- Coeur, D., Lang, M., Naulet, R., Brunet, R. et Strazzeri, D. (1998). Histoire et connaissance des phénomènes naturels extrêmes, *Ingenierie - EAT* (numéro spécial Risques Naturels): 15-26.
- Coeur, D., Gigon, C., Lang, M., Naulet, R. et Recking, A. (2001). Historique-Ardèche - Utilisation de l'information historique pour une meilleure définition du risque d'inondation sur la rivière de l'Ardèche, *Rapport Final*, Contrat de Plan Etat-Région Rhône-Alpes, Cemagref Lyon, UPMF Grenoble, DDE Ardèche, juillet, 94 p.
- Collin, A. et Bourdalouë, P. A. (1855). *Nivellement général de la Loire entre Saint-Nazaire et Briare exécuté en 1855*, Vol. 1, Ponts et chaussées, impr. de Jollet-Souchois, Bourges (BNF, V- 32873 [1100]).
- Combiér (1849). Rivière d'Ardèche - Profil en long d'une partie de la rivière d'Ardèche, depuis le moulin de Salavas jusqu'au Pont d'Arc, *Plan dressé par l'Ing. Ordinaire*, Ponts et Chaussées, Département de l'Ardèche, Aubenas (ADA, 1262W154 [812]).
- Combiér (1857a). Carte générale du bassin de l'Ardèche, d'après Cassini, *Plan de l'Ing. Ordinaire*, Ponts et Chaussées, Département de l'Ardèche, Arrondissement d'Aubenas, Aubenas, 16 février (ADA, 1262W154 [837]).
- Combiér (1857b). Etudes relatives aux inondations, *Courrier de l'Ing. Ordinaire adressé à l'Ing. en Chef de Mardigny*, Ponts et Chaussées, Arrondissement d'Aubenas, Aubenas (ADA, 1262W154 [791]).
- Combiér (1857c). Etudes relatives aux inondations - 1er rapport fourni le 15 février 1857 en réponse à la circulaire du 26 juillet 1856, *Rapport de l'Ing. Ordinaire*, Ponts et Chaussées, Arrondissement d'Aubenas, Aubenas, 15 février (ADA, 1262W154 [789]).
- Combiér (1857d). Etudes relatives aux inondations - Plan du cours de l'Ardèche entre le pont suspendu de Vallon et le pont d'Arc, *Plan dressé par l'Ing. Ordinaire*, Ponts et Chaussées, Département de l'Ardèche, Arrondissement d'Aubenas, Aubenas, 16 février (ADA, 1262W154 [834]).
- Combiér (1857e). Etudes relatives aux inondations - Profils en long et en travers du lit de l'Ardèche entre le pont suspendu de Vallon et le Pont d'Arc, *Plan dressé par l'Ing. Ordinaire*, Ponts et Chaussées, Département de l'Ardèche, Arrondissement d'Aubenas, Aubenas, 16 février (ADA, 1262W154 [835]).

- Combiér (1857f). Etudes relatives aux inondations - Rivière d'Ardèche - Profil en long de l'Ardèche pris à la ligne d'étiage depuis son origine jusqu'au pont d'Aubenas - Profil en long de l'Ardèche pris à la ligne d'étiage entre le pont d'Aubenas et le Rhône - Profil en long des crues du 28 septembre 1846 et du 10 octobre 1827, *Plan dressé par l'Ing. Ordinaire*, Ponts et Chaussées, Département de l'Ardèche, Aubenas, 16 février (ADA, 1262W154 [811]).
- Combiér (1857g). Profil en travers du Pont d'Arc (tête amont), *Plan dressé par l'Ing. Ordinaire*, Ponts et Chaussées, Département de l'Ardèche, Arrondissement d'Aubenas, Aubenas (ADA, 1262W154 [798]).
- Comité de bassin RMC (1995). Atlas du bassin RMC, Grand affluents R.D. du Rhône, *Etat des lieux réalisé à l'occasion de l'élaboration du SDAGE*, DIREN Rhône-Alpes, Délégation de bassin RMC, Agence de l'Eau RMC, oct.
- Cultil (1872). Observations pluviométriques - Création de nouvelles stations, Demande de M. l'Inspecteur Général Belgrand, *Courrier du conducteur ff d'Ing. Ordinaire adressé à l'Ing. en Chef*, Ponts et Chaussées, Arrondissement d'Aubenas, Aubenas, 28 décembre (ADA, 1262W153 [775]).
- Deblaère, J. C. et Fabry, M. H. (1998). Phénomènes remarquables : inventaire des situations à précipitations remarquables en Auvergne, Bourgogne et Rhône-Alpes, Etude n° 5, Service Central d'Exploitation de la Météorologie, Météo-France.
- Delemer (1904). Etude sur les Crues de l'Ardèche - Mémoire, *Annales des Ponts et Chaussées*, T. XIII (18) : 130-216, pl. 6 et 7.
- DIREN Rhône-Alpes (1991). Limnigramme de la station de Sauze St-Martin, *Rapport technique*, (DIREN Rhône-Alpes, dossier : Limnigramme de la station de Sauze St-Martin [342]).
- Duband, D. (1994). Pour une meilleure prise en compte de l'information hydrométéorologique historique, sur les crues importantes des bassins supérieurs de certaines rivières à risque, *Congrès de la SHF, 23ème journée de l'hydraulique*, Nîmes, France, sept., pp. 137-144.
- Duquenne, H. (1998). QGF98, a new solution for the quasigeoid in France of *Symposium on the geoid in Europe*, Budapest.
- Duquenne, F. (1999). GPS : Nouveau système de référence géodésique français, nouveaux processus de calculs, *Cours*, Ecole Supérieure des Géomètres Topographes, Le Mans.
- EDF-DTG (1962). Contrôle des débits des cours d'eau - Techniques et matériel en 1962 - Texte, *Conférence internationale du 7 au 8 septembre*, Budapest (IGA, Fonds Pardé, 1039 [103]).
- Fargue, R. (1896). Note sommaire résumant la méthode suivie pour les jaugeages exécutés sur la Garonne, à Langon, de 1857 à 1862, Ponts et Chaussées, Commission des Annonces des Crues, Paris, 12 novembre (IGA, Fonds Pardé, 1039 [108]).
- Fiero, A. (1991). *Histoire de la météorologie*, Denoël.
- Flamant, A. (1900). *Hydraulique, Encyclopédie des Travaux Publics*, Béranger, C., Paris.
- Guillot, P. (1959). Aspect hydrométéorologique des crues cévenoles des 30 septembre et 4 octobre 1958, *La Houille Blanche (SHF)* (spécial A-1959) : 682-691.
- Heiskanen, W. A. et Moritz, H. (1967). *Physical geodesy*, Freeman, W. H., San Francisco.
- Joly (1860). Etudes relatives aux inondations - Observations pluviométriques et de hauteurs d'eau, *Courrier de l'Ing. en Chef adressé à l'Ing. Ordinaire Batailler*, Ponts

- et Chaussées, Département de l'Ardèche, Privas, 1 mai (ADA, 1262W153 [769]).
- Julien, L. (1861). Observations hydrométriques au pont suspendu de Vallon - Feuilles mensuelles - juillet 1861, *Relevé hydrométrique*, Ponts et Chaussées, Département de l'Ardèche, Arrondissement d'Aubenas, (ADA, 1262W152 [746]).
- Julien, L. (1875-1876). Observations hydrométriques au pont suspendu de Vallon - Feuilles mensuelles - aout 1875 à janvier 1876, mars 1876 à décembre 1876, *Relevé hydrométrique*, Ponts et Chaussées, Route Départementale n° 1, (ADA, 1262W152 [745]).
- Lallemand, C. (1911). Nivellement général de la France. Notice sur le nivellement des vallées des Alpes et sur le relevé et la publication des profils en long de cours d'eau, *Extrait du T. IV des Comptes rendus des travaux du Service des Grandes Forces Hydrauliques*, Paris (BNF, 4- L19BIS- 25 [1134]).
- Lancrenon (1875). Mise en état d'observation des échelles, *Courrier de l'Ing. Ordinaire adressé à MM les Subdivisionnaires*, Ponts et Chaussées, Département de l'Ardèche, Arrondissement d'Aubenas, Aubenas, 27 avril (ADA, 1262W153 [777]).
- Landon, N. (1999). *L'évolution contemporaine du profil en long des affluents du Rhône moyen. Constat régional et analyse d'un hydrosystème complexe, la Drôme*, Thèse de doctorat, Université Paris IX, Sorbonne, Paris, janv.
- Lang, M., Coeur, D., Lallement, C. et Naulet, R. (1998a). Valorisation de l'information historique pour la prédétermination du risque d'inondation : application au bassin du Guiers, *Ingenierie - EAT* (16) : 3-13.
- Lang, M., Coeur, D., Lallement, C., Naulet, R. et Boudou, G. (1998b). Historisque-Guiers - Utilisation de l'information historique pour une meilleure définition du risque inondation, *Rapport technique*, Pôle Grenoblois d'Etude et de Recherche pour la Prévention des Risques Naturels, jun.
- Lang, M., Coeur, D., Lallement, C. et Naulet, R. (1999). Use of historical information for flood frequency studies : the example of river Guiers, in Llasat, C., Versace, P. et Ferrari, E. (ed.), *Heavy Rains and Rare Floods - Proceedings of the Joint Session of Topic IV (Rare Floods) and Topic VI (Heavy Rains)*, Vol. 2049, FRIEND-AMHY, UNESCO IHP-V 1.1 Project, National Research Council Group for Prevention from Hydrogeological Disasters, Istanbul, Turquie, 16 oct. 1998.
- Lemoine, G. (1896). Essai sur le problème de l'annonce des crues pour les rivières des départements de l'Ardèche, du Gard et de l'Hérault, *Annales des Ponts et Chaussées*, 2eme sem. (61) : 523-567.
- Levasseur, L. (2001). Demande d'information sur l'Ardèche, *Courrier adressé à M. Lang (Cemagref)*, CNR, Lyon, 10 mai (Cemagref [840]).
- Marchegay (1861). Rapport sur les inondations qui ont eu lieu en 1857 dans les vallées des principaux torrents du département de l'Ardèche, et en particulier sur les inondations du 10 septembre 1857, *Annales des Ponts et Chaussées*, T. I (1ère année) : 1-16.
- Mardigny (de), P. (1857a). Etudes relatives aux inondations - Echelles métriques, *Courrier de l'Ing. en Chef adressé à l'Ing. Ordinaire Combiér*, Ponts et Chaussées, Département de l'Ardèche, Privas, 3 février (ADA, 1262W153 [763]), 3 février.
- Mardigny (de), P. (1857b). Etudes relatives aux inondations - Rivière d'Ardèche, *Rapport de l'ingénieur en chef*, Ponts et Chaussées, Département de l'Ardèche, Privas, 1er

- avril (ADA, 1270W1 [792]).
- Mardigny (de), P. (1860a). *Mémoire sur les inondations des rivières de l'Ardèche*, Dalmont et Dunod, Paris (ENPC, Fonds Ancien, 273-4976 v. 18524 [738]).
- Mardigny (de), P. (1860b). Mémoire sur les inondations des rivières de l'Ardèche, *Annales des Ponts et Chaussées*, T. XIX (258) : 249-296, pl. 174 et 175.
- Mas (de), F. B. (1899). *Cours de navigation intérieure de l'École Nationale des Ponts et Chaussées - Rivières à courant libre*, *Encyclopédie des Travaux Publics*, Baudry, Paris.
- Météo France (1995a). *Inventaire des épisodes de fortes pluies en Ardèche - Tome I : 1807 - 1927*, Aubenas.
- Météo France (1995b). *Inventaire des épisodes de fortes pluies en Ardèche - Tome II : 1928 - 1994*, Aubenas.
- Ministère de l'Agriculture (1905a). Organisation et comptes rendus des travaux, *Rapport technique*, Direction de l'Hydraulique et des Améliorations Agricoles, Service d'Etudes des Grandes Forces Hydrauliques - Région de Alpes, (IGA, Fonds Pardé, 2523 [1230]).
- Ministère de l'Agriculture (1905b). Résultats des études et travaux, *Rapport technique*, Direction de l'Hydraulique et des Améliorations Agricoles, Service d'Etudes des Grandes Forces Hydrauliques - Région de Alpes, (IGA, Fonds Pardé, 2524 [1232]).
- Ministère de l'Agriculture (1908). Comptes-rendu et résultats des études et travaux au 31 décembre, *Rapport technique*, Direction de l'Hydraulique et des Améliorations Agricoles, Service d'Etudes des Grandes Forces Hydrauliques - Région de Alpes, (IGA, Fonds Pardé, 2526 [1234]).
- Ministère de l'Agriculture (1911a). Cartes, *Rapport technique*, Direction de l'Hydraulique et des Améliorations Agricoles, Service d'Etudes des Grandes Forces Hydrauliques - Région de Alpes, (IGA, Fonds Pardé, 2528 [1236]).
- Ministère de l'Agriculture (1911b). Comptes-rendu et résultats des études et travaux au 31 décembre, *Rapport technique*, Direction de l'Hydraulique et des Améliorations Agricoles, Service d'Etudes des Grandes Forces Hydrauliques - Région de Alpes, (IGA, Fonds Pardé, 2527 [1235]).
- Ministère de l'Agriculture (1911c). Nivellements, *Rapport technique*, Direction de l'Hydraulique et des Améliorations Agricoles, Service d'Etudes des Grandes Forces Hydrauliques - Région de Alpes, (IGA, Fonds Pardé, 2529 [1237]).
- Ministère de l'Agriculture (1912a). Cartes, *Rapport technique*, Direction de l'Hydraulique et des Améliorations Agricoles, Service d'Etudes des Grandes Forces Hydrauliques - Région de Alpes, (IGA, Fonds Pardé, 2530 [1238]).
- Ministère de l'Agriculture (1912b). Comptes-rendu et résultats des études et travaux au 31 décembre, *Rapport technique*, Direction de l'Hydraulique et des Améliorations Agricoles, Service d'Etudes des Grandes Forces Hydrauliques - Région de Alpes, (IGA, Fonds Pardé, 2531 [1239]).
- Ministère de l'Agriculture (1913). Nivellements, *Rapport technique*, Direction de l'Hydraulique et des Améliorations Agricoles, Service d'Etudes des Grandes Forces Hydrauliques - Région de Alpes, (IGA, Fonds Pardé, 2532 [1240]).
- Ministère de l'Agriculture (1916a). Cartes et nivellements, *Rapport technique*, Direction de l'Hydraulique et des Améliorations Agricoles, Service d'Etudes des Grandes Forces

- Hydrauliques - Région de Alpes, (IGA, Fonds Pardé, 2534 [1242]).
- Ministère de l'Agriculture (1916b). Comptes-rendu et résultats des études et travaux au 31 décembre, *Rapport technique*, Direction de l'Hydraulique et des Améliorations Agricoles, Service d'Etudes des Grandes Forces Hydrauliques - Région de Alpes, (IGA, Fonds Pardé, 2533 [1241]).
- Ministère de l'Agriculture (1917a). Comptes-rendu et résultats des études et travaux au 31 décembre, *Rapport technique*, Direction de l'Hydraulique et des Améliorations Agricoles, Service d'Etudes des Grandes Forces Hydrauliques - Région de Alpes, (IGA, Fonds Pardé, 2535 [1243]).
- Ministère de l'Agriculture (1917b). Nivellements, *Rapport technique*, Direction de l'Hydraulique et des Améliorations Agricoles, Service d'Etudes des Grandes Forces Hydrauliques - Région de Alpes, (IGA, Fonds Pardé, 2536 [1244]).
- Ministère de l'Agriculture (1920a). Cartes, *Rapport technique*, Direction de l'Hydraulique et des Améliorations Agricoles, Service d'Etudes des Grandes Forces Hydrauliques - Région de Alpes, (IGA, Fonds Pardé, 2539 [1247]).
- Ministère de l'Agriculture (1920b). Comptes-rendu et résultats des études et travaux au 31 décembre, *Rapport technique*, Direction de l'Hydraulique et des Améliorations Agricoles, Service d'Etudes des Grandes Forces Hydrauliques - Région de Alpes, (IGA, Fonds Pardé, 2537 [1245]).
- Ministère de l'Agriculture (1920c). Nivellements, *Rapport technique*, Direction de l'Hydraulique et des Améliorations Agricoles, Service d'Etudes des Grandes Forces Hydrauliques - Région de Alpes, (IGA, Fonds Pardé, 2538 [1246]).
- Ministère de l'Agriculture (1923). Nivellements, *Rapport technique*, Direction de l'Hydraulique et des Améliorations Agricoles, Service d'Etudes des Grandes Forces Hydrauliques - Région de Alpes, (IGA, Fonds Pardé, 2540 [1248]).
- Ministère de l'Agriculture, du Commerce et des Travaux Public. (1853). Règlement portant création et organisation d'un service hydrométrique pour le bassin de la Loire, *Arrêté du Ministre P. Magne*, Paris, 30 juillet (ADA, 1262W153 [761]).
- Ministère de l'Agriculture, du Commerce et des Travaux Publics. (1856). Circulaire du 26 juillet 1856 sur le programme des études relatives aux inondations, *Circulaire du Ministre E. Rouher adressée aux préfets et aux ingénieurs*, Paris, 26 juillet (dans Champion, 1864, p. CLXXXVII, n°208 [826]).
- Ministère de l'Industrie (1951-1968). Stations de jaugeages exploitées par les circonscriptions électriques - Relevés journaliers ou mensuels, *IV : Rhône-Méditerranée-Corse*, Direction du Gaz et de l'Electricité, Service Technique de l'Energie Electrique et des Grands Barrages, (DDE07, Archives au Parc, dossier : Stations de jaugeage, 1964-66-67-68 [571, 572, 573, 574] et IGA, Fonds Pardé, PS3 [133]).
- Ministère de la Protection de la Nature et de l'Environnement, Ministère de l'Equipement et du Logement, Ministère du Développement Industriel et Scientifique, Ministère de l'Agriculture, CNR et Agence de Bassin Rhône-Méditerranée-Corse (1969-76). Annuaire National des débits de cours d'eau, *IV - Bassin Rhône Méditerranée Corse*, Paris (IGA, Fonds Pardé, PS1 [134 à 141]).
- Ministère des Travaux Publics (1847). Programme d'étude sur le cours de la Loire, *Règlement*, Administration des Ponts et Chaussées, (dans Champion, 1861, pièce justificative n° 196, p. CXXIX [816]).

- Ministère des Travaux Publics (1889-1891). Nivellement général de la France - Répertoire graphique définissant les emplacements et altitudes des repères du réseau fondamental, Vol. I, Paris (ENPC, Fonds Ancien, 18894 [742]).
- Ministère des Travaux Publics (1949). Circulaire du 5 mars 1949 - Annonce des crues, *Règlement*, (DDE07, Archives au Parc ; dossier : Service d'Annonce des crues (anciens documents), 1960-1970 [602]).
- Ministère des Travaux Publics et des Transports (1960). Circulaire du 6 décembre 1960 - Annonce des crues, (DDE07, Archives au Parc, dossier : Service d'Annonce des crues (anciens documents), 1960-1970 [603]).
- Ministère des Travaux Publics, Direction Générale des Ponts et Chaussées et des Chemins de Fer, Division de la Navigation, 2ème Bureau, Annonce des Crues (1875). Prière de fournir des renseignements quotidiens par voie télégraphique, *Courrier du Ministre aux Ing. en Chef*, Versailles, 28 décembre (ADA, 1262W153 [776]).
- Ministère des Travaux Publics et des Transports (1962). Directives ministérielles du 21/02/1961 et 09/05/1962 - Révision du règlement d'annonce des crues, *Règlement*, (DDE07, Archives au Parc ; dossier : Service d'Annonce des crues (anciens documents), 1960-1970 [604]).
- Morel (1921a). Bassin du Rhône - L'Ardèche - Profil en long de la ligne d'eau, Planche 1 (Sortie des gorges-Rhône), *Levé effectué du 20/08/1921 au 24/08/1921 et le 21/04/1921 par l'Adjoint technique des Ponts et Chaussées pour le compte du Service des Forces Hydrauliques*, Service du Nivellement Général de la France (IGA, Fonds Pardé, 1116, B2-21 [111]).
- Morel (1921b). Bassin du Rhône - L'Ardèche - Profil en long de la ligne d'eau, Planche 2 (Ruoms-Vallon), *Levé effectué du 07/04/1921 au 20/04/1921 par l'Adjoint technique des Ponts et Chaussées pour le compte du Service des Forces Hydrauliques*, Service du Nivellement Général de la France (IGA, Fonds Pardé, 1116, B2-21 [112]).
- Morlière (1857a). Etudes relatives aux inondations - Rivière d'Ardèche - Profils des crues du 10 septembre et du 5 octobre 1857, *Plan dressé par l'élève Ing. ff d'Ing. d'Arrondissement*, Ponts et Chaussées, Département de l'Ardèche, Aubenas (ADA, 1262W154 [796]).
- Morlière (1857b). Etudes relatives aux inondations - Rivière d'Ardèche - Profils en long et plan - Profil comparatif des crues de 1827, 1846 et 1857, *Plan dressé par l'élève Ing. ff d'Ing. d'Arrondissement*, Ponts et Chaussées, Département de l'Ardèche, Aubenas (ADA, 1262W154 [795]).
- Morlière (1857c). Rivière d'Ardèche - Rapport sur la crue du 10 septembre, *Rapport de l'élève Ing. ff d'Ing. d'Arrondissement*, Ponts et Chaussées, Arrondissement d'Aubenas, Aubenas, 23 octobre (ADA, 1262W154 [793]).
- Moschetti, A. (1971). Règlement particulier des stations - Complément d'information, *Note du Directeur départemental à MM les observateurs*, DDE07, SAC, 8 avril (DDE07, Archives au Parc, dossier : Annonce des Crues (anciens documents), 1960-70 [423]).
- Napoléon, L. (1856), *Lettre de l'Empereur au Ministre de l'Agriculture, du Commerce et des Travaux Publics*, Plombières, 19 juillet (dans Champion, 1864, p. CLXXXI, n°207 [825]).
- Naulet, R., Lang, M., Coeur, D. et Gigon, C. (2001). Collaboration between historians and hydrologists on the Ardeche river (France). First step : Inventory of Historical Flood

- Information, in Glade, T., Albini, P. et Frances, F. (ed.), *The Use of Historical Data in Natural Hazard Assessments*, Vol. 17 of *Advances in Natural and Technological Hazards Research*, chapter B: Flooding, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, oct, 113-129.
- Pardé, M. (1925a). Ensemble de notes, *Manuscrit*, (IGA, Fonds Pardé, 1116, B2-28 [170]).
- Pardé, M. (1925b). *La genèse des crues, Etude Générale*, Thèse principale de doctorat, Institut des Etudes Rhodaniennes de l'Université de Lyon et P. Mason, Grenoble (UJF, Bibliothèque de l'Institut Dolomieu - Géologie, cote: TH/PAR/1925/T.2 [167,168,190,1194]).
- Pardé, M. (1925c). *Le régime du Rhône, Etude hydrologique*, Thèse principale de doctorat, Institut des Etudes Rhodaniennes de l'Université de Lyon et P. Mason, Grenoble (UJF, Bibliothèque de l'Institut Dolomieu - Géologie, cote: TH/PAR/1925/T.1 [167,168,190,1194]).
- Pardé, M. (1936). La grande crue du Rhône en novembre 1935, *Revue de Géographie Alpine*, T. XXIV (2): 395-420.
- Perret (1857). Etudes relatives aux inondations - Bassin du Rhône - Courbes des débits de l'Ardèche à St Martin d'Ardèche - Crues du 28 au 29 septembre 1846, du 26 octobre au 3 novembre 1853 et du 10 mai au 10 juillet 1856, *Plan dressé par l'Ing. Ordinaire*, Ponts et Chaussées, Département de l'Ardèche, Arrondissement de Privas, Privas, 5 mars (ADA, 1262W154 [810]).
- Picard, J. (1684). *Traité de nivellement*, Michallet, E., Paris (BNF, V- 18791 [1069]).
- Picon, A. et Ribeill, G. (1993). Pour un guide de l'histoire de l'administration de l'Equipement, *Rapport de recherche*, DRAST - ENPC/LATTS, Paris.
- Ponts et Chaussées (1901). Bassin de l'Ardèche - Service de l'annonce des crues - Année 1901 - Rapport d'activité, *Rapport technique*, Département de l'Ardèche, Arrondissement d'Aubenas, Service de l'Annonce des Crues, Aubenas (DDE07, Archives au SAC, dossier: Hydraulique, Observations 1892 à 1912, 1901 à 1914 [537]).
- Ponts et Chaussées (1902). Bassin de l'Ardèche - Service de l'annonce des crues - Année 1902 - Rapport d'activité, *Rapport technique*, Département de l'Ardèche, Arrondissement d'Aubenas, Service de l'Annonce des Crues, Aubenas (DDE07, Archives au SAC, dossier: Hydraulique, Observations 1892 à 1912, 1901 à 1914 [538]).
- Ponts et Chaussées (1903). Bassin de l'Ardèche - Service de l'annonce des crues - Année 1903 - Rapport d'activité, *Rapport technique*, Département de l'Ardèche, Arrondissement d'Aubenas, Service de l'Annonce des Crues, Aubenas (DDE07, Archives au SAC, dossier: Hydraulique, Observations 1892 à 1912, 1901 à 1914 [539]).
- Ponts et Chaussées (1904). Bassin de l'Ardèche - Service de l'annonce des crues - Année 1904 - Rapport d'activité, *Rapport technique*, Département de l'Ardèche, Arrondissement d'Aubenas, Service de l'Annonce des Crues, Aubenas (DDE07, Archives au SAC, dossier: Hydraulique, Observations 1892 à 1912, 1901 à 1914 [540]).
- Ponts et Chaussées (1905). Bassin de l'Ardèche - Service de l'annonce des crues - Année 1905 - Rapport d'activité, *Rapport technique*, Département de l'Ardèche, Arrondissement d'Aubenas, Service de l'Annonce des Crues, Aubenas (DDE07, Archives au SAC, dossier: Hydraulique, Observations 1892 à 1912, 1901 à 1914 [541]).
- Ponts et Chaussées (1906). Bassin de l'Ardèche - Service de l'annonce des crues - Année 1906 - Rapport d'activité, *Rapport technique*, Département de l'Ardèche, Arrondisse-

- ment d'Aubenas, Service de l'Annonce des Crues, Aubenas (DDE07, Archives au SAC, dossier : Hydraulique, Observations 1892 à 1912, 1901 à 1914 [542]).
- Ponts et Chaussées (1907). Bassin de l'Ardèche - Service de l'annonce des crues - Année 1907 - Rapport d'activité, *Rapport technique*, Département de l'Ardèche, Arrondissement d'Aubenas, Service de l'Annonce des Crues, Aubenas (DDE07, Archives au SAC, dossier : Hydraulique, Observations 1892 à 1912, 1901 à 1914 [543]).
- Ponts et Chaussées (1908). Bassin de l'Ardèche - Service de l'annonce des crues - Année 1908 - Rapport d'activité, *Rapport technique*, Département de l'Ardèche, Arrondissement d'Aubenas, Service de l'Annonce des Crues, Aubenas (DDE07, Archives au SAC, dossier : Hydraulique, Observations 1892 à 1912, 1901 à 1914 [544]).
- Ponts et Chaussées (1909). Bassin de l'Ardèche - Service de l'annonce des crues - Année 1909 - Rapport d'activité, *Rapport technique*, Département de l'Ardèche, Arrondissement d'Aubenas, Service de l'Annonce des Crues, Aubenas (DDE07, Archives au SAC, dossier : Hydraulique, Observations 1892 à 1912, 1901 à 1914 [545]).
- Ponts et Chaussées (1912a). Hauteurs maximales et minimales aux stations hydrométriques de 1892 à 1912, *Rapport technique*, Département de l'Ardèche, Arrondissement d'Aubenas, Service de l'Annonce des Crues, Aubenas (DDE07, Archives au Service d'Annonce des Crues, dossier : Service Hydraulique, Obs., 1915-1923 [668]).
- Ponts et Chaussées (1912b). Périodes et hauteurs des étiages aux stations hydrométriques de 1892 à 1912, *Rapport technique*, Département de l'Ardèche, Arrondissement d'Aubenas, Service de l'Annonce des Crues, Aubenas (DDE07, Archives au Service d'Annonce des Crues, dossier : Service Hydraulique, Obs., 1915-1923 [667]).
- Ponts et Chaussées (1916). Bassin de l'Ardèche - Service de l'annonce des crues - Année 1916 - Rapport d'activité, *Rapport technique*, Département de l'Ardèche, Arrondissement d'Aubenas, Service de l'Annonce des Crues, Aubenas, février (DDE07, Archives au SAC, dossier : Hydraulique, Observations 1892 à 1912, 1901 à 1914 [523]).
- Ponts et Chaussées (1918). Bassin de l'Ardèche - Service de l'annonce des crues - Année 1918 - Rapport d'activité, *Rapport technique*, Département de l'Ardèche, Arrondissement d'Aubenas, Service de l'Annonce des Crues, Aubenas, janvier (DDE07, Archives au SAC, dossier : Hydraulique, Observations 1892 à 1912, 1901 à 1914 [524]).
- Ponts et Chaussées (1920). Bassin de l'Ardèche - Service de l'annonce des crues - Année 1920 - Rapport d'activité, *Rapport technique*, Département de l'Ardèche, Arrondissement d'Aubenas, Service de l'Annonce des Crues, Aubenas, janvier (DDE07, Archives au SAC, dossier : Hydraulique, Observations 1892 à 1912, 1901 à 1914 [528]).
- Ponts et Chaussées (1921). Bassin de l'Ardèche - Service de l'annonce des crues - Année 1921 - Rapport d'activité, *Rapport technique*, Département de l'Ardèche, Arrondissement d'Aubenas, Service de l'Annonce des Crues, Aubenas, janvier (DDE07, Archives au SAC, dossier : Hydraulique, Observations 1892 à 1912, 1901 à 1914 [527]).
- Ponts et Chaussées (1922). Bassin de l'Ardèche - Service de l'annonce des crues - Année 1922 - Rapport d'activité, *Rapport technique*, Département de l'Ardèche, Arrondissement d'Aubenas, Service de l'Annonce des Crues, Aubenas, janvier (DDE07, Archives au SAC, dossier : Hydraulique, Observations 1892 à 1912, 1901 à 1914 [526]).
- Ponts et Chaussées (1923). Bassin de l'Ardèche - Service de l'annonce des crues - Année 1923 - Rapport d'activité, *Rapport technique*, Département de l'Ardèche, Arrondissement d'Aubenas, Service de l'Annonce des Crues, Aubenas, janvier (DDE07, Archives au SAC, dossier : Hydraulique, Observations 1892 à 1912, 1901 à 1914 [525]).

- Prévoit, E. et Lallemand, C. (1920). Nivellement des vallées des Alpes et relevé des profils en long des cours d'eau, *Extrait du T. IX des Comptes rendus des études et travaux du Service des Grandes Forces Hydrauliques de la région du Sud-Est*, Paris (BNF, 8- V PIECE- 21778 [1133]).
- Reynier, E. (1947). *Le pays de Vivarais*, Yssingeaux (DDE07 [203]).
- Rose-Pizant, A., Lallement, C. et Tourasse, P. (1998). La Durance à Pont Mirabeau (BV 11920 km²) - Etude historique - Période 1904-1959, *Rapport provisoire*, n° D4166/RAP/1997-00538-A/ARP, EDF-DTG, Grenoble, fev.
- s.n. (1841). Crue de l'Ardèche du 28 octobre 1840, *Courrier de l'Ing. en Chef, Directeur de la Vallée du Rhône, au Secrétaire d'Etat des Travaux Publics*, Ponts et Chaussées, Valence, 30 juin (AN F14 7560, sous-dossier : Inondations, Bassin du Rhône, 1843-55 [729]).
- s.n. (1859). Crues des 14 et 15 octobre 1859 - Rivières du Doux, d'Erieux, d'Ardèche, de Chassezac, d'Ibie, *Rapport technique*, Ponts et Chaussées, Département de l'Ardèche, Privas (ADA, 1270W1 [691]).
- s.n. (1865). Renseignement sur les crues - Utilisation du télégraphe, *Courrier de l'Ing. en Chef de l'Ardèche adressé à l'Ing. Ordinaire Cultil*, Ponts et Chaussées, Département de l'Ardèche, Cours d'eau, Privas, 16 décembre (ADA, 1262W153 [772]).
- s.n. (1882-1883). Ensemble de notes et de télégrammes relatifs aux crues de 1882 et 1883, *Rapport technique*, Ponts et Chaussées, Département de l'Ardèche, Aubenas (ADA, 1262W153 [781]).
- s.n. (1899). Jaugeages de la rivière d'Ardèche à St Martin - Situation des observations faites au 31 décembre 1898, *Rapport de l'Agent Voyer Cantonal*, Ponts et Chaussées, Département de l'Ardèche, 11 janvier (DDE07, Archives au Parc, dossier : Navigation Intérieure, Rivières Navigables, Affaires Diverses, 1953-1958, 1926-1953 [450]).
- s.n. (1942). Exécution de la circulaire du 7 novembre 1942 relative à la nomenclature des stations de mesure de débits, *Rapport technique*, Ponts et Chaussées, Département de l'Ardèche, Arrondissement Sud, Service de l'Annonce des Crues, (DDE07, Archives au Parc, dossier : Navigation Intérieure, 1934-1957 [402]).
- s.n. (1959). Observations sur les crues du 10-11/12/1959 et du 30/09/1958, *Rapport technique*, Ponts et Chaussées, Département de l'Ardèche, Arrondissement Sud, Service de l'Annonce des Crues, (DDE07, Archives au Parc, dossier : Navigation Intérieure, Rivières Navigables, Affaires Diverses, 1953-1958, 1926-1953 [585]).
- s.n. (1970). Risques d'inondations, *Rapport technique*, DDE07, Service d'Annonce des Crues, Privas (DDE07, Archives au Parc, dossier : Annonce des Crues, 1970-1980 [611]).
- Sauquet, E. (2000). *Une cartographie des écoulements annuels et mensuels d'un grand bassin versant structurée par la topologie du réseau hydrographique*, Thèse de doctorat en Mécanique des Milieux Géophysiques et Environnement, Institut National Polytechnique de Grenoble, Cemagref Lyon HHLY, Grenoble.
- SHF (1939-1968). Annuaire Hydrologique de la France, *Imprimerie Chaix*, sous l'égide du Secrétariat à la Production Industrielle (Direction Electricité), Paris (IGA, Fonds Pardé, PS2 [212 à 242]).
- Soubeyrand (1961). Règlement du service d'annonce des crues, *Rapport de l'Ing. en Chef*,

Ponts et Chaussées, Département de l'Ardèche, Arrondissement Sud, Service de l'Annonce des Crues, (DDE07, Archives au Parc; dossier: Service d'Annonce des crues (anciens documents), 1950-60 [601]).

Soubeyrand (1963). Règlement des stations du service d'annonce des crues de l'Ardèche, *Rapport de l'Ing. en Chef*, Ponts et Chaussées, Département de l'Ardèche, Service d'Annonce des Crues, (DDE07, Archives au Parc, dossier: Service Hydrométrique, régime particulier des stations, 1963, sous-dossier: règlements particuliers des stations d'observation [650]).

Tavernier, R. (1907). Etude des Grandes Forces Hydrauliques de la région des Alpes Provençales, compte rendu de 1905, rapport général, *Annales des Ponts et Chaussées*, v (57): 88-135.

Tavernier, R. et Brosse (de la), R. (1909). Publication par la Mission d'étude des grandes forces hydrauliques des Alpes et Pyrénées, *La Houille Blanche (SHF)* (9): 245.

Vaschalde, H. (1873). Chroniques météorologiques du Vivarais, *Transcription d'un document manuscrit*, (DDE07, Service d'Annonce des Crues, Articles [251]).

Vaschalde, H. (1890). *Les inondations du Vivarais depuis le XIIIème siècle, prédiction et historique de celle du 22 septembre 1890*, Aubenas (BNF, LK2- 3834 [252]).

Vignon, E. J. M. (1862). *Études historiques sur l'administration des voies publiques en France: aux dix-septième et dix-huitième siècles.*, Vol. II, Dunod, Paris.



Chapitre 5

Exploitation de l'information historique sur les secteurs de Vallon Pont d'Arc et St-Martin

Sommaire

5.1	Introduction	168
5.2	Choix des secteurs étudiés	169
5.3	Critique des données limnimétriques	171
5.3.1	Zéro des échelles	171
5.3.1.1	Secteur de Vallon	171
5.3.1.2	Secteurs de Sauze et St-Martin	176
5.3.2	Cotes retenues et exhaustivité des événements	177
5.3.2.1	Données historiques antérieures à la création du SAC (avant 1892)	177
5.3.2.2	Données de la période 1892-1979	181
5.3.2.3	Données de la période 1980-2001	182
5.4	Reconstitution des débits de crue	183
5.4.1	Secteur de Vallon	183
5.4.1.1	Modélisation des crues récentes	183
5.4.1.2	Modélisation des crues historiques	188
5.4.1.3	Courbes de tarage retenues à Vallon	192
5.4.2	Secteur de Saint Martin	193
5.4.3	Chroniques de débit retenues	197
5.5	Analyse fréquentielle	203
5.5.1	Test de l'homogénéité et de la stationnarité	203
5.5.2	Ajustements à l'aide des données de Vallon-Pont-d'Arc issues de la période systématique, puis historique	207
5.5.3	Comparaison des résultats obtenus avec l'information des crues historiques de St-Martin avec l'extrapolation par la méthode du Gradex	213
5.6	Conclusion	216
5.7	Bibliographie	217

5.1 Introduction

Après avoir présenté la méthodologie de collecte des données et son application sur le bassin versant de l'Ardèche, nous abordons dans ce chapitre l'exploitation de cette information historique. Nous justifions en premier lieu le choix des deux secteurs particuliers étudiés (§5.2, p. 169). La critique des données limnimétriques (§5.3, p. 171) puis la reconstitution des débits de crues (§5.4, p. 183) sont ensuite présentés. Enfin la dernière section est relative à l'analyse fréquentielle des crues (§5.5, p. 203).

En guise de préambule nous justifions le choix d'effectuer l'analyse fréquentielle sur les débits reconstitués et non pas sur les hauteurs d'eau qui, il est vrai, demandent moins d'information, pour trois raisons principales :

- D'une part il est plus judicieux de travailler avec un débit car il s'agit d'une donnée conservative. En effet une fois reconstituée, cette variable ne sera pas influencée par des modifications futures éventuelles de la topographie. Seuls des aménagements majeurs (construction de retenues, dérivation d'eau depuis ou vers d'autres bassin versants) sont susceptibles de la perturber. A contrario la hauteur d'eau est un paramètre très sensible, exploitable uniquement dans le contexte d'un état donné et invariant de la topographie. Le fonctionnement intrinsèque des cours d'eau et les aménagements liés aux activités humaines ne permettent pas de disposer de séries où deux hauteurs d'eau identiques soient garantes de phénomènes d'intensité équivalente. Comme nous le développons au §5.3.1, p. 171, la modification de la référence des échelles (le zéro) est une pratique courante. Aussi dans ce contexte seul le passage par la variable débit permet de relier les différentes séries entre elles.
- La hauteur d'eau ne peut être utilisée que pour un usage unique lié au risque d'inondation : l'estimation des fréquences de dépassement de certains niveaux de débordement. Or il s'avère que les besoins, en matière de connaissances, pour la gestion des crues doivent être beaucoup plus précis (vitesses des écoulements, volumes ...).
- Enfin l'hypothèse de base de l'analyse fréquentielle paramétrique est que la variable étudiée suit une loi de probabilité générale déterminée (Gumbel, GEV, ...). Si cette hypothèse peut à la rigueur être acceptée pour la variable débit qui intègre de nombreux phénomènes sur l'ensemble du bassin versant, il est très peu probable qu'il existe une loi générale permettant de représenter la hauteur d'eau qui a contrario relève essentiellement de conditions locales.

5.2 Choix des secteurs étudiés

Nous avons retenu les secteurs de Vallon Pont d'Arc (cf. figure 4.1, p. 112, stations n^{os} 53 à 56, 58 et 59) et de Saint-Martin d'Ardèche (cf. figure 4.1, p. 112, stations n^{os} 61 à 66) pour l'exploitation de l'information historique dans l'analyse fréquentielle.

Plusieurs facteurs ont motivé le choix de ces secteurs :

- En premier lieu la *Disponibilité de données hydrométriques récentes*. Le secteur de Saint Martin est pour ce critère le plus fourni du bassin de l'Ardèche avec notamment les différentes stations de Sauze Saint-Martin.
- La *Disponibilité de données hydrométriques anciennes* est le second critère ayant motivé le choix. Le secteur de Vallon Pont d'Arc est à ce sujet le plus intéressant avec notamment la présence du Moulin de Salavas qui fut, avec l'arche naturelle de Pont d'Arc, le lieu privilégié pour archiver les hauteurs atteintes par les crues avant la mise en place d'échelles d'observation. La figure (5.1), p. 170, présente une photo de ce moulin avec les repères de quelques crues historiques. Un repère physique n'a été conservé que pour la crue de 1857 (cf. marque blanche du zoom), pour les autres crues les limites sont issues de plans anciens dressés par les ingénieurs des Ponts et Chaussées. La tour du moulin de Salavas date de plusieurs siècles (présente sur des gravures du XVI^e siècle), elle servait de poste surveillance et de péage des droits de passage à gué au lieu dit actuellement « le bac » (Roudil, 1998).
- La *Disponibilité de données topographiques anciennes* est le troisième critère ayant motivé notre choix. Les données anciennes de hauteur d'eau doivent être converties en débit pour être utilisées en analyse fréquentielle (cf. remarques de préambule). Cette conversion passe par l'établissement de courbes de tarage à partir de modèles hydrauliques qui prennent en compte l'évolution de la topographie. Le secteur de Vallon est le plus riche en terme de plans anciens (cf. figures 4.15 à 4.20, pp. 145-147).
- Le fait que les deux secteurs soient dans la *partie aval du bassin* est également un élément important du choix. La densité de population étant plus forte, la quantité de données et la demande sociale en terme de gestion des inondations sont également plus importantes. A partir de Vallon, l'Ardèche ne reçoit plus d'affluent majeur d'où l'intérêt d'une étude fréquentielle de ces secteurs dans le cadre de l'hydrologie générale du Rhône. Enfin la proximité des deux secteurs (Saint Martin est située 30 km en aval de Vallon, cf. figure 4.2, p. 113 : profil en long de l'Ardèche) sans affluent important permet une inter-comparaison intéressante pour la validation.
- Enfin les *critères liés à la configuration hydraulique* ont également influencés notre choix. En particulier la stabilité géomorphologique des secteurs étudiés. Les deux ponts de Vallon et de St-Martin sont situés sur des socles rocheux (évidence technique) limitant l'instabilité des sections notamment en crue. Il n'existe pas de site idéal présentant à la fois une quantité d'information hydrologique importante et une configuration hydraulique simple, sans influence aval en crue. La sortie des gorges, en amont de la station de Sauze, serait un secteur intéressant d'un point de vue hydraulique puisqu'en crue, l'Ardèche passe par le régime critique à cet endroit (cf. §5.4.2, p. 193) ; cependant aucune cote de crues n'y est relevée. On notera également que contrairement à St-Martin, le site de Vallon a l'avantage d'être relativement encaissé (à l'entrée des gorges). Cette configuration lui confère une bonne sensibilité, c'est à dire un accroissement de la hauteur d'eau important pour un accroissement

du débit. Il s'agit là d'un élément important de la fiabilité des cotes de crues historiques.

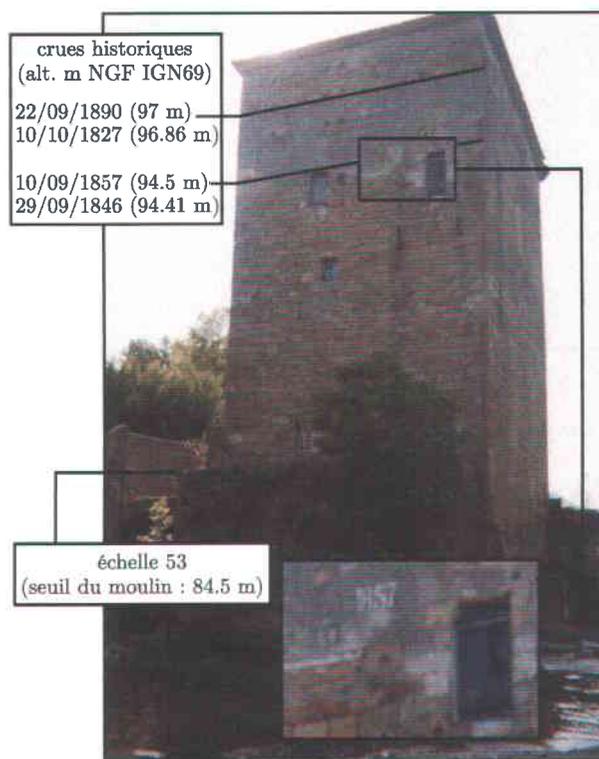


FIG. 5.1 – Altitude des crues historiques au Moulin de Salavas

Remarque 5.1 *L'édification des premiers ponts insubmersibles (cf. construction du pont suspendu de Vallon entre 1833 et 1836) engendre des problèmes techniques sur les crues à l'origine des documents anciens de nature technique dont nous disposons. Ainsi la quantité relativement faible de données topographiques et de cotes de crues répertoriées à Saint-Martin au cours du XIX^e comparativement à Vallon (cf. tableau 4.5, p. 141) trouve ici son explication. Le premier pont à Saint Martin n'a en effet été construit qu'entre 1892 et 1894 (pont en pierre de 5 arches), remplacé par un pont suspendu après sa destruction par la crue du 28 septembre 1900 (amoncellement de bois en amont des piles, ce qui a conduit à construire ensuite un pont suspendu d'après le curé de St-Martin, 1959a). Chaque pont avait un receveur (personnel affecté à son exploitation) qui était également employé par les services des Ponts et Chaussées pour relever les hauteurs des crues. Bien que les ponts ne soient pas les meilleurs points d'observation en raison des perturbations hydrauliques qu'ils engendrent (remarque déjà formulée par les ingénieurs de l'époque), le manque d'observateurs liés aux restrictions budgétaires (cf. §4.4.1.2, p. 130) fait que, sur certaines périodes, seuls ces sites disposent d'informations sur les crues.*

5.3 Critique des données limnimétriques

5.3.1 Zéro des échelles

Les hauteurs atteintes par les crues présentées ci-avant sont relatives au zéro des échelles ou à l'étiage pour les données anciennes. Il convient de les convertir en altitude afin de s'affranchir des problèmes de déplacement des niveaux de référence au cours du temps.

5.3.1.1 Secteur de Vallon (cf. figure 5.6, p. 184)

Nous avons pu identifier six stations ayant existé sur le secteur de Vallon. Elles sont présentées d'amont en aval dans le tableau (5.1), p. 172, qui répertorie entre autres leur période d'activité ainsi que les altitudes des zéros converties dans le système actuel (NGF IGN69). La première station (n° 53) est située au niveau du moulin de Salavas. La connaissance de l'altitude du seuil de la porte de la tour du moulin (84.50 m), également représenté sur les plans anciens de l'Ing. Combier, nous a permis notamment d'établir la correction de -0.55 m pour passer du système Rhône au système d'altitude actuel.

L'échelle la plus importante est celle située au niveau du pont de Vallon à Salavas (n° 55), elle a fait l'objet des relevés présentés à la figure (4.13), p. 138. Nous connaissons précisément son altitude (78.69 m) à partir de 1921 d'après un document de la CGE (1922) dans le système Lallemand. Cette référence n'a pas été modifiée jusqu'à présent. Pour la période antérieure à la création officielle du Service d'Annonce des Crues (SAC), la correction de -0.55 m (Système Rhône/NGF IGN69) établie en amont au niveau du moulin de Salavas conduit, d'après les profils en travers de Combier (1849, 1857e), à un niveau d'étiage situé à une altitude de 78.20 mètres. Cette altitude de l'étiage est confirmée d'une part à partir de la hauteur au dessus de l'étiage pour la crue du 22 septembre 1890, notée à 17.3 m par l'ICPC Lemoine (cf. tableau 4.5, p. 141), et d'autre part à partir d'une plaque qui matérialise cette crue et dont l'altitude a été récemment levée par la DDE à 95.5 mètres ($95.5 - 17.3 = 78.20$ m). Nous savons également que les pratiques de l'époque consistaient à disposer le zéro des échelles au niveau de l'étiage (cf. article 16¹ du programme d'étude sur la Loire, Ministère des Travaux Public, 1847). Par ailleurs l'analyse des hauteurs minimales annuelles (la notion d'étiage du XIX^e siècle semble correspondre aux minimums annuels) entre 1875 et 1964 ne met pas en évidence de rupture brusque (cf. figure 5.2, p. 173). Enfin le seuil d'alerte du SAC, fixé à une hauteur de 4 mètres, également dénommé « hauteur à partir de laquelle des dégâts surviennent » dans les documents de 1882 (antérieurs à la mise en place du SAC), n'a pas changé jusqu'à aujourd'hui (cf. figure 4.13, p. 138).

L'altitude du zéro de cette échelle représente un exemple intéressant d'une fausse information s'étant propagée au cours du temps. Le tableau (D.3) de l'annexe §D.3.1, p. 319, répertorie les relevés d'observateurs disponibles. On remarque que pour certains ils spécifient entre autres l'altitude du zéro de l'échelle. Pour la station du pont suspendu de Vallon (n° 55) cette dernière est notée à 83.70 m de 1896 à 1964. Cette constatation amène deux remarques : (1) le zéro ne change pas au cours du temps ce qui confirme notre hypothèse du paragraphe précédent, à savoir que l'échelle n'a pas été déplacée ; (2) l'altitude est cependant différente de celle que nous avons déterminé (78.20 m). L'explication, pour

1. Art. 16 – Le point zéro de toutes les échelles sera posé au niveau de l'étiage, le même jour, à la même heure, sur tout le développement du fleuve où l'on veut recueillir des observations.

ce dernier point, provient du fait que la cote de 83.70 m correspond à l'étiage représenté sur le profil en travers, au niveau du pont suspendu, levé par Combiér (1849). Cette altitude est dans un système local, elle n'a été convertie dans le système Rhône que dans la version finale du document (Combiér, 1857e). En se basant uniquement sur l'information des relevés de 1964, nous aurions pu faussement conclure que l'altitude du zéro était dans le système Lallemand (système en fonction avant 1969, cf. §4.4.1.1, p. 126), soit une altitude actuelle de 83.78 m NGF IGN69. On voit ici l'intérêt d'un recoupement effectué à partir de nombreuses sources d'informations. Dans le cas présent, l'altitude erronée, notée par un observateur qui a dû consulter le premier document de l'ingénieur Combiér vers 1896, a été reproduite et transmise par les observateurs qui se sont succédés au cours du XX^e siècle.

TAB. 5.1 – *Historique des stations de Vallon*

Station n°	Activité	Equipement	Exploitant	Alt. Zéro (m NGF IGN69)	Localisation
53	1644-1890	*	Service des Inondations (P. et C.)	seuil du moulin 84.50	Moulin de Salavas
54	1921-1926	Echelle	CGE	80.65	seuil amont du pont
55	1857-1861	Echelle	Service des Inondations (P. et C.)	Etiage 78.20	Culée RG du pont
	1862-1891		P. et C.		
	1892-1921		SAC (P. et C.)	78.69	
	1921-1980		SAC (P. et C. puis DDE)		
	1980-1989	Limnigraphe Echelle		78.17 78.69	
	1989-act.	LPN8 Echelle	DDE/CNR	78.69	
56	1961-1964	Limnigraphe	4 ^e CE/ CNR	76.60	Aval du pont
	1964-1968		6 ^e CE/CNR		
	1968-70+?		AFB-RMC/ SHC/CNR		
58	1857-1860	Echelle	Service des Inondations (P. et C.)	Etiage 71.38	Pont d'Arc Amont
59	1857-1860	Echelle	Service des Inondations (P. et C.)	Etiage 71.33	Pont d'Arc Aval

(*) - Absence d'information

LPN8 : capteur de pression + station d'acquisition

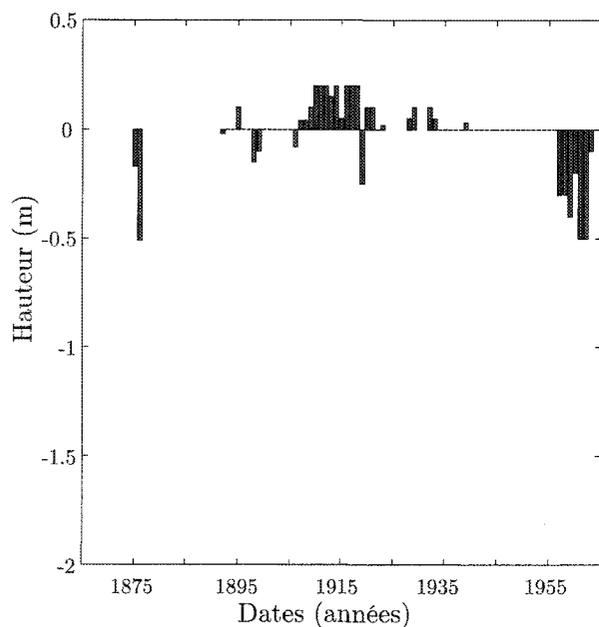


FIG. 5.2 – *Hauteurs minimales annuelles à l'échelle de Vallon (n° 55) sur la période 1875-1964*

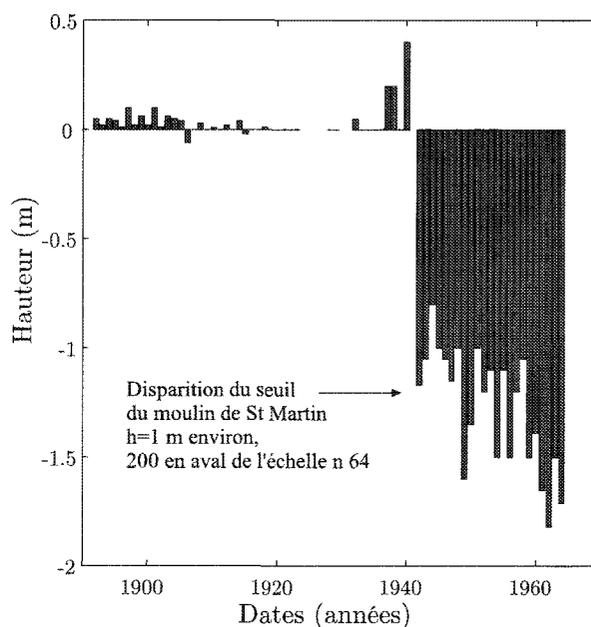


FIG. 5.3 – *Hauteurs minimales annuelles à l'échelle de St-Martin (n° 64) sur la période 1892-1964*

La chronique présentée à la figure (4.25), p. 150, est issue des enregistrements du limnigraphe de la DDE sur la période 1980-1984. Le zéro est donné approximativement à 77.00 m NGF (la station n'est pas validée dans la banque Hydro). Les relevés effectués par l'observateur à l'échelle de Vallon (n° 55) ont été saisis sur support informatique jusqu'en 1964 seulement (cf. figure 4.13, p. 138). Le limnigraphe ayant été installé 1961 nous pensions initialement pouvoir compter en effet sur des enregistrements systématiques à partir de cette date. Nous disposons cependant d'un document de synthèse (Gigon, 2002) qui répertorie les hauteurs observées à l'échelle pour les principales crues. Il comporte de nombreuses erreurs et lacunes pour la période ancienne (ex : crue notée à 17 m le 18/10/1827 au lieu de 16.1 m le 10/10/1827 ; absence des crues de 1924, 1927 et 1930 etc.) cependant les données deviennent fiables et nombreuses à partir de 1963 où toutes les crues supérieures au seuil d'alerte de 4 mètres sont alors relevées. Nous avons exploité ces hauteurs pour estimer l'altitude réelle du zéro du limnigraphe. Le tableau (5.2), p. 175, présente ces résultats. Après conversion des heures des maxima observés à l'échelle en temps GMT+1 (format des dates Hydro), l'altitude du zéro, obtenue en minimisant l'écart quadratique entre les altitudes à l'échelle et celles au limnigraphe, est évaluée à 78.17 m avec un résidu moyen de 0.1 m. Le fait que cette altitude se situe en dessous de celle de l'échelle (0.52 m en dessous) est confirmé par l'absence, dans les relevés de l'observateur (document de Gigon), des crues du 20/10/1984 et 26/10/1984 enregistrées respectivement à 4.24 et 4.08 mètres (hauteurs inférieures au seuil d'alerte après correction). Nous n'avons pas décelé de sous périodes homogènes entre 1980 et 1984 ce qui nous conduit à penser que le résidu moyen de 0.1 m est dû aux imprécisions des deux dispositifs (problème de battillage, lecture de l'échelle,...). Le tableau (5.2), p. 175, montre également les erreurs liées à l'appréciation

de la date du maximum de la crue par l'observateur (ΔZ), maximums majoritairement sous estimés. Les décalages sont de l'ordre de l'heure, pour certains, ils atteignent la demi-journée et conduisent à une sous estimation de la hauteur de l'ordre du mètre.

Le limnigraphe de la 4^e CE (station n° 56) n'a pas fait l'objet d'un traitement particulier puisque nous n'avons pas pu, au niveau de l'Etat Général des Sources (EGS), localiser ses données. Les stations n°s 58 et 59 disposent uniquement de quelques relevés anciens (1857 et 1859), par contre les ingénieurs des Ponts et Chaussées y ont également repéré des laisses de certaines crues historiques (1827, 1846, 1855, 1856, 1890). Les altitudes des niveaux d'étiage ont été déterminées de la même manière que celle à l'échelle du pont suspendu pour la période 1857-1891, à partir des sections en travers levées par l'IOPC Combier (1849, 1857e). Ces points se sont avérés d'un intérêt majeur du point de vue de la modélisation hydraulique. Ils permettent d'apprécier d'une part, la pente de la ligne d'eau entre le pont suspendu et Pont d'Arc et d'autre part, d'estimer les pertes de charge singulières au niveau de cette arche naturelle (échelles amont-aval).

TAB. 5.2 – Estimation du zéro du limnigraphe de Vallon

Crues	Dates	Lecture échelle			Limnigraphe			$\Delta Z^{(4)}$ (m)
		h ⁽¹⁾	H ⁽²⁾ (m)	Alt. (78.69)	h ⁽¹⁾	H ⁽²⁾ (m)	Alt. (78.17 ⁽³⁾)	
1	21/09/1980	15:00	8.10	86.79	15:01	8.15	86.32	
					16:32	8.47	86.64	0.15
2	29/12/1981	06:00	4.70	83.39	06:24	5.75	83.92	-0.53
3	21/09/1982				04:49	4.70	82.87	-0.18
		06:00	4.00	82.69	05:49	4.40	82.57	
4	08/11/1982	18:30	11.20	89.89	18:30	11.90	90.07	
					19:20	12.00	90.17	-0.28
5	27/11/1982	09:00	4.50	83.19		5.18 ⁽⁵⁾	83.35	
					14:29	5.61	83.78	-0.59
6	26/04/1983	04:00	4.30	82.99		4.85 ⁽⁵⁾	83.02	
					16:22	5.73	83.90	-0.91
7	27/04/1983	01:00	4.60	83.29		5.29 ⁽⁵⁾	83.46	
					02:08	5.46	83.63	-0.13
8	19/05/1984				09:28	4.74	82.91	-0.22
		11:00	4.00	82.69		4.56 ⁽⁵⁾	82.73	
9	04/10/1984				23:32	5.23	83.40	-0.11
					23:59	4.60	83.29	
10	06/11/1984	08:00	4.00	82.69	08:21	4.98	83.15	
					13:23	5.58	83.75	-1.06
11	07/11/1984	22:00	6.30	84.99		6.62 ⁽⁵⁾	84.79	
					23:23	6.69	84.86	0.13
12	02/12/1984				22:30	8.20	86.37	0.32
		00:00	8.00	86.69		7.82 ⁽⁵⁾	85.99	

(1) - Heures converties en GMT+1

(2) - Hauteurs des crues

(3) - Altitude du zéro du limnigraphe optimisée par les moindres carrés (Résidus : 0.10 m)

(4) - Différence d'altitude entre le maximum observé à l'échelle et celui enregistré par le limnigraphe

(5) - Hauteurs interpolées

5.3.1.2 Secteurs de Sauze et St-Martin

L'activité hydrométrique sur le secteur de Sauze, situé à 2.3 km en amont du pont de Saint Martin, est relativement contemporaine. Il a existé trois stations (n^{os} 61, 62 et 63) de 1921 jusqu'à aujourd'hui (cf. tableau 5.3, p. 176). L'enquête historique nous a permis de répertorier sans ambiguïté le zéro de ces échelles situées au même endroit.

TAB. 5.3 - *Historique des stations de Sauze*

Station n°	Activité	Equipement	Exploitant	Alt. Zéro (m NGF IGN69)	Localisation
61	1921-1922	Echelle	CGE	46.24	X=776.696
	1922-1927			44.24	Y=1926.247
	1955-1964	Limnigraphe	4 ^e CE	45.62	Lambert II
	1964-1968			46.00	
	1968-1991	AFB-RMC/SHC			
	1991-act.	SEMA de la DIREN-RA			
62	1991-act.	LPN8	CNR	46.00	
63	1991-act.	LPN8	EDF		

Le secteur de Saint Martin comporte également trois stations (n^{os} 64, 65 et 66) présentées dans le tableau (5.4), p. 177. La première information fiable sur la localisation précise et l'altitude du zéro de l'échelle du service des Ponts et Chaussées à St-Martin (n° 64) est fournie par un levé de ligne d'eau d'étiage effectué en 1921 par le Service du Nivellement Général de la France (avant l'IGN) pour le compte du Service des Grandes Forces Hydrauliques (Morel, 1921). Pour la période 1892-1921, étant données d'une part la nature du socle rocheux au niveau du pont de St-Martin et d'autre part la pratique de l'époque consistant à positionner le zéro de l'échelle au niveau de l'étiage, il est fort probable que le niveau de référence soit proche de 45.70 m NGF. La stabilité du zéro de l'échelle a été vérifiée, comme pour la station de Vallon, en s'intéressant aux variations du niveau d'étiage sur la période 1892-1964. La série fait apparaître deux sous-périodes homogènes, avec un abaissement d'environ 1 mètre du niveau d'étiage vers 1941 (cf. figure 5.3, p. 173). L'explication est fournie par un courrier du curé de St-Martin (1959b) adressé à Maurice Pardé où il apparaît qu'un seuil d'environ 1 à 1.5 mètre de hauteur existait au XIX^e siècle, 200 m en aval du pont de St-Martin. Ce seuil, qui figure sur le document de l'IGN en 1921 (0.7 m) a disparu en 1941. L'enquête historique a montré et notamment les différents réglemens particuliers des stations que le seuil d'alerte, fixé à 4 mètres avant 1941 était passé ensuite à 3 mètres (cf. figure 4.12, p. 138). Pour la période antérieure au SAC et à la construction du pont (1892), nous savons qu'une échelle a été installée en 1857 mais nous en ignorons la localisation et l'altitude précise du zéro.

Les enregistrements de la station installée par la 4^e CE (n° 65) n'ont pas pu être localisés. La CNR dispose par contre de données sur la période 1970-1991 (station n° 66). Nous n'avons pas cherché à obtenir ces dernières en raison des contraintes de propriété envisagées ; par ailleurs elles étaient redondantes avec les données de Sauze dans la banque HYDRO (cf. figures 4.21 à 4.24, pp. 149-150) supposées initialement continues depuis 1955.

TAB. 5.4 – Historique des stations de Saint Martin

Station n°	Activité	Equipement	Exploitant	Alt. Zéro (m NGF IGN69)	Localisation
64	1857-1861	Echelle	Service des Inondations (P. et C.)	Etiage *	*
	1862-1891		P. et C.		
	1892-1921		SAC (P. et C.)	Etiage 45.70	Culée RG du pont
	1921-1989		SAC (P. et C. puis DDE)	45.70	
	1989-act.		LPN8 Echelle		
65	1955-1964	Limnigraphe	4 ^e CE	48.03	
	1964-1968		6 ^e CE		
	1968-1981		AFB-RMC		
66	1970-1992	Limnigraphe	CNR	*	*

(*) - Absence d'information

5.3.2 Cotes retenues et exhaustivité des événements

5.3.2.1 Données historiques antérieures à la création du SAC (avant 1892)

La figure (5.4), p. 178, présente une synthèse des informations historiques retenues en définitive à Vallon sur la période qui précède la création du SAC. Pour la critique détaillée des crues antérieures à 1830 nous renvoyons à l'annexe §D, p. 307. Elle retrace, pour chaque événement, la source originelle des informations souvent reprises par les auteurs contemporains et parfois déformées au cours du temps. La critique des données est dans ce cas essentiellement réalisée par recoupement des différentes sources. Nous avons cependant également exploité les premiers relevés pluviométriques effectués par M. de Montravel. On notera que des données pourtant issues du SAC sont parfois erronées. A titre d'exemple un rapport de Durand et Soubeyrand (1958), ingénieurs du Service Hydraulique des Pont et Chaussées, établi à l'occasion des crues de fin septembre et octobre 1958, présente les crues supérieures ou égales à 10 mètres à l'échelle de Vallon. Parmi celles-ci se trouve une crue le *18 octobre 1824* notée à 16.1 m qui ne figure dans aucune autre source. On relève également les erreurs suivantes : la crue de 1827 est notée à 17 m à l'échelle de Vallon comme la plus forte connue alors que l'ensemble des autres documents s'accordent à affirmer qu'elle est la seconde après celle de 1890. Cette dernière est d'ailleurs notée à 16.7 m à l'échelle de Vallon au lieu de 17.3 m. Dans la liste des crues supérieures ou égales à 10 mètres il manque celle du 16 octobre 1907 (alors qu'elle est notée par les observateurs de l'époque de ce même service). Autre exemple, on note dans l'ouvrage de Vaschalde (1890, p. 66), que les crues de 1888 et 1872 sont les plus fortes sur la période 1866-1889 alors qu'une crue particulièrement forte a eu lieu en 1878.

Il ressort de la critique des différentes sources que la crue de 1890 est la plus forte connue. Il semble qu'il faille remonter à 1522 pour retrouver des témoignages d'une crue aussi forte sinon plus. Les crues de 1827 et 1644, très voisines, arrivent respectivement

aux deuxième et troisième rangs. Les hauteurs considérables des crues de 1890 et 1827 ne font aucun doute, elles sont validées par de nombreuses laisses. A l'occasion de ces deux événements au moins, l'Ardèche a d'ailleurs repris son ancien cours dans la Combe d'Arc au niveau de l'arche de Pont d'Arc (cf. les cartes des figures 4.14 et 4.15, p. 145, la connection s'établit à partir d'une hauteur de 17.45 m au dessus de l'étiage, altitude 88.83 m NGF). Les ingénieurs des Ponts et Chaussées ont dès 1849 repéré et nivellé des laisses de la crue de 1827 dans cette combe (Comber, 1849, 1857e, De Mardigny 1857, 1860a, 1860b). Nous ne connaissons pas l'intensité exacte de la crue de 1794. Elle a été cependant inférieure à celle de 1772 et il semble qu'elle soit d'intensité comparable à celle de 1826 (aux alentours de 12 mètres au dessus de l'étiage au pont suspendu de Vallon). Nous savons avec certitude que la crue de 1772 n'a pas été dépassée jusqu'à ce que survienne celle de 1827. Les éléments de l'annexe §D, p. 307, qui présentent des commentaires du type « plus forte crue depuis... » nous permettent d'ailleurs d'établir un classement relatif des crues entre 1772 et 1826 (cf. encadré grisé de la figure 5.4). Notre enquête historique s'est essentiellement attachée aux XIX^e et XX^e siècle (un approfondissement des recherches jusqu'au moyen âge est prévu dans le cadre de la poursuite du projet SPHERE). Nous disposons ainsi de très peu d'information sur les crues de la période 1644-1772 même s'il semble que la crue de 1772 soit la seconde plus forte sur cette période (cf. annexe §D, p. 307). Dans ces conditions deux hypothèses peuvent être formulées (cf. figure 5.4, p. 178) : (1) le seuil de perception des crues est susceptible d'avoir évolué en s'abaissant entre la crue de 1644 et celle de 1772 (en raison du développement démographique par exemple) et dans ce cas seul un seuil au niveau de la crue de 1644 permet de garantir l'exhaustivité ; (2) le niveau de perception des crues n'a pas évolué sur la période 1644-1772 et dans ce cas un seuil au niveau de la crue de 1772 permet de garantir l'exhaustivité.

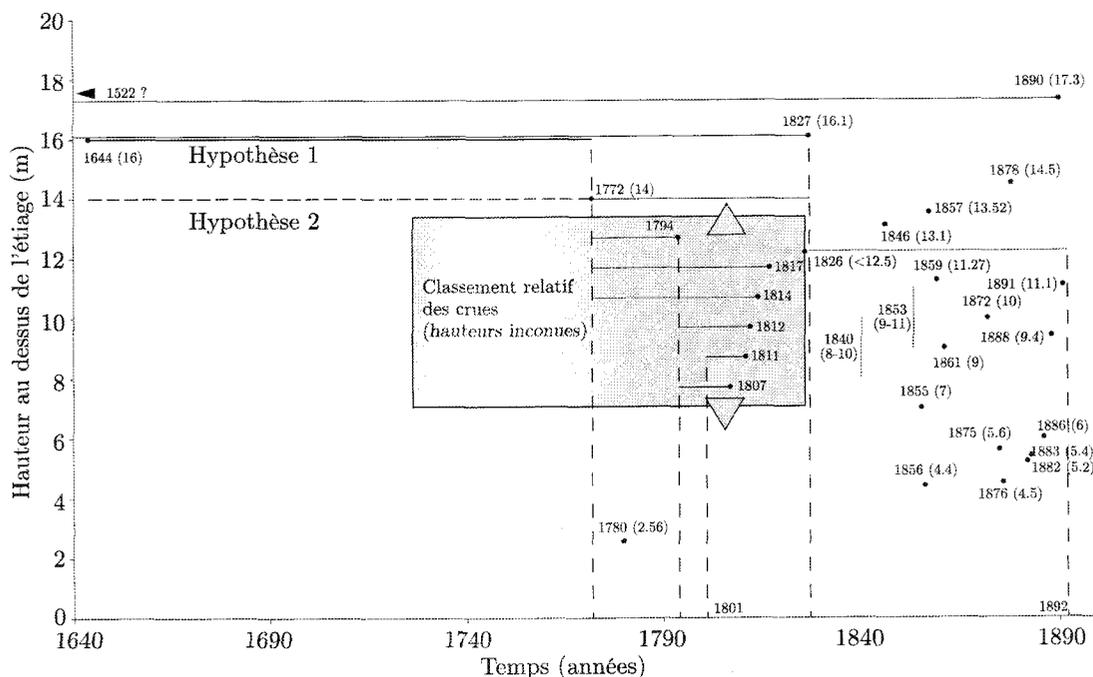


FIG. 5.4 – Hauteurs maximales annuelles des crues historiques à Vallon (n° 55) avant la mise en place du SAC

Pour la période qui précède la création du SAC nous nous sommes essentiellement attachés au secteur de Vallon. En effet comme on peut le voir dans le tableau (4.5), p. 141, le secteur de St-Martin ne présente pas de garantie en terme d'exhaustivité : certaines crues pourtant importantes n'y sont pas représentées (1872, 1878). On observe également des inversions dans le classement des crues par rapport à celui des crues de Vallon (ex : 1827 > 1890, 1846 > 1857 etc.). Il est vrai que ces inversions peuvent être dues aux conditions d'écoulement (embâcles, influence aval) cependant comme nous l'avons déjà énoncé, avant 1892 aucune donnée sur la localisation précise de l'échelle de St-Martin n'est disponible. D'ailleurs d'autres sources d'information nous confirment l'ordre de certaines crues (cf. notes 2 du tableau 5.5, p. 180). D'après la relation entre les hauteurs à l'échelle de Vallon et celles à l'échelle de St-Martin (cf. figure 5.5, p. 181) et compte-tenu d'une incertitude de l'ordre de ± 0.70 m sur la cote à St-Martin, le classement des crues aux deux sites est compatible.

Le tableau (5.5), p. 180, présente les douze crues *maximales annuelles* retenues en définitive ainsi que trois seuils de non dépassement permettant de garantir l'exhaustivité. L'abondance relative des crues après 1850 pourrait inciter à sélectionner un dernier seuil de perception plus faible que 12.5 mètres. Ce n'est pas le cas pour deux raisons essentielles que nous avons déjà évoquées au §4.4.2.2, p. 137 : (1) l'information disponible sur les faibles crues n'est pas le reflet d'une connaissance exhaustive, elle traduit uniquement les aléas de l'archivage des données (cf. figure 5.4, p. 178, crue de 1856 connue approximativement car une inondation importante a eu lieu sur le Rhône, etc.) ; (2) les maxima annuels ont parfois occulté, en terme d'archivage, des crues importantes ayant eu lieu au sein de la même année.

TAB. 5.5 – *Hauteurs maximales annuelles au-dessus de l'étiage des crues historiques retenues à Vallon (n° 55) et St-Martin (n° 64) - Seuils adoptés sur la période 1645-1891*

Vallon (n° 55)			St-Martin (n° 64)	
rangs à Vallon	Dates	Hauteurs	Dates	Hauteurs
1	22/09/1890 12:00	17.30	22/09/1890 15:00	8.45 ⁽¹⁾
2	10/10/1827 00:30	16.10	10/10/1827	8.35 ⁽²⁾
3	22/10/1878 00:00	14.50	-	-
4	09/09/1772	14.00	-	-
5	10/09/1857 19:30	13.52	10/09/1857 22:30	6.60 ⁽³⁾
6	29/09/1846 00:00	13.10	29/09/1846 00:30	7.75 ⁽⁴⁾
7	15/10/1859 00:00	11.27	15/10/1859 00:00	6.20
8	21/10/1891 07:00	11.10	21/10/1891 10:40	6.70
9	-	-	29/10/1853 13:00	6.25
10	03/10/1872	10.00	-	-
11	31/12/1888	9.40	-	-
12	15/07/1861 22:00	9.00	-	-
Seuils	Périodes	Hauteurs	-	
1	1645-1771	16 ou 14		
2	1773-1826	14		
3	1828-1889	12.5		

Notes du tableau (5.5)

(1) - Cote de 10.45 m à Sauze d'après Barrière (1959).

(2) - Notée à 8.9 m par Combier (1857f), elle a été corrigée en fonction du niveau atteint sur les marches de l'église de St-Martin pour les crues de 1890 et 1827 d'après un courrier du curé (1959a, 1959b) adressé à Pardé. Le maximum de la seconde crue était situé de 10 à 18 cm en-dessous de la première.

(3) - Nous avons retenu l'estimation de Morlière (1857a, 1857b, 1857c) plus précise que celles de Marchegay (1861) et de Gros (limnigramme de crue au lieu d'un tableau sommaire).

(4) - Nous avons retenu la cote de Combier (1857f) plus compatible avec les autres crues..

5.3.2.2 Données de la période 1892-1979

Une comparaison visuelle approfondie des données saisies à partir des relevés d'observateurs nous a amené à conclure que, dans de nombreux cas, le maximum de l'événement n'avait pas été observé. La crue du 30 septembre 1958, qui s'est pourtant avéré être la plus forte du XX^e siècle, est un exemple flagrant (celle de 1900 appartient au XIX^e). A Vallon cette crue est passée dans la nuit, l'observateur de l'époque relève -0.1 m le 30 septembre à 7h00 et 5.5 m le 1 octobre à 7h00. La crue a atteint en réalité la hauteur de 12.2 mètres à 19h30, soit une erreur considérable de 6.7 mètres. L'observateur de St-Martin a également manqué le maximum : il note -0.75 m le 30 septembre à 17h00 et 4.8 m le 1 octobre à 7h00 alors que le maximum est de 6.7 m (à 22h30). En effet tel que le montrent les hydrogrammes de la figure (4.3), p. 113, l'Ardèche présente des crues rapides, dont les durées sont de l'ordre de 15 à 20 heures avec des temps de montée de 4 heures environ.

Pour répondre à ce problème et éviter des incertitudes rédhibitoires sur les hauteurs, nous nous sommes attachés à définir un seuil physique suffisamment élevé pour garantir l'archivage du maximum des événements même si l'observateur n'était pas présent. Il semble que les curés qui se sont succédés à l'église de St-Martin aient été particulièrement intéressés par la « potamologie » (terme de Maurice Pardé pour définir la science des cours d'eau). Aussi nous avons naturellement choisi comme seuil la place au pied des marches de l'église. Cette dernière est inondée à partir d'une hauteur de 5 mètres à l'échelle de St-Martin d'après le curé (1959a, 1959b). Pour la station de Vallon, le seuil (8 mètres) a été obtenu en exploitant une relation entre les hauteurs aux échelles de Vallon et de St-Martin établie par Delemer (1904) et complétée par nos soins en fonction des cotes disponibles jusqu'en 1964 (cf. figure 5.5, p. 181).

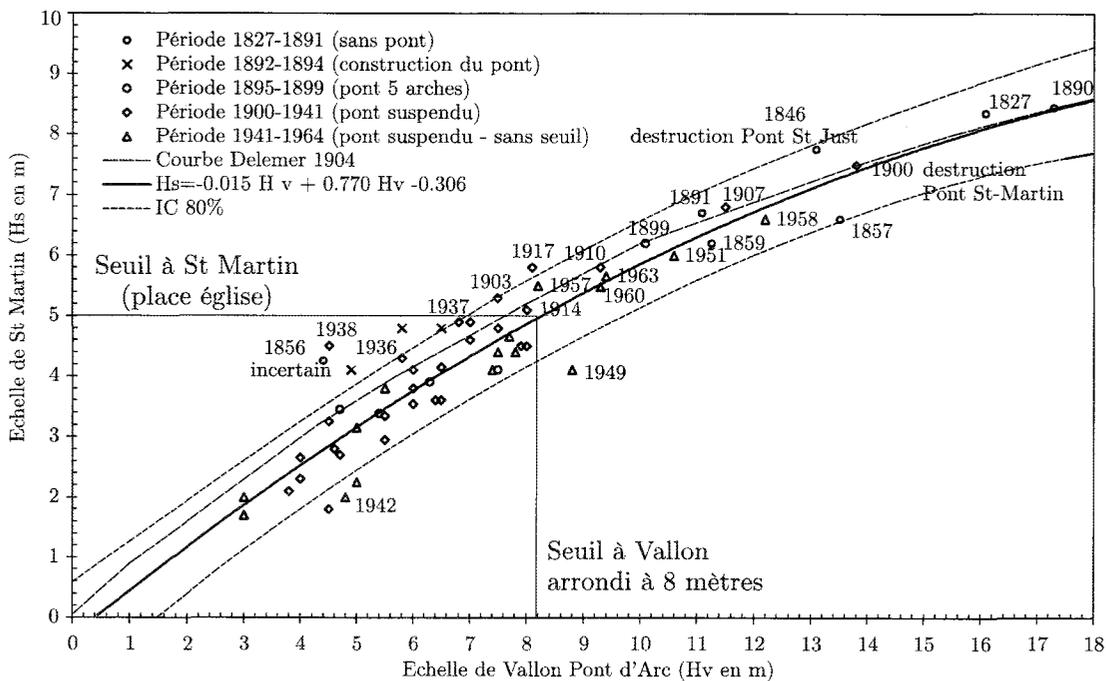


FIG. 5.5 – Correspondance entre les hauteurs aux échelles de Vallon (n° 55) et de St-Martin (n° 64) établie à partir des cotes maximales annuelles issues des relevés d'observateurs

Ces seuils ont ensuite été utilisés pour échantillonner les chroniques de hauteurs issues des observateurs et présentées aux figures (4.12) et (4.13), p. 138. Chaque événement seuil a alors fait l'objet d'une critique particulière. Les dates et heures des maxima aux stations de Vallon et de St-Martin ont été comparées en se référant aux temps de propagation observés sur les données systématiques (de 1h30 à 4h suivant les débits). Les lacunes (absence de fiches mensuelles) ont également fait l'objet d'un traitement spécifique. Dans certains cas, l'information a pu être retrouvée à partir de synthèses annuelles ou inter-stations du service d'annonce des crues, ou en exploitant le fonds Maurice Pardé, dans lequel sont disponibles des notes manuscrites avec les hauteurs maximales annuelles manquantes, directement recopiées des cahiers d'observateurs. Pour d'autres années, nous avons pu établir qu'aucune crue n'avait eu lieu pendant un mois sans donnée, en exploitant l'information pluviométrique des rapports de Météo France (1995a, 1995b).

Les hauteurs des crues retenues en définitive, annotées des sources d'informations et des corrections effectuées, sont présentées accompagnées des débits estimés au §5.4.3, p. 197. Le plan de présentation a été choisi pour des raisons pratiques, la démarche de critique des données est cependant essentiellement itérative. Une nouvelle inspection des hauteurs peut être effectuée lorsqu'une anomalie est détectée au niveau des débits. De la même façon, l'étude de la stationnarité (cf. §5.5.1, p. 203) nous a conduit à des retours aux sources d'informations.

5.3.2.3 Données de la période 1980-2001

Les hauteurs enregistrées au cours de la période systématique à Vallon et Sauze (issues de la banque HYDRO cf. figures 4.25 et 150, p. 150), ont été critiquées de la même manière que pour la période 1892-1979. Nous avons retenu pour Vallon toutes les crues supérieures au seuil d'alerte à l'échelle du pont suspendu (n° 55). Le document de Gigon (2002) qui présente une synthèse exhaustive des crues supérieures à 4 mètres nous a permis de compléter les nombreuses lacunes. Un contrôle a également été effectué à partir de l'information pluviométrique des rapports de Météo France (1995a, 1995b). La comparaison inter-stations met en évidence des défauts d'enregistrement à Sauze (29 octobre 1987, 11 octobre 1988, 3 novembre 1989) et à Vallon (22/09/1993). Les hauteurs des crues retenues en définitive, annotées des sources d'informations et des corrections effectuées, sont présentées accompagnées des débits estimés au §5.4.3, p. 197.

5.4 Reconstitution des débits de crue

Nous présentons dans cette partie les modèles hydrauliques qui ont permis d'estimer les débits de crue ainsi que leurs incertitudes au niveau de Vallon (§5.4.1) et de St-Martin (§5.4.2). Les séries de débits utilisées en définitive dans l'analyse fréquentielle sont comparées dans la dernière section (§5.4.3).

5.4.1 Secteur de Vallon

Le secteur de Vallon est très intéressant en terme de modélisation hydraulique : (1) des levés topographiques et de ligne d'eau anciens sont disponibles ; (2) nous avons collecté les cotes des principales crues historiques sur un linéaire important permettant d'avoir une information fiable sur la pente de la ligne d'eau et les pertes de charge singulières au niveau de l'arche naturelle. Les figures (5.6) et (5.9), p. 184-186, présentent respectivement la carte du secteur étudié et une représentation 3D de la géométrie. Il se décompose en deux parties principales : la première à l'amont montre des zones d'expansion des crues et un lit mineur stable (roche mère), la seconde est encaissée dans le début des gorges, le lit mineur est alors constitué de sable fin. L'Ardèche coule avec une pente moyenne de 0.16 % qui devient plus faible (0.096 %) après le passage à travers l'arche naturelle de Pont d'Arc (cf. figure 5.7, p. 185). On note également au niveau de l'arche la présence en rive gauche de l'ancien lit (Combe).

En ce qui concerne la modélisation hydraulique à proprement parlé nous avons opté pour le logiciel HEC-RAS. Il permet de travailler en 1D aussi bien en permanent qu'en transitoire et prend en compte les régimes mixtes (passage du régime fluvial à torrentiel et inversement). Entre autres éléments appréciables, il est libre d'accès, dispose d'une interface graphique de modélisation de la géométrie et d'une bibliothèque de lois d'ouvrages importante.

5.4.1.1 Modélisation des crues récentes

Le modèle hydraulique dit « actuel » a été établi à partir de 29 sections en travers réparties sur les 6 kilomètres que compte le secteur d'étude. Ces sections en travers, pour une part, ont été réalisées pour les besoins d'une précédente étude hydraulique par la société Sogréah (1994a, 1994b). Elles ont été construites à partir de plans photogrammétriques de 1990 : le lit mineur correspond à un lit théorique rectangulaire dont l'altitude du fond a été calée de telle sorte qu'il puisse écouler le débit d'étiage observé le jour de la prise de vue. Il s'agit là d'un moyen de lissage hydraulique de la topographie fine tout à fait justifié. Une autre part des profils en travers provient de levés topographiques classiques effectués en 1997 afin de contrôler les premiers. On dénombre plusieurs ouvrages d'amont en aval : le seuil du moulin de Salavas (hauteur de 3.5 mètres, en diagonale par rapport à l'écoulement), suivi d'un autre seuil ($h = 2.5$ mètres) et enfin du nouveau pont de Vallon à Salavas construit fin 1992 sur les piles de l'ancien.

Les paramètres liés à la géométrie et invariant d'une simulation à l'autre sont les suivants :

- Les conditions limites aval et amont sont prises égales aux hauteurs normales avec des pentes respectives de 0.096 % et 0.16 % (le régime mixte nécessite en effet

une condition supplémentaire pour que le calcul puisse également se dérouler depuis l'amont).

- Compte tenu de la configuration des deux seuils (présence d'atterrissements et de blocs), la valeur minimale admise dans la littérature a été adoptée pour les coefficients de débit (0.37).
- Les coefficients de contraction/expansion ont été fixés à 0.3/0.5 à l'amont et à l'aval du pont de Vallon qui ne représente pas un obstacle à l'écoulement et à 0.6/0.8 pour l'arche de Pont d'Arc qui oppose une résistance importante.

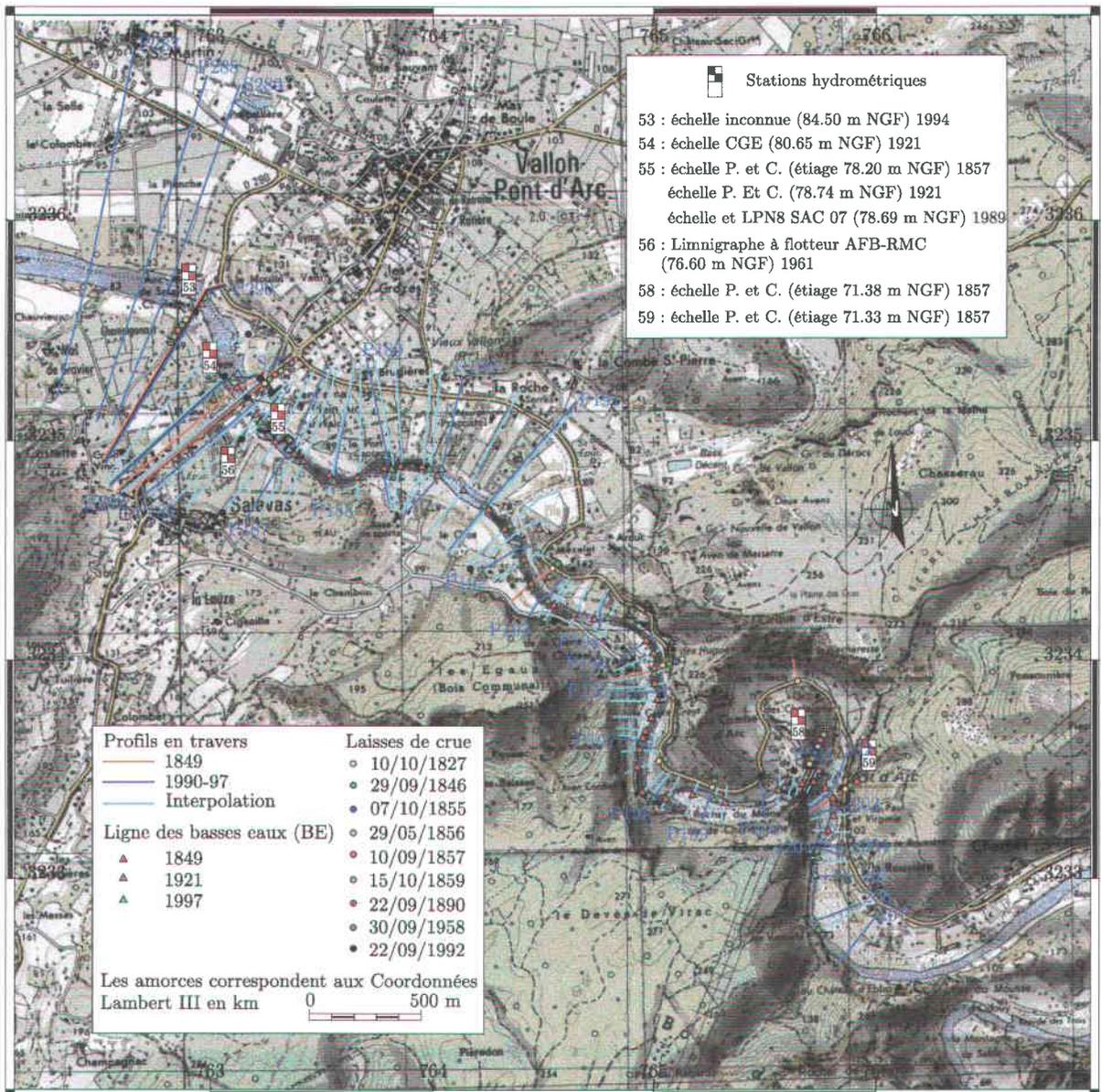


FIG. 5.6 – Localisation des profils en travers du modèle hydraulique de Vallon

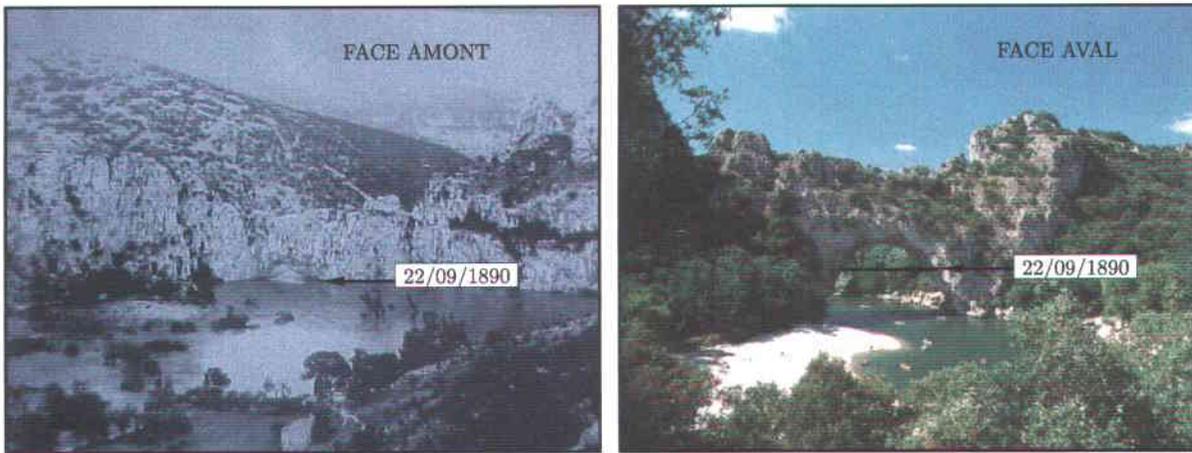


FIG. 5.7 – Crue du 22 septembre 1890 au niveau de l'arche naturelle de Pont d'Arc

Nous avons choisi de travailler avec des coefficients de rugosité variables en fonction du débit pour deux raisons : (1) la moitié du secteur est situé dans les gorges et ne présente pas par conséquent la structure lit mineur, lit moyen, lit majeur ; les zones d'expansion du secteur amont, compte tenue de la configuration, ne participent pas à l'écoulement et jouent un rôle de stockage ; (2) les coefficients de rugosité sont interprétés comme étant purement un paramètre de calage permettant d'intégrer également les pertes de charges liées au développement de la turbulence pour les fortes crues (augmentation du coefficient de Manning n / baisse du coefficient de Strickler k). La figure (5.8), p. 185, présente les coefficients de rugosité ayant conduit aux meilleures adéquations entre les pentes des lignes d'eau simulées et celles matérialisées par les laisses de crue (la valeur du débit influençant quant à elle la hauteur).

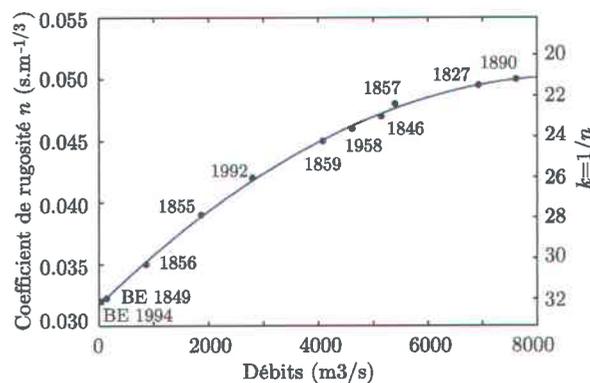


FIG. 5.8 – Coefficients de rugosité des débits de crues et de basses eaux simulés

En premier lieu et afin de vérifier la cohérence de la topographie, la ligne des basses eaux de 1997 a été calée avec le débit correspondant ($Q = 40 \text{ m}^3/\text{s}$). Cette simulation montre une bonne adéquation entre valeurs observées et simulées, la différence maximale

est de 36 cm (dans ce cas particulier de niveau d'étiage les valeurs relatives n'ont pas de sens). Ce résultat traduit la cohérence générale de la topographie. La crue de 1992 a ensuite été calée avec le débit jaugé par la DIREN à 2800 m³/s. On observe moins de 6% d'erreur sur l'ensemble des cotes calculées et observées. Le calage optimal pour la crue de 1958 a été obtenu par itération en modifiant le couple (n, Q) . Les erreurs sont inférieures à 5 % mais on remarquera que seules deux laisses sont présentes. Enfin la ligne des basses eaux de 1921 a été simulée dans le but d'apprécier une modification éventuelle de la topographie. Nous avons utilisé à cet effet le débit journalier issu de la CGE et correspondant à la date du levé ($Q = 126 \text{ m}^3/\text{s}$ arrondi à 120). Cette modélisation ne fait pas apparaître de tendance particulière à l'enfoncement ou à l'exhaussement du lit de l'Ardèche (la moyenne des valeurs absolues des erreurs est de 17 cm pour 14 valeurs prises en compte). Les différentes simulations ont montrées que l'Ibie, un petit affluent en rive gauche, n'avait pas une contribution significative. L'ensemble des résultats est illustré à la figure (5.10), p. 187.

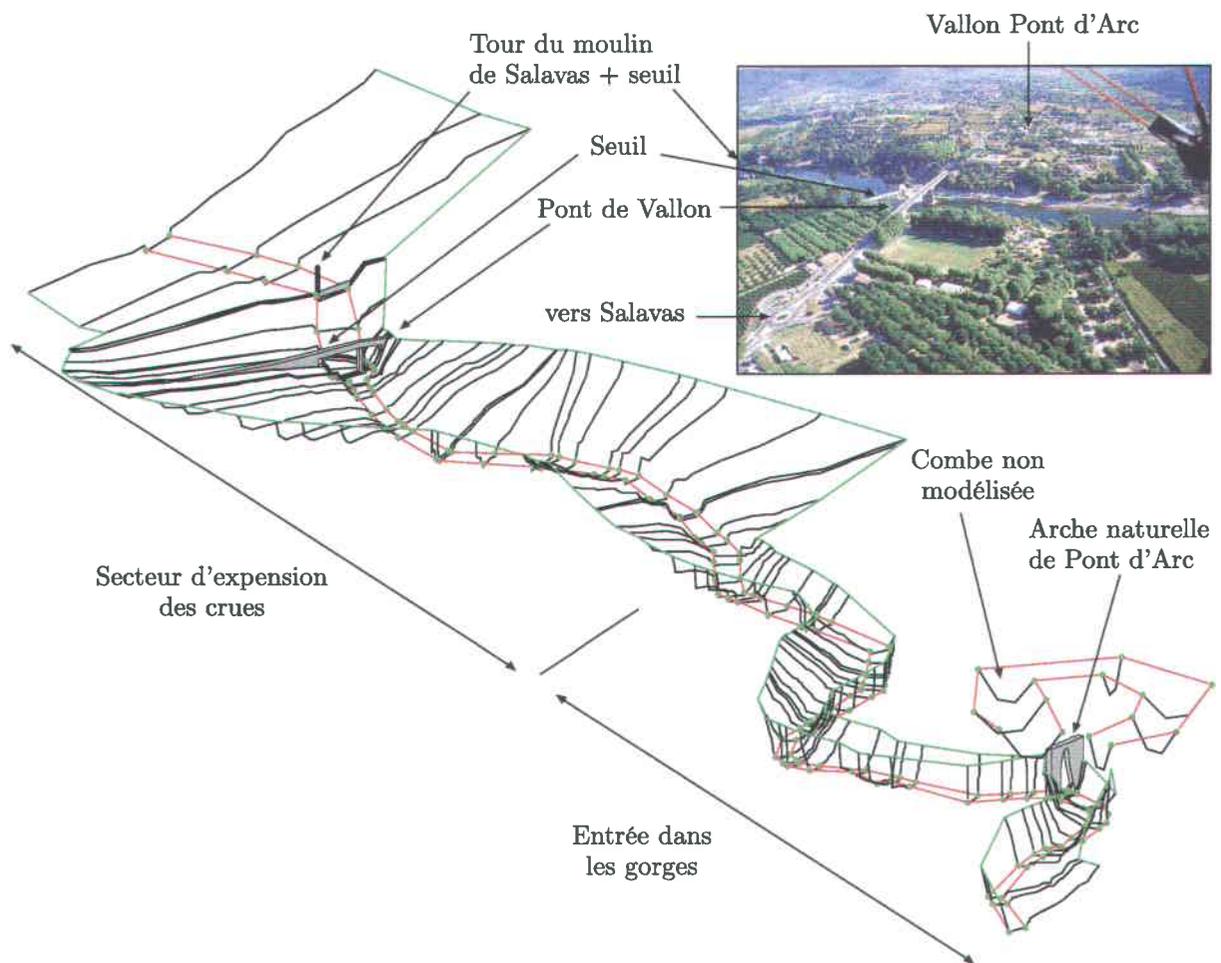


FIG. 5.9 – Représentation 3D de la géométrie du modèle hydraulique de Vallon

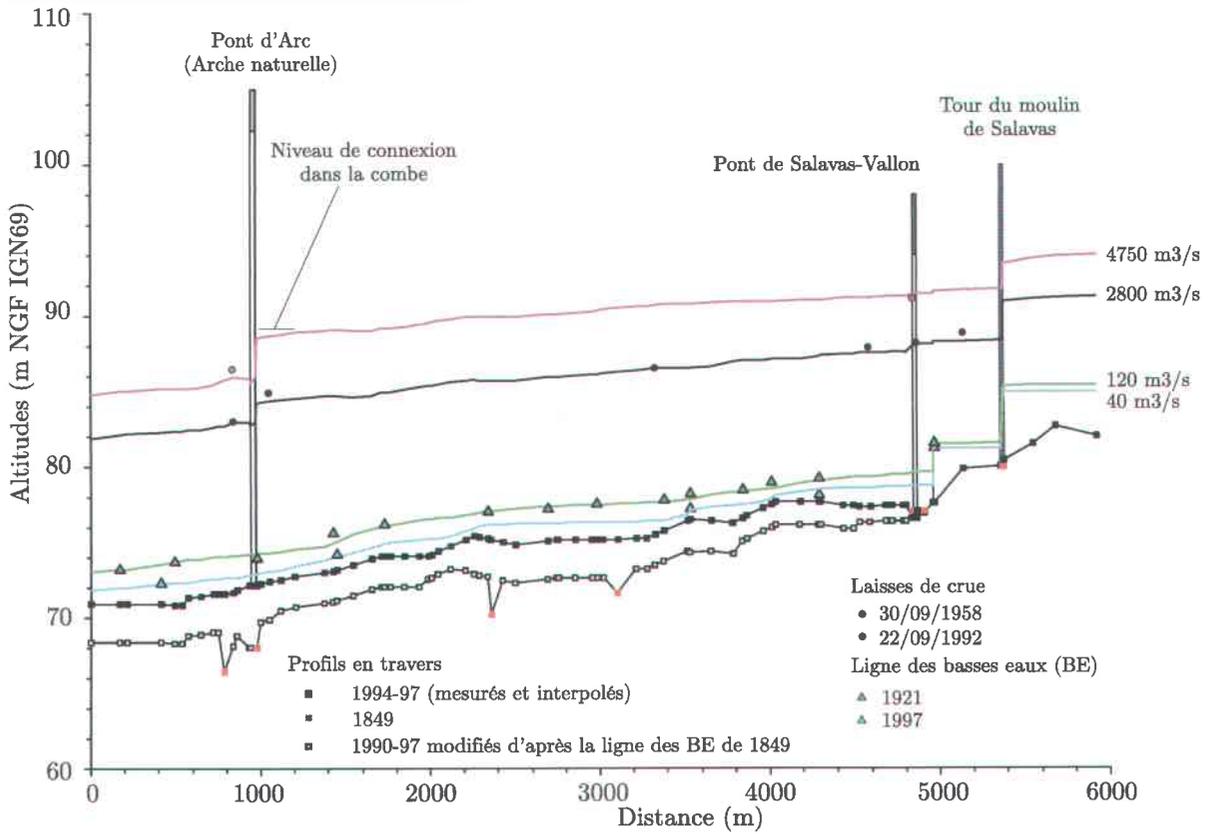


FIG. 5.10 – Profil en long de l'Ardèche à Vallon, topographie actuelle (1994-97)

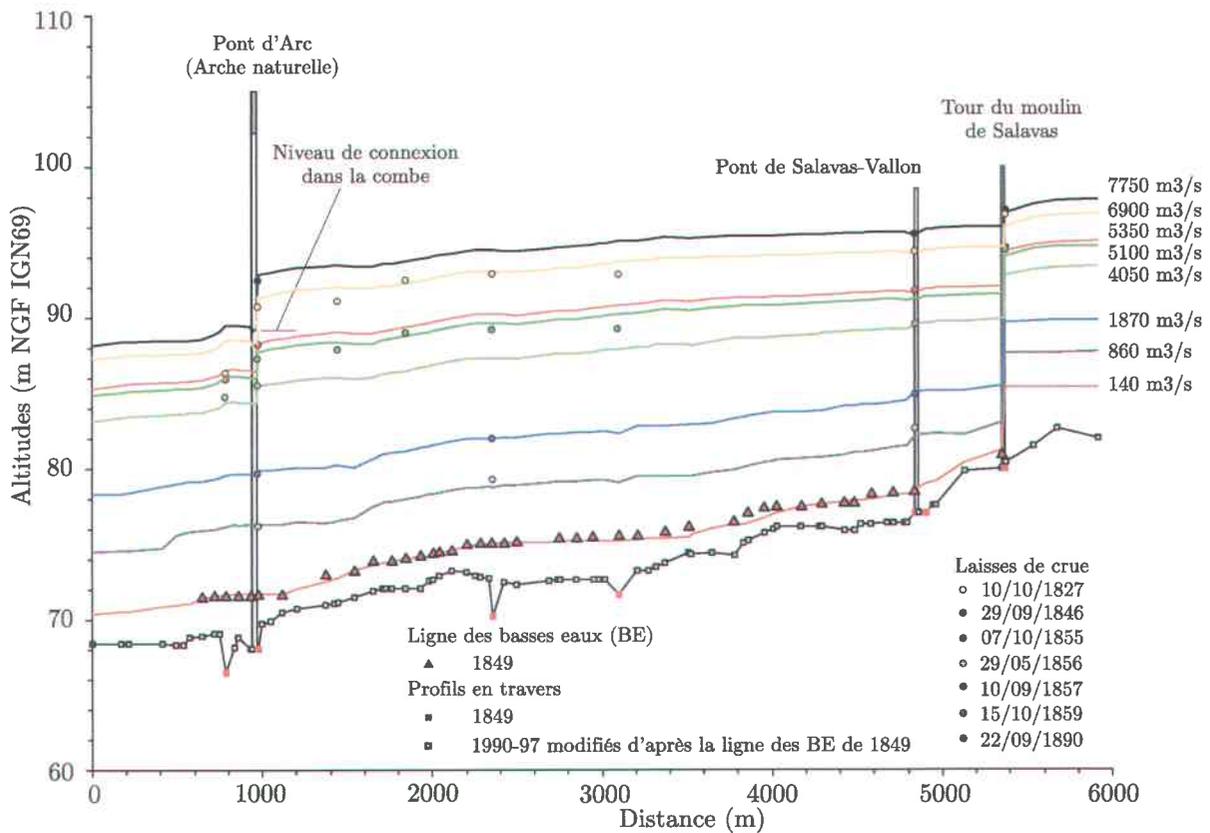


FIG. 5.11 – Profil en long de l'Ardèche à Vallon, topographie ancienne (1849)

5.4.1.2 Modélisation des crues historiques

Une fois le modèle actuel réalisé, la première démarche a consisté à localiser géographiquement l'ensemble des informations anciennes : levés de ligne des basses eaux et sections en travers de 1849, laisses de crues historiques. Il s'agit là d'une démarche délicate réalisée dans le plan à partir de repères fixes (moulin de Salavas, pont suspendu et arche naturelle) et en altitude suivant les corrections présentées au tableau (4.3), p. 129.

Septs profils en travers de 1849 ont été intégrés dans la géométrie de 1990-1997 qui a ensuite été progressivement modifiée pour obtenir la ligne d'eau observée avec le débit de basses eaux jaugé au Pont d'Arc (Combier, 1857c). La figure (5.10), p. 187, présente également la comparaison du fond des lits de 1994-97 et de 1849. Le secteur amont, entre le moulin de Salavas et le pont d'Arc, est situé sur le socle rocheux et ne montre pas de modification (mis à part l'absence du deuxième seuil construit vers 1899). Le secteur aval, essentiellement constitué de sable, montre par contre un exhaussement du lit depuis 1849 de l'ordre de 2 à 3 mètres. On notera que les sections en travers anciennes apparaissent plus bas que les sections de 1990-97 modifiées. Il s'agit là d'un effet dû au fait que les premières sont des sections réelles alors que les secondes présentent un lit mineur théorique rectangulaire. Dans tous les cas les surfaces d'écoulement sont équivalentes, ce ne sont que les points bas qui diffèrent. Cet exhaussement peut s'expliquer par une baisse de l'hydraulicité au XX^e siècle (cf. §5.5.1, p. 203).

Le calage de 7 crues historiques montre une bonne adéquation (cf. tableau 5.6 et figure 5.11, p. 187).

TAB. 5.6 – *Erreurs relatives maximales entre les hauteurs modélisées et les laisses des crues historiques à Vallon*

Crue	erreur
1827	< 7 % à l'amont de l'arche < 17 % à l'aval de l'arche
1846	< 6 %
1855	< 3 %
1856	< 11 %
1857	< 6 %
1859	< 4 %
1890	< 3 %

On notera la cohérence de la perte de charge singulière estimée au niveau de l'arche de pont d'Arc (coefficients de contraction/expansion fixés par la géométrie). Cette observation s'applique particulièrement aux crues postérieures à l'installation des échelles qui ont été a priori mieux suivies (limnigrammes des crues au pont de Vallon et au Pont d'Arc pour 1857 et 1859, uniquement au pont de Vallon pour 1890).

La figure (5.12), p. 189, présente la courbe de tarage obtenue à l'échelle de Vallon en régime permanent (courbe 0). Cette figure résume également les différents tests réalisés pour évaluer la sensibilité du modèle aux paramètres de calage. Les éléments les plus importants pour l'estimation du débit de crue sont, par ordre décroissant :

- Les coefficients de rugosité (courbe 1). Ils ont été modifiés de ± 25 % pour rester dans une gamme réaliste (Strickler de 15 à 26 pour les plus forts débits et de 24

à 40 pour les plus faibles) ce qui conduit à une incertitude relative sur les débits de l'ordre de $\pm 15\%$. Ce résultat est conforme à ceux de Wohl (1998) qui, pour une même variation de Strickler ($\pm 25\%$) et une pente du lit du même ordre de grandeur, observe un changement maximum du débit de 20% .

- La topographie (courbe 2). L'altitude du fond des sections en travers au niveau de l'arche a été modifiée de ± 4 mètres. La valeur inférieure est issue d'une remarque de l'IOPC Combiér (1856) qui estime l'épaisseur de la couche de sable à 4 mètres sous l'arche d'après l'altitude de l'affleurement de la roche mère à l'aval. La valeur supérieure est théorique et peut être vue comme une obstruction partielle de l'arche par des embâcles.
- Les coefficients de contraction/expansion (courbe 3). L'arche provoque un remous qui, pour les forts débits, remonte au-delà du pont de Vallon.
- La condition aval (courbe 4). La pente de 0.096% utilisée pour déterminer la hauteur normale a été modifiée de $\pm 25\%$.

La courbe notée T représente l'effet cumulé des différents tests (borne supérieure variant de $+20$ à $+35\%$ du débit et borne inférieure de -25 à -27% du débit). Ces résultats sont à rapprocher de ceux de Jarrett (1984, 1987) et Kirby (1987) qui placent dans l'ordre la topographie et les coefficients de rugosité en tête des paramètres influençant l'estimation des débits de crue (cf. §2.2.2.2, p. 36). Dans notre cas la topographie est située en deuxième position car seule la partie aval du modèle a été modifiée.

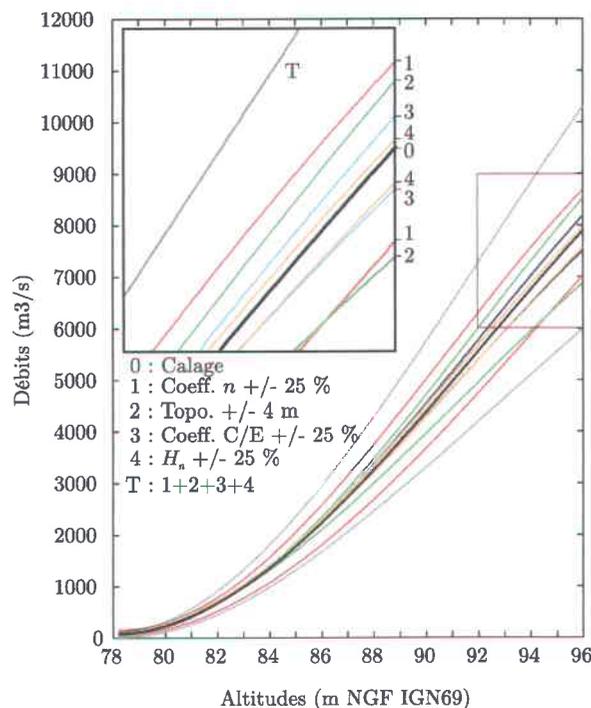


FIG. 5.12 – Courbe de tarage en régime permanent à l'échelle de Vallon (n° 55) et tests de sensibilité du modèle aux paramètres de calage

Nous avons pris le parti de ne pas modéliser la Combe au niveau du Pont d'Arc. La connection, qui s'établit à une altitude de 88.83 m NGF, serait susceptible d'augmenter

la section d'écoulement et d'influencer l'estimation des débits pour les crues de 1827 et 1890. Toutefois nous disposons d'une laisse pour la crue de 1827 qui se situe à l'aval du modèle, après la réunion des eaux provenant à la fois de l'arche et de la Combe (cf. figure 5.6, p. 184). Dans tous les cas de figure simulés ($n \pm 25\%$, pente aval $\pm 25\%$, etc.), la ligne d'eau calculée se situe au-dessus de cette laisse. Ce résultat tend à confirmer que le débit transitant dans la Combe n'est pas significatif.

Enfin nous avons testé la sensibilité du modèle à la condition amont. Une modélisation en régime transitoire a donc été réalisée à cet effet. Le principe de la démarche est le suivant :

- i)* Les hydrogrammes d'entrée des crues de 1857 et 1859 ont été déterminés en ne prenant en compte que la partie du modèle comprise entre le pont de Vallon et l'arche de pont d'Arc. Les limnigrammes enregistrés aux échelles n^{os} 55 et 58 (Morlière, 1857a et s.n., 1859) ont alors respectivement servi de conditions limites amont et aval (cf. figures 5.13 et 5.14 p. 191).
- ii)* Les hydrogrammes déterminés ci-avant ont été ensuite exploités sur l'ensemble du modèle pour estimer les pertes de charge singulières au niveau de l'arche (cf. figures 5.13 et 5.14 p. 191, calage de l'altitude à l'échelle n^{os} 59). Il s'est avéré en effet que les coefficients d'expansion/contraction n'étaient plus pris en compte par le logiciel HEC-RAS en mode transitoire. Les pertes de charge singulières ont donc été représentées par des pertes de charge linéaires additionnelles (coefficients de Strickler) au niveau des sections de l'arche.
- iii)* Différents tests de sensibilité ont été effectués : (a) sensibilité à la forme de l'hydrogramme (cf. figure 5.15, p. 191). Plus celui-ci est pointu, plus le phénomène d'hystérésis devient marqué. La différence constatée sur les débits estimés, en fonction des formes théoriques d'hydrogramme, est assez faible (de l'ordre de 3 %). On notera par contre que les débits estimés en régime transitoire sont significativement plus élevés qu'en mode permanent (+ 1500 m³/s pour la crue de 1890 dont l'altitude est de 95.5 m NGF). (b) sensibilité aux coefficients de rugosité et à la perte de charge singulière au niveau de l'arche (cf. figure 5.16, p. 191).

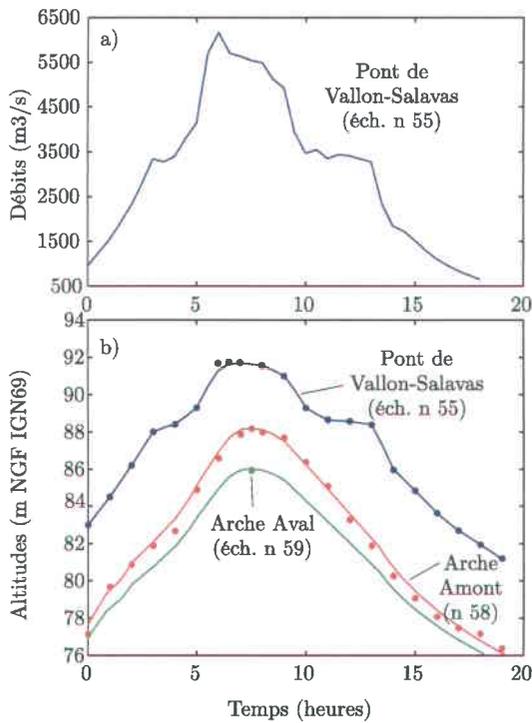


FIG. 5.13 – Crues de 1857: a) Hydrogramme estimé au pont de Vallon, b) limnigrammes observés (points) et simulés (ligne) aux différentes échelles

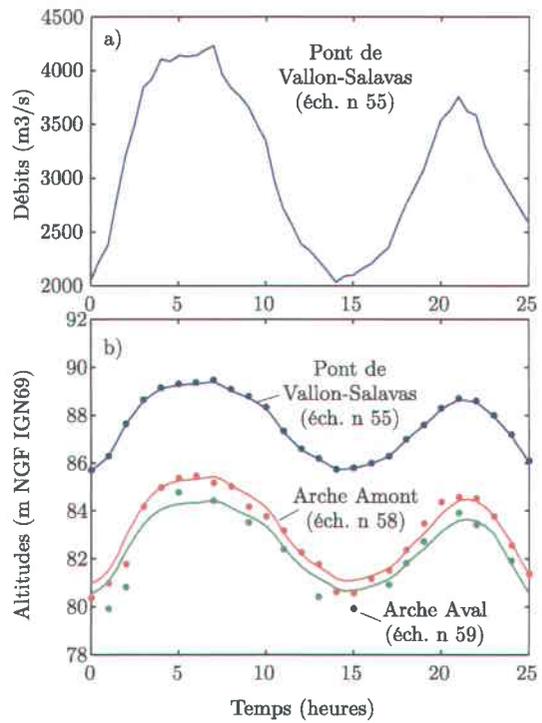


FIG. 5.14 – Crues de 1859: a) Hydrogramme estimé au pont de Vallon, b) limnigrammes observés (points) et simulés (ligne) aux différentes échelles

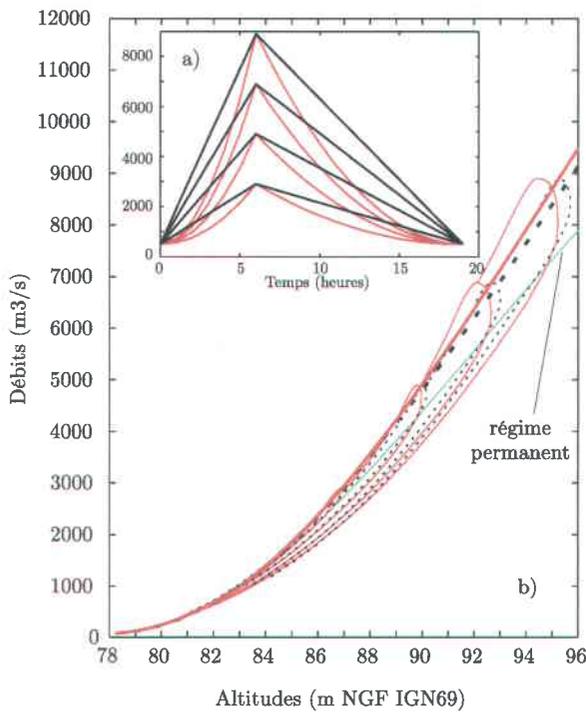


FIG. 5.15 – Modélisation en régime transitoire: a) Hydrogrammes théoriques testés, b) Courbe de tarage à l'échelle de Vallon

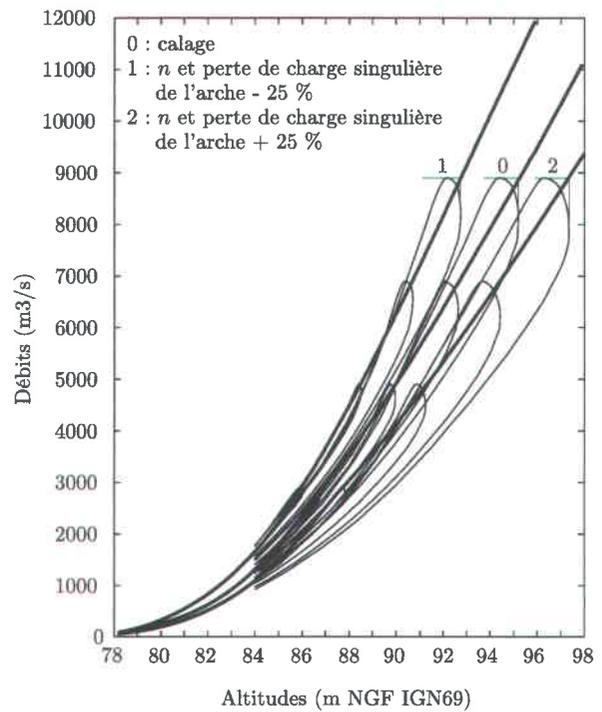


FIG. 5.16 – Modélisation en régime transitoire: sensibilité de la courbe de tarage de Vallon aux coefficients de rugosité

5.4.1.3 Courbes de tarage retenues à Vallon

Les figures (5.17) et (5.18), p. 192, présentent les courbes de tarage $Q(Z)$ établies à la station de Vallon (n° 55) :

- La première courbe s'applique à la période antérieure à 1921. Elle correspond à l'archivage sous forme d'un polynôme ($Q = aZ^3 + bZ^2 + cZ + d$) des résultats des simulations en régime permanent (cf. courbe 0 de la figure 5.12, p. 189). On observe une très bonne adéquation avec les jaugeages aux flotteurs réalisés par la méthode Fargue (1896) (les barres représentent les précisions considérées à ± 0.1 m sur l'altitude et à $\pm 25\%$ sur le débit jaugé). Nous avons retenu pour la courbe de tarage un niveau d'incertitude relative $\Delta Q/Q$ de $\pm 25\%$ pour la partie inférieure à $2000 \text{ m}^3/\text{s}$ qui est validée par les jaugeages. Pour la partie supérieure ($>2000 \text{ m}^3/\text{s}$) les bornes supérieure et inférieure correspondent aux estimations respectivement les plus fortes et faibles issues de l'ensemble des tests de sensibilité. Ainsi la borne supérieure a une incertitude relative $\Delta Q/Q$ variant de $+25\%$ à $+50\%$ donnée en régime transitoire par la courbe notée 1 de la figure (5.16), p. 191. La borne inférieure a une incertitude relative $\Delta Q/Q$ variant de -25% à -27% donnée en régime permanent par la courbe notée T de la figure (5.12), p. 189.
- La deuxième courbe s'applique à la période 1921-2001. Elle correspond à l'archivage des résultats sous forme de deux polynômes dont les coefficients sont fonction de l'altitude Z . Très peu de jaugeages sont disponibles, les plus récents correspondent à des débits d'étiage. Nous avons volontairement arrêté la courbe à une altitude de 92 m NGF car il semble probable que pour les crues supérieures la section d'écoulement tende vers celle de la topographie ancienne (fond sableux).

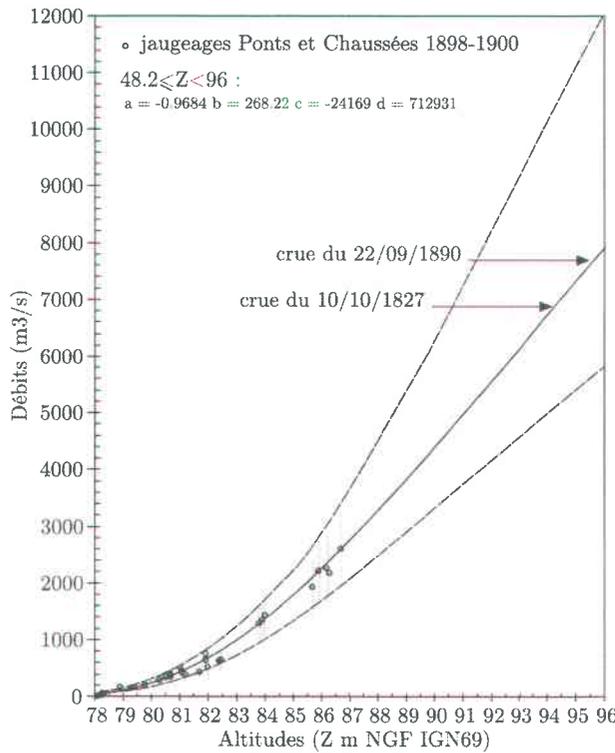


FIG. 5.17 – Courbe de tarage à l'échelle de Vallon (n° 55) avant 1921

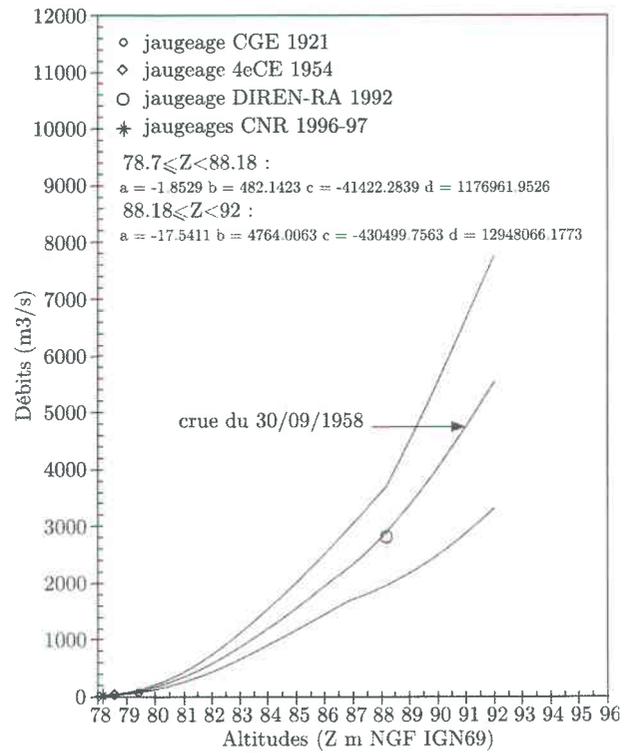


FIG. 5.18 – Courbe de tarage à l'échelle de Vallon (n° 55) période 1921-2001

5.4.2 Secteur de Saint Martin

Pour le secteur de Saint Martin nous avons repris et étendu jusqu'à Sauze la modélisation hydraulique réalisée par Alain Recking (Coeur et al., 2001) à partir des données que nous avons collectées dans le cadre du projet HISTORISQUE-Ardèche. D'après Lang et al. (2001): « La sortie des gorges (sur un linéaire d'environ 2500 m), entre Sauze et l'aval de St-Martin présente de nombreux avantages (cf. figure 5.19, p. 193): (1) des données anciennes sont disponibles; (2) sur cette zone l'Ardèche ne reçoit pas d'affluent ce qui limite les incertitudes induites par les problèmes de concomitance des crues; (3) la partie de la rivière comprise entre l'amont de Sauze (sortie des gorges) et l'aval de St-Martin a creusé son lit dans la roche ce qui limite considérablement les incertitudes liées aux modifications de la topographie; (4) le seul ouvrage important est un pont suspendu sans aucune interférence possible avec les écoulements; (5) une étude de sensibilité (décrite plus loin) a montré que cette zone n'est pas influencée par la confluence Rhône/Ardèche située 10 km en aval ».

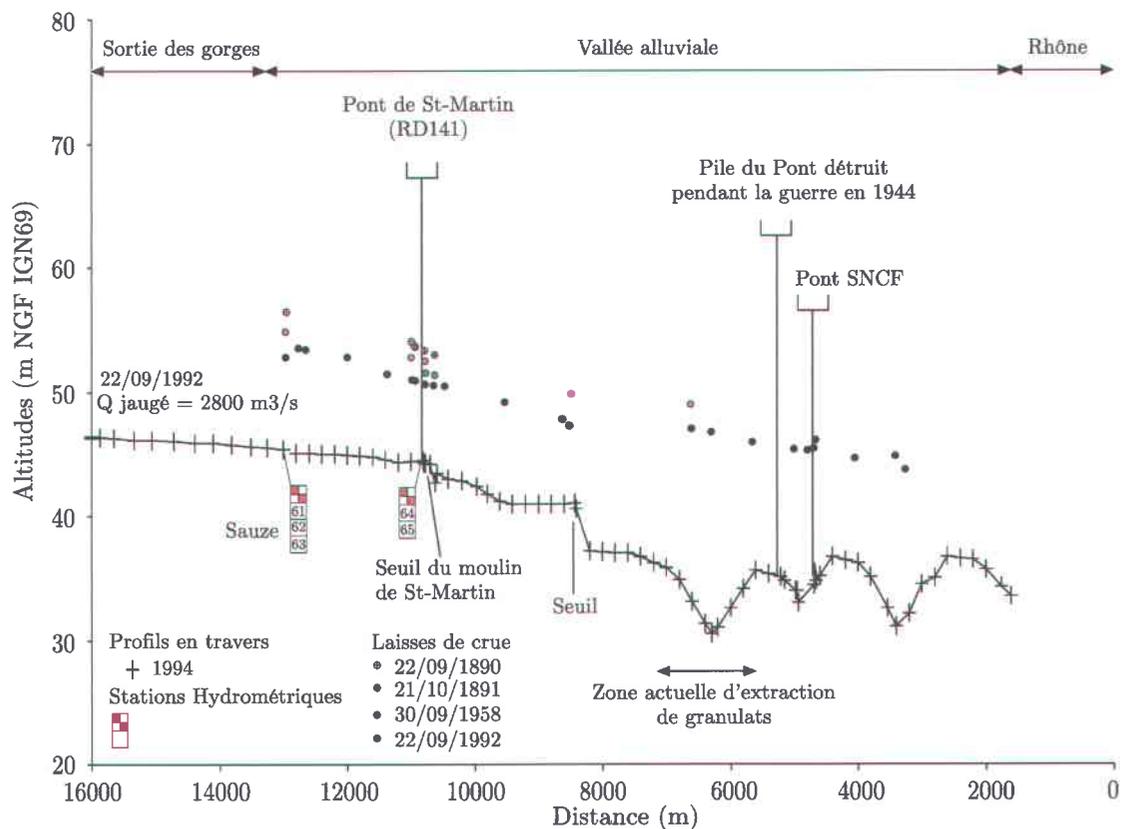


FIG. 5.19 – Profil en long de l'Ardèche à St-Martin

« Pour justifier du choix de ce tronçon, un modèle de simulation des 12 km de rivière reliant les gorges au Rhône a été construit à partir de 71 profils en travers du lit mineur (des plans photogrammétriques ont été utilisés pour prolonger ces sections en lit majeur). Sur ce secteur les pentes sont dans l'ensemble faibles (0 à 0.15 %) voire négatives par endroit et la partie aval du profil est très perturbée suite aux extractions de granulats effectuées dans le lit mineur. On dénombre plusieurs ouvrages dont les principaux sont

le pont SNCF et le pont de la RN86, tous deux prolongés par d'imposantes digues en travers de la vallée. Le secteur à l'aval de St-Martin a assez fortement évolué au cours des deux derniers siècles. On note une configuration du cours d'eau en tresses sur la carte de Cassini datant du XVIII^e siècle (cf. figure 4.10, p. 127), l'Ardèche a depuis été confinée dans un chenal unique. Le lit de l'Ardèche présente une granulométrie de rivière à galets. Le lit moyen est dans l'ensemble occupé d'une végétation assez dense de type forêt alluviale; il est directement prolongé dans la partie amont par des versants abrupts (coteaux). A l'aval il est prolongé par un lit majeur occupé essentiellement par l'agriculture, et pouvant atteindre une largeur maximum de 2000 m environ ».

« Le code de calcul employé pour la partie qui s'étend de la station de St-Martin au Rhône est celui du logiciel MAGE (Cemagref), permettant un calcul 1D en réseau maillé par résolution d'un schéma implicite. Les données de calage utilisées ont été celles recueillies à l'occasion de la crue du 22 septembre 1992: laisses de crues disponibles sur tout le linéaire étudié, débit jaugé par la DIREN à Sauze à 2800 m³/s, condition aval donnée par la mesure de la cote atteinte à l'échelle de Pont Saint-Esprit (43.36m). Le calage effectué sur ces données a été très satisfaisant (moins de 5% d'erreur sur l'ensemble des cotes calculées et observées) avec des coefficients de Strickler de 30 en lit mineur, 10 en lit moyen (végétation de type forêt alluviale) et 15 en lit majeur (terres agricoles). Une étude de sensibilité a été effectuée pour juger de la validité du modèle ainsi construit pour simuler des événements autres que la crue de 1992: sensibilité à la condition aval (différentes cotes du Rhône à Pont Saint Esprit ont été utilisées pour simuler l'effet d'une concomitance de crue), sensibilité à la condition amont (calcul en transitoire pour juger des effets des écrêtements locaux de l'hydrogramme, comparé à un calcul en régime permanent), sensibilité aux déformations de la géométrie (pour juger des imprécisions apportées par la qualité des données utilisées) et enfin sensibilité aux valeurs de calage des coefficients de Strickler ».

« Les résultats obtenus montrent que sur le secteur de St-Martin: (1) la sensibilité aux cotes élevées du Rhône n'existe plus. De toutes manières les observations disponibles tendent à indiquer qu'il n'y a jamais concomitance de crue entre ces deux cours d'eau: les crues de type Cévenole de l'Ardèche sont évacuées avant l'arrivée de celles du Rhône (Safège, 2000); (2) la sensibilité à la condition amont est extrêmement faible (moins de 4 % sur les cotes), les zones de stockage (et donc d'écrêtement) étant situées en aval (remblais routiers); (3) la sensibilité à la géométrie est inférieure à 1 % (socle rocheux); (4) la sensibilité aux valeurs des coefficients de Strickler du lit mineur est par contre très forte (de l'ordre de $\pm 35\%$ si on fait varier ce coefficient dans la fourchette communément admise de $K=25$ à 35 pour ce type de rivière). Tout le problème de ce type de démarche est de pouvoir juger de la validité du modèle lorsqu'il est utilisé très loin des conditions de calage (la crue de 1992 avait été estimée de période de retour 5 ans par Sogreah alors que les crues que l'on cherche à reconstituer sont beaucoup plus fortes). On note cependant qu'une simulation de la crue de 1958 donne une ligne d'eau cohérente sur trois points disponibles à plusieurs kilomètres d'intervalle ».

Les figures (5.20) et (5.21), p. 195, présentent les courbes de tarage établies à la station de St-Martin (n° 64):

- La première courbe s'applique à la période antérieure à 1941 où un seuil existait à l'aval du pont (cf. §5.3.1.2, p. 176). Elle a été établie à partir des jaugeages que nous avons pu collecter sur la période 1857-1926 (formule de type $Q = a(h - h_0)^b$) et

5.4.3 Chroniques de débit retenues

Les débits de crue ont finalement pu être déterminés à partir des hauteurs collectées et des différentes courbes de tarage. La figure (5.23), p. 197, présente la comparaison des débits de crue estimés à Vallon et Sauze ou St-Martin. Nous avons ajusté par les moindres carrés un coefficient de proportionnalité a entre les débits Q_v de la station amont et ceux Q_s des deux stations aval ($Q_s = Q_v \cdot a$). La relation est globalement bonne (coefficient de corrélation $r = 0.96$). Le coefficient a peut être exprimé comme une fonction du rapport des surfaces de bassin versant $a = \left(\frac{S_s}{S_v}\right)^n$. Sans information locale on utilise généralement $n = 0.8$ (cf. méthode CRUPEDIX du CTGREF, 1980-1982), ici la puissance obtenue est de 0.418 :

$$Q_s = Q_v \cdot \left(\frac{S_s}{S_v}\right)^{0.418} \quad (5.1)$$

Ce résultat, avec une puissance plus faible, est envisageable compte tenu du peu d'apport existant entre les secteurs de Vallon et de St-Martin. On note par ailleurs que les différentes courbes de tarage conduisent à des estimations identiques pour la crue de 1890, et voisines de la relation de proportionnalité pour la crue de 1827. Cette observation vient confirmer l'hypothèse d'un écoulement non significatif dans la combe du Pont d'Arc lors des crues débordantes.

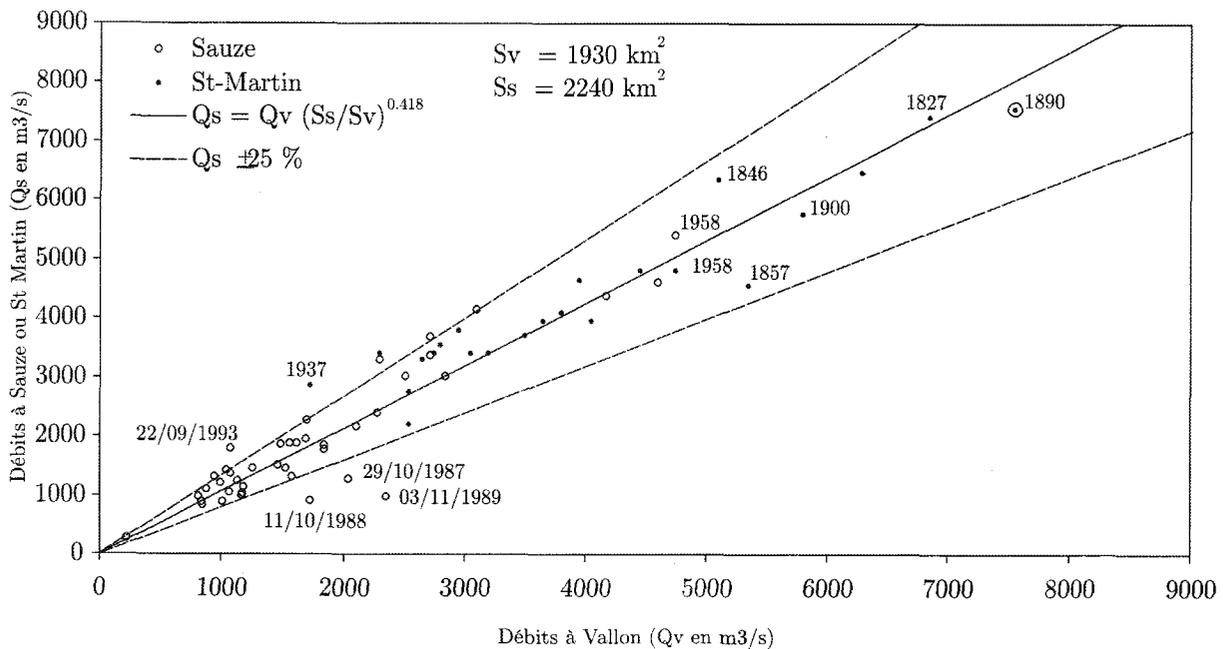


FIG. 5.23 – Comparaison des débits de crue estimés à Vallon, Sauze et St-Martin

5.4.3 Chroniques de débit retenues

Les débits de crue ont finalement pu être déterminés à partir des hauteurs collectées et des différentes courbes de tarage. La figure (5.23), p. 197, présente la comparaison des débits de crue estimés à Vallon et Sauze ou St-Martin. Nous avons ajusté par les moindres carrés un coefficient de proportionnalité a entre les débits Q_v de la station amont et ceux Q_s des deux stations aval ($Q_s = Q_v \cdot a$). La relation est globalement bonne (coefficient de corrélation $r = 0.96$). Le coefficient a peut être exprimé comme une fonction du rapport des surfaces de bassin versant $a = \left(\frac{S_s}{S_v}\right)^n$. Sans information locale on utilise généralement $n = 0.8$ (cf. méthode CRUPEDIX du CTGREF, 1980-1982), ici la puissance obtenue est de 0.418 :

$$Q_s = Q_v \cdot \left(\frac{S_s}{S_v}\right)^{0.418} \quad (5.1)$$

Ce résultat, avec une puissance plus faible, est envisageable compte tenu du peu d'apport existant entre les secteurs de Vallon et de St-Martin. On note par ailleurs que les différentes courbes de tarage conduisent à des estimations identiques pour la crue de 1890, et voisines de la relation de proportionnalité pour la crue de 1827. Cette observation vient confirmer l'hypothèse d'un écoulement non significatif dans la combe du Pont d'Arc lors des crues débordantes.

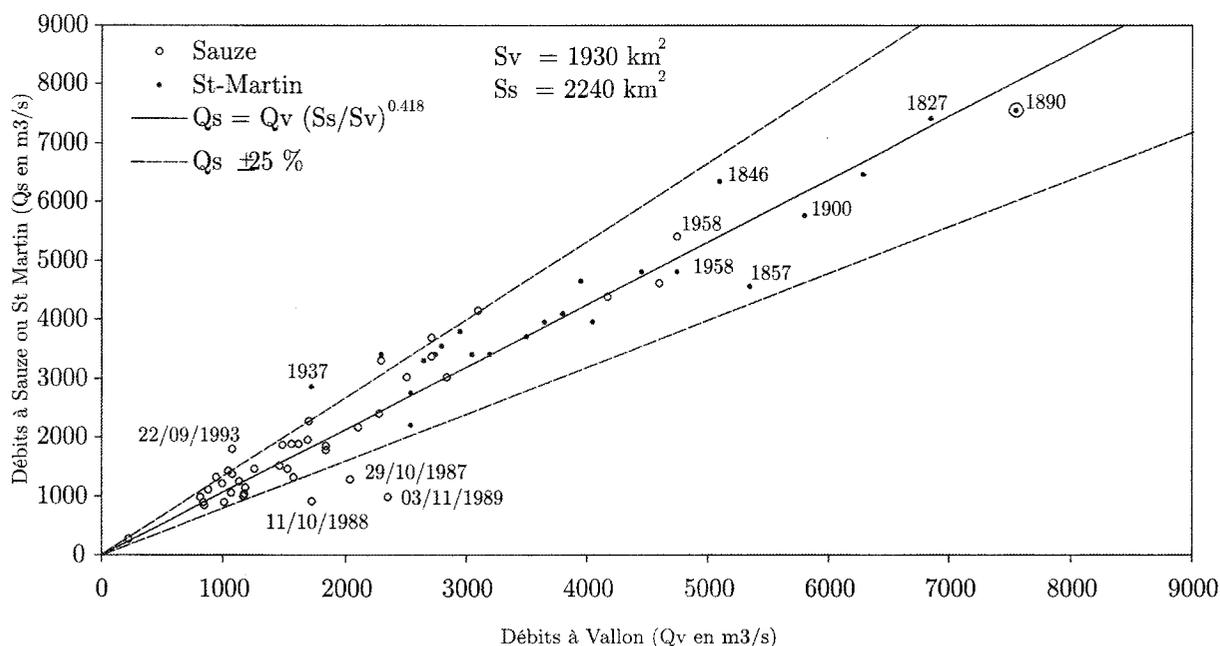


FIG. 5.23 – Comparaison des débits de crue estimés à Vallon, Sauze et St-Martin

Le tableau (5.7), p. 198, montre que nos estimations des débits de crue sont très proches de celles de Pardé (1925c, 1942, 1953b) qui a exploité les jaugeages des Ponts et Chaussées et l'extrapolation de Delemer (1904). Dans son article publié dans la *Houille Blanche* il revoit à la baisse ses estimations (Pardé et Beauregard (de), 1959).

TAB. 5.7 – Comparaison entre les débits de crue (m^3/s) estimés à Vallon par Maurice Pardé et ceux issus du modèle hydraulique

Dates des crues	Pardé (avant 1958)	Pardé (après 1958)	Modèle
10/10/1827	6800	6000	6850
22/09/1890	7500	≤6500	7550
28/09/1900	5600	≤5500	5800
16/10/1907	4300	-	4450
08/10/1933	3700	-	3500
10/11/1951	3600	-	3500
30/09/1958	-	≤4600	4750
04/10/1958	-	≤3900	3850

La liste complète des débits de crue reconstitués et de leur incertitude est présentée au tableau (5.8) p. 200. Les crues qui apparaissent éloignées de la relation de proportionnalité établie ci-avant ont fait l'objet d'une attention particulière (notamment celles en dehors des limites subjectives $\pm 25\%$ de la figure 5.23). Nous avons indiqué dans le tableau (5.8) tous les éléments ayant permis d'établir chacune des données (hauteur : colonne H, altitude du zéro de l'échelle : colonne Z0, courbe de tarage utilisée : colonne C, etc.). On s'intéressera particulièrement aux colonnes S et N qui respectivement précisent l'origine de la hauteur d'eau utilisée et les éventuelles corrections apportées (lorsque la comparaison des temps de propagation fait apparaître que le maximum n'a pas été observé, ex : crue de 1947 ; lorsque les études réalisées après coup sur les niveaux maximum atteints révèlent des hauteurs supérieures à celles relevées par les observateurs, ex : crue du 19/11/1951, etc.). L'ensemble des lacunes a pu être comblé soit en transférant les débits d'une station à l'autre soit par le biais des seuils de non dépassement dont la validité s'appuie également sur les données pluviométriques (absence d'événement sur les périodes de lacune hydrométrique).

On notera que l'incertitude ΔH des cotes de crues à St-Martin antérieures à 1890 a été estimée à ± 0.70 m (cf. figure 5.5, p. 181), de même que celle des cotes de crues postérieures à 1890, reconstituées d'après la cote à Vallon. Cette incertitude est combinée avec celle de la courbe de tarage à St-Martin (incertitude $(\Delta Q/Q)_1$ variant de $\pm 25\%$ à $\pm 40\%$ en fonction du débit, cf. figures 5.20 et 5.21, p. 195), à partir d'un calcul d'erreur relative au premier ordre, qui conduit à une incertitude $(\Delta Q/Q)_2$ variant de ± 60 à 80% :

$$Q = a(H - H_0)^b \text{ et } (\Delta Q/Q)_2 = \Delta a/a + b \cdot \Delta H / (H - H_0) \quad (5.2)$$

avec : $\Delta a/a = (\Delta Q/Q)_1$ et $\Delta b/b \approx 0$

Au final cinq seuils de non dépassement permettent de garantir l'exhaustivité des crues à Vallon : $6800 \text{ m}^3/\text{s}$ (hypothèse 1 : crue de 1644, seuil de 16 m en cote) ou $5650 \text{ m}^3/\text{s}$ (hypothèse 2 : crue de 1772, seuil de 14 m en cote) sur la période 1645-1771, $5650 \text{ m}^3/\text{s}$

sur la période 1772-1826 (crue de 1772, seuil de 14 m en cote), 4750 m³/s sur la période 1827-1891 (seuil de 12.5 m en cote), 2250 m³/s sur la période 1892-1979 (seuil de 8 m en cote) et enfin 810 m³/s sur la période 1980-2001 d'enregistrement en continu effectif (seuil d'alerte: 4 m en cote). Ce dernier seuil n'est exploité ensuite dans l'analyse fréquentielle que pour vérifier la stationnarité des événements, les ajustements sont en effet réalisés avec l'approche exploitant les maxima annuels. On notera que certaines crues de la période 1827-1891 sont inférieures au seuil. Elles ont été retenues car, comme les autres valeurs de cette période, il s'agit de maxima annuels qui sont par ailleurs supérieurs à 2250 m³/s (8 m à l'échelle, seuil physique de perception supposé garantir l'archivage du maximum réel des crues). Ces cinq seuils de non dépassement ont été transférés à St-Martin par le biais de la relation (5.1).

L'indépendance entre les événements a été assurée par un critère d'espacement des pointes de crue de 1 jour (durée moyenne des hydrogrammes de crue), et un critère de redescente de l'hydrogramme de crue en dessous de 150 m³/s (valeur qui représente plus de 75 % des débits moyens journaliers de l'Ardèche, cf. figure 4.4, p. 113).

TAB. 5.8 – Liste des crues de l'Ardèche à Vallon, Sauze et St-Martin

Station de Vallon (n 55)													Station de St-Martin (n 64)												
aaaa	mm	jj	hh	min	H	Z0	C	Q	Qsup	Qinf	S	N	aaaa	mm	jj	hh	min	H	Z0	C	Q	Qsup	Qinf	S	N
1644	09	03			16.00	78.20	1	6800	10300	5050	1		1644	09	03										
seuil 16.00 78.20 1 6800 a1													seuil 7250 a2												
Période ou 5630													Période ou 6000												
1645	01	01	00	00									1645	01	01	00	00								
1771	12	31	23	59									1771	12	31	23	59								
seuil 14.00 78.20 1 5650 b1													seuil 6000 b2												
Période													Période												
1772	01	01	00	00									1772	01	01	00	00								
1826	12	31	23	59									1826	12	31	23	59								
1772	09	09			14.00	78.20	1	5650	8350	4250	1		1772	09	09						6000	8900	4500	c2	
seuil 12.50 78.20 1 4750 c1													seuil 5050 d2												
Période													Période												
1827	01	01	00	00									1827	01	01	00	00								
1891	12	31	23	59									1891	12	31	23	59								
1827	10	10	00	30	16.10	78.20	1	6850	10400	5100	1		1827	10	10			8.35	45.70	3	7400	10350	4450	16	
1846	09	29	00	00	13.10	78.20	1	5100	7500	3850	1		1846	09	29			7.75	45.70	3	6350	8850	3800	17	e2
1853	10	29						3750	5350	2900		d1,e1	1853	10	29	13	00	6.25	45.70	3	4000	5650	2400	18	f2
1857	09	10	19	30	13.52	78.20	1	5350	7900	4050	2		1857	09	10	22	30	6.60	45.70	3	4550	6350	2700	2	f2
1859	10	15	00	00	11.27	78.20	1	4050	5800	3100	3	e1	1859	10	15			6.20	45.70	3	3950	5500	2400	3	f2,g2
1861	07	15	22	00	9.00	78.20	1	2800	3850	2150	4	e1	1861	07	15						3000	5250	950		c2,f2
1878	10	22	00	00	14.50	78.20	1	5950	8850	4450	5		1878	10	22						6350	10100	2700		c2
1888	12	31			9.40	78.20	1	3000	4150	2300	6	e1	1888	12	31						3200	4400	2450		c2,f2
1890	09	22	12	00	17.30	78.20	1	7550	11550	5550	5		1890	09	22	15	00	8.45	45.70	3	7550	10600	4550	19	
1891	10	21	07	00	11.10	78.20	1	3950	5600	3000	7	e1	1891	10	21			6.70	45.70	3	4650	6550	2800	5	f2

Station de Sauze (n 61)												
aaaa	mm	jj	hh	min	H	Z0	C	Q	Qsup	Qinf	S	N
1890	09	22	15	00	10.45	46.00	5	7550	10600	4550	21	

LEGENDES :

aaaa : Année	C : numéro de la courbe de tarage	Q : Débits estimés en m ³ /s
mm : Jours	1 - Courbe à Vallon avant 1921	(arrondi à 50 m ³ /s près avant 1980, à 10 m ³ /s près de 1980 à 2001)
hh : Heure	2 - Courbe à Vallon période 1921-2001	
mim : minute	3 - Courbe à St-Martin avant 1941	Qsup : Borne supérieure du débit
H : Hauteur à l'échelle	4 - Courbe à St-Martin période 1941-2001	(incertitude de la courbe de tarage)
Z0 : Altitude de l'échelle (m NGF IGN69)	5 - Courbe à Sauze	Qinf : Borne inférieure du débit
		S : Source de l'information
		N : Notes

SOURCES :

1 Combiér (1849, 1857c, 1857d, 1857e, 1857f, 1857g)	21 Barrière (1959)
2 Morlière (1857a, 1857b, 1857c)	22 Barrière (1958)
3 s.n. (1859)	23 Banque HYDRO Limnigraphe Sauze (fichier : SauzeHMM.text)
4 Julien (1861)	24 Banque HYDRO Limnigraphe Sauze (fichier : SauzeCTH2.text)
5 Lemoine (1896)	
6 Vaschalde (1890)	
7 Vaschalde (1890) et Pardé (1925a) pour l'heure	
8 Delemer (1904)	
9 Pardé (1925a)	
10 Météo France (1995a, 1995b)	
11 Relevés d'observateurs + rapports annuels + tableau de synthèse (fichier : VallonCTH1.txt)	
12 Pardé (1942)	
13 Pardé (1953)	
14 Gigon (2002)	
15 Banque HYDRO Limnigraphe Vallon (fichier : VallonCTH2.txt)	
16 Mr le curé de St-Martin d'Ardèche (1959a, 1959b)	
17 Combiér (1857f)	
18 Perret (1857)	
19 Lemoine (1896) et Pardé (1925a) pour l'heure	
20 Relevés d'observateurs + rapports annuels + tableau de synthèse (fichier : StMartinCTH1.txt)	

NOTES :

a1	Seuil à partir des crues de 1644 ou 1772
b1	Seuil à partir de la crue de 1772
c1	Seuil d'après l'ensemble des sources
d1	Débit transféré depuis St-Martin
e1	Maximum annuel : inf. au seuil mais sup. à 8.00 m
a2	Seuil à partir des crues de 1644 ou 1772 depuis Vallon
b2	Seuil à partir de la crue de 1772 transférée depuis Vallon
c2	Débit transféré depuis Vallon
d2	Seuil d'après l'ensemble des sources transféré depuis Vallon
e2	Problème temps de propagation, heure 00:30 supprimée
f2	Maximum annuel : inf. au seuil mais sup. à 5 m
g2	Problème temps de propagation, heure 00:00 supprimée

TAB. 5.8 (suite) – Liste des crues de l'Ardèche à Vallon, Sauze et St-Martin

Station de Vallon (n 55)													Station de St-Martin (n 64)												
aaaa	mm	jj	hh	min	H	Z0	C	Q	Qsup	Qinf	S	N	aaaa	mm	jj	hh	min	H	Z0	C	Q	Qsup	Qinf	S	N
seuil 2250 fl													seuil 5.00 45.70 3 2400 h2												
Période													Période												
1892	01	01	00	00									1892	01	01	00	00								
1979	12	31	23	59									1979	12	31	23	59								
1899	11	02	20	00	10.10	78.69	1	3650	5200	2800	8		1899	11	02	22	00	6.20	45.70	3	3950	5500	2400	8	
1900	09	28	22	00	13.80	78.69	1	5800	8650	4400	8		1900	09	29	01	00	7.40	45.70	3	5750	8050	3450	9	
1903	10	29						2600	3500	2000	d1		1903	10	29			5.30	45.70	3	2750	3600	1900	20	
1907	09	27	00	00	8.00	78.69	1	2550	3450	1950	9		1907	09	27			5.30	45.70	3	2750	3600	1900	20	
1907	10	16	21	00	11.50	78.69	1	4450	6450	3400	9		1907	10	16			6.80	45.70	3	4800	6750	2900	20	
1910	10	30			8.50	78.69	1	2800	3850	2150	10		1910	10	30						3000	5300	950	c2	
1910	12	06	17	00	9.30	78.69	1	3200	4500	2450	11		1910	12	06			5.80	45.70	3	3400	4650	2200	20	
1914	07	22	07	30	8.00	78.69	1	2550	3450	1950	11		1914	07	22						2700	4800	800	20	c2,i2
1914	11	03			8.00	78.69	1	2550	3450	1950	9		1914	11	03	18	00	5.10	45.70	3	2500	3200	1800	20	
1917	05	20						3200	4500	2450	11	d1,gl	1917	05	20	19	30	5.80	45.70	3	3400	4650	2200	20	
1924	11	29			8.80	78.69	2	2550	3300	1800	12		1924	11	29						2700	4800	800	c2	
1927	08	18			9.00	78.69	2	2650	3400	1850	12		1927	08	18						2800	5000	850	c2	
1930	06	26			9.76	78.69	2	3000	3950	2000	12		1930	06	26						3200	5650	1000	c2	
1933	09	29			8.15	78.69	2	2300	2900	1650	12		1933	09	29						2450	4350	700	20	c2,j2
1933	10	08			10.60	78.69	2	3500	4800	2250	12		1933	10	08						3700	6450	1200	20	c2,k2
1935	12	25						2350	3000	1700	11	d1,hl	1935	12	25			5.10	45.70	3	2500	3200	1800	12	
1937	11	01						2700	3500	1850	11	d1,il	1937	11	01			5.35	45.70	3	2850	3700	1950	12	
1947	02	10						2300	2900	1650	11	d1,jl	1947	02	10	16	00	4.40	45.70	4	2450	3100	1750	12	
1949	11	20	11	00	8.80	78.69	2	2550	3300	1800	11		1949	11	20						2700	3500	1900	20	c2,l2
1951	11	10			10.60	78.69	2	3500	4800	2250	13		1951	11	10	15	00	5.80	45.70	4	3700	5100	2300	16	
1951	11	19			8.50	78.69	2	2450	3100	1750	11	k1	1951	11	19						2600	3300	1850	c2	
1956	03	22						3000	4050	1950	11	d1,il	1956	03	22	06	00	5.30	45.70	4	3200	4300	2100	20	
1957	12	25	12	00	8.20	78.69	2	2300	2950	1700	11		1957	12	25	15	00	5.50	45.70	4	3400	4600	2200	16	
1958	09	30	19	30	12.20	78.69	2	4750	6650	2850	14		1958	09	30	22	30	6.70	45.70	4	4800	6700	2850	14	
1958	10	04						3850	5400	2300	11	d1,m1	1958	10	04	16	30	6.15	45.70	4	4100	5750	2450	16	
1958	12	20	07	00	9.70	78.69	2	2950	3900	2000	11		1958	12	20	06	00	5.90	45.70	4	3800	5300	2350	16	
1959	12	11	00	00	8.00	78.69	2	2250	2850	1650	11		1959	12	11						2400	3050	1750	c2	
1960	10	06	04	00	9.00	78.69	2	2650	3400	1850	11		1960	10	06	06	00	5.40	45.70	4	3300	4450	2150	20	
1960	10	23	16	00	9.30	78.69	2	2750	3600	1900	11		1960	10	23	18	30	5.48	45.70	4	3400	4600	2200	20	
1963	11	06	07	00	9.40	78.69	2	2800	3650	1950	11		1963	11	06	13	30	5.66	45.70	4	3550	4900	2250	20	
1970	10	08	00	00	10.00	78.69	2	3100	4150	2100	14		1970	10	08						3300	4400	2250	c2	
1973	12	24	09	00	8.60	78.69	2	2450	3200	1750	14		1973	12	24						2600	3400	1850	c2	
1976	08	29	22	00	9.10	78.69	2	2650	3450	1850	14		1976	08	29						2800	3650	1950	c2	
1976	09	12	14	20	9.60	78.69	2	2900	3800	1950	14		1976	09	12						3100	4050	2050	c2	
1976	11	10	18	00	10.50	78.69	2	3450	4650	2200	14		1976	11	10						3650	4950	2350	c2	
1977	01	01	17	45	8.00	78.69	2	2250	2850	1650	14		1977	01	01						2400	3050	1750	c2	
1977	10	23	20	15	12.00	78.69	2	4600	6400	2750	14		1977	10	23						4900	6800	2950	c2	
1977	12	08	12	00	8.90	78.69	2	2600	3350	1850	14		1977	12	08						2750	3550	1950	c2	

Station de Sauze (n 61)												
aaaa	mm	jj	hh	min	H	Z0	C	Q	Qsup	Qinf	S	N
1957	12	25	15	00	7.25	45.62	5	3300	4450	2150	22	
1958	09	30	22	30	9.20	45.62	5	5400	7550	3250	21	
1970	10	08			7.72	46.00	5	4150	5800	2500	23	
1977	10	23			8.12	46.00	5	4600	6450	2750	23	

NOTES :

- d1 Débit transféré depuis St-Martin
- d2 Débit transféré depuis Vallon
- f1 Seuil à partir de la place de l'église à St-Martin
- h2 Seuil à partir de la place de l'église à St-Martin
- g1 Maximum manqué (7.9 m à 17:00 et 8.1 m à 20:00)
- i2 Maximum Manqué (4.5 m à 7:00)
- h1 Maximum manqué (5.2 m à 12:00 et 5.8 m à 17:00)
- j2 Maximum Manqué (2.1 m à 7:00)
- il Maximum manqué (6.5 m à 7:00 et 6.8 m à 12:00)
- k2 Maximum Manqué (0.7 m à 7:00)
- j1 Maximum manqué (5 m à 7:00)
- l2 Maximum Manqué (4.1 m à 11:00)
- k1 Maximum manqué (8 m à 7:00), maxi d'après la source 11
- l1 Maximum manqué (2.8 m à 7:00)
- m1 Maximum manqué (9.2 m à 12:00 et 8.4 m à 17:00)

TAB. 5.8 (suite et fin) – Liste des crues de l'Ardèche à Vallon, Sauze et St-Martin

Station de Vallon (n 55)													Station de Sauze (n 61)																						
aaaa	mm	jj	hh	min	H	Z0	C	Q	Qsup	Qinf	S	N	aaaa	mm	jj	hh	min	H	Z0	C	Q	Qsup	Qinf	S	N										
				GMT+1													GMT+1																		
seuil				4.00				78.69		2		810			seuil				860																
Période													Période																						
1980	01	01	00	00														1980	01	01	00	00													
2001	12	31	23	59														2001	12	31	23	59													
1980	9	21	15	0	8.10	78.69	2	2280	2890	1660	14			1980	09	21	18	37	5.85	46.00	5	2390	3050	1720	24										
1981	12	29	6	24	5.75	78.17	2	1190	1480	890	15			1981	12	29	08	52	4.05	46.00	5	1140	1420	850	24										
1982	9	21	4	49	4.70	78.17	2	840	1040	630	15			1982	09	21	09	17	3.59	46.00	5	890	1110	670	24										
1982	11	8	19	19	12.00	78.17	2	4170	5840	2500	15			1982	11	08	21	24	7.92	46.00	5	4370	6120	2620	24										
1982	11	27	14	29	5.61	78.17	2	1140	1420	850	15			1982	11	27	16	16	4.23	46.00	5	1240	1550	930	24										
1983	4	26	16	22	5.73	78.17	2	1180	1470	880	15			1983	04	26						1260	1560	940	24 a3,b3										
1983	10	15	1	45	6.30	78.69	2	1580	1970	1180	14			1983	10	15	03	50	4.35	46.00	5	1310	1640	980	24										
1984	5	19	9	28	4.74	78.17	2	850	1060	640	15			1984	05	19						900	1130	680	24 b3,c3										
1984	10	4	23	32	5.23	78.17	2	1010	1260	760	15			1984	10	05	01	59	3.59	46.00	5	890	1110	670	24										
1984	11	7	23	23	6.69	78.17	2	1530	1910	1150	15			1984	11	08	00	28	4.59	46.00	5	1460	1830	1100	24										
1984	12	1	22	30	8.20	78.17	2	2110	2660	1570	15			1984	12	01	23	58	5.58	46.00	5	2170	2740	1600	24										
1985	5	12	15	2	2.21	78.17	2	220	280	170	15 o1			1985	05	12	18	08	1.97	46.00	5	260	330	200	24 d3										
1986	4	25			4.60	78.69	2	970	1210	730	10			1986	04	25						1030	1290	780	b3										
1986	11	15			7.00	78.69	2	1850	2310	1380	10			1986	11	15						1970	2460	1470	b3										
1987	2	12	7	0	4.70	78.69	2	1000	1250	750	14			1987	02	12	12	17	4.17	46.00	5	1210	1510	900	24										
1987	4	4	11	0	7.00	78.69	2	1850	2310	1380	14			1987	04	04	14	51	5.04	46.00	5	1770	2210	1330	24										
1987	10	29			7.50	78.69	2	2040	2560	1520	10			1987	10	29						2170	2720	1620	24 b3,e3										
1987	12	5	22	0	4.90	78.69	2	1070	1340	800	14			1987	12	06	02	31	3.88	46.00	5	1040	1300	780	24										
1988	1	14			7.00	78.69	2	1850	2310	1380	10			1988	01	15	05	25	5.16	46.00	5	1850	2320	1390	24										
1988	10	11	20	0	6.70	78.69	2	1730	2160	1300	14			1988	10	11						1840	2300	1380	24 b3,f3										
1988	10	20	3	0	5.20	78.69	2	1170	1470	880	14			1988	10	20	07	42	3.80	46.00	5	1000	1250	750	24										
1989	11	3	15	0	8.30	78.69	2	2360	3010	1700	14			1989	11	03						2510	3200	1810	24 b3,g3										
1990	2	1						570	720	430	o1,pl			1990	02	01	18	37	2.99	46.00	5	610	770	460	24 d3										
1991	3	9						1060	1330	800	pl			1991	03	09	06	27	4.04	46.00	5	1130	1410	850	24										
1992	9	22	16	0	9.50	78.69	2	2840	3730	1950	14			1992	09	22	18	25	6.58	46.00	5	3020	4010	2030	24										
1993	9	22						1680	2110	1260	14 q1,pl			1993	09	22	23	49	5.07	46.00	5	1790	2240	1340	24										
1993	10	6	1	0	4.32	78.69	2	880	1100	660	14			1993	10	06	03	33	3.99	46.00	5	1100	1380	830	24										
1994	1	7	12	0	4.53	78.69	2	950	1180	710	14			1994	01	07	14	32	4.35	46.00	5	1310	1640	980	24										
1994	2	4	21	30	4.85	78.69	2	1050	1320	790	14			1994	02	05	00	37	4.50	46.00	5	1410	1760	1050	24										
1994	9	24	0	0	4.94	78.69	2	1080	1360	810	14			1994	09	24	02	15	4.45	46.00	5	1370	1720	1030	24										
1994	10	21	0	42	6.64	78.69	2	1710	2130	1280	14			1994	10	21	02	42	5.71	46.00	5	2270	2890	1660	24										
1994	11	5	13	0	6.07	78.69	2	1490	1860	1120	14			1994	11	05	15	14	5.17	46.00	5	1860	2330	1400	24										
1995	10	5	13	0	9.23	78.69	2	2720	3550	1890	14			1995	10	05	16	46	7.26	46.00	5	3680	5060	2290	24										
1996	1	23	20	0	6.27	78.69	2	1570	1960	1170	14			1996	01	23	22	04	5.19	46.00	5	1880	2340	1410	24										
1996	11	13	8	0	9.22	78.69	2	2720	3540	1890	14			1996	11	13	10	13	6.95	46.00	5	3370	4560	2180	24										
1997	11	6	21	0	6.62	78.69	2	1700	2120	1270	14			1997	11	06	23	23	5.29	46.00	5	1950	2440	1460	24										
1997	12	19	6	30	8.70	78.69	2	2510	3240	1790	14			1997	12	19	08	57	6.58	46.00	5	3020	4010	2030	24										
1998	5	31	15	30	5.43	78.69	2	1260	1570	940	14			1998	05	31	17	49	4.58	46.00	5	1460	1820	1090	24										
1999	10	21						1560	1950	1170	pl			1999	10	21	10	50	4.89	46.00	5	1660	2080	1250	24										
2000	9	29	21	30	4.12	78.69	2	820	1020	610	14			2000	09	29	23	40	3.77	46.00	5	980	1230	740	24										
2000	11	14	0	0	6.42	78.69	2	1620	2030	1220	14			2000	11	14	02	21	5.19	46.00	5	1880	2340	1410	24										
2000	11	24						1220	1530	920	pl			2000	11	24	00	41	4.33	46.00	5	1300	1630	980	24										
2000	12	3						1130	1410	850	pl			2000	12	03	02	31	4.16	46.00	5	1200	1500	900	24										
2000	12	25						1020	1280	770	pl			2000	12	25	08	41	3.97	46.00	5	1090	1360	820	24										
2001	10	20	16	54	6.02	78.69	2	1470	1840	1100	14			2001	10	20	20	31	4.66	46.00	5	1510	1890	1130	24										

NOTES :

- | | | | |
|----|----------------------------------|----|--|
| n1 | Seuil à partir du seuil d'alerte | a3 | Problème de temps de propagation |
| o1 | Maximum annuel : inf. au seuil | b3 | Débit transféré depuis Vallon |
| pl | Débit transféré depuis Sauze | c3 | Problème de temps de propagation, heure 13:13 supprimée |
| q1 | Maximum non enregistré | d3 | Maximum annuel : inf. au seuil |
| | | e3 | Maximum non enregistré |
| | | f3 | Maximum non enregistré, problème de temps de propagation |
| | | g3 | Maximum non enregistré |

5.5 Analyse fréquentielle

5.5.1 Test de l'homogénéité et de la stationnarité

La stationnarité des crues ayant dépassé les différents seuils présentés ci-avant a été évaluée à l'aide du test proposé par Lang (1995). Ce dernier suppose un processus d'occurrence Poissonnien. Il consiste à reporter sur un graphique la date de chaque crue et son rang d'apparition dans l'échantillon (cf. Lang et al., 1999 ; figure 3.6, p. 80). La courbe expérimentale reliant chacun de ces points est comparée avec l'intervalle de tolérance à 95 % de la variable aléatoire K_t , nombre d'événements sur $[0; t]$. Lorsque la courbe est située à l'intérieur de l'intervalle, l'hypothèse de stationnarité peut être acceptée. Dans le cas contraire, cette hypothèse est refusée (avec un risque de 5 % de la rejeter à tort) et le point de la courbe expérimentale situé le plus loin en-dehors de l'intervalle de tolérance fournit une indication sur une date possible de rupture. Ce test est particulièrement intéressant dans le cadre de l'analyse des crues historiques où l'on ne dispose pas d'une information en continu. Les tests classiques de stationnarité raisonnent en effet sur des échantillons avec des valeurs obtenues régulièrement (cf. maxima annuel). L'intérêt des tests sur le processus d'occurrence réside dans le fait qu'il est possible de traiter un échantillon de valeurs supérieures à un seuil, en raisonnant soit sur le nombre de crues observées chaque année, soit sur la date d'occurrence des crues. Les premiers restent cependant d'un intérêt limité dans le cas des crues historiques, car ils nécessitent d'avoir suffisamment d'observations pour pouvoir les répartir en quatre ou cinq classes minimum, ce qui revient à choisir un seuil assez bas, avec en moyenne plus d'une crue par an. Dans la pratique, le test sur la stationnarité du processus d'occurrence sera réalisé à partir des dates de toutes les crues ayant dépassé un certain seuil. Ce seuil sera choisi plus ou moins haut, en fonction de la disponibilité de l'information et de la garantie du respect de l'exhaustivité de l'échantillon.

Nous avons effectué les tests de stationnarité uniquement sur les données de la station de Vallon puisque celles de St-Martin présentent les mêmes événements supérieurs aux seuils. Seule la crue de 1857, estimée à 4550 m³/s à St-Martin, ne serait pas retenue. Cependant, tel que précisé au §5.3.2.1, p. 177, nous accordons une plus grande fiabilité aux hauteurs relevées à Vallon. Les figures (5.24) à (5.27), pp. 204-205, montrent que l'hypothèse de stationnarité est globalement acceptée : le cumul des événements supérieurs au seuil considéré reste dans l'intervalle de tolérance à 95 %. La figure (5.25), p. 204, distingue la sous période historique où les crues sont relevées par des observateurs. On ne constate pas de non stationnarité ce qui conforte la validité du seuil de 2250 m³/s supposé garantir l'exhaustivité (débit inondant la place l'église de St-Martin, cf. §5.4.3, p. 197). Par ailleurs, les aménagements réalisés sur le Chassezac en 1964-1968 ainsi que leur mode de gestion (cf. §4.2, p. 111) ne semblent pas affecter les crues considérées.

Les crues qui dépassent le seuil de 4750 m³/s sur la période 1827-2001 (cf. figure 5.26) ont une période de retour de 25 ans ($\mu = 0.04$). L'année de départ considérée pour le test de stationnarité ne correspond donc pas à la première crue (1827) mais à 1815 ($1827 - 25/2 \approx 1815$). Les éléments présentés au §5.3.2.1, p. 177, qui montrent une crue en 1794 dont l'intensité, sans être connue précisément, est du même ordre de grandeur, confirment cette estimation ($1827 - (1827 - 1794 + 1)/2 = 1810$). Pour les crues supérieures à 5650 m³/s (cf. figure 5.27) l'année de départ a été de la même manière prise égale à 1708 ($1772 - (1772 - 1645 + 1)/2 = 1708$).

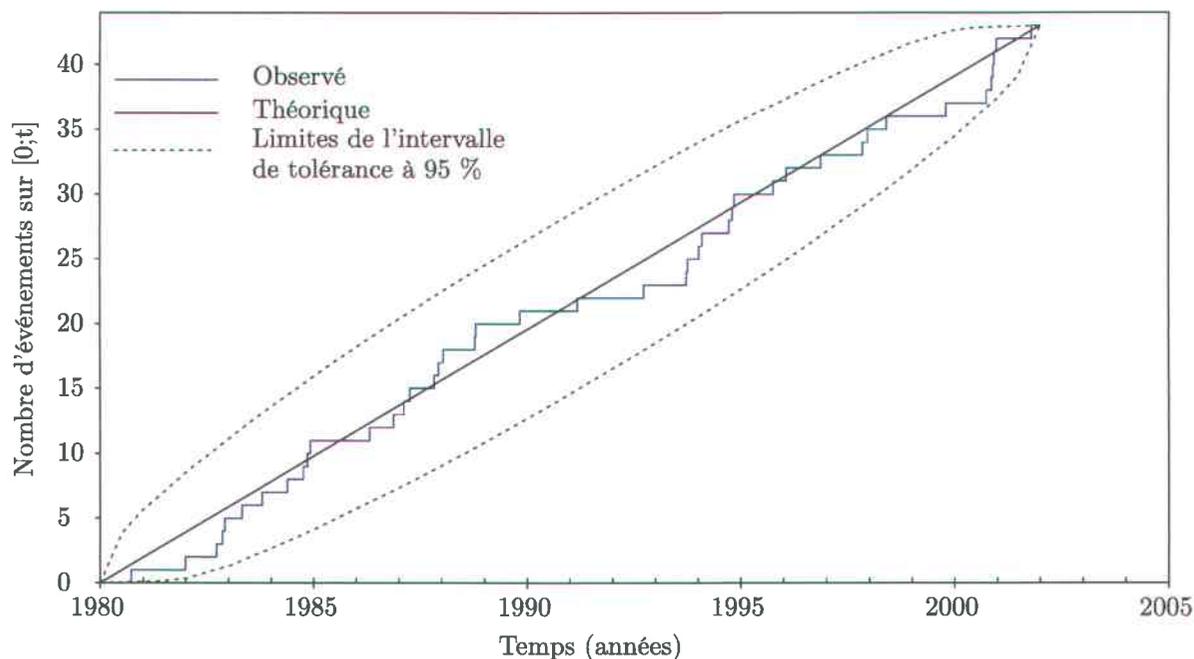


FIG. 5.24 - Test de stationnarité de la série des débits supérieurs au seuil de 810 m³/s à Vallon sur la période 1980-2001

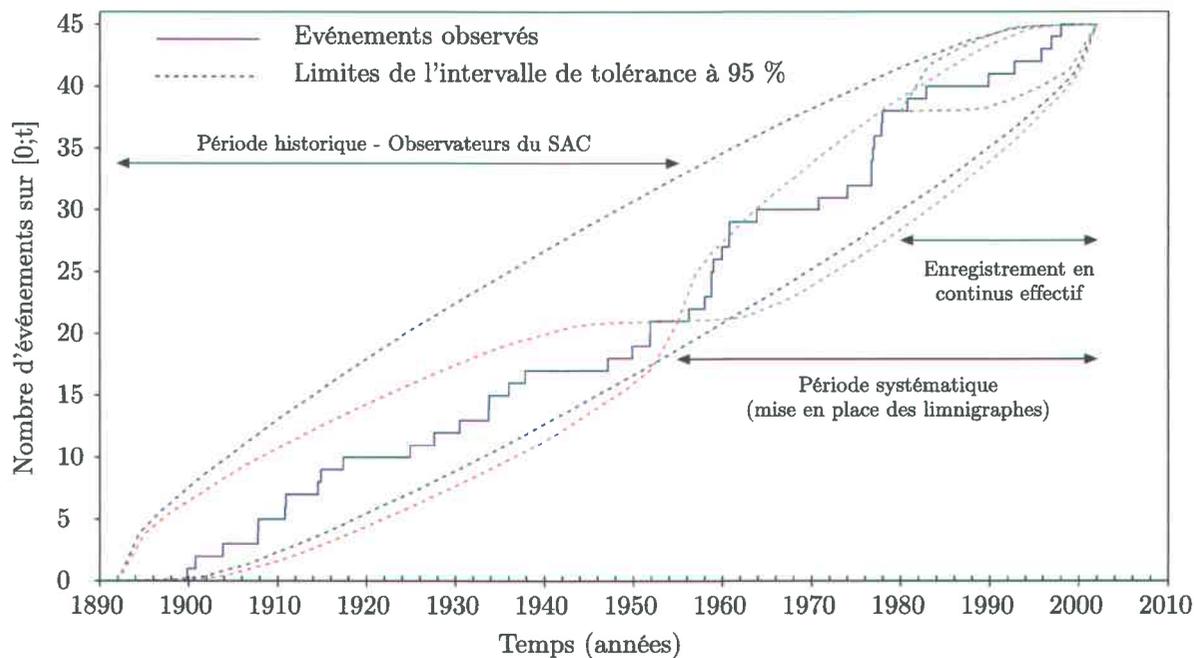


FIG. 5.25 - Test de stationnarité de la série des débits supérieurs au seuil de 2250 m³/s à Vallon sur la période 1892-2001

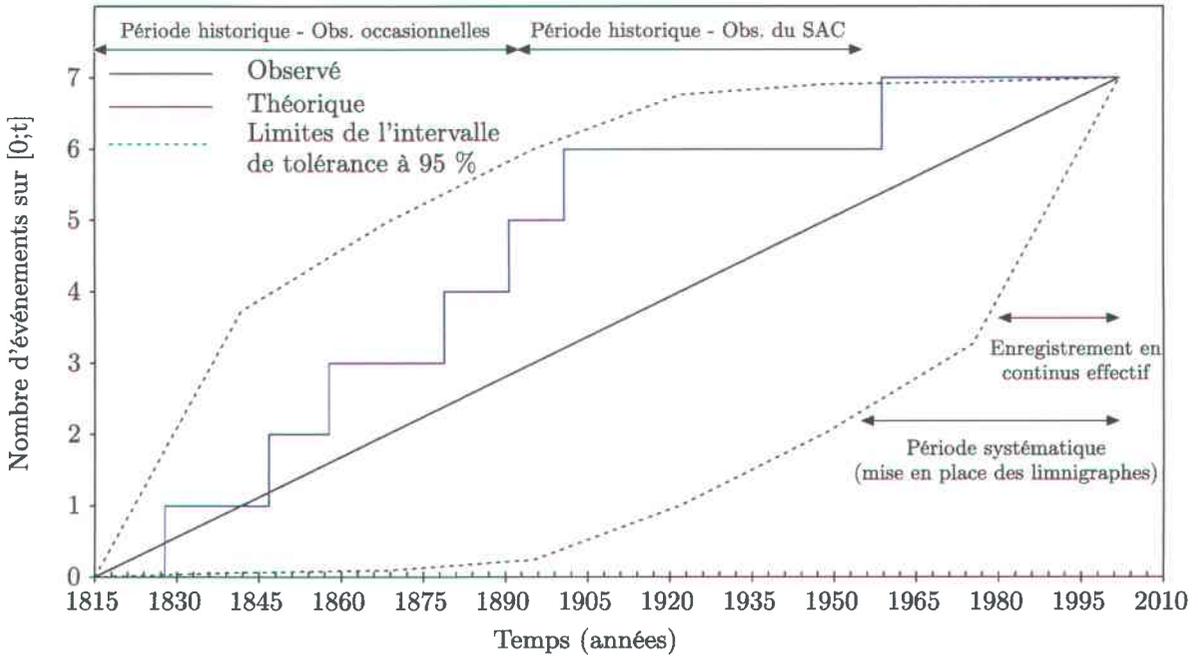


FIG. 5.26 – Test de stationnarité de la série des débits supérieurs au seuil de 4750 m³/s à Vallon sur la période 1815-2001

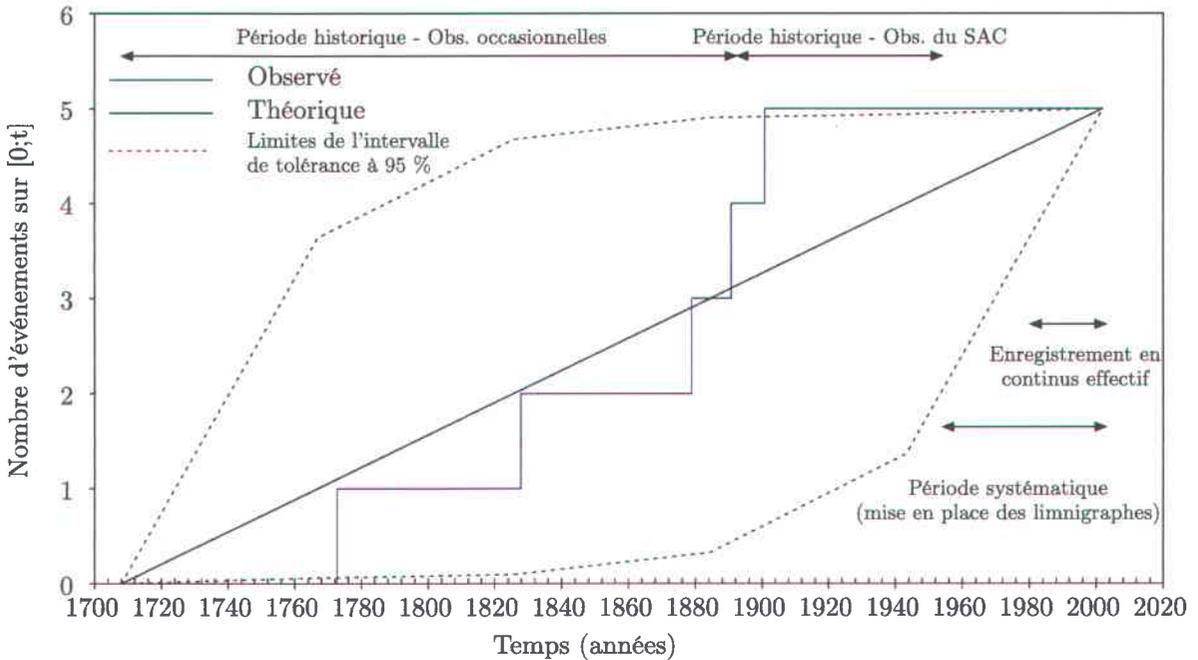


FIG. 5.27 – Test de stationnarité de la série des débits supérieurs au seuil de 5650 m³/s à Vallon sur la période 1708-2001

On notera que les crues de forte intensité sont plus nombreuses avant le XX^e siècle (cf. figures 5.26 et 5.27). Pour expliquer ce phénomène on peut émettre différentes hypothèses qui restent à vérifier : (1) une baisse de l'hydrologie après la fin du petit âge glaciaire en Europe au début du XIX^e siècle ; (2) une exploitation importante des forêts. A ce sujet Vignon (1862, p. 63 et pièce justificative n° 28) précise qu'en 1643 la marquise de Montlor, propriétaire d'une grande forêt dans le Vivarais, avait obtenu, pour en faciliter l'exploitation, l'autorisation de rendre à ses frais l'Ardèche navigable. Le manque de végétation sur les versants du bassin de l'Ardèche, d'origine anthropique ou non, est mis en cause pour justifier la violence des crues dès le XIX^e siècle dans les rapports des ingénieurs des Ponts et Chaussées. Une campagne de reboisement importante a d'ailleurs eu lieu entre 1880 et 1900. Reynier (s.d.) note : « le reboisement a été poussé d'une façon forte active. Depuis 1880 environ, il n'est guère de communes dans la montagne, à qui on ait enlevé plusieurs centaines d'hectares de terrain pour y planter des arbres. Les chiffres suivants, empruntés au rapport du conservateur des forêts au conseil général de l'Ardèche marquent bien le progrès accompli dans l'oeuvre du reboisement : 28464.3 fr. en 1889, ..., 40 573 fr en 1895 ». Quoiqu'il en soit, on retiendra que les tests de stationnarité effectués sont globalement satisfaisants et que les séries des événements passés peuvent être exploitées dans l'analyse fréquentielle en terme de future probabilité d'occurrence.

Afin de vérifier visuellement l'homogénéité des données, le test développé par Ouarda et al. (1993) a été réalisé. Il consiste à reporter sur un graphique le nombre cumulé, sur la période considérée, de crues observées entre le 1^{er} janvier et une date quelconque de l'année. La figure (5.28), p. 206, montre distinctement une seule population homogène de crue ayant lieu en automne. La période de risque pour les crues les plus intenses (crues supérieures à 4750 m³/s) se réduit au mois de septembre et octobre. Les problèmes d'hétérogénéité accidentelle (embâcles, etc.) ont été corrigés en amont de la démarche, lors de la comparaison des stations entre elles.

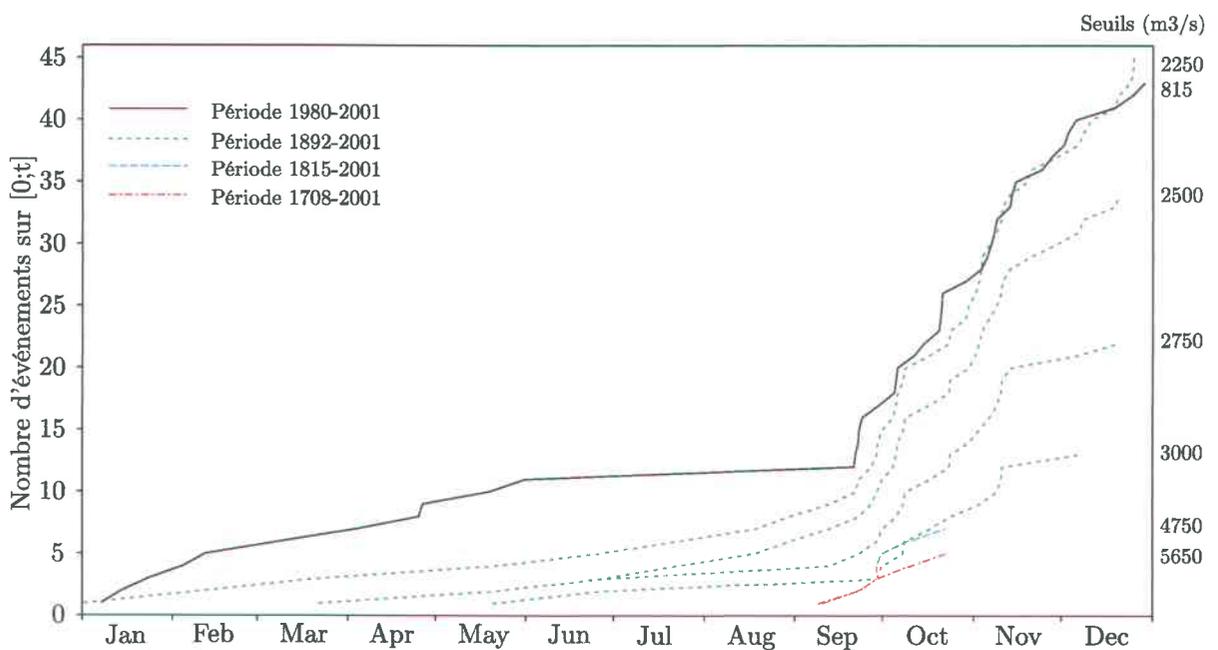


FIG. 5.28 – Test de saisonnalité à Vallon pour différents seuils

5.5.2 Ajustements à l'aide des données de Vallon-Pont-d'Arc issues de la période systématique, puis historique

Le mode d'archivage des données historiques nous a conduit à opter pour une analyse fréquentielle des séries de maxima annuels (AM). En effet, tel qu'énoncé au §4.4.2.2, p. 137, les crues maximales annuelles peuvent masquer les autres événements forts de l'année. Dans ces conditions l'analyse fréquentielle de type renouvellement, basée sur des séries de valeurs supérieures à un seuil (PD ou POT) conduirait à utiliser des seuils élevés pour garantir l'exhaustivité (cf. seuil de 12.5 mètres à Vallon sur la période 1827-1891). D'un autre côté nous disposons d'informations fiables sur des crues historiques qui, sans qu'elles soient supérieures à ces seuils, sont assurément des *maxima annuels* dont les débits sont importants et par conséquent intéressants à valoriser dans l'analyse fréquentielle (ex. : crue de 1853, 1859, 1861, 1888 et 1891 à Vallon).

Nous avons donc extrait les maxima annuels des séries présentées aux figures (5.24) à (5.27) , pp. 204-205. La quantité d'information exploitée est de ce fait réduite : des 38 et 45 crues respectivement supérieures aux seuils 2250 m³/s (période 1892-1979) et 810 m³/s (période 1980-2001) nous ne retenons que 26 et 22 maxima annuels. Cette démarche se justifie dans le sens où le domaine d'intérêt correspond aux *fréquences rares* : le fait de réduire le nombre de valeurs va augmenter la variance d'échantillonnage, cependant, la perte d'information s'effectue sur des crues de faible intensité. En contre partie la méthode adoptée permet d'exploiter des crues historiques fortes supplémentaires ce qui va augmenter la robustesse d'estimation de la queue de distribution. La moyenne des débits de crue à Vallon sur 1772-2001 pouvant être traités par l'approche de type AM est de 3005 m³/s alors que celle des débits de crue exploitables par l'approche de type PD n'est que de 2515 m³/s. Il s'agit là bien évidemment d'un cas particulier lié au mode d'archivage des crues historiques et à la répartition dans le temps des événements observés sur l'Ardèche. En principe l'approche AM contraint à sélectionner des débits faibles pour les années sans crue. Dans notre cas, seuls deux maxima annuels (1985 et 1990) sont inférieurs au seuil et ne contrebalancent pas le gain apporté, en terme d'espérance, par les cinq crues historiques supplémentaires. Les figures (5.29) et (5.30), p. 208, présentent les séries traitées à Vallon et St-Martin.

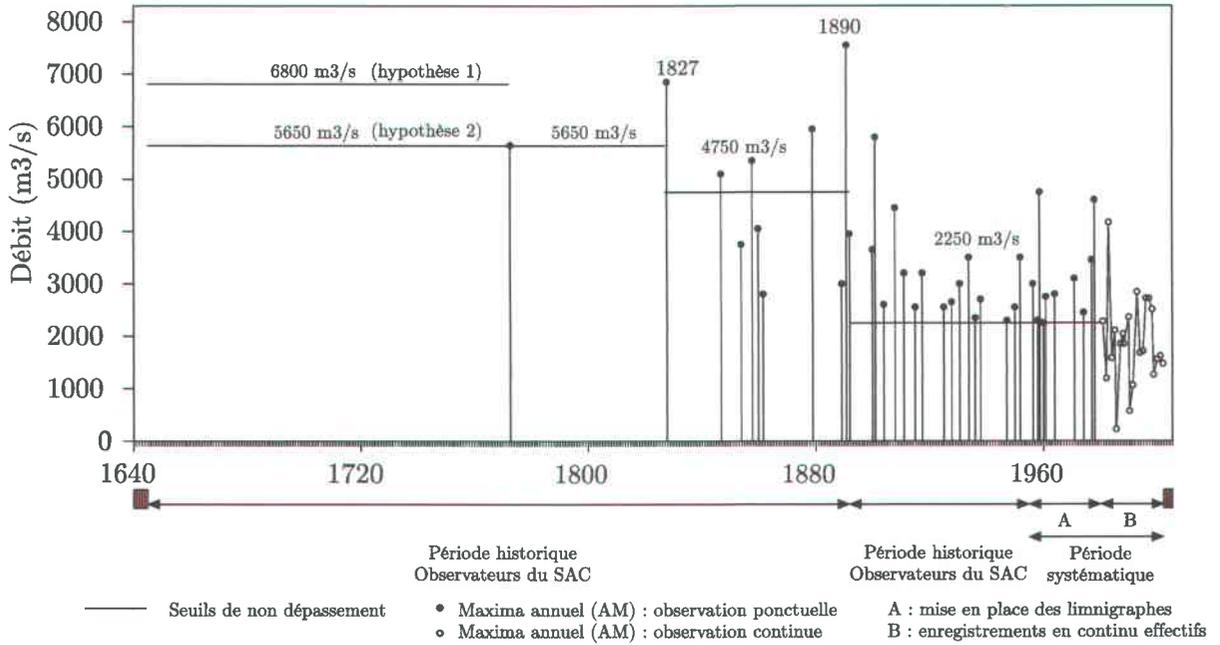


FIG. 5.29 – Chronique de débits maximum annuels à Vallon exploitée dans l'analyse fréquentielle

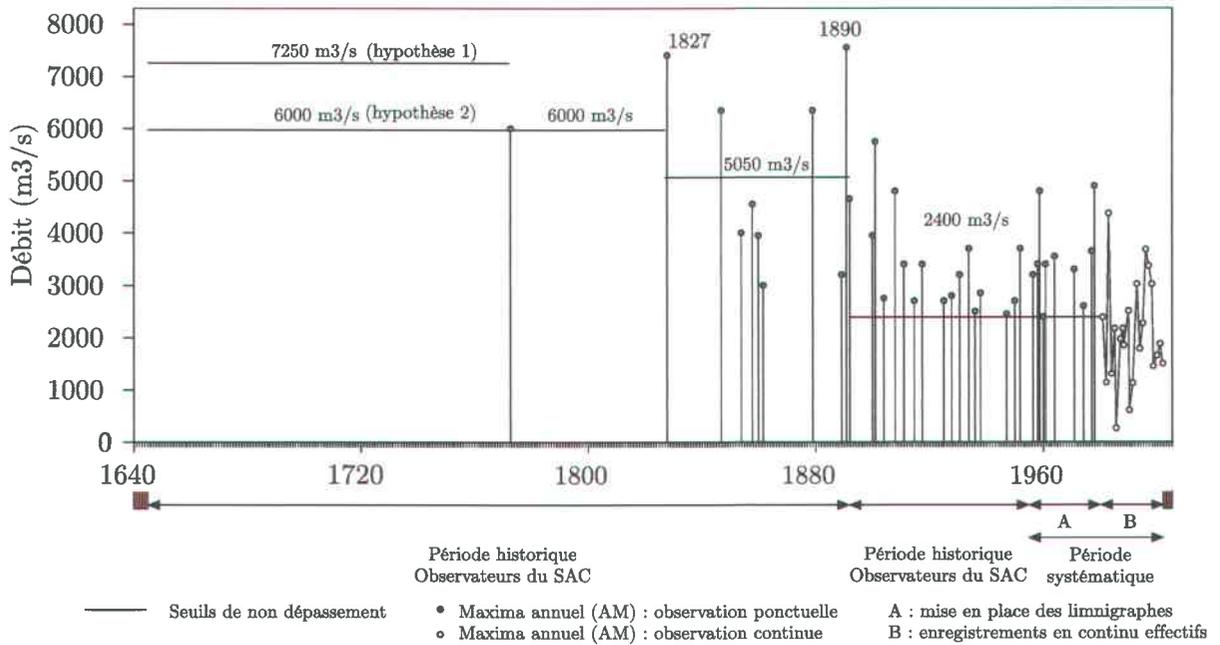


FIG. 5.30 – Chronique de débits maximum annuels à St-Martin exploitée dans l'analyse fréquentielle

La distribution de probabilité utilisée pour effectuer les ajustements est la loi généralisée des valeurs extrêmes (*Generalized Extreme Value*, GEV), également connue sous le nom de loi de Jenkinson. Ce dernier a proposé en 1955 une formulation unique des trois solutions de l'équation fonctionnelle conduisant aux lois de valeurs extrêmes de type I, II et III exposées par Fréchet (1927) et Fisher et Tippett (1928) (respectivement lois de Gumbel, Fréchet et Weibull). Lubes et Masson (1991, p. 68-70) présentent un bref historique de ces lois et un rappel de leur justification théorique. Les fonctions de densité f_X et de répartition F_X sont respectivement données par :

$$f_X(x|\alpha,\beta,k) = \frac{1}{\alpha} \left[1 - k \left(\frac{x-\beta}{\alpha}\right)\right]^{\frac{1}{k}-1} \exp \left\{ - \left[1 - k \left(\frac{x-\beta}{\alpha}\right)\right]^{1/k} \right\}$$

avec : $k \neq 0$ et $\alpha > 0$

$x > \beta + \frac{\alpha}{k}$ si $k < 0$

$x < \beta + \frac{\alpha}{k}$ si $k > 0$

(5.3)

$$F_X(x|\alpha,\beta,k) = \Pr [X \leq x] = \exp \left\{ - \left[1 - k \left(\frac{x-\beta}{\alpha}\right)\right]^{1/k} \right\}$$

avec : $k \neq 0$ et $\alpha > 0$

$x > \beta + \frac{\alpha}{k}$ si $k < 0$

$x < \beta + \frac{\alpha}{k}$ si $k > 0$

(5.4)

On notera que lorsque k tend vers 0, la loi GEV tend vers la loi EV1 (Gumbel). En effet d'après l'expression (5.4) on peut écrire :

$$\ln [-\ln (F_X)] = \frac{1}{k} \ln \left[1 - k \left(\frac{x - \beta}{\alpha} \right) \right]$$
(5.5)

or avec le développement en série de *Maclaurin* $\ln(1-x) = -\sum_{i=1}^{\infty} \frac{x^i}{i}$ ($-1 \leq x < 1$) on a :

$$\lim_{k \rightarrow 0} \ln \left[1 - k \left(\frac{x - \beta}{\alpha} \right) \right] = -k \left(\frac{x - \beta}{\alpha} \right)$$
(5.6)

d'où :

$$\lim_{k \rightarrow 0} \ln [-\ln (F_X)] = -\frac{x - \beta}{\alpha}$$
(5.7)

Soit l'expression de la fonction de répartition de la loi de Gumbel :

$$F_X(x|\alpha,\beta) = \exp \left[-\exp \left(-\frac{x - \beta}{\alpha} \right) \right]$$
(5.8)

D'autre part si $k < 0$, on obtient la loi EV2 (loi de Fréchet également appelée log Gumbel car si $X \sim \text{EV2}$ alors $\ln(X) \sim \text{EV1}$) ; si $k > 0$, on obtient la loi EV3 (si $X \sim \text{EV3}$ alors $(-X) \sim \text{Weibull}$).

La méthode du maximum de vraisemblance pour la loi GEV, avec ou sans information historique, se heurte assez fréquemment à des problèmes numériques de convergence lors de l'optimisation. Nous avons donc choisi d'utiliser comme valeurs initiales les paramètres estimés par la méthode de l'algorithme des moments espérés (EMA). Cette méthode, présentée au §3.3.4 ,p. 76, avait été développée jusqu'alors pour la loi normale à deux paramètres par Lane et Cohn (1996) et pour la loi log Pearson Type III par Cohn et al. (1997) et Cohn et al. (2001). Nous avons effectué pour notre part les développements,

originaux à notre connaissance, pour les lois EV1 et GEV. Les calculs sont effectués en annexe (§B.3, p. 234 et §B.5, p. 240). L'annexe §B, p. 231, présente également l'adaptation aux lois EV1 et GEV de la méthode du maximum de vraisemblance « généralisée » (MLE_G) que nous avons proposée au §3.3.1.5, p. 68.

Les ajustements réalisés sur les données de l'Ardèche à Vallon sont présentés à la figure (5.31), p. 211. Nous avons traité six cas en fonction de la quantité d'information prise en compte. Le tableau (5.9), p. 212, résume les quantiles obtenus. La méthode employée pour la détermination des probabilités empiriques est celle de Hirsch et Stedinger (1987) que nous avons modifiée (cf. §3.6.2, p. 91). On constate que les méthodes MLE_G et EMA fournissent des estimations des quantiles très voisines. On note également que l'exploitation des données systématiques uniquement (période 1980-2001) conduit à des quantiles centennaux très inférieurs ($\hat{X}_{100} = 4029-4186 \text{ m}^3/\text{s}$ suivant les méthodes) de ceux obtenus en incorporant l'information historique ($\hat{X}_{100} = 6195-5884 \text{ m}^3/\text{s}$ pour les cas c à f et suivant les méthodes). En pratique il est conseillé d'exploiter les ajustements pour des périodes de retour allant jusqu'à deux ou trois fois la taille de l'échantillon systématique (ici $N_S = 22$). Nous avons toutefois choisi de présenter l'estimation de la crue centennale réalisée avec les données systématiques pour permettre la comparaison. On note que l'incorporation de l'information historique conduit dans le cas extrême à une estimation supérieure à celle réalisée avec l'information systématique seule de l'ordre de 20 % pour la crue décennale et de 50 % pour la crue centennale. On remarque par ailleurs que les estimations sont relativement peu sensibles au mode d'incorporation de l'information historique. En effet les résultats entre les cas d et e, avec ou sans prise en compte de la crue de 1772, ne diffèrent que de 2 % au niveau de la crue centennale.

La figure (5.31), p. 211, montre clairement l'intérêt de l'information historique pour déterminer le comportement asymptotique de la distribution des débits maxima annuels : le cas (a) présente une distribution avec un paramètre de forme positif ($k > 0$), soit une borne supérieure ($x < \beta + \alpha/k$) alors que les cas (b) à (f) présentent des paramètres de forme négatifs (la distribution n'est plus bornée par le haut).

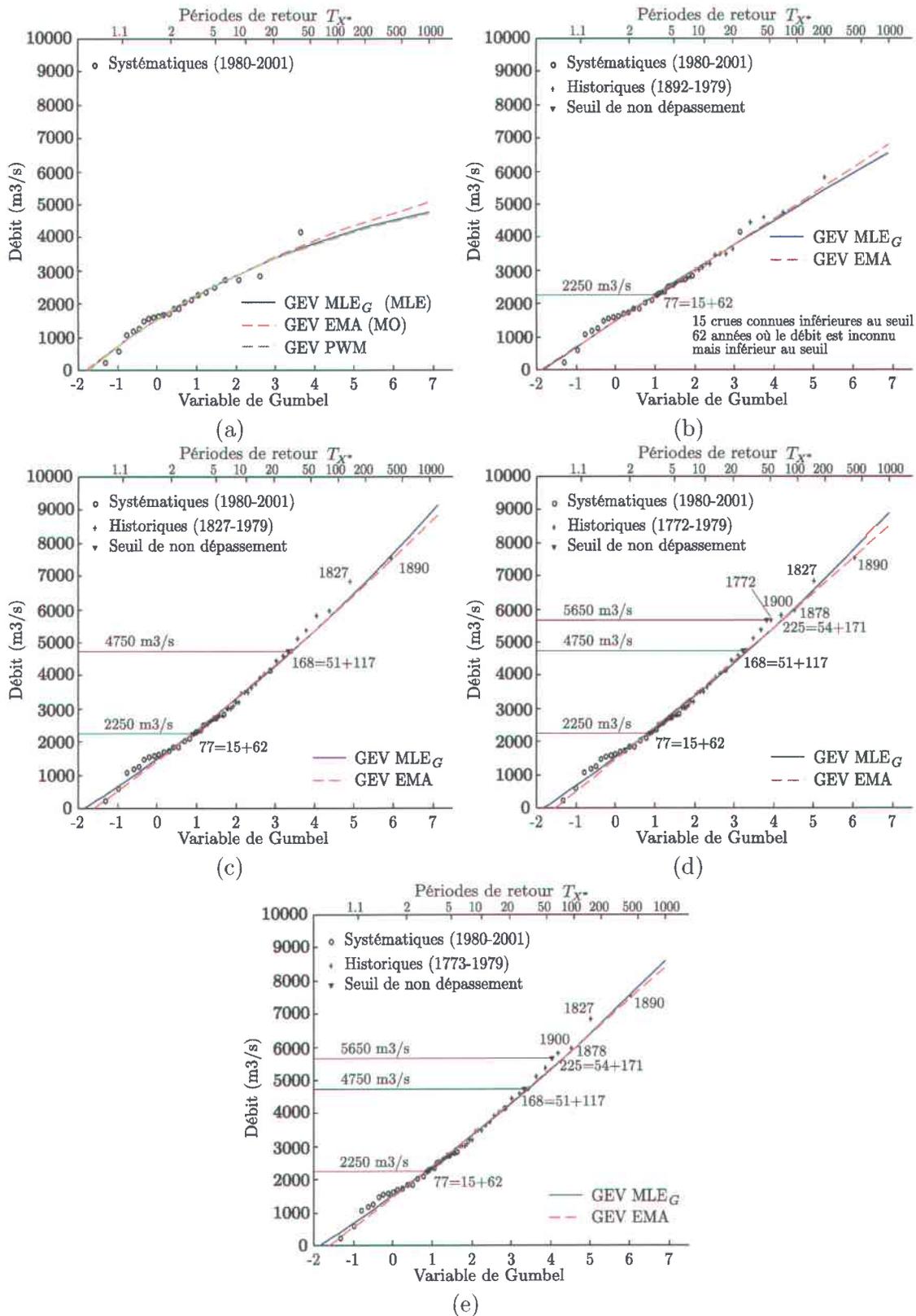


FIG. 5.31 – Distributions des débits à Vallon avec prise en compte de l'information historique

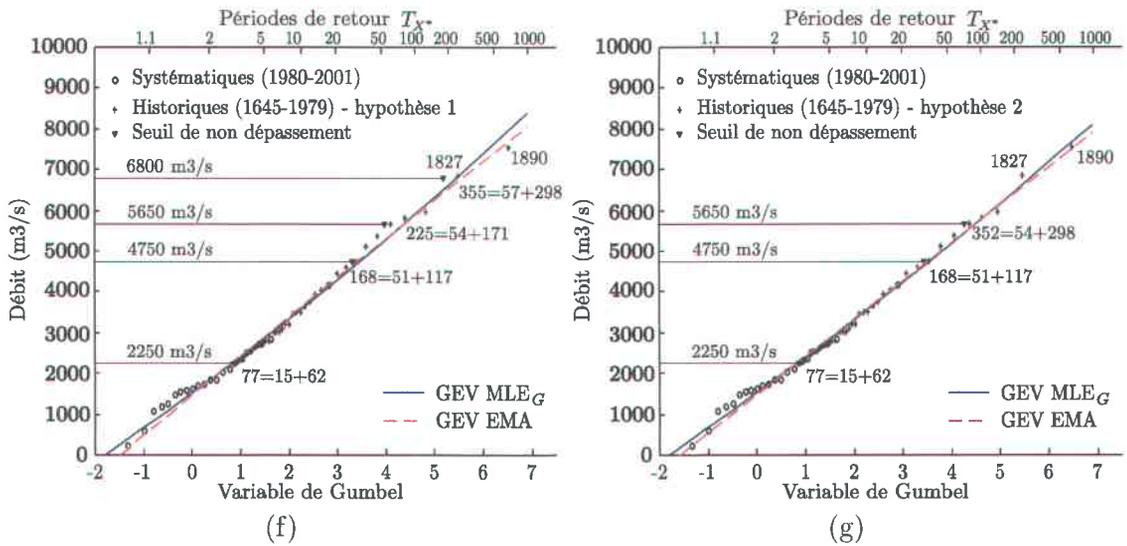


FIG. 5.31 (suite et fin) – Distributions des débits à Vallon avec prise en compte de l'information historique

TAB. 5.9 – Quantiles (en m³/s) estimés à Vallon

Cas	a			b		c		d	
Période	1980-2001			1892-2001		1827-2001		1772-2001	
Méthode	MLE	MO	PWM	MLE _G	EMA	MLE _G	EMA	MLE _G	EMA
\hat{X}_{10}	3006	3009	2993	3199	3199	3626	3668	3621	3673
\hat{X}_{100}	4064	4186	4029	4927	5010	6195	6173	6110	6066
Cas	e		f		g				
Période	1773-2001		1645-2001		1645-2001				
			hypothèse 1*		hypothèse 2**				
Méthode	MLE _G	EMA	MLE _G	EMA	MLE _G	EMA			
\hat{X}_{10}	3571	3606	3581	3643	3533	3573			
\hat{X}_{100}	5974	5968	5907	5884	5764	5756			

Sans information historique : méthode du maximum de vraisemblance (MLE), méthode des moments (MO), méthode des moments de probabilité pondérés (PWM).

Avec information historique : méthode du maximum de vraisemblance généralisé (MLE_G), méthode de l'algorithme des moments espérés (EMA).

*Hypothèse 1 : seuil de perception à 6800 m³/s sur la période 1645-1771.

**Hypothèse 2 : seuil de perception à 5650 m³/s sur la période 1645-1771.

5.5.3 Comparaison des résultats obtenus avec l'information des crues historiques de St-Martin avec l'extrapolation par la méthode du Gradex

Pour le secteur de St-Martin nous présentons à la figure (5.32), p. 215, une comparaison des estimations obtenues d'une part avec l'information historique sur plusieurs périodes (cas a, b, c, d, e, f, g) et d'autre part en exploitant l'information pluviométrique (cas h et i). Nous avons repris à cet effet les résultats de l'étude effectuée par Safège (2000).

La méthode utilisée pour exploiter les pluies est celle du Gradex (Guillot et Duband, 1967). Elle repose initialement sur trois hypothèses fondamentales : (1) la distribution des pluies de durée d a un comportement asymptotique exponentiel (on appelle gradex des pluies a_{pd} le paramètre d'échelle) ; (2) la fonction de répartition du volume de ruissellement direct des crues extrêmes annuelles (VCX_d) a même comportement asymptotique que celui de la fonction de répartition des précipitations maximales annuelles (la capacité de rétention du sol est bornée et sa distribution tend vers une valeur limite) ; (3) la forme de l'hydrogramme des crues devient invariante pour les forts événements.

Les postes pluviométriques exploités pour l'estimation de la pluie de bassin journalière à St-Martin sont présentés à la figure (4.5), p. 114. Après avoir testé différentes méthodes (Thiessen et krigeage), la pondération retenue dans l'étude Safège (2000) est une simple moyenne arithmétique (poids égal aux 11 stations, résultat intermédiaire entre les deux autres méthodes). La durée moyenne des hydrogrammes de crues observées étant de l'ordre de 18 à 20 heures (cf. figure 4.3, p. 113), la durée caractéristique d (durées communes pour les pluies et les volumes de ruissellement direct) a été prise égale à 24 heures. Ainsi la pluie de bassin journalière cévenole (septembre à novembre) a été déterminée sur 44 années (1955 à 1998). Le Gradex des pluies cévenoles a_{pd} est obtenu après un ajustement d'une loi de Gumbel ($a_{pd} = 28$ mm ou $a_{pd} = 726$ m³/s avec un bassin versant de 2240 km²). Après avoir également effectué un ajustement de Gumbel sur les VCX_d (paramètre de position $x_0 = 582$ et paramètre d'échelle ou gradex des débits $a_{qd} = 470$), ces derniers peuvent être extrapolés, conformément à l'hypothèse (2), à partir de la distribution des pluies pour les fortes périodes de retour (supérieures à $T_g = 10$ ans), soit :

$$VCX_d(T) = VCX_{(d,T_g)} + a_{pd} \cdot \ln \left[\frac{T}{T_g} \right] \quad \text{avec } T \geq T_g \quad (5.9)$$

Enfin, et contrairement à l'hypothèse (3) de la méthode initiale, l'estimation des débits de pointe (QIX) a été obtenue dans l'étude Safège (2000) en considérant un rapport de pointe ($r = QIX/VCX_d$) qui décroît avec l'augmentation des VCX_d .

Nous présentons également une extrapolation obtenue avec une variante de la méthode du Gradex. Cette dernière, dénommée Gradex esthétique (Michel, 1982), propose une extrapolation progressive du gradex des débits a_{qd,T_g} (au niveau de la période d'extrapolation T_g) vers le gradex des pluies a_{pd} :

$$VCX_d(T) = VCX_{(d,T_g)} + a_{pd} \cdot \ln \left[1 + \frac{a_{qd,T_g}}{a_{pd}} \frac{T - T_g}{T_g} \right] \quad \text{avec } T \geq T_g \quad (5.10)$$

Les intervalles de confiance à 95 % ont été déterminés en considérant une distribution normale des quantiles à partir du calcul de la variance asymptotique présenté par Lang (1995).

Le tableau (5.10), p. 214, présente les quantiles calculés soit par la méthode MLE_G avec l'information historique pour les différentes périodes considérées, soit par les méthodes du Gradex et du Gradex esthétique. On constate, ici encore, que la simple extrapolation d'une loi à trois paramètres (GEV) sur la période récente (1980-2001), conduit à des valeurs bien inférieures à celles obtenues avec un large recul chronologique. Ainsi l'estimation de la crue centennale passe de 4560 m³/s (courbe a) à 6114 - 6578 m³/s (courbe c à g) lorsque l'on incorpore de l'information historique. Comme précédemment, étant donnée la taille de l'échantillon, les calculs des quantiles de période de retour $T = 100$ ans et $T = 1000$ ans avec les données systématiques ne sont effectués que dans un but de comparaison. On constate ainsi une différence importante entre les comportements asymptotiques des distributions ajustées soit à partir de l'information systématique seule (cf. cas a, figure 5.32, en haut), soit en incorporant l'information historique (cf. cas b à g, figure 5.32, haut).

Un résultat remarquable est la très bonne concordance des résultats obtenus par l'approche historique avec ceux de la méthode du Gradex esthétique. On observe en effet que les comportements asymptotiques des distributions ajustées sont très voisins. Le faisceau des courbes obtenues en exploitant l'information historique est contenu dans l'intervalle de confiance à 95 % de l'ajustement obtenu par la méthode du Gradex esthétique (cf. figure 5.32, bas).

TAB. 5.10 – Quantiles (en m³/s) estimés à St-Martin

Cas	a	b	c	d	e
Période	1980-2001	1892-2001	1827-2001	1772-2001	1773-2001
\hat{X}_{10}	3349	3466	3907	3902	3849
\hat{X}_{20}	3769	4035	4693	4669	4594
\hat{X}_{50}	4246	4745	5752	5690	5582
\hat{X}_{100}	4560	5258	6578	6477	6340
\hat{X}_{1000}	5382	6840	9509	9213	8957
Cas	f	g	h	i	
Période	1645-2001 (hypothèse 1*)	1645-2001 (hypothèse 2**)	Gradex	Gradex esthétique	
\hat{X}_{10}	3865	3811	3391	3391±352	
\hat{X}_{20}	4594	4514	4367	4042±455	
\hat{X}_{50}	5548	5427	5627	5081±621	
\hat{X}_{100}	6269	6114	6576	5944±759	
\hat{X}_{1000}	8696	8392	9706	9013±1245	

*Hypothèse 1 : seuil de perception à 6800 m³/s sur la période 1645-1771.

**Hypothèse 2 : seuil de perception à 5650 m³/s sur la période 1645-1771.

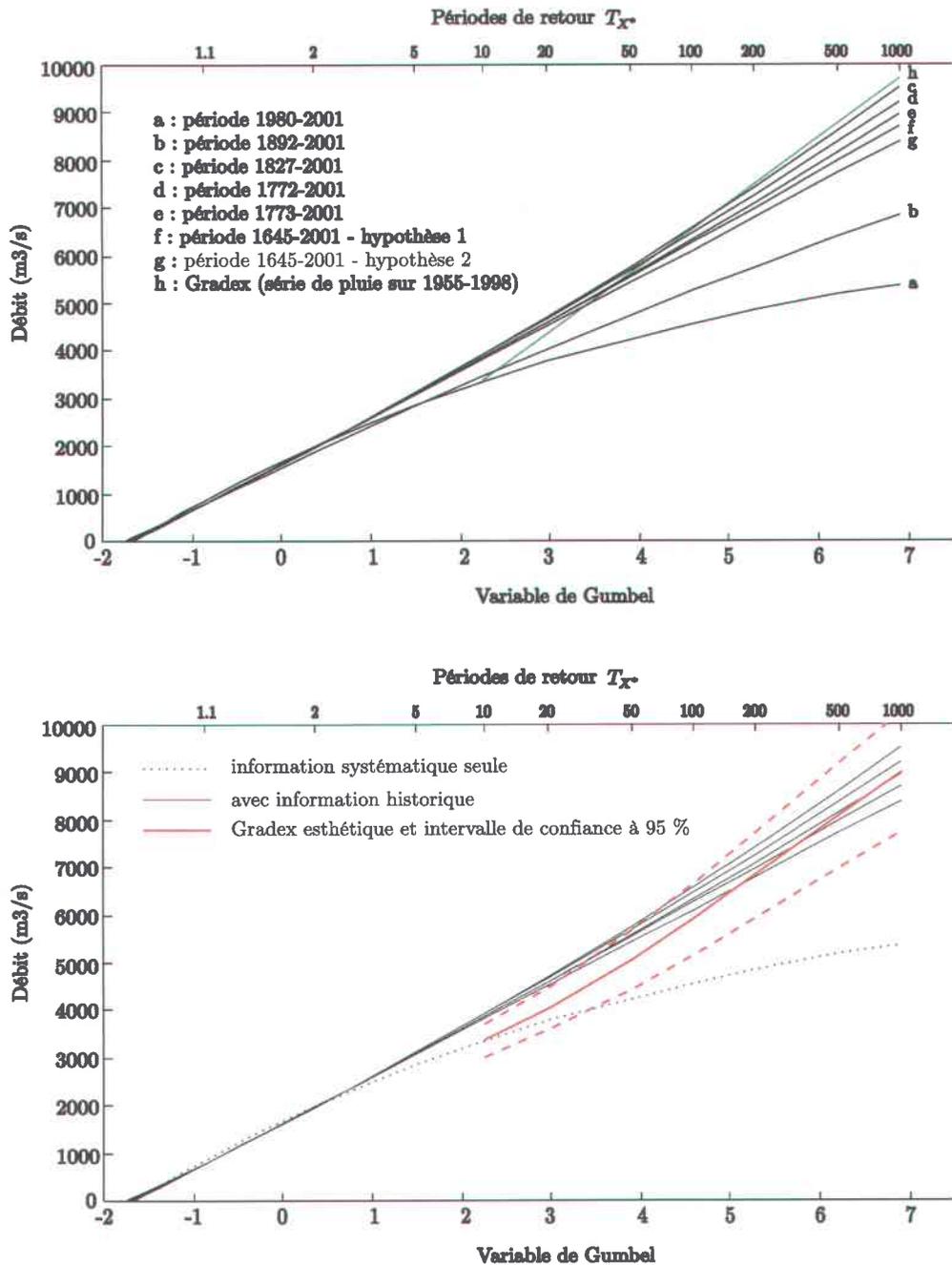


FIG. 5.32 – Distribution des débits à St-Martin avec information historique ou pluviométrique

5.6 Conclusion

Nous avons présenté dans ce chapitre l'exploitation de l'information historique sur deux secteurs du bassin de l'Ardèche, Vallon Pont-d'Arc et St-Martin d'Ardèche. Une analyse approfondie des différentes sources d'informations anciennes a permis de réaliser une critique des données limnimétriques et de proposer des séries de cotes de crues depuis 1644. La constitution de ces séries a été effectuée en suivant la méthodologie présentée au chapitre précédent qui permet notamment de retourner, pour chaque cote présentée, aux documents sources.

La conversion des ces cotes en débits a été réalisée par le biais de modélisations hydrauliques 1D en régime permanent et transitoire. Ces modèles, outre le fait qu'ils rendent possible le transfert géographique d'une cote de crue ancienne jusqu'à une station actuelle, permettent d'exploiter au mieux les indications sur la pente de la ligne d'eau fournies par les nombreuses laisses de crues historiques. Les différents tests de sensibilité montrent que le coefficient de rugosité est le paramètre qui influence le plus l'incertitude sur le débit estimé. Ce résultat est en accord avec ceux de la littérature compte tenu de la géométrie relativement stable des deux sites étudiés. Au final, nous avons pu reconstituer des courbes de tarage et leurs incertitudes pour différentes époques, en exploitant des relevés de topographie anciens. L'intercomparaison des débits de crue estimés à Vallon et à St-Martin montre une très bonne cohérence.

L'analyse des séries reconstituées indique que l'hypothèse de stationnarité peut globalement être acceptée. Ce résultat, au-delà du processus physique d'occurrence des événements, met en avant l'exhaustivité des crues répertoriées. Cette qualité dans la recherche d'informations anciennes conforte le choix d'une collaboration entre hydrologues et historiens au sein de la démarche HISTORISQUE. On note également que les crues de forte intensité sont plus nombreuses avant le XX^e siècle. Ce phénomène est également observé par Miramont et Guilbert (1997) sur la Durance et pourrait être expliqué par la fin du petit âge glaciaire et une reforestation après une exploitation intense.

Enfin une analyse de la distribution des crues a été réalisée à partir des méthodes permettant la prise en compte de l'information historique. Les ajustements d'une loi GEV reposent sur la méthode du maximum de vraisemblance généralisé (MLE_G) et celle de l'algorithme des moments espérés (EMA) que nous avons adaptée pour la première fois à la loi utilisée. On constate que les quantiles obtenus en exploitant uniquement l'information systématique sont très inférieurs à ceux calculés en incorporant l'information historique. Sur les deux secteurs étudiés, les quantiles estimés en considérant les périodes 1827-2001, 1772-2001, 1773-2001 et 1645-2001 sont relativement homogènes. On remarque une bonne concordance des résultats obtenus par l'approche historique avec ceux de la méthode Gradex esthétique qui exploite l'information pluviométrique. On retiendra en définitive des estimations de la crue centennale de l'ordre de 6000 m³/s et 6400 m³/s respectivement à Vallon et St-Martin.

5.7 Bibliographie

- Barrière, F. (1958), *Courrier adressé à l'Ing. en Chef*, 4e CE, Service d'Etude des Débits, (DDE07, Archives au Parc ;dossier : Navigation Intérieure, Rivières Navigables, Affaires Diverses, 1953-1958, 1926-1953 ;sous-dossier : 14^e section, Mesures de débits et jaugeages ;chemise : 1955-63 [587]).
- Barrière, F. (1959). Note sur l'activité du Service d'Etude des Débits - octobre 1958 à octobre 1959, *Rapport technique*, 4e CE, Service d'Etude des Débits, (DDE07, Archives au Parc ;dossier : Navigation Intérieure, Rivières Navigables, Affaires Diverses, 1953-1958, 1926-1953, sous-dossier : 14^e section, Mesures de débits et jaugeages, chemise : 1955-63 [586]).
- CGE (1922). Débits de l'Ardèche à Vallon et à St-Martin, relation entre les débits et les hauteurs limnimétriques, *Rapport technique*, n° 15.367, Services Techniques Hydrauliques, Paris, mars (IGA, Fond Pardé, 1116, B2-22 [56]).
- Coeur, D., Gigon, C., Lang, M., Naulet, R. et Recking, A. (2001). Historique-Ardèche - Utilisation de l'information historique pour une meilleure définition du risque d'inondation sur la rivière de l'Ardèche, *Rapport Final*, Contrat de Plan Etat-Région Rhône-Alpes, Cemagref Lyon, UPMF Grenoble, DDE Ardèche, juillet, 94 p.
- Cohn, T. A., Lane, W. L. et Baier, W. G. (1997). An algorithm for computing moments-based flood quantile estimates when historical flood information is available, *Water Resources Research*, 33 (9) : 2089-2096.
- Cohn, T. A., Lane, W. L. et Stedinger, J. R. (2001). Confidence intervals for expected moments algorithm flood quantile estimates, *Water Resources Research*, 37 (6) : 1695-1706.
- Combiér (1849). Rivière d'Ardèche - Profil en long d'une partie de la rivière d'Ardèche, depuis le moulin de Salavas jusqu'au Pont d'Arc, *Plan dressé par l'Ing. Ordinaire*, Ponts et Chaussées, Département de l'Ardèche, Aubenas (ADA, 1262W154 [812]).
- Combiér (1856). Du régime de l'Ardèche - De l'importance et de la durée des crues de cette rivière - Renseignements provoqués par la circulaire du 26 juillet 1856, *Rapport de l'Ing. Ordinaire*, Ponts et Chaussées, Arrondissement d'Aubenas, Aubenas, 19 septembre (ADA, 1262W154 [790]).
- Combiér (1857a). Carte générale du bassin de l'Ardèche, d'après Cassini, *Plan de l'Ing. Ordinaire*, Ponts et Chaussées, Département de l'Ardèche, Arrondissement d'Aubenas, Aubenas, 16 février (ADA, 1262W154 [837]).
- Combiér (1857b). Etudes relatives aux inondations, *Courrier de l'Ing. Ordinaire adressé à l'Ing. en Chef de Mardigny*, Ponts et Chaussées, Arrondissement d'Aubenas, Aubenas (ADA, 1262W154 [791]).
- Combiér (1857c). Etudes relatives aux inondations - 1er rapport fourni le 15 février 1857 en réponse à la circulaire du 26 juillet 1856, *Rapport de l'Ing. Ordinaire*, Ponts et Chaussées, Arrondissement d'Aubenas, Aubenas, 15 février (ADA, 1262W154 [789]).
- Combiér (1857d). Etudes relatives aux inondations - Plan du cours de l'Ardèche entre le pont suspendu de Vallon et le pont d'Arc, *Plan dressé par l'Ing. Ordinaire*, Ponts et Chaussées, Département de l'Ardèche, Arrondissement d'Aubenas, Aubenas, 16 février (ADA, 1262W154 [834]).

- Combiere (1857e). Etudes relatives aux inondations - Profils en long et en travers du lit de l'Ardèche entre le pont suspendu de Vallon et le Pont d'Arc, *Plan dressé par l'Ing. Ordinaire*, Ponts et Chaussées, Département de l'Ardèche, Arrondissement d'Aubenas, Aubenas, 16 février (ADA, 1262W154 [835]).
- Combiere (1857f). Etudes relatives aux inondations - Rivière d'Ardèche - Profil en long de l'Ardèche pris à la ligne d'étiage depuis son origine jusqu'au pont d'Aubenas - Profil en long de l'Ardèche pris à la ligne d'étiage entre le pont d'Aubenas et le Rhône - Profil en long des crues du 28 septembre 1846 et du 10 octobre 1827, *Plan dressé par l'Ing. Ordinaire*, Ponts et Chaussées, Département de l'Ardèche, Aubenas, 16 février (ADA, 1262W154 [811]).
- Combiere (1857g). Profil en travers du Pont d'Arc (tête amont), *Plan dressé par l'Ing. Ordinaire*, Ponts et Chaussées, Département de l'Ardèche, Arrondissement d'Aubenas, Aubenas (ADA, 1262W154 [798]).
- CTGREF, SRAE, DIAME, SH (1980-1982). *Synthèse nationale sur les crues des petits bassins versants*, Fascicule 3 : la méthode CRUPEDIX.
- Cunnane, C. (1979). A note on the Poisson assumption in partial duration series models, *Water Resources Research*, 15 (2) : 489-494.
- Delemer (1904). Etude sur les Crues de l'Ardèche - Mémoire, *Annales des Ponts et Chaussées*, T. XIII (18) : 130-216, pl. 6 et 7.
- Durand et Soubeyrand (1958). Crue de fin septembre et octobre 1958 - Circulaire S.C.V, n° 950/H du 13 octobre 1958 (Direction des Ports Maritimes et des Voies Navigables) - Rapport de l'ingénieur, *Rapport des Ing. en Chef, numéro*, number 724/SH, Ponts et Chaussées, Service Hydraulique, Privas, décembre (DDE07, Service d'Annonce des Crues, Rapport d'étude [202]).
- Fargue, R. (1896). Note sommaire résumant la méthode suivie pour les jaugeages exécutés sur la Garonne, à Langon, de 1857 à 1862, Ponts et Chaussées, Commission des Annonces des Crues, Paris, 12 novembre (IGA, Fond Pardé, 1039 [108]).
- Fisher, R. A. et Tippett, L. H. C. (1928). Limiting forms of the frequency distribution of the largest or smallest member of a sample, *Proceedings of the Cambridge Philosophical Society*, Vol. 24, pp. 180-190.
- Fréchet, M. (1927). Sur la loi de probabilité de l'écart maximum, *Ann. Soc. Polonaise Math.*, 6 : 93-116.
- Gigon, C. (2002). Crues de l'Ardèche à Vallon Pont d'Arc, *Rapport technique*, n° VALLON 12, DDE07, SUAP/PR, Service d'Annonce des Crues, Privas, décembre (DDE07, Service d'Annonce des Crues, Rapports d'étude [96]).
- Guillot, P. et Duband, D. (1967). La méthode du Gradex pour le calcul de la probabilité des crues à partir des pluies, *Colloque International sur les crues et leur évaluation*, Leningrad, 15-22 août, *IASH*, publication n° 84, 560-56. Symposium International d'Hydrologie, Fort Collins, sept.
- Hirsch, R. M. et Stedinger, J. R. (1987). Plotting positions for historical floods and their precision, *Water Resources Research*, 23 (4) : 715-727.
- Jarrett, R. D. (1984). Hydraulics of high-gradient streams, *Journal of the Hydraulics Division. ASCE*, 110 (11) : 1519-1539.
- Jarrett, R. D. (1987). Errors in slope-area computations of peak discharges in mountain streams, *Journal of Hydrology*, 96 (1/4) : 53-67.

- Jenkinson, A. F. (1955). The frequency distribution of the annual maximum or minimum values of meteorological elements, *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 87: 158-171.
- Julien, L. (1861). Observations hydrométriques au pont suspendu de Vallon - Feuilles mensuelles - juillet 1861, *Relevé hydrométrique*, Ponts et Chaussées, Département de l'Ardèche, Arrondissement d'Aubenas, (ADA, 1262W152 [746]).
- Kirby, W. H. (1987). Linear error analysis of slope-area discharge determinations, *Journal of Hydrology*, 96 (1/4): 125-138.
- Lane, W. L. et Cohn, T. A. (1996). Expected Moments Algorithm for flood frequency analysis, *North American water and Environment Congress '96*, Anaheim, California, USA, jun.
- Lang, M. (1995). *Les chroniques en hydrologie: Modélisation comparée par un système de gestion de bases de données relationnel et orienté-objet, Traitement de base et intervalles de confiance des quantiles de crues, Techniques d'échantillonnage par la méthode du renouvellement*, Thèse de doctorat, Université Joseph Fourier, Grenoble.
- Lang, M., Naulet, R., Recking, A., Coeur, D. et Gigon, C. (2002). Etude de cas: l'analyse des pluies et crues extrêmes observées depuis 200 ans dans un bassin cévenol, l'Ardèche, *La Houille Blanche*, à paraître n° 6 ou 7/8.
- Lang, M., Ouarda, T. B. M. J. et Bobée, B. (1999). Towards operational guidelines for over-threshold modeling, *Journal of Hydrology*, 225: 103-117.
- Lemoine, G. (1896). Essai sur le problème de l'annonce des crues pour les rivières des départements de l'Ardèche, du Gard et de l'Hérault, *Annales des Ponts et Chaussées*, 2eme sem. (61): 523-567.
- Lubes, H. et Masson, J. M. (1991). Méthode des moments de probabilité pondérés - Application à la loi de Jenkinson, *Hydrol. Continent.*, 6 (1): 67-84.
- Marchegay (1861). Rapport sur les inondations qui ont eu lieu en 1857 dans les vallées des principaux torrents du département de l'Ardèche, et en particulier sur les inondations du 10 septembre 1857, *Annales des Ponts et Chaussées*, T. I (1ère année): 1-16.
- Mardigny (de), P. (1857). Etudes relatives aux inondations - Rivière d'Ardèche, *Rapport de l'ingénieur en chef*, Ponts et Chaussées, Département de l'Ardèche, Privas, 1er avril (ADA, 1270W1 [792]).
- Mardigny (de), P. (1860a). *Mémoire sur les inondations des rivières de l'Ardèche*, Dalmont et Dunod, Paris (ENPC, Fond Ancien, 273-4976 v. 18524 [738]).
- Mardigny (de), P. (1860b). Mémoire sur les inondations des rivières de l'Ardèche, *Annales des Ponts et Chaussées*, T. XIX (258): 249-296, pl. 174 et 175 (DDE 07 [675]).
- Météo France (1995a). *Inventaire des épisodes de fortes pluies en Ardèche - Tome I: 1807 - 1927*, Aubenas.
- Météo France (1995b). *Inventaire des épisodes de fortes pluies en Ardèche - Tome II: 1928 - 1994*, Aubenas.
- Michel, C. (1982). *Extrapolation par la méthode du GRADEX*. Note du 03-05, Cemagref, Antony.
- Ministère de l'Industrie (1951-1968). Stations de jaugeages exploitées par les circonscriptions électriques - Relevés journaliers ou mensuels, *IV: Rhône-Méditerranée-Corse*, Direction du Gaz et de l'Electricité, Service Technique de l'Energie Electrique et

- des Grands Barrages, (DDE07, Archives au Parc, dossier: Stations de jaugeage, 1964-66-67-68 [571, 572, 573, 574] et IGA, Fond Pardé, PS3 [133]).
- Ministère des Travaux Publics (1847). Programme d'étude sur le cours de la Loire, *Règlement*, Administration des Ponts et Chaussées, (dans Champion, 1861, pièce justificative n 196, p. CXXIX [816]).
- Miramont, C. et Guilbert, X. (1997). Variations historiques de la fréquence des crues et évolution de la morphogenèse fluviale en moyenne Durance (France du Sud-Est), *Géomorphologie* (4) : 325-337.
- Morel (1921). Bassin du Rhône - L'Ardèche - Profil en long de la ligne d'eau, Planche 2 (Ruoms-Vallon), *Levé effectué du 07/04/1921 au 20/04/1921 par l'Adjoint technique des Ponts et Chaussées pour le compte du Service des Forces Hydrauliques*, Service du Nivellement Général de la France,, (IGA, Fond Pardé, 1116, B2-21 [112]).
- Morlière (1857a). Etudes relatives aux inondations - Rivière d'Ardèche - Profils des crues du 10 septembre et du 5 octobre 1857, *Plan dressé par l'élève Ing. ff d'Ing. d'Arrondissement*, Ponts et Chaussées, Département de l'Ardèche, Aubenas (ADA, 1262W154 [796]).
- Morlière (1857b). Etudes relatives aux inondations - Rivière d'Ardèche - Profils en long et plan - Profil comparatif des crues de 1827, 1846 et 1857, *Plan dressé par l'élève Ing. ff d'Ing. d'Arrondissement*, Ponts et Chaussées, Département de l'Ardèche, Aubenas (ADA, 1262W154 [795]).
- Morlière (1857c). Rivière d'Ardèche - Rapport sur la crue du 10 septembre, *Rapport de l'élève Ing. ff d'Ing. d'Arrondissement*, Ponts et Chaussées, Arrondissement d'Aubenas, Aubenas, 23 octobre (ADA, 1262W154 [793]).
- Mr Le Curé de St-Martin d'Ardèche (1959a). Observations sur les crues de l'Ardèche, *Courrier adressé à Maurice Pardé*, 21 mai (IGA, Fond Pardé, 1116, B2-27 [143]).
- Mr Le Curé de St-Martin d'Ardèche (1959b). Observations sur les crues de l'Ardèche, *Courrier adressé à Maurice Pardé*, 8 mai. (IGA, Fond Pardé, 1116, B2-27 [143]).
- Ouarda, T. B. M. J., Ashkar, F. et El-Jabi, N. (1993). Peak over threshold model for seasonal flood variations, in Kuo, C. Y. (ed.), *Engineering Hydrology*, Publication, A., Proc. of Symposium of San Francisco, California, 25-30 July, pp. 341-346.
- Pardé, M. (1925a). Ensemble de notes, *Manuscrit*, (IGA, Fond Pardé, 1116, B2-28 [170]).
- Pardé, M. (1925b). *La genèse des crues, Etude Générale*, Thèse principale de doctorat, Institut des Etudes Rhodaniennes de l'Université de Lyon et P. Mason, Grenoble (UJF, Bibliothèque de l'Institut Dolomieu - Géologie, cote: TH/PAR/1925/T.2 [167,168,190,1194]).
- Pardé, M. (1925c). *Le régime du Rhône, Etude hydrologique*, Thèse principale de doctorat, Institut des Etudes Rhodaniennes de l'Université de Lyon et P. Mason, Grenoble (UJF, Bibliothèque de l'Institut Dolomieu - Géologie, cote: TH/PAR/1925/T.1 [167,168,190,1194]).
- Pardé, M. (1942). Quelques nouveautés sur le régime du Rhône, *Les Etudes Rhodaniennes* : 200 p.
- Pardé, M. (1953a). La genèse et les caractères de plusieurs grandes inondations récentes, *Annales de Géographie*, 62ème année: 18-36.
- Pardé, M. (1953b). *Le régime des rivières du massif central depuis le début du siècle, Mélanges géographiques offerts à Arbos, P.*, Institut de Géographie, Clermont-

Ferrand.

- Pardé, M. et Beauregard (de), J. (1959). Quelques remarques sur les crues cévenoles de septembre et octobre 1958, *La Houille Blanche (SHF)* (spécial A-1959) : 670-681.
- Perret (1857). Etudes relatives aux inondations - Bassin du Rhône - Courbes des débits de l'Ardèche à St Martin d'Ardèche - Crues du 28 au 29 septembre 1846, du 26 octobre au 3 novembre 1853 et du 10 mai au 10 juillet 1856, *Plan dressé par l'Ing. Ordinaire*, Ponts et Chaussées, Département de l'Ardèche, Arrondissement de Privas, Privas, 5 mars (ADA, 1262W154 [810]).
- Reynier, E. (s.d.). Esquisse géographique du Vivarais - essai de géographie régionale, chap V : *Les cours d'eau et les inondations* : 81-112.
- Roudil, P. (1998). La traversée de l'Ardèche, *Mémoire d'Ardèche - Temps présent* (58).
- s.n. (1859). Crues des 14 et 15 octobre 1859 - Rivières du Doux, d'Erieux, d'Ardèche, de Chassezac, d'Ibie, *Rapport technique*, Ponts et Chaussées, Département de l'Ardèche, Privas (ADA, 1270W1 [691]).
- Safege (2000). Etude globale pour une stratégie de réduction des risques dus aux crues du Rhône., *Analyse hydrologique*, Territoire Rhône, nov.
- SOGREAH (1994a). Etude hydraulique des zones inondables de la rivière Ardèche entre le Pont d'Aubenas et le Pont d'Arc, n° 300243, décembre.
- SOGREAH (1994b). Etude Hydrologique et hydraulique de la crue du 22 septembre 1992, n° 300152, décembre.
- Vaschalde, H. (1890). *Les inondations du Vivarais depuis le XIIIème siècle, prédiction et historique de celle du 22 septembre 1890*, Aubenas (BNF, LK2- 3834 [252]).
- Vignon, E. J. M. (1862). *Études historiques sur l'administration des voies publiques en France : aux dix-septième et dix-huitième siècles.*, Vol. I, Dunod, Paris.
- Wohl, E. E. (1998). Uncertainty in flood estimates associated with roughness coefficient, *Journal of Hydraulic Engineering. ASCE*, 124 (2) : 219-223.



Chapitre 6

Conclusion et perspectives

6.1 Conclusion

Nous avons abordé dans ce travail de thèse l'utilisation de l'information des crues historiques dans l'objectif d'améliorer la prédétermination du risque d'inondation. Outre l'intérêt que représente ce thème par les enjeux humains et économiques qu'il recouvre, il revêt un caractère pluridisciplinaire particulièrement attractif. En contre partie la diversité des aspects à aborder a été plus difficile à concilier avec l'exercice académique d'une thèse. Nous nous sommes efforcé d'appréhender le problème d'un point de vue pratique en déroulant l'ensemble des différents aspects de la démarche dans le cadre du cas d'étude de l'Ardèche (France).

Nous avons présenté dans le chapitre 2 les différentes données exploitables dans l'analyse fréquentielle des crues. Les informations préhistoriques, historiques et contemporaines ont été abordées en détaillant d'une part les moyens disponibles pour les obtenir et d'autre part les problèmes liés à leur utilisation. Nous avons mis en avant que, concernant l'information historique en particulier, la littérature faisait état de peu de développements méthodologiques pour la collecte des données. Les hydrologues ont très tôt travaillé dans un contexte interdisciplinaire, en s'associant les compétences de géomorphologues, de géobotanistes, pour la collecte de l'information préhistorique. Paradoxalement l'appréhension de la période historique s'effectue sans recours extérieurs. Face à ce constat, une méthodologie basée sur une collaboration entre historiens et hydrologues, intitulée HISTORISQUE, a permis d'éviter deux écueils courants dans le domaine de l'étude des crues historiques : (a) une collecte principalement descriptive et qualitative ne permettant pas d'exploiter statistiquement cette information ; (b) un inventaire hydrologique incomplet faute d'avoir su tirer parti de la diversité des sources d'archives. Enfin nous avons présenté dans le chapitre 2 la formalisation de l'information sur les crues en vue de son exploitation dans l'analyse fréquentielle. Il ressort que les données, sans distinction d'origine, sont de nature : (a) non censurée, les intensités des crues sont connues ; (b) censurée, les intensités des crues sont inconnues mais situées au-dessous ou au-dessus d'un seuil (C) ou dans un intervalle (IC). Parallèlement le seuil de troncature peut être : (a) une variable aléatoire et l'information est alors qualifiée de censurée (C) ou de binomiale (BC) suivant que l'intensité des crues est connue ou non, (b) une valeur fixe correspondant à la dernière des plus fortes crues connues de manière exhaustive et classées par ordre décroissant (MF).

L'analyse fréquentielle des crues avec données historiques a été traitée dans le cha-

pitre 3. Les méthodes paramétriques adaptées aux séries de maxima annuels (AM) ont été étudiées en premier lieu. Une synthèse de celles exploitant l'information historique nous a conduit à proposer une formulation généralisée pour la méthode du maximum de vraisemblance (MLE_G). Cette formulation a l'avantage de pouvoir représenter : (a) les quatre types d'information (binomiale : BC, censurée : C, censurée dans un intervalle : IC, crues maximales : MF), (b) une information censurée aussi bien sur la période systématique que sur la période historique (S ou H), (c) des seuils de perception successifs différents au cours du temps. L'approche adoptée ne permet pas par contre de calculer la matrice d'information de Fisher. Ainsi la variance asymptotique (*Cramer-Rao Lower Bound*, CRLB) des quantiles estimés par la méthode MLE_G ne peut être déterminée qu'à partir de la matrice Hessienne évaluée au niveau des paramètres estimés (*observed information matrix*). Dans le cadre de l'approche AM nous avons également développé l'adaptation novatrice de la méthode de l'algorithme des moments espérés (EMA) pour les lois EV1 et GEV.

L'approche exploitant les valeurs supérieures à un seuil (POT) a été étudiée en second lieu. Les méthodes qui utilisent l'expression du maximum de vraisemblance ont été privilégiées car elles permettent de traiter relativement facilement l'information hétérogène et, au regard de la littérature, montrent des écarts quadratiques plus faibles que les autres méthodes. On constate une similitude entre les expressions de l'approche de type maxima annuel (AM), où l'occurrence des crues supérieures au seuil de perception est représentée par une loi binomiale, et celles de l'approche de type valeur supérieure à un seuil (POT), où l'occurrence des crues supérieures au seuil de perception est représentée ici par une loi de Poisson.

Nous avons repris le modèle d'incorporation de l'information censurée développé par Hirsch et Stedinger (1987) pour le calcul des probabilités empiriques d'un échantillon mixte, composé de crues de la période récente et historique. Ce modèle a fait l'objet d'une modification pour le cas général où plusieurs seuils de perception existent au cours du temps.

Concernant la prise en compte des erreurs de mesure des débits, nous avons mis en évidence dans le chapitre 3 que les données censurées dans un intervalle (IC) n'étaient pas adaptées pour les représenter. Ces dernières étant réservées aux cas où deux bornes physiques existent. L'erreur de mesure doit être prise en compte explicitement dans l'expression du maximum de vraisemblance. Nous avons illustré ce fait par un exemple avec la loi de Gumbel (EV1) dans le cas de l'information systématique. Si l'erreur n'est pas prise en compte dans l'expression du maximum de vraisemblance, ce qui est le cas pour la majorité des expressions présentées dans la littérature, un biais est observé. Si la majorité des auteurs conclut à l'intérêt de l'information historique pour la réduction de l'incertitude d'échantillonnage, il semble que cet intérêt, au moins pour les lois à deux paramètres, soit moins évident lorsqu'il existe une erreur de mesure. Des développements théoriques restent à établir sur la prise en compte des erreurs de mesure avec les différents types d'information historique et pour différentes lois (Kuczera, 1992, a traité le cas de la loi log Normale et de l'information historique de type BC).

Nous avons mis en avant dans le chapitre 3 le fait que les variances asymptotiques des quantiles, et au-delà les intervalles de confiance, ne semblaient pas pouvoir être estimés directement à partir de la matrice Hessienne lorsque des valeurs censurées dans un intervalle (IC) sont prises en compte. Pour la loi EV1 et sans prise en compte de l'information historique, les variances asymptotiques déterminées en considérant des données

ponctuelles (c'est à dire non comprises dans un intervalle) soit à partir de l'inverse de la matrice d'information de Fisher, soit à partir de l'inverse de la matrice Hessienne évaluée au niveau des paramètres estimés, sont très voisines. Par contre, lorsque de l'information censurée dans un intervalle (IC) est exploitée, la variance asymptotique obtenue à partir de l'inverse de la matrice Hessienne est très nettement inférieure. Nous n'avons pas actuellement d'explication sur ce point qui devra être développé dans les recherches futures.

Nous avons abordé dans le chapitre 4 la collecte des données historiques sur les inondations à travers l'étude de cas de la rivière Ardèche (France). La méthodologie originale, dénommée HISTORISQUE, initiée sur les rivières du Guiers et de l'Isère, a pu être approfondie sur l'Ardèche. Elle se déroule dans un cadre interdisciplinaire avec une collaboration entre historiens et hydrologues. Après avoir présenté les caractéristiques du bassin versant servant de support à l'étude, nous avons abordé les aspects généraux et le déroulement de la démarche. Les trois étapes principales de la méthodologie HISTORISQUE ont été détaillées: (a) réalisation d'un *Etat Général des Sources (EGS)* disponibles dans les divers fonds d'archives concernant les données hydrologiques historiques, (b) *collation des données*, à partir de l'EGS, et enregistrement des informations ayant un intérêt du point de vue de l'étude des crues historiques dans une *base de données des références*, (c) élaboration des différents *historiques* (producteurs de données, événements du bassin) en interrogeant par mots clé cette base. Ce travail de reconstitution forme l'appareillage critique de l'étude. Il permet d'obtenir une vision exhaustive des sources d'informations disponibles et au-delà des événements ayant eu lieu sur le bassin versant. Les outils mis en oeuvre garantissent une certaine « traçabilité » en permettant de revenir à la source de chaque information. Enfin, nous avons présenté les principaux résultats obtenus à l'issue de l'enquête historique. En premier lieu des *historiques* des services producteurs de données techniques sur les cours d'eau: données topographiques, hydrométriques et météorologiques. En second lieu les valeurs remarquables de pluies et de cotes de crues de l'Ardèche.

L'exploitation de l'information historique sur deux secteurs du bassin de l'Ardèche, Vallon Pont-d'Arc et St-Martin d'Ardèche, a été traitée dans le chapitre 5. Des séries de cotes de crues depuis 1644 ont été reconstituées puis converties en débits par le biais de modélisations hydrauliques 1D en régime permanent et transitoire. Ces modèles permettent d'une part un transfert géographique d'une cote de crue ancienne jusqu'à une station actuelle, et d'autre part d'exploiter au mieux les indications sur la pente de la ligne d'eau fournies par les laisses de crues historiques. Au regard des différents tests de sensibilité réalisés, le coefficient de rugosité est le paramètre qui influence le plus l'incertitude sur le débit estimé. L'exploitation des relevés topographiques anciens a permis de reconstituer des courbes de tarage avec leurs incertitudes pour différentes époques. L'intercomparaison des débits de crue estimés à Vallon et à St-Martin montre une très bonne cohérence. L'analyse des séries reconstituées indique que l'hypothèse de stationnarité peut globalement être acceptée. Ce résultat met en avant l'exhaustivité des crues répertoriées et au-delà conforte le choix d'une collaboration entre hydrologues et historiens au sein de la démarche HISTORISQUE. L'analyse de la distribution des crues a été réalisée à partir des méthodes permettant la prise en compte de l'information historique. On constate que les quantiles obtenus en exploitant uniquement l'information systématique sont très inférieurs à ceux calculés en incorporant l'information historique. Cette dernière

montre son intérêt pour identifier le comportement asymptotique de la distribution des débits de crue. Les résultats obtenus en exploitant soit l'information historique, soit l'information pluviométrique (méthode du Gradex esthétique) sont très cohérents.

6.2 Perspectives

La recherche sur le thème des crues historiques se poursuit dans le cadre du projet SPHERE qui contient notamment un volet sur la paléohydrologie. Il sera intéressant de comparer les résultats obtenus par ces méthodes d'investigation avec ceux issus de la collecte des informations historiques, obtenues au cours de cette thèse par le biais d'une collaboration entre historiens et hydrologues. Des incertitudes sur l'exhaustivité des événements détectés par les techniques de la paléohydrologie pourront alors être levées (problème de l'effacement possible des traces de crues anciennes par d'autres plus fortes ayant suivies, etc.). On notera également que dans le contexte de ce projet une étude complémentaire du secteur de Vallon-Pont-d'Arc a été récemment réalisée pour étudier l'impact sur l'estimation des débits des débordements dans la combe d'Arc lors des très fortes crues (Moussay, 2002). Les résultats montrent peu de différence (6 % pour les fortes crues) entre les nouvelles courbes de tarage et celles que nous avons déterminées en supposant négligeables les débits écoulés dans la combe. Cette modélisation complémentaire a par ailleurs permis d'évaluer les conditions d'écoulement en forte crue dans la combe d'Arc et seront exploitées par les paléohydrologues.

Des développements théoriques importants restent à effectuer sur la prise en compte des erreurs de mesure (reconstitution des débits de crue) dans les méthodes d'estimation permettant de traiter l'information historique. Ce travail est nécessaire pour évaluer l'intérêt de cette information en termes de réduction de l'intervalle de confiance des quantiles estimés. Les incertitudes sur les débits de crue des séries reconstituées sur l'Ardèche pourront alors être également exploitées. On notera qu'il serait intéressant d'étudier les approches bayésiennes qui semblent mieux appropriées pour intégrer les erreurs de mesure. La détermination des fonctions de densité des paramètres (et au-delà des régions de confiance des quantiles) est souvent plus facile que par l'approche classique. On étudiera à cet effet les travaux de O'Connell (1999) qui prend en compte les incertitudes sur les débits maxima annuels avec différentes distributions discrètes en fonction de la nature des données ainsi que l'incertitude sur la durée des seuils de perception.

La comparaison par le biais de simulations Monte-Carlo des approches exploitant l'information historique dans le contexte soit des séries de maxima annuels (AM) soit des séries de valeurs supérieures à un seuil (POT) a été réalisée avec la méthode du maximum de vraisemblance (Martins et Stedinger, 2001). Seules les données de type C et BC ont été considérées, il serait intéressant d'effectuer les mêmes travaux avec des données censurées dans un intervalle (IC). On notera que pour répondre au problème des valeurs aberrantes du paramètre de forme obtenues parfois par la méthode du maximum de vraisemblance pour les lois GEV et GPA, Martins et Stedinger (2001) proposent une approche intéressante. Ils utilisent une distribution a priori du paramètre de forme pour le restreindre dans un domaine statistiquement et physiquement raisonnable.

Nous avons brièvement abordé le problème des probabilités empiriques. Un cadre général permet de traiter l'information historique en prenant en compte différents seuils au cours du temps. Plusieurs points restent à développer : (1) le traitement de l'information

de type binomiale (BC) , (2) la détermination des intervalles de confiance en présence d'information historique, (3) le choix de la date de début de la période historique. Un travail complémentaire a permis de progresser sur ce dernier point, à partir de simulations Monte Carlo d'une série d'échantillons mixtes (périodes systématique et historique) dont les valeurs sont issues d'une loi GEV (Troy, 2002).

Enfin la démarche HISTORIQUE se poursuit sur l'Ardèche, l'enquête historique qui a été réalisée va être prolongée en remontant au moyen âge. La collaboration entre historiens et hydrologues pour la collecte et la validation des crues anciennes ayant montré son intérêt, l'approche pourra être reproduite sur d'autres secteurs d'étude.

6.3 Bibliographie

- Hirsch, R. M. et Stedinger, J. R. (1987). Plotting positions for historical floods and their precision, *Water Resources Research*, 23 (4) : 715-727.
- Kuczera, G. (1992). Uncorrelated Measurement Error in Flood Frequency Inference, *Water Resources Research*, 28 (1) : 183-188.
- Martins, E. S. et Stedinger, J. R. (2001). Historical information in generalized maximum likelihood framework with partial duration and annual maximum series, *Water Resources Research*, 37 (10) : 2559-2567.
- Moussay, D. (2002). *Etude hydraulique pour la reconstitution de débits de crues historiques : application au site de Vallon-Pont-d'Arc sur l'Ardèche*, Travail de fin d'étude. Entpe Vaux-en-Velin, Cemagref Lyon, 28 juin, 83p.
- O'Connell, D. (1999). *FLDFRQ3 Three-parameter maximum likelihood flood-frequency estimation with optimal probability regions using parameter grid integration : User's Guide (Release 1.1)*, U.S. Bureau of Reclamation, Denver, CO, feb.
(<ftp://ftp.seismo.usbr.gov/pub/outgoing/geomagic/src/fldfreq3/userman.pdf>)
- Troy, B (2002). Traitement de l'information historique pour la prédétermination des crues : application à la loi GEV. *Rapport de Stage 2^e année*, Ecole Centrale Lyon, Cemagref, août, 49p.



Annexe A

Rapports et publications réalisés dans le cadre de la thèse

- Barriendos, M., Coeur, D., Lang, M., Llassat, M. C., **Naulet, R.**, Lemaitre, F. et Barrera, T. (2002). Stationarity analysis of historical flood in France and Spain with classification of events based on historical flood levels or damages. *EGS, XXIV General Assembly, Posters session*, session NH4 03: The use of historical data in natural hazard assessment: Floods, Nice, France, 25-29 april.
- Brochot, S., Coeur, D., Lang, M., **Naulet, R.** et Richard, D. (2000). Historisque-Isère et torrents affluents: utilisation de l'information historique pour une meilleure définition du risque d'inondation, *Rapport final*, Cemagref, Thème mobilisateur risque et aménagement, nov.
- Coeur, D., Gigon, C., Lang, M. et **Naulet, R.** (1999). Historisque-Ardèche - Utilisation de l'information historique pour une meilleure définition du risque d'inondation, *Rapport technique*, Programme de Recherche sur les Risques Naturels, Contrat de Plan Etat-Région Rhône-Alpes, juillet.
- Coeur, D., Gigon, C., Lang, M., **Naulet, R.** et Recking, A. (2001). Historisque-Ardèche - Utilisation de l'information historique pour une meilleure définition du risque d'inondation sur la rivière de l'Ardèche, *Rapport Final*, Programme de Recherche sur les Risques Naturels, Contrat de Plan Etat-Région Rhône-Alpes, juillet.
- Coeur, D., Lang, M., **Naulet, R.**, Brunet, R. et Strazzeri, D. (1998). Histoire et connaissance des phénomènes naturels extrêmes, *Ingenierie - EAT* (numéro spécial Risques Naturels): 15-26.
- Coeur, D., **Naulet, R.**, Lang, M. et Soulingeas, Y. (1999). Historisque-Isère - Utilisation de l'information historique pour une meilleure définition du risque d'inondation, *Rapport intermédiaire 1ère année*, Pôle Grenoblois d'Etude et de Recherche pour la Prévention des Risques Naturels, mars.
- Lang, M., Coeur, D., Lallement, C. et **Naulet, R.** (1998). Valorisation de l'information historique pour la prédétermination du risque d'inondation: application au bassin du Guiers, *Ingenierie - EAT* (16): 3-13.
- Lang, M., Coeur, D., Lallement, C. et **Naulet, R.** (1999). Use of historical information for flood frequency studies: the example of river Guiers, in Llasat, C., Versace, P. et Ferrari, E. (ed.), *Heavy Rains and Rare Floods - Proceedings of the Joint Session of Topic IV (Rare Floods) and Topic VI (Heavy Rains)*, Vol. 2049, FRIEND-AMHY,

- UNESCO IHP-V 1.1 Project, National Research Council Group for Prevention from Hydrogeological Disasters, Istanbul, Turquie, 16 oct. 1998.
- Lang, M., Coeur, D., Lallement, C., **Naulet, R.** et Boudou, G. (1998). Historisque-Guiers - Utilisation de l'information historique pour une meilleure définition du risque inondation, *Rapport technique*, Pôle Grenoblois d'Etude et de Recherche pour la Prévention des Risques Naturels, juin.
- Lang, M., **Naulet, R.**, Recking, A., Coeur, D. et Gigon, C. (2002). Etude de cas : l'analyse des pluies et crues extrêmes observées depuis 200 ans dans un bassin cévenol, l'Ardèche, *La Houille Blanche*, à paraître n° 6 ou 7/8.
- Naulet, R.**, Lang, M., Coeur, D. et Gigon, C. (2001). Collaboration between historians and hydrologists on the Ardeche river (France). First step: Inventory of Historical Flood Information, in Glade, T., Albini, P. et Frances, F. (ed.), *The Use of Historical Data in Natural Hazard Assessments*, Vol. 17 of *Advances in Natural and Technological Hazards Research*, chapter B: Flooding, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, oct, 113-129.
- Naulet, R.** (2002). Eléments de statistique appliqués à l'hydrologie, *Rapport technique*, Cemagref, Lyon, 123p.
- Sheffer, N., Enzel, Y., Grodek, T., Benito, G., Lang, M., **Naulet, R.** et Gigon, C. (2000). Extreme floods of the Ardèche river, France (SPHERE Project), *EGS, XXIV General Assembly, Posters session*, session NH4 03: The use of historical data in natural hazard assessment : Floods, Nice, France, 25-29 april.

Annexe B

Détail des programmes

Sommaire

B.1	Format des fichiers de données	231
B.2	Lecture des fichiers et construction des structures	233
B.3	Fonction d'estimation des paramètres de la loi EV1 par la méthode EMA	234
B.4	Fonction d'estimation des paramètres de la loi EV1 par la méthode MLE_G	236
B.5	Fonction d'estimation des paramètres de la loi GEV par la méthode EMA	240
B.6	Fonction d'estimation des paramètres de la loi GEV par la méthode MLE_G	243
B.7	Bibliographie	246

Les programmes sont des fonctions (ou sous-routines) écrites pour Matlab (version 5.3.1) dont la syntaxe est très proche du langage C. Le choix de ce mode de programmation est lié à la grande bibliothèque disponible, ces fonctions peuvent dans tous les cas être converties en applications indépendantes (C et C++).

B.1 Format des fichiers de données

On considère deux types de données : (a) les débits d'intensité connue notés NC pour non censuré et (b) les débits compris dans un intervalle, notés IC pour *interval censored*. Ces deux types de données couvrent soit la période systématique (notée S) soit la période historique (notée H). Le nom du fichier de données est composé du nom de la station, de la période, du type de données et de l'extension « .dat » : *NomStationPériodeType.dat*. Si tous les types de données sont disponibles on disposera par conséquent de quatre fichiers, soit en prenant pour exemple la station de Bruceton (Big Sandy River) :

- i*) Fichier de données systématiques non censurées : BrucetonSNC.dat
- ii*) Fichier de données systématiques censurées : BrucetonSIC.dat
- iii*) Fichier de données historiques non censurées : BrucetonHNC.dat
- iv*) Fichier de données historiques censurées : BrucetonHIC.dat

Les données sont présentées en colonnes, séparées par un espace. Différents formats de date sont possibles, le même type de format doit cependant être utilisé au sein d'un même fichier. Des commentaires (localisation de la station, validité de telle crue, etc.) peuvent être insérés s'ils sont précédés du signe « % ». Le format des fichiers des données non censurées et censurées est présenté au tableau (B.1).

Fichier des données non censurées	Fichier des données censurées
jj mm aaaa débit%valeur incertaine	jj mm aaaa UB LB
mm aaaa débit	mm aaaa UB LB
aaaa débit	aaaa UB LB

TAB. B.1 – *Format des fichiers*

avec :

- UB, la borne supérieure qui peut avoir pour valeur soit : Inf (pour $+\infty$), soit un réel positif ;
- LB, la borne inférieure qui peut avoir pour valeur soit : -Inf (pour $-\infty$), soit un réel positif.

B.2 Lecture des fichiers et construction des structures

Les fichiers non censurés sont lus par la fonction *LireNC(PathNomFichier)* qui retourne une structure présentée au tableau (B.2). Les fichiers censurés sont quant à eux lus par la fonction *LireIC(PathNomFichier)* qui retourne une structure illustrée dans le tableau (B.3).

Champs	Valeurs
NC.Donnee	fichier présent ou non, valeur « O » ou « N »
.Debit	débit en m ³ /s
.N	nombre de maxima annuels
.Date.Jour	01 si absent
.Mois	01 si absent
.Annee	obligatoire
.Njour	nombre de jours depuis l'an 0.

TAB. B.2 – Structure des données non censurées

Champs	Valeurs
NC.Donnee	fichier présent ou non, valeur « O » ou « N »
.UB	borne supérieure: Inf ou débit en m ³ /s
.LB	borne inférieure: -Inf ou débit en m ³ /s
.N	nombre d'intervalles
.Date.Jour	01 si absent
.Mois	01 si absent
.Annee	obligatoire
.Njour	nombre de jours depuis l'an 0.

TAB. B.3 – Structure des données censurées

Les fonctions *LireNC(NomStation)* et *LireIC(NomStation)* trient les données chronologiquement. On utilise ces fonctions de la façon suivante :

S.NC=LireNC([Path NomStation 'SNC.dat'])

S.IC=LireIC([Path NomStation 'SIC'])

On obtient finalement une structure (S ou H) composée des champs IC et NC qui se subdivisent eux même en différents champs présentés ci-avant. Si certains des quatre fichiers possibles ne sont pas présents dans le répertoire du Path, le champ *Donnee* des structures contient la valeur « N ». Ce champ est utilisé ensuite pour déterminer les procédures à lancer dans les méthodes d'estimation.

B.3 Fonction d'estimation des paramètres de la loi EV1 par la méthode EMA

La fonction $EV1fitEMA(S,H)$ reçoit en arguments les structures présentées au §B.2 et renvoie un vecteur des paramètres estimé $\hat{\alpha}$ et $\hat{\beta}$ par la méthode EMA pour la loi de Gumbel (EV1).

On renvoie au §3.3.4, p. 76, pour le principe général de la méthode. La principale difficulté dans l'application de cette méthode à la loi de Gumbel réside dans le calcul des moments théoriques $\mu'_{H,r,j}^{<>}$, $\mu'_{H,r,j}^{>}$ et $\mu'_{H,r,j}^{<}$ de la variable censurée suivant les équations (3.76), (3.77) et (3.78). Le calcul des moments théoriques de la loi EV1 conduit à déterminer la valeur des intégrales d'Euler (Naulet, 2002). Dans le cas de l'information censurée les bornes de l'intégrale ne sont plus $[0; +\infty]$ mais $[z_{Uj}; z_{Lj}]$ avec la transformation $z = \exp[-(\frac{t-\beta}{\alpha})]$ ($t = x$, $t = y$ pour l'information censurée respectivement systématique et historique), soit l'expression de l'intégrale d'Euler :

$$I(z|k) = (-1)^k \int_{z_{Uj}}^{z_{Lj}} [\ln(z)]^k e^{-z} dz \tag{B.1}$$

La loi de Gumbel ayant deux paramètres, il est nécessaire de déterminer les deux premiers moments pour les estimer. L'intégrale d'Euler doit être calculée pour $k = 0, 1$ et 2 . Le calcul pour $k = 0$ est immédiat, par contre pour les deux autres valeurs on a recours à une intégration numérique. On utilise la fonction *quad8* de Matlab qui est basée sur un schéma récursif de quadrature fermée de *Newton-Côtes* à partir d'un polynôme de degré 8 (Forsythe et al., 1977).

Dans le cadre de l'information censurée, trois combinaisons recouvrent l'ensemble des valeurs possibles pour les bornes supérieures et inférieures. Le tableau (B.4). illustre ces trois cas de figure et donne les valeurs des bornes de la variable transformée z . Le signe & signifie un « et » logique.

TAB. B.4 – Différentes combinaisons des bornes de l'information censurée

Cas	Bornes	t_{Uj}	t_{Lj}	z_{Uj}	z_{Lj}
1		$+\infty$	& $-\infty < t < y_{Uj}$	0	& $z_{Uj} < z < +\infty$
2		$t_{Lj} < t < +\infty$	& $-\infty$	$0 < z < z_{Lj}$	& $+\infty$
3		$t_{Lj} < t < +\infty$	& $-\infty < t < t_{Uj}$	$0 < z < z_{Lj}$	& $z_{Uj} < z < +\infty$

Pour le cas 1, l'intégration numérique ne peut pas être employée directement puisque la borne $z_{Uj} = 0$, on décompose donc l'intégrale (B.1) suivant :

$$I(z|k) = (-1)^k \int_0^{+\infty} [\ln(z)]^k e^{-z} dz - (-1)^k \int_{z_{Lj}}^{+\infty} [\ln(z)]^k e^{-z} dz \tag{B.2}$$

et on utilise les résultats obtenus pour le calcul des moments classiques, soit :

$$I(z|1) = \gamma + \int_{z_{Lj}}^{+\infty} [\ln(z)] e^{-z} dz \quad (\text{B.3})$$

avec la constante d'*Euler-Mascheroni* $\gamma = 0.5772156649$

$$I(z|2) = \gamma^2 + \frac{\pi^2}{6} - \int_{z_{Lj}}^{+\infty} [\ln(z)]^2 e^{-z} dz \quad (\text{B.4})$$

Pour ces deux dernières équations (B.3) et (B.4) ainsi que pour le cas 2, $+\infty$ est représenté par la valeur 200. En effet comme le montre la figure (B.1), la fonction d'Euler tend vers 0 quand $z \rightarrow +\infty$ et une étude de sensibilité montre qu'au-delà de cette valeur l'intégrale ne varie plus pour une précision de 10^{-9} .

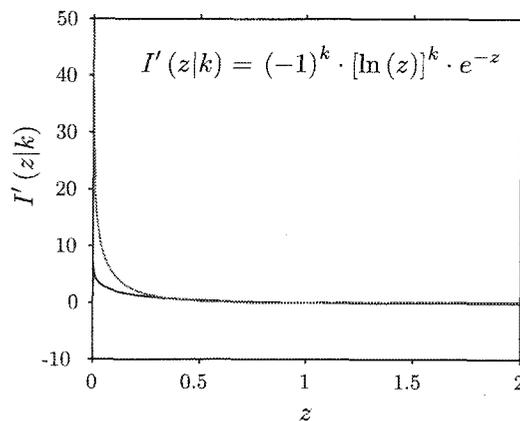


FIG. B.1 – *Fonction d'Euler*

L'estimation des paramètres de la loi de Gumbel, une fois les moments censurés non centrés calculés, s'obtient simplement à partir de l'expression liant les moments centrés et non centrés et du système d'équations liant les moments centrés d'ordre 1 et 2 aux paramètres.

B.4 Fonction d'estimation des paramètres de la loi EV1 par la méthode MLE_G

La fonction $EV1fitMLEg(para, S, H)$ contient le logarithme de la fonction de vraisemblance (LL_{TOT}) présenté à l'expression (3.62), ses dérivées premières ainsi que la matrice *Hessienne* pour la loi de Gumbel (EV1).

La fonction $fminunc(fun, x0, options, S, H)$ de Matlab permet de minimiser une fonction fun , ici l'argument est $EV1fitMLEg$. On renvoie au rapport de Naulet (2002) pour un rappel de ces méthodes d'optimisation. Les valeurs initiales α et β (vecteur $x0$) sont les estimations obtenues par la méthode EMA (cf. §B.3, p. 234). Le paramètre $options$ est un vecteur qui contient entre autres la tolérance sur le logarithme de la fonction de vraisemblance ($TolFun$), la tolérance sur les estimations des paramètres ($TolX$) et la tolérance sur la solution du préconditionnement des gradients conjugués ($TolPCG$). Ces trois valeurs sont fixées à 10^{-15} .

Pour simplifier la présentation des différentes expressions contenues dans la fonction $EV1fitMLEg$, seules les équations relatives à l'information systématique (v.a. X) sont présentées, celles relatives à l'information historique sont identiques. On pose :

$$Z = \frac{X - \beta}{\alpha} \quad (\text{B.5})$$

Les expressions des fonctions de densité et de répartition de la loi de Gumbel s'écrivent donc :

$$f_{Z^*}(\alpha, \beta | z_i) = \frac{1}{\alpha} \exp(-z_i - e^{-z_i}) \quad (\text{B.6})$$

$$F_{Z^*}(\alpha, \beta | z_i) = \exp(-e^{-z_i}) \quad (\text{B.7})$$

On adopte également la notation suivante :

$$f_{Z^*}(\alpha, \beta | z_{U_i}) \equiv f_{U_i} \text{ et } F_{Z^*}(\alpha, \beta | z_{U_i}) \equiv F_{U_i} \quad (\text{B.8})$$

$$f_{Z^*}(\alpha, \beta | z_{L_i}) \equiv f_{L_i} \text{ et } F_{Z^*}(\alpha, \beta | z_{L_i}) \equiv F_{L_i} \quad (\text{B.9})$$

La fonction $fminunc$ est un algorithme de minimisation, aussi pour maximiser LL_{TOT} on multiplie par -1 toutes les expressions ci-après :

– Information non censurée :

Logarithme de la fonction de vraisemblance :

$$LL_S^\bullet = \sum_{i=1}^{N_S^\bullet} [-\ln(\alpha) - z_i - e^{-z_i}] \quad (\text{B.10})$$

Dérivées premières :

$$\frac{\partial LL_S^\bullet}{\partial \alpha} = \sum_{i=1}^{N_S^\bullet} \left[(-1 + e^{-z_i}) \frac{\partial z_i}{\partial \alpha} - \frac{1}{\alpha} \right] \quad (\text{B.11})$$

$$\frac{\partial LL_S^\bullet}{\partial \beta} = \sum_{i=1}^{N_S^\bullet} (-1 + e^{-z_i}) \frac{\partial z_i}{\partial \beta} \quad (\text{B.12})$$

avec :

$$\frac{\partial z_i}{\partial \alpha} = -\frac{1}{\alpha} z_i \quad (\text{B.13})$$

$$\frac{\partial z_i}{\partial \beta} = -\frac{1}{\alpha} \quad (\text{B.14})$$

Éléments de la matrice Hessienne :

$$\frac{\partial^2 LL_S^\bullet}{\partial \alpha^2} = \sum_{i=1}^{N_S^\bullet} \left[(-1 + e^{-z_i}) \frac{\partial^2 z_i}{\partial \alpha^2} - \left(\frac{\partial z_i}{\partial \alpha} \right)^2 e^{-z_i} + \frac{1}{\alpha^2} \right] \quad (\text{B.15})$$

$$\frac{\partial^2 LL_S^\bullet}{\partial \beta^2} = \sum_{i=1}^{N_S^\bullet} \left[(-1 + e^{-z_i}) \frac{\partial^2 z_i}{\partial \beta^2} - \left(\frac{\partial z_i}{\partial \beta} \right)^2 e^{-z_i} \right] \quad (\text{B.16})$$

$$\frac{\partial^2 LL_S^\bullet}{\partial \beta \partial \alpha} = \sum_{i=1}^{N_S^\bullet} \left[(-1 + e^{-z_i}) \frac{\partial^2 z_i}{\partial \beta \partial \alpha} - \frac{\partial z_i}{\partial \beta} \frac{\partial z_i}{\partial \alpha} e^{-z_i} \right] \quad (\text{B.17})$$

avec :

$$\frac{\partial^2 z_i}{\partial \alpha^2} = \frac{2}{\alpha^2} z_i \quad (\text{B.18})$$

$$\frac{\partial^2 z_i}{\partial \beta^2} = 0 \quad (\text{B.19})$$

$$\frac{\partial^2 z_i}{\partial \beta \partial \alpha} = \frac{1}{\alpha^2} \quad (\text{B.20})$$

- Information censurée :

- intensité des crues comprise dans un intervalle :

Logarithme de la fonction de vraisemblance :

$$LL_S^{\langle \rangle} = \sum_{i=1}^{N_S^{\langle \rangle}} \ln(F_{U_i} - F_{L_i}) \quad (\text{B.21})$$

Dérivées premières :

$$\frac{\partial LL_S^{\langle \rangle}}{\partial \theta_r} = \sum_{i=1}^{N_S^{\langle \rangle}} \frac{1}{F_{U_i} - F_{L_i}} \left(\frac{\partial F_{U_i}}{\partial \theta_r} - \frac{\partial F_{L_i}}{\partial \theta_r} \right) \quad r = 1, 2 \quad (\text{B.22})$$

avec :

$$\frac{\partial F_{B_i}}{\partial \theta_r} = \frac{\partial z_{B_i}}{\partial \theta_r} e^{-z_{B_i}} F_{B_i} \quad r = 1, 2 \quad (\text{B.23})$$

où l'indice B_i signifie soit la borne supérieure U_i (*upper*) soit la borne inférieure L_i (*Lower*), avec :

$$\frac{\partial z_{B_i}}{\partial \theta_1} = \frac{\partial z_{B_i}}{\partial \alpha} = -\frac{1}{\alpha} z_{B_i} \quad (\text{B.24})$$

$$\frac{\partial z_{B_i}}{\partial \theta_2} = \frac{\partial z_{B_i}}{\partial \beta} = -\frac{1}{\alpha} \quad (\text{B.25})$$

Éléments de la matrice Hessienne :

$$\frac{\partial^2 LL_S^{\langle \rangle}}{\partial \theta_r \partial \theta_n} = \sum_{i=1}^{N_S^{\langle \rangle}} \left[\frac{1}{F_{Ui} - F_{Li}} \left(\frac{\partial^2 F_{Ui}}{\partial \theta_r \partial \theta_n} - \frac{\partial^2 F_{Li}}{\partial \theta_r \partial \theta_n} \right) - \frac{1}{(F_{Ui} - F_{Li})^2} \left(\frac{\partial F_{Ui}}{\partial \theta_r} - \frac{\partial F_{Li}}{\partial \theta_r} \right) \left(\frac{\partial F_{Ui}}{\partial \theta_n} - \frac{\partial F_{Li}}{\partial \theta_n} \right) \right] \quad \text{avec } r, n = 1, 2$$

avec :

$$\frac{\partial^2 F_{Bi}}{\partial \theta_r \partial \theta_n} = \frac{\partial^2 z_{Bi}}{\partial \theta_r \partial \theta_n} e^{-z_{Bi}} F_{Bi} + \frac{\partial z_{Bi}}{\partial \theta_r} \frac{\partial F_{Bi}}{\partial \theta_n} (e^{-z_{Bi}} - 1) \quad r, n = 1, 2 \quad (\text{B.26})$$

avec :

$$\frac{\partial^2 z_{Bi}}{\partial \theta_1 \partial \theta_1} = \frac{\partial^2 z_{Bi}}{\partial \alpha^2} = \frac{2}{\alpha^2} z_{Bi} \quad (\text{B.27})$$

$$\frac{\partial^2 z_{Bi}}{\partial \theta_2 \partial \theta_2} = \frac{\partial^2 z_{Bi}}{\partial \beta^2} = 0 \quad (\text{B.28})$$

$$\frac{\partial^2 z_{Bi}}{\partial \theta_2 \partial \theta_1} = \frac{\partial^2 z_{Bi}}{\partial \beta \partial \alpha} = \frac{1}{\alpha^2} \quad (\text{B.29})$$

– intensité des crues supérieure à un seuil :

Logarithme de la fonction de vraisemblance :

$$LL_S^{\rangle} = \sum_{i=1}^{N_S^{\rangle}} \ln(1 - F_{Li}) \quad (\text{B.30})$$

Dérivées premières :

$$\frac{\partial LL_S^{\langle \rangle}}{\partial \theta_r} = \sum_{i=1}^{N_S^{\langle \rangle}} \frac{1}{1 - F_{Li}} \left(-\frac{\partial F_{Li}}{\partial \theta_r} \right) \quad r = 1, 2 \quad (\text{B.31})$$

Éléments de la matrice Hessienne :

$$\frac{\partial^2 LL_S^{\langle \rangle}}{\partial \theta_r \partial \theta_n} = \sum_{i=1}^{N_S^{\langle \rangle}} \frac{1}{1 - F_{Li}} \left(-\frac{\partial^2 F_{Li}}{\partial \theta_r \partial \theta_n} \right) - \frac{1}{(1 - F_{Li})^2} \frac{\partial F_{Li}}{\partial \theta_r} \frac{\partial F_{Li}}{\partial \theta_n} \quad r, n = 1, 2 \quad (\text{B.32})$$

– intensité des crues inférieure à un seuil :

Logarithme de la fonction de vraisemblance :

$$LL_S^{\lessdot} = \sum_{i=1}^{N_S^{\lessdot}} \ln(F_{Ui}) \quad (\text{B.33})$$

Dérivées premières :

$$\frac{\partial LL_S^{\langle \rangle}}{\partial \theta_r} = \sum_{i=1}^{N_S^{\langle \rangle}} \frac{1}{F_{Ui}} \frac{\partial F_{Ui}}{\partial \theta_r} \quad r = 1, 2 \quad (\text{B.34})$$

Éléments de la matrice Hessienne :

$$\frac{\partial^2 LL_S^{\langle \rangle}}{\partial \theta_r \partial \theta_n} = \sum_{i=1}^{N_S^{\langle \rangle}} \left[\frac{1}{F_{U_i}} \frac{\partial^2 F_{U_i}}{\partial \theta_r \partial \theta_n} - \frac{1}{F_{U_i}^2} \frac{\partial F_{U_i}}{\partial \theta_r} \frac{\partial F_{U_i}}{\partial \theta_n} \right] \quad r, n = 1, 2 \quad (\text{B.35})$$

On vient de présenter les différentes expressions pour l'information systématique (indice S), elles sont identiques pour l'information historique (indice H). Finalement la fonction *EV1fitMLEg* va construire une fonction de vraisemblance totale LL_{TOT} , sa dérivée première et seconde en fonction de l'information disponible, soit :

$$LL_{TOT} = LL_H^\bullet + LL_H^{\langle \rangle} + LL_H^{\rangle} + LL_H^{\langle} + LL_S^\bullet + LL_S^{\langle \rangle} + LL_S^{\rangle} + LL_S^{\langle} \quad (\text{B.36})$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial LL_{TOT}}{\partial \theta_r} &= \frac{\partial LL_H^\bullet}{\partial \theta_r} + \frac{\partial LL_H^{\langle \rangle}}{\partial \theta_r} + \frac{\partial LL_H^{\rangle}}{\partial \theta_r} + \frac{\partial LL_H^{\langle}}{\partial \theta_r} + \frac{\partial LL_S^\bullet}{\partial \theta_r} + \frac{\partial LL_S^{\langle \rangle}}{\partial \theta_r} \\ &+ \frac{\partial LL_S^{\rangle}}{\partial \theta_r} + \frac{\partial LL_S^{\langle}}{\partial \theta_r} \quad r = 1, 2 \end{aligned} \quad (\text{B.37})$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 LL_{TOT}}{\partial \theta_r \partial \theta_n} &= \frac{\partial^2 LL_H^\bullet}{\partial \theta_r \partial \theta_n} + \frac{\partial^2 LL_H^{\langle \rangle}}{\partial \theta_r \partial \theta_n} + \frac{\partial^2 LL_H^{\rangle}}{\partial \theta_r \partial \theta_n} + \frac{\partial^2 LL_H^{\langle}}{\partial \theta_r \partial \theta_n} + \frac{\partial^2 LL_S^\bullet}{\partial \theta_r \partial \theta_n} + \frac{\partial^2 LL_S^{\langle \rangle}}{\partial \theta_r \partial \theta_n} \\ &+ \frac{\partial^2 LL_S^{\rangle}}{\partial \theta_r \partial \theta_n} + \frac{\partial^2 LL_S^{\langle}}{\partial \theta_r \partial \theta_n} \quad r, n = 1, 2 \end{aligned} \quad (\text{B.38})$$

B.5 Fonction d'estimation des paramètres de la loi GEV par la méthode EMA

La fonction $GEVfitEMA(S, H, varargin)$ reçoit en arguments les structures présentées au §B.2 et renvoie un vecteur des paramètres estimé $\hat{\alpha}$, $\hat{\beta}$ et \hat{k} par la méthode EMA pour la loi de GEV.

On renvoie au §3.3.4 (p. 76) pour le principe général de la méthode. La principale difficulté dans l'application de cette méthode à la loi GEV réside dans le calcul des moments théoriques $\mu_{H,r,j}^{<>}$, $\mu_{H,r,j}^{>}$ et $\mu_{H,r,j}^{<}$ de la variable censurée suivant les équations (3.76), (3.77) et (3.78). Le calcul des moments théoriques de la loi GEV conduit à déterminer la fonction Gamma (Naulet, 2002). Dans le cas de l'information censurée les bornes de l'intégrale ne sont plus $[0; +\infty]$ mais $[z_{Uj}; z_{Lj}]$ avec la transformation $z = \exp[-t]$ où t est la variable réduite de Jenkinson :

$$t = -\frac{1}{k} \ln \left[1 - k \left(\frac{w - \beta}{\alpha} \right) \right] \quad (\text{B.39})$$

($w = x$, $w = y$ pour l'information censurée respectivement systématique et historique). L'expression des moments non centrés pour l'information censurée est :

$$\mu_{r,j}^{<>} = \sum_{l=0}^r \binom{r}{l} \left(\beta + \frac{\alpha}{k} \right)^{r-l} \left(-\frac{\alpha}{k} \right)^l \int_{z_{Uj}}^{z_{Lj}} z^{lk} e^{-z} dz \quad (\text{B.40})$$

$$\mu_{r,j}^{<} = \sum_{l=0}^r \binom{r}{l} \left(\beta + \frac{\alpha}{k} \right)^{r-l} \left(-\frac{\alpha}{k} \right)^l \left(\int_0^{z_{Lj}} z^{lk} e^{-z} dz - \int_0^{z_{Uj}} z^{lk} e^{-z} dz \right) \quad (\text{B.41})$$

$$\mu_{r,j}^{>} = \sum_{l=0}^r \binom{r}{l} \left(\beta + \frac{\alpha}{k} \right)^{r-l} \left(-\frac{\alpha}{k} \right)^l [\gamma(lk + 1, z_{Lj}) - \gamma(lk + 1, z_{Uj})] \quad (\text{B.42})$$

avec $\gamma(a, x)$ la fonction Gamma incomplète basse (*lower incomplete gamma function*). On utilise plus souvent la fonction Gamma normalisée (*regularized gamma function*) définie par :

$$P(a, x) = \frac{\gamma(a, x)}{\Gamma(a)} \quad (\text{B.43})$$

Soit :

$$\mu_{r,j}^{<>} = \sum_{l=0}^r \binom{r}{l} \left(\beta + \frac{\alpha}{k} \right)^{r-l} \left(-\frac{\alpha}{k} \right)^l \Gamma(lk + 1) [P(lk + 1, z_{Lj}) - P(lk + 1, z_{Uj})] \quad (\text{B.44})$$

$$\mu_{r,j}^{<} = \sum_{l=0}^r \binom{r}{l} \left(\beta + \frac{\alpha}{k} \right)^{r-l} \left(-\frac{\alpha}{k} \right)^l I(z, k|l) \quad (\text{B.45})$$

$$\text{avec } : I(z, k|l) = \Gamma(lk + 1) [P(lk + 1, z_{Lj}) - P(lk + 1, z_{Uj})] \quad (\text{B.46})$$

La loi GEV ayant trois paramètres, il est nécessaire de déterminer les trois premiers moments pour les estimer. Aussi d'après l'équation (B.45) on voit que $I(z, k|l)$ doit être

calculée pour $l = 0, 1, 2$ et 3 . On a :

$$I(z, k|0) = [(1 - e^{-z_{Lj}}) - (1 - e^{-z_{Uj}})] \quad (\text{B.47})$$

$$I(z, k|1) = \Gamma(k+1) [P(k+1, z_{Lj}) - P(k+1, z_{Uj})] \quad (\text{B.48})$$

$$I(z, k|2) = \Gamma(2k+1) [P(2k+1, z_{Lj}) - P(2k+1, z_{Uj})] \quad (\text{B.49})$$

$$I(z, k|3) = \Gamma(3k+1) [P(3k+1, z_{Lj}) - P(3k+1, z_{Uj})] \quad (\text{B.50})$$

Pour calculer $P(a, x)$ on utilise la fonction *gammainc(x, a)* de Matlab (5.3.1) qui est basée sur l'algorithme décrit par Abramowitz et Stegun (1965, section 6.5).

Dans le cadre de l'information censurée, trois combinaisons recouvrent l'ensemble des valeurs possibles pour les bornes supérieures et inférieures. Le tableau (B.5) illustre ces trois cas de figure et donne les valeurs des bornes de la variable transformée z . Le signe & signifie un « et » logique.

TAB. B.5 – Différentes combinaisons des bornes de l'information censurée

Cas	Bornes	t_{Uj}	t_{Lj}	z_{Uj}	z_{Lj}
1		$+\infty$	& $-\infty < t < y_{Uj}$	0	& $z_{Uj} < z < +\infty$
2		$t_{Lj} < t < +\infty$	& $-\infty$	$0 < z < z_{Lj}$	& $+\infty$
3		$t_{Lj} < t < +\infty$	& $-\infty < t < t_{Uj}$	$0 < z < z_{Lj}$	& $z_{Uj} < z < +\infty$

Pour le cas 1, on a :

$$z_{Lj} = \exp(-t_{Lj}) = \left[1 - k \left(\frac{w_{Lj} - \beta}{\alpha} \right) \right]^{1/k} \quad (\text{B.51})$$

$$G(z_{Lj}) = \exp(-z_{Lj}) \quad (\text{B.52})$$

$$G(z_{Uj}) = 1 \quad (\text{B.53})$$

$$I(z, k|0) = 1 - e^{-z_{Lj}} = 1 - G(z_{Lj}) \quad (\text{B.54})$$

$$I(z, k|1) = \Gamma(k+1) P(k+1, z_{Lj}) \quad (\text{B.55})$$

$$I(z, k|2) = \Gamma(2k+1) P(2k+1, z_{Lj}) \quad (\text{B.56})$$

$$I(z, k|3) = \Gamma(3k+1) P(3k+1, z_{Lj}) \quad (\text{B.57})$$

Pour le cas 2, on a :

$$z_{Uj} = \exp(-t_{Uj}) = \left[1 - k \left(\frac{w_{Uj} - \beta}{\alpha} \right) \right]^{1/k} \quad (\text{B.58})$$

$$I(z, k|0) = e^{-z_{Uj}} \quad (\text{B.59})$$

$$I(z, k|1) = \Gamma(k+1) [1 - P(k+1, z_{Lj})] \quad (\text{B.60})$$

$$I(z, k|2) = \Gamma(2k+1) [1 - P(2k+1, z_{Lj})] \quad (\text{B.61})$$

$$I(z, k|3) = \Gamma(3k+1) [1 - P(3k+1, z_{Lj})] \quad (\text{B.62})$$

Enfin pour le cas 3, on a :

$$z_{U_j} = \exp(-t_{U_j}) = \left[1 - k \left(\frac{w_{U_j} - \beta}{\alpha} \right) \right]^{1/k} \quad (\text{B.63})$$

$$z_{L_j} = \exp(-t_{L_j}) = \left[1 - k \left(\frac{w_{L_j} - \beta}{\alpha} \right) \right]^{1/k} \quad (\text{B.64})$$

$$I(z, k|0) = e^{-z_{U_j}} - e^{-z_{L_j}} \quad (\text{B.65})$$

$$I(z, k|1) = \Gamma(k+1) [P(k+1, z_{L_j}) - P(k+1, z_{U_j})] \quad (\text{B.66})$$

$$I(z, k|2) = \Gamma(2k+1) [P(2k+1, z_{L_j}) - P(2k+1, z_{U_j})] \quad (\text{B.67})$$

$$I(z, k|3) = \Gamma(3k+1) [P(3k+1, z_{L_j}) - P(3k+1, z_{U_j})] \quad (\text{B.68})$$

L'estimation des paramètres de la loi GEV, une fois les moments censurés non centrés calculés, s'obtient simplement d'une part à partir de l'expression liant les moments centrés et non centrés et d'autre part à partir du système d'équations liant les moments centrés aux paramètres.

B.6 Fonction d'estimation des paramètres de la loi GEV par la méthode MLE_G

La fonction $GEVfitLEg(para, S, H)$ contient le logarithme de la fonction de vraisemblance (LL_{TOT}) présenté à l'expression (3.62), ses dérivées premières ainsi que la matrice *Hessienne* pour la loi GEV.

Pour simplifier la présentation des différentes expressions contenues dans la fonction $GEVfitMLEg$, seules les équations relatives à l'information systématique (v.a. X) sont présentées, celles relatives à l'information historique sont identiques. On pose :

$$y = -\frac{1}{k} \ln(1-t) \quad \text{et} \quad t = \frac{k}{\alpha} (x - \beta) \quad (\text{B.69})$$

Les expressions des fonctions de densité et de répartition de la loi GEV s'écrivent donc :

$$f_{Y^*}(\alpha, \beta, k|y) = \frac{\exp(-y - e^{-y})}{\alpha(1-t)} \quad (\text{B.70})$$

$$G_{Y^*}(\alpha, \beta, k|y) = \exp(-e^{-y}) \quad (\text{B.71})$$

On adopte également la notation suivante :

$$f_{Y^*}(\alpha, \beta, k|y_{U_i}) \equiv f_{U_i} \quad \text{et} \quad G_{Y^*}(\alpha, \beta, k|y_{U_i}) \equiv G_{U_i} \quad (\text{B.72})$$

$$f_{Y^*}(\alpha, \beta, k|y_{L_i}) \equiv f_{L_i} \quad \text{et} \quad G_{Y^*}(\alpha, \beta, k|y_{L_i}) \equiv G_{L_i} \quad (\text{B.73})$$

La fonction *fminunc* est un algorithme de minimisation, aussi pour maximiser LL_{TOT} on multiplie par -1 toutes les expressions ci-après :

– Information non censurée :

Logarithme de la fonction de vraisemblance :

$$LL_S^* = \sum_{i=1}^{N_S^*} -\ln(\alpha) - y_i - e^{-y_i} + ky_i \quad (\text{B.74})$$

Dérivées premières :

$$\frac{\partial LL_S^*}{\partial \alpha} = \sum_{i=1}^{N_S^*} -\frac{1}{\alpha} + (-1 + k + e^{-y_i}) \frac{\partial y_i}{\partial \alpha} \quad (\text{B.75})$$

$$\frac{\partial LL_S^*}{\partial \beta} = \sum_{i=1}^{N_S^*} (-1 + k + e^{-y_i}) \frac{\partial y_i}{\partial \beta} \quad (\text{B.76})$$

$$\frac{\partial LL_S^*}{\partial k} = \sum_{i=1}^{N_S^*} y_i + (-1 + k + e^{-y_i}) \frac{\partial y_i}{\partial k} \quad (\text{B.77})$$

avec :

$$\frac{\partial y_i}{\partial \alpha} = -\frac{z_i}{\alpha(1-t_i)} \quad (\text{B.78})$$

$$\frac{\partial y_i}{\partial \beta} = -\frac{1}{\alpha(1-t_i)} \quad (\text{B.79})$$

$$\frac{\partial y_i}{\partial k} = \frac{z_i}{k(1-t_i)} - \frac{y_i}{k} \quad (\text{B.80})$$

avec :

$$z_i = \frac{t_i}{k} \tag{B.81}$$

Éléments de la matrice Hessienne :

$$\frac{\partial^2 LL_S^\bullet}{\partial \alpha^2} = \sum_{i=1}^{N_S^\bullet} (-1 + k + e^{-y_i}) \frac{\partial^2 y_i}{\partial \alpha^2} - e^{-y_i} \left(\frac{\partial y_i}{\partial \alpha} \right)^2 + \frac{1}{\alpha^2} \tag{B.82}$$

$$\frac{\partial^2 LL_S^\bullet}{\partial \beta^2} = \sum_{i=1}^{N_S^\bullet} (-1 + k + e^{-y_i}) \frac{\partial^2 y_i}{\partial \beta^2} - e^{-y_i} \left(\frac{\partial y_i}{\partial \beta} \right)^2 \tag{B.83}$$

$$\frac{\partial^2 LL_S^\bullet}{\partial k^2} = \sum_{i=1}^{N_S^\bullet} (-1 + k + e^{-y_i}) \frac{\partial^2 y_i}{\partial k^2} - e^{-y_i} \left(\frac{\partial y_i}{\partial k} \right)^2 + 2 \frac{\partial y_i}{\partial k} \tag{B.84}$$

$$\frac{\partial^2 LL_S^\bullet}{\partial \alpha \partial \beta} = \sum_{i=1}^{N_S^\bullet} (-1 + k + e^{-y_i}) \frac{\partial^2 y_i}{\partial \alpha \partial \beta} - e^{-y_i} \frac{\partial y_i}{\partial \alpha} \frac{\partial y_i}{\partial \beta} \tag{B.85}$$

$$\frac{\partial^2 LL_S^\bullet}{\partial \alpha \partial k} = \sum_{i=1}^{N_S^\bullet} (-1 + k + e^{-y_i}) \frac{\partial^2 y_i}{\partial \alpha \partial k} - e^{-y_i} \frac{\partial y_i}{\partial \alpha} \frac{\partial y_i}{\partial k} + \frac{\partial y_i}{\partial \alpha} \tag{B.86}$$

$$\frac{\partial^2 LL_S^\bullet}{\partial \beta \partial k} = \sum_{i=1}^{N_S^\bullet} (-1 + k + e^{-y_i}) \frac{\partial^2 y_i}{\partial \beta \partial k} - e^{-y_i} \frac{\partial y_i}{\partial \beta} \frac{\partial y_i}{\partial k} + \frac{\partial y_i}{\partial \beta} \tag{B.87}$$

avec :

$$\frac{\partial^2 y_i}{\partial \alpha^2} = \frac{z_i (2 - t_i)}{\alpha^2 (1 - t_i)^2} \tag{B.88}$$

$$\frac{\partial^2 y_i}{\partial \beta^2} = \frac{k}{\alpha^2 (1 - t_i)^2} \tag{B.89}$$

$$\frac{\partial^2 y_i}{\partial k^2} = \frac{z_i^2}{k (1 - t_i)^2} - \frac{2}{k} \frac{\partial y_i}{\partial k} \tag{B.90}$$

$$\frac{\partial^2 y_i}{\partial \alpha \partial \beta} = \frac{1}{\alpha^2 (1 - t_i)^2} \tag{B.91}$$

$$\frac{\partial^2 y_i}{\partial \alpha \partial k} = -\frac{z_i^2}{\alpha (1 - t_i)^2} \tag{B.92}$$

$$\frac{\partial^2 y_i}{\partial \beta \partial k} = -\frac{z_i}{\alpha (1 - t_i)^2} \tag{B.93}$$

- **Information censurée :**

- *intensité des crues comprise dans un intervalle :*

Logarithme de la fonction de vraisemblance :

$$LL_S^{<>} = \sum_{i=1}^{N_S^{<>}} \ln(F_{U_i} - F_{L_i}) \tag{B.94}$$

Dérivées premières :

$$\frac{\partial LL_S^{\langle \rangle}}{\partial \theta_r} = \sum_{i=1}^{N_S^{\langle \rangle}} \frac{1}{F_{U_i} - F_{L_i}} \left(\frac{\partial F_{U_i}}{\partial \theta_r} - \frac{\partial F_{L_i}}{\partial \theta_r} \right) \quad (\text{B.95})$$

avec :

$$\frac{\partial F_{B_i}}{\partial \theta_r} = \frac{\partial y_{B_i}}{\partial \theta_r} e^{-y_{B_i}} F_{B_i} \quad (\text{B.96})$$

avec :

$$\frac{\partial y_{B_i}}{\partial \alpha} = -\frac{z_{B_i}}{\alpha(1-t_{B_i})} \quad (\text{B.97})$$

$$\frac{\partial y_{B_i}}{\partial \beta} = -\frac{1}{\alpha(1-t_{B_i})} \quad (\text{B.98})$$

$$\frac{\partial y_{B_i}}{\partial k} = \frac{z_{B_i}}{k(1-t_{B_i})} - \frac{y_{B_i}}{k} \quad (\text{B.99})$$

avec :

$$z_{B_i} = \frac{t_{B_i}}{k} \quad (\text{B.100})$$

Éléments de la matrice Hessienne :

$$\frac{\partial^2 LL_S^{\langle \rangle}}{\partial \theta_r \partial \theta_n} = \sum_{i=1}^{N_S^{\langle \rangle}} \frac{1}{F_{U_i} - F_{L_i}} \left(\frac{\partial^2 F_{U_i}}{\partial \theta_r \partial \theta_n} - \frac{\partial^2 F_{L_i}}{\partial \theta_r \partial \theta_n} \right) - \frac{1}{(F_{U_i} - F_{L_i})^2} \left(\frac{\partial F_{U_i}}{\partial \theta_r} - \frac{\partial F_{L_i}}{\partial \theta_r} \right) \left(\frac{\partial F_{U_i}}{\partial \theta_n} - \frac{\partial F_{L_i}}{\partial \theta_n} \right) \quad (\text{B.101})$$

avec :

$$\frac{\partial^2 F_{B_i}}{\partial \theta_r \partial \theta_n} = \frac{\partial^2 y_{B_i}}{\partial \theta_r \partial \theta_n} e^{-y_{B_i}} F_{B_i} + \frac{\partial y_{B_i}}{\partial \theta_r} \frac{\partial F_{B_i}}{\partial \theta_n} (e^{-y_{B_i}} - 1) \quad (\text{B.102})$$

avec :

$$\frac{\partial^2 y_{B_i}}{\partial \alpha^2} = \frac{z_{B_i}(2-t_{B_i})}{\alpha^2(1-t_{B_i})^2} \quad (\text{B.103})$$

$$\frac{\partial^2 y_{B_i}}{\partial \beta^2} = \frac{k}{\alpha^2(1-t_{B_i})^2} \quad (\text{B.104})$$

$$\frac{\partial^2 y_{B_i}}{\partial k^2} = \frac{z_{B_i}^2}{k(1-t_{B_i})^2} - \frac{2}{k} \frac{\partial y_{B_i}}{\partial k} \quad (\text{B.105})$$

$$\frac{\partial^2 y_{B_i}}{\partial \alpha \partial \beta} = \frac{1}{\alpha^2(1-t_{B_i})^2} \quad (\text{B.106})$$

$$\frac{\partial^2 y_{B_i}}{\partial \alpha \partial k} = -\frac{z_{B_i}^2}{\alpha(1-t_{B_i})^2} \quad (\text{B.107})$$

$$\frac{\partial^2 y_{B_i}}{\partial \beta \partial k} = -\frac{z_{B_i}}{\alpha(1-t_{B_i})^2} \quad (\text{B.108})$$

- intensité des crues supérieure à un seuil :

Logarithme de la fonction de vraisemblance :

$$LL_S^> = \sum_{i=1}^{N_S^>} \ln(1 - F_{Li}) \quad (\text{B.109})$$

Dérivées premières :

$$\frac{\partial LL_S^{\langle \rangle}}{\partial \theta_r} = \sum_{i=1}^{N_S^{\langle \rangle}} \frac{1}{1 - F_{Li}} \left(-\frac{\partial F_{Li}}{\partial \theta_r} \right) \quad (\text{B.110})$$

Éléments de la matrice Hessienne :

$$\frac{\partial^2 LL_S^{\langle \rangle}}{\partial \theta_r \partial \theta_n} = \sum_{i=1}^{N_S^{\langle \rangle}} \frac{1}{1 - F_{Li}} \left(-\frac{\partial^2 F_{Li}}{\partial \theta_r \partial \theta_n} \right) - \frac{1}{(1 - F_{Li})^2} \frac{\partial F_{Li}}{\partial \theta_r} \frac{\partial F_{Li}}{\partial \theta_n} \quad (\text{B.111})$$

– intensité des crues inférieure à un seuil :

Logarithme de la fonction de vraisemblance :

$$LL_S^< = \sum_{i=1}^{N_S^<} \ln(F_{Ui}) \quad (\text{B.112})$$

Dérivées premières :

$$\frac{\partial LL_S^{\langle \rangle}}{\partial \theta_r} = \sum_{i=1}^{N_S^{\langle \rangle}} \frac{1}{F_{Ui}} \frac{\partial F_{Ui}}{\partial \theta_r} \quad (\text{B.113})$$

Éléments de la matrice Hessienne :

$$\frac{\partial^2 LL_S^{\langle \rangle}}{\partial \theta_r \partial \theta_n} = \sum_{i=1}^{N_S^{\langle \rangle}} \frac{1}{F_{Ui}} \frac{\partial^2 F_{Ui}}{\partial \theta_r \partial \theta_n} - \frac{1}{F_{Ui}^2} \frac{\partial F_{Ui}}{\partial \theta_r} \frac{\partial F_{Ui}}{\partial \theta_n} \quad (\text{B.114})$$

B.7 Bibliographie

Forsythe, G. E., Malcolm, M. A. et Moler, C. B. (1977). *Computer Methods for Mathematical Computations*, Prentice-Hall.

Naulet, R. (2002). Éléments de statistique appliqués à l'hydrologie, *Rapport technique*, Cemagref, Lyon, 123p.

Annexe C

Etat Général des Sources sur l'Ardèche

Sommaire

C.1 Instruments de recherche	249
C.1.1 Institut de Géographie Alpine (IGA) - Fonds Maurice Pardé	249
C.1.2 Archives Départementales de l'Ardèche (ADA)	250
C.1.3 Archives Nationales (AN)	250
C.1.4 Bibliothèque de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées (ENPC)	251
C.1.5 Société Hydrotechnique de France (SHF)	251
C.1.6 Bibliothèque Nationale (BN)	251
C.2 Grille de Lecture	251
C.3 Détail des fonds documentaires exploités	253
C.3.1 Direction Régionale de l'Environnement Rhone-Alpes (DIREN-RA)	253
C.3.1.1 Station de Neyrac	253
C.3.1.2 Station de Barutel	253
C.3.1.3 Station de Pont de Rolandy	253
C.3.1.4 Station de Pont de Labeaume	253
C.3.1.5 Station de Voguë	254
C.3.1.6 Station de Vallon Pont d'Arc	254
C.3.1.7 Station de Sauze Saint-Martin	254
C.3.2 Institut de Géographie Alpine (IGA)	254
C.3.2.1 Fonds Maurice Pardé	255
C.3.2.2 Bibliothèque de l'IGA	258
Périodiques	258
Ouvrages	260
C.3.3 Direction Départementale de l'Equipement de l'Ardèche (DDE07)	261
C.3.3.1 Archives au Parc	261
Service hydraulique, service d'annonce des crues, navigation intérieure: aspects généraux	261
Observation hydrométriques et pluviométriques, jaugeages	263
Etudes	266

	Police, travaux, inondations	266
C.3.3.2	Archives au Service d'Annonce des Crues	267
	Observations hydrométriques et pluviométriques	267
	Articles	267
	Rapports d'étude	268
C.3.4	Archives Départementales de l'Ardèche (ADA)	271
C.3.4.1	Série C (Etats du Vivarais)	272
C.3.4.2	Série L	273
C.3.4.3	Série M	273
C.3.4.4	Série S	273
C.3.4.5	Série W	274
C.3.4.6	Autres fonds aux ADA	276
	Service Restauration des Terrains de Montagne (RTM)	276
	Fichier du fonds ancien et moderne des ADA	276
C.3.4.7	Bibliothèque	276
C.3.5	Archives communales (AC)	276
C.3.5.1	Commune d'Aubenas	276
C.3.5.2	Autres communes	277
C.3.6	Archives Nationales (AN)	277
C.3.6.1	Sous-série F ² (Administration départementale)	278
C.3.6.2	Sous-série F ¹⁰ (Agriculture)	278
C.3.6.3	Sous-série F ¹⁴ (Travaux Publics)	279
C.3.7	Ecole Nationale des Ponts et Chaussées (ENPC)	280
C.3.7.1	Fichier Richard	280
C.3.7.2	Fonds Anciens	280
	Manuscrits	280
	Imprimés	280
	Annales des Ponts et Chaussées (1831-1999)	284
C.3.8	Société Hydrotechnique de France (SHF)	295
C.3.8.1	La Houille Blanche (1902-1999)	296
C.3.8.2	La Revue Générale d'Hydraulique	300
C.3.8.3	Comité Technique de la SHF, Mémoires et Travaux de la SHF	300
C.3.8.4	Bibliothèque de la SHF	301
C.3.9	Bibliothèque Nationale (BN)	302
C.4	Bibliographie	306

On présente ci-après différents éléments de l'Etat Général des Sources (EGS) tirés du rapport HISTORISQUE-Ardèche (Coeur et al., 2001). Il s'agit de la première étape de la démarche HISTORISQUE qui consiste à élaborer une vue d'ensemble des sources documentaires sur les inondations et l'aménagement de la rivière Ardèche au cours des deux derniers siècles. De la qualité du paysage documentaire ainsi dressé (souci d'exhaustivité et de cohérence) dépend la qualité finale de l'ensemble des analyses et des données produites.

Nous abordons en premier lieu les instruments de recherche disponibles, par fonds, qui se sont enrichis, depuis le début de nos travaux, d'outils informatiques de consultation via

internet (cf. §C.1). La grille de lecture servant notamment à guider la recherche des historiens est ensuite présentée (cf. §C.2). Enfin les différents fonds documentaires exploités sont ensuite détaillés en suivant le cadre général de classement des archives lorsqu'il existe (cf. §C.3). Un paragraphe présente de façon générale chaque fonds puis nous détaillons les cotes retenue pour l'EGS en suivant une présentation décimale par souci de lisibilité. Bien que réalisé en particulier pour le bassin versant de l'Ardèche, cet EGS, qui met en évidence les aspects méthodologiques et les informations disponibles, peut servir de guide pour transposer la démarche à d'autres cours d'eau.

C.1 Instruments de recherche

Il s'agit des premiers ouvrages à consulter. Le néophyte aura pris soin au préalable de parcourir le guide du fonds d'archives, guide établi en général par l'archiviste en chef. On le trouve pratiquement dans toutes les collections départementales. Les inventaires détaillés constituent ensuite les principaux outils pour prendre connaissance de la teneur des séries. Dans les fonds importants, comme aux Archives Nationales par exemple, il peut y avoir plusieurs niveaux d'inventaire, du plus général au plus détaillé. A noter qu'à ce jour peu de ces documents ont fait l'objet d'une édition. Un grand nombre se trouve donc encore sous forme manuscrite ou dactylographiée, reliée ou non, en classeurs ou encore en fichiers. Cela pour nous rappeler que la majeure partie des collections relatives à l'aménagement du territoire, aspects hydrauliques compris, n'ont pas encore fait l'objet de classements ni d'inventaires complets. Loin s'en faut. Cela est particulièrement vrai pour les fonds départementaux des Ponts et Chaussées et de l'Équipement alors que c'est sans doute là que sont conservés en France plus des trois quarts des informations utiles... Rappelons enfin que les versements effectués par les administrations auprès des services d'archives, quand ils ont lieu, ne sont pas suivis immédiatement d'un classement et d'un inventaire. Il faut des années pour cela. En attendant on dispose pour travailler au mieux des bordereaux de versement, au pire le fonds n'est pas accessible.

C.1.1 Institut de Géographie Alpine (IGA) - Fonds Maurice Pardé

Le Réseau Documentaire de Grenoble (REDOC) regroupe 99 structures documentaires (Bibliothèque Universitaire de Sciences, IGA, Institut Dolomieu, Cemagref Grenoble, etc.). Les catalogues de ce réseau sont consultables en ligne (www.pole.upmf-grenoble.fr/REDOC/index.html).

Le catalogue de l'inventaire du Fonds Maurice Pardé a été mis en ligne dernièrement (iga.ujf-grenoble.fr/parde/index.htm).

C.1.2 Archives Départementales de l'Ardèche (ADA)

Pas de catalogue en ligne, présentation des Archives Départementales de l'Ardèche (www.ardecoll.ac-grenoble.fr/archives/index.htm).

- MANAROT (M.), Inventaire sommaire des Archives Départementales de l'Ardèche antérieures à 1790. Séries A, B, C, D, Paris, Imp. P. Dupont, 1877.
- REGNE (J.), PINTARD (C.), Index de l'inventaire sommaire des séries A, B, C, D des Archives Départementales de l'Ardèche, Doc. dactyl., 1913-1914.

C.1.3 Archives Nationales (AN)

Etat général des fonds des Archives Nationales : base de donnée « Egérie » en ligne (www.archivesnationales.culture.gouv.fr/chan/index.html).

- REY-COURTEL (A.-L.), Archives Nationales, Etat des inventaires, t. IV, Fonds divers, Paris, A.N., 1986.
- TOURTIER-BONAZZI de (C.) dir., Archives Nationales, Etat Général des Fonds, t. V, 1940-1958, Fonds conservés à Paris, Paris, 1988.
- MATHIEU (R.) dir., Archives Nationales, Etat Général des Fonds, t. II, 1789-1940, Paris, A.N., 1978.
- ARCHIVES NATIONALES, Etat sommaire des versements faits aux A.N. par les ministères et les administrations qui en dépendent, t. II, sous-séries F10-F17, Paris, I.N., 1935 - Supplément t. I-II-III, 1962 - Table alphabétique t. I-II-III + supplément, 1972.
- ARCHIVES NATIONALES, Catalogue général des cartes, plans et dessins d'architecture, 5 vol., Paris, A.N., 1958-1978.
- GIRAUD (S.), Equipement hydraulique de la France préindustrielle (1802-1865). Inventaire des travaux sur cours d'eau F2 I 901 à 962, Paris, A.N., 1993.
- LE MOËL (M.) dir., Inventaire analytique dactylographié de la sous-série F14 10 048-10 083 - Fleuves et rivières, cartes et plans (1694-1891), Paris, A.N., 1960-1966.
- LE MOËL (M.) dir., Inventaire analytique dactylographié de la sous-série F14 10 084-10 147 - Canaux et projets de canaux, cartes plans et atlas (1627-1881), Paris, A.N., 1960-1966.
- LE MOËL (M.) dir., Inventaire analytique dactylographié de la sous-série F14 10 148-10 210 - Routes et ponts, cartes et plans (1687-1888), Paris, A.N., 1960-1966.
- LE MOËL (M.) dir., Inventaire analytique dactylographié de la sous-série F14 10 273-10 288 - Ports côtes et marais (XVIIIe-XIXe s.), Forêts (1683-1897), Paris, A.N., 1960-1966.
- ARCHIVES NATIONALES, Répertoire méthodique dactylographié des plans de la sous-série F14 184-10 047, Paris, A.N., s.d.
- LARTIGUE (F.), Répertoire méthodique manuscrit de la sous-série F14 123-166 - Plans des ponts et chaussées, fleuves, rivières, canaux, ports, moulins des généralités d'Auch à Orléans (XVIIIe s.), Paris, A.N., 1953.
- LORQUET (H.), LECESTRE (L.), Index manuscrit sur fiches des noms de lieux de la sous-série F14 8443-8507 - Plans des routes des 22 généralités dessinés de 1745 à 1780 sous la direction de Trudaine et Perronet, Paris, A.N., 1919-1925.

- FELLETIN (M.) et alii, Répertoire alphabétique dactylographié des ingénieurs des Ponts et Chaussées. Dossiers individuels XVIII^e-XX^e s. - F14 2151-2341, 11459-11622, 12565, Paris, A.N., s.d.
- SCHMIDT (C.), Répertoire numérique détaillé manuscrit sur les rivières, canaux, ports maritimes, plans des généralités, inondations, mines, chemins de fer du XVIII^e au XX^e s. - F14 6501-8665 (versement M. T.P. de 1909), Paris, A.N., 1910.

C.1.4 Bibliothèque de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées (ENPC)

Accès aux catalogues en ligne de la Bibliothèque centrale (www.enpc.fr/bib/pres.htm).

- Catalogue des manuscrits de la bibliothèque de l'Ecole des Ponts et Chaussées, Paris, Imprimerie Nationale, 1886.
- Catalogue des livres composants la bibliothèque de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, Paris, Imprimerie Nationale, 1894.

C.1.5 Société Hydrotechnique de France (SHF)

Présentation de la SHF et sommaire des numéros de la revue la *Houille Blanche* en ligne, période 1991-2000 (www.shf.asso.fr), pas de catalogue de la bibliothèque en ligne.

- SHF - EDF - Direction des Etudes et Recherches - Liste des tirés à part.
- SHF - Travaux antérieurs à 1965 - Suppléments aux volumes de « Mémoires et Travaux » de la SHF.
- SHF - Travaux antérieurs à 1965 - Mémoires (tirés à part).
- SHF - Catalogue de la bibliothèque au 01/01/1987.

C.1.6 Bibliothèque Nationale (BN)

Différents catalogues de la Bibliothèque Nationale en ligne (www.bnf.fr), avec accès direct à certains documents numérisés (gallica.bnf.fr).

C.2 Grille de Lecture

Comme précisé au §4.3.2.1, p. 119, la grille de lecture permet d'orienter les historiens dans la recherche d'informations hydrologiques pertinentes (cf. figure C.1, p. 252). Elle est constituée de mots clés qui servent, lors de la constitution des différents historiques, à interroger la base de données des références extraites de l'EGS.

ETAPE 2 - COLLATION DES DONNEES		OBJECTIFS
1 - HISTORIQUE DES SERVICES :		
<ul style="list-style-type: none"> Histoire des services topographiques Histoire des services hydrométriques Histoire des services météorologiques Histoire des services gestionnaires du territoire (Forêt-Travaux Publics-Energie Hydroélectrique) 		Cibler les sources éventuelles d'informations
2 - HISTORIQUE DE LA SCIENCE ET DE LA MESURE :		
<ul style="list-style-type: none"> Hydraulique Hydrologie <ul style="list-style-type: none"> Etude historique Crues extrêmes Crues historiques Gradex Paleoflood Régionalisation Nivologie Modèles pluie-débit Géomorphologie - Hydrogéologie - Sédimentologie Météorologie Climatologie Topographie Hydrométrie <ul style="list-style-type: none"> Echelles limnimétriques Limnigraphes Jaugeages <ul style="list-style-type: none"> Jaugeages aux flotteurs Jaugeages chimiques Courbes de tarage Pluviométrie <ul style="list-style-type: none"> Pluviographes 	Incertitudes	Estimer les incertitudes liées aux pratiques de l'époque situer spatialement les données historiques Estimer les incertitudes liées aux pratiques de l'époque
3 - HISTORIQUE DES ÉVÉNEMENTS DU BASSIN VERSANT CONCERNANT :		
<ul style="list-style-type: none"> Les Etudes hydrauliques 		Modélisation hydraulique - Renvoi à des événements crues
<ul style="list-style-type: none"> Les Aménagements (Constructions - Destructons) : <ul style="list-style-type: none"> Barrages Ponts Digues Forêts Urbanisation 		Apprécier les modifications hydrologiques
<ul style="list-style-type: none"> La topographie : <ul style="list-style-type: none"> Profils en travers Profils en long Cartes 		Modélisation hydraulique Evolution morphologique du lit
<ul style="list-style-type: none"> L'hydrométrie : <ul style="list-style-type: none"> Stations hydrométriques, Limnigraphes (Installation-supression-déplacement) <ul style="list-style-type: none"> Réglementation Conversion hauteur-débit : <ul style="list-style-type: none"> Jaugeages Barèmes des débits Courbes de tarage Relevés des hauteurs : <ul style="list-style-type: none"> Hauteurs maximales Hauteurs journalières Limnigrammes Laisses de crues Levés de la ligne d'eau d'étiage Relevés des débits : <ul style="list-style-type: none"> Débits maxima Débits journaliers Débits mensuels 		Référenceçage altimétrique des hauteurs de crues Evolution de la prise en compte du risque inondation Modélisation hydraulique Evolution de la morphologie du lit
<ul style="list-style-type: none"> Les Crues 		Renvoi à des événements crues
<ul style="list-style-type: none"> Les opérations de pluviométrie : <ul style="list-style-type: none"> Stations pluviométriques, Pluviographes (Installation-supression-déplacement) <ul style="list-style-type: none"> Réglementation Relevés des hauteurs : <ul style="list-style-type: none"> Pluies journalières Pluies mensuelles Pluies annuelles Neige 		Répartition spatiale des pluies Evolution de la prise en compte du risque inondation Renvoi à des crues Méthode d'estimation des débits extrêmes par les pluies (Gradex, AGREGEE) Modèles Pluie-Débit
<ul style="list-style-type: none"> Contexte géologique Contexte géomorphologique Contexte sédimentologique Contexte météorologique Contexte climatologique 		Evolution de la morphologie du lit, stabilité. Renvoi à des crues Stationnarité des événements

Localisation du cours d'eau : Ardèche, Chassezac, Rhône
Type de support : Manuscrit, plan, cartes

FIG. C.1 - Grille de lecture

C.3 Détail des fonds documentaires exploités

Cette partie présente le détail de l'EGS par fonds documentaires exploités pour l'Ardèche. Nous avons indiqué au niveau de chaque cote et entre crochet (c.-à-d. [14], [341], etc.), le numéro d'enregistrement des références qui en ont été extraites puis saisies sous EndNote 4.0 dans la base de données des références. Ceci permet notamment d'avoir un aperçu de l'intérêt et de la contribution de telle ou telle cote dans l'étude HISTORISQUE.

C.3.1 Direction Régionale de l'Environnement Rhone-Alpes (DIREN-RA)

Le Service des Milieux Aquatiques (SEMA) de la DIREN-RA gère actuellement plusieurs stations hydrométriques sur le bassin de l'Ardèche. Il possède des dossiers sur ces stations (localisation, topographie de la rivière, jaugeages, courbes de tarage), ainsi que quelques dossiers des stations anciennement gérées par le Service Navigation du Rhône et les 4^e et 6^e Circonscription Electrique (Service d'Etude des Débits).

C.3.1.1 Station de Neyrac

- 400 Neyrac, 07 Ardèche : *hauteurs journalières (1977-1980)*. [14].

C.3.1.2 Station de Barutel

- Limnigramme de la station de Barutel (1984-1993). [341].

C.3.1.3 Station de Pont de Rolandy

- N° 32, Pont de Rolandy :
 - sous-dossier : Pont de Rolandy, Correspondances (1956-1964). [309], [310], [311], [313], [314].
 - sous-dossier : Pont de Rolandy, Jaugeages (1954-1966). [323], [324], [326], [327], [328], [329].
 - chemise B1. [325].
 - chemise B2. [330], [331], [332], [333], [334], [335], [336], [337], [338], [339].
 - sous-dossier : Pont de Rolandy, Régime des eaux (1965-1967) *courbe de tarage, barême des débits, débits journaliers, hauteurs journalières*. [315], [316], [317], [318], [319], [320], [321], [322].

C.3.1.4 Station de Pont de Labeaume

- Pont de Labeaume, Correspondance (s.d.) : *photos du limnigraphe*. [15].
- Pont de Labeaume :
 - sous-dossier : Pont de Labeaume, Correspondance (s.d.). [107].
- Pont de Labeaume, Jaugeages (1959-1968). [12].

- Pont de Labeaume, Régime des Eaux (1959-1968) *courbe de tarage, barème des débits, débits journaliers, hauteurs journalières*. [13].
- « Bleu », Pont de Labeaume (1968-1999) *Correspondances, Jaugeages, Régime des eaux (courbe de tarage, barème des débits, débits journaliers, topographie)*. [17], [105], [209], [210], [211], [255], [256], [257], [258], [259], [260], [261], [262], [263], [264].
- « Rose », Pont de Labeaume, 1987-1996 : *jaugeages*. [265].
- Linnigramme de la station de Pont de Labeaume (1968-1991). [340].

C.3.1.5 Station de Vogüé

- N° 34, Vogüé, Correspondance (1965). [266], [267], [268], [269].
- N° 34, Vogüé, Jaugeages (1965-1967). [270], [271], [272], [273], [274], [275], [276].
- « Bleu », Vogüé (1968-1998) *Correspondances, Jaugeages, Régime des eaux (courbe de tarage, barème des débits, débits journaliers, hauteurs instantannées, topographie)*. [277], [278], [279], [280], [281], [282], [283], [284], [285], [286], [287], [288], [289], [290], [291], [292], [293], [294], [295], [296], [297], [298].
- Linnigramme de la station de Vogüé (limnigraphe à flotteur) (1968-1981). [343].
- Linnigramme de la station de Vogüé (limnigraphe pneumatique) (1976-1991). [344].

C.3.1.6 Station de Vallon Pont d'Arc

- N° 31, Vallon Pont d'Arc :
 - sous-dossier : Pont de Salavas, Correspondance (1954-1965). [299], [300], [301], [302], [303], [304], [305].
 - sous-dossier : Pont de Salavas, Jaugeages (*pochette vide*). [306].
 - sous-dossier : Pont de Salavas, Régime des eaux (1908-1917 et 1966) *hauteurs journalières*. [307], [308].

C.3.1.7 Station de Sauze Saint-Martin

- Linnigramme de la station de Sauze St-Martin (1968-1991). [342].

C.3.2 Institut de Géographie Alpine (IGA)

Le fonds Maurice Pardé est conservé à l'IGA. On connaît les travaux novateurs en matière d'hydraulique fluviale de ce géographe hors norme. Outre la plupart de ses très nombreuses publications, ses archives personnelles rassemblent tout un ensemble de notes manuscrites relatives à la science des cours d'eau, discipline qu'il appelait de ses vœux sous le nom de potamologie : relevés personnels d'informations de terrain, comptes-rendus d'ouvrages ou d'entretiens, correspondances érudites, notes d'archives, etc. On y dénicherait nombre d'informations aujourd'hui introuvables sur les crues des grands cours d'eau français et étrangers. Le manque de références à bon nombre de ses notes pose d'ailleurs un certain nombre de questions de fond que nous ne développerons pas ici. Sa thèse sur le régime du Rhône (1925) suivie d'études sur les crues de l'Ardèche, est à l'origine d'un travail remarquable et très souvent encore cité, sur l'estimation du débit des crues de cette

rivière. Nous n'avons retenu dans notre inventaire que les documents traitant de l'hydrologie et de l'hydrométrie de l'Ardèche que nous avons complété par les publications de M. Pardé disponibles à la bibliothèque de l'IGA.

C.3.2.1 Fonds Maurice Pardé

- 1039 - Hydrométrie, Instrumentation, techniques de jaugeages :
 - sous-dossier : couleur crème [18], [19], [100], [101], [103], [104], [146].
 - sous-dossier : couleur marron [22], [23], [108], [110], [130], [147], [148], [149], [204], [206], [207], [208].
- 1040 - Hydrométrie : instrumentation - techniques de jaugeage.
- 1041 - Mesures et débits :
 - sous-dossier : Articles divers, Hydrométrie et calculs des débits [154].
 - sous-dossier : Jaugeages, articles sur des faits [20], [21], [145], [200].
 - sous-dossier : Jaugeages de crues en France [162], [199], [235].
- 1050 - Puissance des crues dans le monde.
- 1051 - Tapuscrits « Très grandes crues » de M. Pardé :
 - sous-dossier : 1- Crues, Coefficients et déficits d'écoulement, Estimation des forts débits. 2- Tapuscrits, M. Pardé, Très grandes crues , [127], [156], [157], [158], [163], [171], [172], [173], [174].
- 1074 - Aménagement hydraulique : barrages - département du Gard.
- 1091 - France :
 - sous-dossier : Tableaux débits (tte la France) [175], [176], [177], [178], [179], [180], [181], [182], [183], [184], [185], [186], [187], [188], [189], [190], [191], [192], [193], [194], [195], [196], [197], [198].
- 1116 - Ardèche (France) :
 - sous-dossier : B2-21, Documents officiels (rapports généraux) [49], [50], [51], [52], [53], [54], [57], [58], [59], [106], [111], [112], [113], [114], [115], [116], [117], [118], [119], [120], [128].
 - sous-dossier : B2-22, Hydrologie générale [1], [2], [3], [4], [5], [6], [10], [11], [34], [36], [39], [44], [45], [46], [47], [48], [55], [56], [60], [61], [166].
 - sous-dossier : B2-24, Aménagement de St-Vincent de Durfort, Etude Hydrologique [160].
 - sous-dossier : B2-25, Historique des crues (Rivières d'Ardèche) [73], [150], [151], [167], [168].
 - sous-dossier : B2-27 [7], [8], [9], [35], [37], [38], [40], [41], [42], [43], [62], [121], [142], [143], [144].
 - sous-dossier : B2-28 [169], [170], [254].

- 1191 - Tirés à part de M. PARDE :
 - 1191/24 - Pardé, M. (1953) - Le régime des rivières du massif central depuis le début du siècle, Mélanges géographiques offerts à Arbos, P., Institut de Géographie, Clermont-Ferrand, 201-209. [659].
- 1192 :
 - 1192/10 - Pardé, M. (1956) - Les études hydrométriques et les rapports annuels de la Compagnie Nationale du Rhône, Les Etudes Rhodaniennes, T. XXXI (2), Lyon, 143-155. [161].
 - 1192/29 - Pardé, M. (1961) - Quelques remarques sur les crues cévenoles, Bulletin de la section de géographie du comité des travaux historiques et scientifiques. [1226].
- 1194 :
 - 1194/2 - Etudes critiques sur la hauteur des crues. Extr. de : (s.n.) (s.d.), 47 p. + 1 pl.
 - 1194/14 - Pardé, M. (1958) - Les crues dans le bassin du Rhône en décembre 1954 et janvier 1955, Annales de Géographie, 57ème année, septembre-octobre, 448-452. [560].
 - 1194/19 - Pardé, M. (1941) - La crue de septembre 1940 dans les Alpes du Nord, Revue de Géographie Alpine, T. XXIX, Grenoble. [1227].
- 2222 - CLUB CEVENOL. Section Héraultaise. Le Lodévois. 1964. (France).
- 2340 - Pardé, M. (1942) - Quelques nouveautés sur le régime du Rhône, Les Etudes Rhodaniennes, Lyon, 200p. [155].
- 2397 - Pardé, M. (1949) - Potamologie [1228].
- 2407 - Gosselin, M. (1964) - RHONE-ALPES. Service de navigation. Les problèmes de l'eau dans la région Rhône II (Ain, Ardèche, Drôme, Isère, Loire, Rhône, Savoie et Haute-Savoie) : essai de synthèse des connaissances actuelles. Prévision des besoins en eau et de la pollution des cours d'eau. [1229].
- 2523 - Ministère de l'Agriculture, Direction de l'Hydraulique et des Améliorations Agricoles, Service d'Etudes des Grandes Forces Hydrauliques - Région de Alpes (1905) - Organisation et comptes rendus des travaux. [1230].
- 2524 - Ministère de l'Agriculture, Direction de l'Hydraulique et des Améliorations Agricoles, Service d'Etudes des Grandes Forces Hydrauliques - Région de Alpes (1905) - Résultats des études et travaux. [1232].
- 2525 - Ministère de l'Agriculture, Direction Générale des Eaux et Forêts (1915-1916) - Forêt-hydraulique. Améliorations et météorologie agricole. [1233].
- 2526 - Ministère de l'Agriculture, Direction de l'Hydraulique et des Améliorations Agricoles, Service d'Etudes des Grandes Forces Hydrauliques - Région de Alpes (1907-1908) - Comptes-rendu et résultats des études et travaux au 31 décembre. [1234].
- 2527 - Ministère de l'Agriculture, Direction de l'Hydraulique et des Améliorations Agricoles, Service d'Etudes des Grandes Forces Hydrauliques - Région de Alpes (1910-1911) - Comptes-rendu et résultats des études et travaux au 31 décembre. [1235].

- 2528 - Ministère de l'Agriculture, Direction de l'Hydraulique et des Améliorations Agricoles, Service d'Etudes des Grandes Forces Hydrauliques - Région de Alpes (1911) - Cartes. [1236].
- 2529 - Ministère de l'Agriculture, Direction de l'Hydraulique et des Améliorations Agricoles, Service d'Etudes des Grandes Forces Hydrauliques - Région de Alpes (1911) - Nivellements. [1237].
- 2530 - Ministère de l'Agriculture, Direction de l'Hydraulique et des Améliorations Agricoles, Service d'Etudes des Grandes Forces Hydrauliques - Région de Alpes (1912) - Cartes. [1238].
- 2531 - Ministère de l'Agriculture, Direction de l'Hydraulique et des Améliorations Agricoles, Service d'Etudes des Grandes Forces Hydrauliques - Région de Alpes (1911-1912) - Comptes-rendu et résultats des études et travaux au 31 décembre. [1239].
- 2532 - Ministère de l'Agriculture, Direction de l'Hydraulique et des Améliorations Agricoles, Service d'Etudes des Grandes Forces Hydrauliques - Région de Alpes (1913) - Nivellements. [1240].
- 2533 - Ministère de l'Agriculture, Direction de l'Hydraulique et des Améliorations Agricoles, Service d'Etudes des Grandes Forces Hydrauliques - Région de Alpes (1915-1916) - Comptes-rendu et résultats des études et travaux au 31 décembre. [1241].
- 2534 - Ministère de l'Agriculture, Direction de l'Hydraulique et des Améliorations Agricoles, Service d'Etudes des Grandes Forces Hydrauliques - Région de Alpes (1916) - Cartes et nivellements. [1242].
- 2535 - Ministère de l'Agriculture, Direction de l'Hydraulique et des Améliorations Agricoles, Service d'Etudes des Grandes Forces Hydrauliques - Région de Alpes (1915-1917) - Comptes-rendu et résultats des études et travaux au 31 décembre. [1243].
- 2536 - Ministère de l'Agriculture, Direction de l'Hydraulique et des Améliorations Agricoles, Service d'Etudes des Grandes Forces Hydrauliques - Région de Alpes (1917) - Nivellements. [1244].
- 2537 - Ministère de l'Agriculture, Direction de l'Hydraulique et des Améliorations Agricoles, Service d'Etudes des Grandes Forces Hydrauliques - Région de Alpes (1917-1920) - Comptes-rendu et résultats des études et travaux au 31 décembre. [1245].
- 2538 - Ministère de l'Agriculture, Direction de l'Hydraulique et des Améliorations Agricoles, Service d'Etudes des Grandes Forces Hydrauliques - Région de Alpes (1920) - Nivellements. [1246].
- 2539 - Ministère de l'Agriculture, Direction de l'Hydraulique et des Améliorations Agricoles, Service d'Etudes des Grandes Forces Hydrauliques - Région de Alpes (1920) - Cartes. [1247].
- 2540 - Ministère de l'Agriculture, Direction de l'Hydraulique et des Améliorations Agricoles, Service d'Etudes des Grandes Forces Hydrauliques - Région de Alpes (1923) - Nivellements. [1248].
- 2631 - Ministère de l'Agriculture, Direction générale des eaux et forêts (1911) - Restauration et conservation des terrains en montagne : 1ère partie. [1249].
- 2632 - Ministère de l'Agriculture, Direction générale des eaux et forêts (1911) - Restauration et conservation des terrains en montagne : 2ème partie. [1250].
- 2641 - Ministère de l'Agriculture, Direction générale des eaux et forêts (1911) - Restauration et conservation des terrains en montagne : 2ème partie - Description sommaire des périmètres

- de restauration : région des Alpes. [1251].
- 2673 - Bouchaud, H. (1957) - Problème de la Prévention des inondations en France. La prévention des inondations dans les bassins de la Loire, de la Garonne et du Rhône, Paris, Rapport - Conseil Economique - Commission des transports, des postes, télégraphes et du Tourisme. [1252].
 - 2675 - s.n. (1957) - Avis formulé par le Conseil Economique au cours de sa séance du 9 juillet 1957 sur le problème de la prévention des inondations en France et la prévention des inondations dans les bassins de la Loire, de la Garonne et du Rhône, Paris. [1253].
 - 3284 - Lemoine, G. (1896) - Essai sur le problème de l'annonce des crues pour les rivières des départements de l'Ardèche, du Gard et de l'Hérault, Annales des Ponts et Chaussées, 2eme sem. (61), novembre, 523-567. [129].
 - 3366 - Musset, R. (1954) - Notes sur l'évolution des cours d'eau. [1255].
 - 3415 - Roche, M. (1972) - Problèmes méthodologiques relatifs à la connaissance des crues, Journée d'étude de l'eau, 03/1972, Strasbourg. [205].
 - 3527 - Tricart, J. - Les modalités du transport des alluvions dans les rivières cévenoles. [1254].
 - PS 1 - Annuaire national des débits des cours d'eau (France) (1969-1979), publié par : Ministère de la Protection de la Nature et de l'Environnement, Ministère de l'Équipement et du Logement, Ministère du Développement Industriel et Scientifique, Ministère de l'Agriculture, CNR et Agence de Bassin Rhône-Méditerranée-Corse [141], [140], [139], [138], [137], [136], [135], [134].
 - PS2 - Annuaire Hydrologique de la France (1939-1968), publié par : SHF [212], [213], [214], [215], [216], [217], [218], [219], [220], [221], [222], [223], [224], [225], [226], [227], [228], [229], [230], [231], [232], [233], [234], [236], [237], [238], [239], [240], [241], [242], [1200].
 - PS3 - Annuaire des stations de jaugeage exploitées par les circonscriptions électriques (1951-1968), publié par : EDF, Direction de l'Équipement en 1954 et Ministère de l'Industrie, Direction du Gaz et de l'Électricité, Service Technique de l'Énergie Électrique et des Grands Barrages en 1965 [102], [133].
 - PS 23 - Bulletin d'hydrométéorologie et de statistique économique (France) (1923-1927), publié par : Institut des Etudes Rhodaniennes de l'Université de Lyon [122], [123], [124], [125], [126].
 - PS 62 - Rapport sur le Rhône / Compagnie nationale du Rhône (1954-1971).

C.3.2.2 Bibliothèque de l'IGA

Périodiques

Revue de Géographie Alpine

- Pardé, M. (1919) - Les crues de décembre 1918 et janvier 1919 dans le bassin du Rhône, Revue de Géographie Alpine, T. VII, 227-239.[552]
- Bouchayer, A. (1925) - Le Drac dans la plaine de Grenoble de 1280 à 1651, Revue de Géographie Alpine, T. XIII, 115-172.[152]
- Bouchayer, A. (1925) - Le Drac et ses affluents, Revue de Géographie Alpine, T. XIII, 287-357.[662]

- Bouchayer, A. (1925) - Le bassin du Drac, *Revue de Géographie Alpine*, T. XIII, 287-357.[663]
- Pardé, M. (1925) - Le régime du Rhône, *Revue de Géographie Alpine*, T. XIII, Grenoble, 460-547.[660]
- Pardé, M. (1928) - Périodicité des grandes inondations et crues exceptionnelles, *Revue de Géographie Alpine*, T. XVI, Grenoble, 499-519.[661]
- Pardé, M. (1929) - Les crues de l'automne 1928 dans le bassin de l'Isère, *Revue de Géographie Alpine*, T. XXII, Grenoble, 337-413.[1195]
- Pardé, M. (1934) - Intempéries méditerranéennes récentes en France, *Revue de Géographie Alpine*, T. XXII (III), 675-703.[153]
- Pardé, M. (1936) - L'orage du 3 au 4 octobre 1935 dans le bassin du Rhône, *Revue de Géographie Alpine*, T. XXIV (1), 217-233.[556]
- Pardé, M. (1936) - La grande crue du Rhône en novembre 1935, *Revue de Géographie Alpine*, T. XXIV (2), 395-420.[557]
- Pardé, M. (1936) - Les crues du Rhône de décembre 1935 à mai 1936, *Revue de Géographie Alpine*, T. XXIV (3), 701-707.[558]
- Pardé, M. (1936) - Déformations verticales des lits fluviaux en crue et en décrue, *Revue de Géographie Alpine*, T. XXIV (fac. II), Grenoble, 307-335.[1198]
- Pardé, M. (1941) - La crue de septembre 1940 dans les Alpes du Nord, *Revue de Géographie Alpine*, T. XXIX, Grenoble.[1227]
- Pardé, M. (1950) - La sécheresse des années 1942-1949 en France, *Revue de Géographie Alpine*, T. XXXVIII, 369-404.[1202]
- Pardé, M. (1952) - Quelques indications sur le régime des rivières alpestres piémontaines, *Revue de Géographie Alpine*, T. XL, 383-420.[159]

Les Etudes Rhodaniennes

- Pardé, M. (1927) - Les crues de 1924 dans le bassin du Rhône, *Les Etudes Rhodaniennes*, Vol. II, Lyon, 11-40.[553]
- Pardé, M. (1928) - Les crues du Rhône en décembre 1925 et février 1928, *Les Etudes Rhodaniennes*, T. IV, Lyon, 1-46.[554]
- Pardé, M. (1942) - Quelques nouveautés sur le régime du Rhône, *Les Etudes Rhodaniennes*, Lyon, 200p.[155]
- Pardé, M. (1948) - Les crues du Rhône de novembre 1944 à février 1945, *Les Etudes Rhodaniennes*, XXIII (1-2), Lyon, 69-76.[1201]
- Pardé, M. (1956) - Les études hydrométriques et les rapports annuels de la Compagnie Nationale du Rhône, *Les Etudes Rhodaniennes*, T. XXXI (2), Lyon, 143-155.[161]

Annales de Géographie

- Pardé, M. (1937) - Inondations en France en 1935 et 1936, *Annales de Géographie*, XLVI année, 15 mars, 113-123.[1199]
- Pardé, M. (1953) - La genèse et les caractères de plusieurs grandes inondations récentes, *Annales de Géographie*, 62ème année, janvier-février, 18-36.[559]
- Pardé, M. (1958) - Les crues dans le bassin du Rhône en décembre 1954 et janvier 1955, *Annales de Géographie*, 57ème année, septembre-octobre, 448-452.[560]

- Pardé, M. (1963) - Les crues cévenoles catastrophiques du dernier demi-siècle et de septembre-octobre 1958, *Annales de Géographie*, 472-477.[165]

Revue Géographique des Pyrénées et du Sud Ouest

- Pardé, M. (1930) - L'annonce des crues, *Revue Géographique des Pyrénées et du Sud Ouest*, T. I, Toulouse, 477-487.[1196]
- Pardé, M. (1934) - Crues méditerranéennes et crues carpathiques, *Revue Géographique des Pyrénées et du Sud Ouest*, T. V (4), octobre, 425-433.[555]

Bulletin de la section de géographie du comité des travaux historiques et scientifiques (devient : Actes du ...ème Congrès National des Sociétés Savantes, Section de géographie)

- Pardé, M. (1953) - Les grandes crues du Rhône inférieur en novembre 1951, *Bulletin de la section de Géographie du Comité des Travaux historiques et scientifiques*, Imp. Nationale, Paris, 119-130.[1204]
- Pardé, M. (1961) - Quelques remarques sur les crues cévenoles, *Bulletin de la section de géographie du comité des travaux historiques et scientifiques*. [1226]
- Pardé, M. (1962) - Quelques remarques sur les crues cévenoles, *Actes du 86ème Congrès National des Sociétés Savantes*, Imp. Nationale, Montpellier, 239-264p.[1209]

Revue pour l'Etude des Calamités

- Pardé, M. (1954) - Sur quelques grandes crues de l'été 1954, *Revue pour l'Etude des Calamités*, T. XIV (32), jan.-déc., 37-76.[1205]

Ouvrages

Ouvrages aux bibliothèques de l'IGA, de l'Université Joseph Fourier et de l'institut Dolomieu :

- IGA - MAGASIN.GEO - A 4359 - COLLECTIF (1968) - Hydrologie - Mélanges offerts par ses amis et disciples à Maurice Pardé, *Orphrys*. [653], [654], [655], [656], [657], [658].
- IGA - MAGASIN.GEO - B 4899 - Pardé, M. (1968) - Fleuves et rivières, Collection Armand Colin, no 155 Section de géographie, Colin, A., 5ème édition, Paris, 241p. [1210].
- UJF - BU Sciences - MAGASIN0A - 4/651 - Pardé, M. - Données numériques sur les régimes des cours d'eau, *Ecole des ingénieurs hydrauliciens*, Université de Grenoble.[1256]
- UJF - BU Sciences - MAGASIN0A - 4/940/1 et 4/940/2 - Pardé, M. (1949) - Potamologie, Université de Grenoble, Ecole nationale supérieure d'électrotechnique et d'hydraulique, Section hydraulique.[1228]
- UJF - BU Sciences - MAGASIN0A - 8/1512 - Pardé, M. (1925) - Le Calcul des débits du Rhône et de ses affluents, thèse secondaire de doctorat, Bibliothèque de l'Institut de Géographie Alpine, Grenoble, 168p.[1193]
- Bibliothèque de l'Institut Dolomieu - Géologie - TH/PAR/1925/T.1 - Pardé, M. (1925) - Le régime du Rhône, Etude hydrologique, thèse principale de doctorat, Institut des Etudes Rhodaniennes de l'Université de Lyon et P. Mason, Grenoble, 887p.[1194]
- Bibliothèque de l'Institut Dolomieu - Géologie - TH/PAR/1925/T.2 - Pardé, M. (1925) - La genèse des crues, Etude Générale, thèse principale de doctorat, Institut des Etudes Rhodaniennes de l'Université de Lyon et P. Mason, 440p.[1192]

C.3.3 Direction Départementale de l'Équipement de l'Ardèche (DDE07)

Les archives des services de la Direction Départementale de l'Équipement (DDE) constituent une source d'information essentielle au titre des activités actuelles du Service d'Annonce des Crues de l'Ardèche : suivi en temps réel de l'état hydrologique de la rivière et de ses affluents, cahier d'observations en période de crue, mise en place de Plans de Prévention du Risque d'Inondation (PPRI). La DDE07 conserve des archives dans ses locaux (cf. §C.3.3.2, p. 267). Par ailleurs d'autres archives sont entreposées, avant leur transfert aux Archives Départementales de l'Ardèche, dans un local aménagé à cet effet : « au Parc » (cf. §C.3.3.1, p. 261). On y trouve notamment les pièces relatives à la mise en place et au fonctionnement du service hydraulique depuis 1848, mais également et surtout un grand nombre des relevés hydrométriques journaliers pratiqués sur l'Ardèche et ses affluents à compter de la fin du XIX^e siècle ; relevés qui ont fait l'objet d'un enregistrement sur support informatique complet par nos soins avant traitement spécifique (12 stations).

Il n'existe pas de classement à proprement parlé de ces documents stockés dans des cartons, l'archiviste départemental devra notamment s'assurer de la continuité de ces fonds avec ceux déjà versés. Les cartons, étant sans cote d'archives, nous nous sommes attaché à les répertorier en *conservant exactement leurs intitulés*. Il est vrai que ces derniers devront nécessairement un jour être éclatés, leur contenu redistribué pour aboutir enfin à une cotation définitive intégrant et complétant les pièces actuellement contenues dans les séries S et W des archives départementales. Cependant cette démarche peut être relativement longue. Aussi il nous a semblé plus opportun, afin de retourner facilement aux documents sources aussi bien pour l'étude HISTORIQUE que pour les besoins du service d'annonce des crues, de désigner les cotes (cartons) en respectant leurs inscriptions contrairement à ce qui a été présenté dans le rapport de Coeur et al. (2001). Ainsi les intitulés réels sont présentés ci-après en lettre normale alors que ceux génériques à valeur indicative dorénavant obsolètes sont rappelés en italique.

C.3.3.1 Archives au Parc

Service hydraulique, service d'annonce des crues, navigation intérieure : aspects généraux

1- Navigation Intérieure, 1834 à 1917 [614], [615]

- sous-dossier : Ponts et Chaussées, Département de l'Ardèche, 2^o section, 1^{ère} partie ;pièce : 85 [403]
- sous-dossier : Ponts et Chaussées, Département de l'Ardèche, 2^o section, 1^{ère} partie ;pièce : 98 [402]

2- *Le Parc - SH, fonctionnement du service (1848-1935).*

3- *Le Parc - SH, fonctionnement du service (1834-1928).*

4- *Le Parc - Navigation Intérieure (NI) (1934-1957).*

5- Service Hydraulique, Annonce des Crues, règlements et consignes, observateurs, 1940-1963 [569], [570]

6- Service d'Annonce des crues (anciens documents), 1950-60 [601]

7- Service Hydraulique-Hydrologie, hydrologie des cours d'eau, jaugeages, 1952-1964 [575], [576], [577]

8- *Le Parc - SH, circulaires (1954-1978)*.

9- Annonce des Crues, Affaires Diverses :

- sous-dossier : 1933-1946 [632], [634], [635]
- sous-dossier : 1946-53 [636], [637], [638]
- sous-dossier : 1953-61 [639], [640], [641], [642], [643]
- sous-dossier : 1963-72 [644]

Le Parc - Annonce des Crues (SAC), affaires diverses (s.d.).

10- Annonce des Crues, études et monographies [626], [627], [628], [629], [630], [631]

Le Parc - SAC, études et monographies (s.d.).

11- *Le Parc - NI (1900-1933)*.

12- Annonce des Crues (anciens documents), A, 1960-80

- sous-dossier : Hydro-Pluvio, création de stations, 1959 [625]

13- Service d'Annonce des crues (anciens documents), 1960-1970 [602], [603], [604], [605], [606], [607], [608], [609]

14- Annonce des Crues (anciens documents), 1960-70 [414], [415], [416], [417], [418], [419], [422], [423]

- sous-dossier : Stations hydrométriques, entretien du matériel [420]
- sous-dossier : suite de pochettes de 1971 à 1980 [421]

15- *Le Parc - SAC, fonctionnement et divers (1960-1980)*.

16- Annonce des Crues, stations observations [437]

17- Service Hydrométrique, régime particulier des stations, 1963

- sous-dossier : règlements particuliers des stations d'observation [650]

18- Stations de jaugeage, 1964-66-67-68 [571], [572], [573], [574]

19- *Le Parc - SAC, fonctionnement et divers (1960-1980)*.

20- Annonce des Crues, 1970-1980 [610], [611], [612], [613]

21- *Le Parc - SAC, fonctionnement et divers (1970-1990)*.

22- Annonce des Crues (anciens documents), 1970-80 [424], [425], [426], [427], [429]

23- *Le Parc - SAC, fonctionnement et divers (1970-1990)*.

24- *Le Parc - SAC, fonctionnement et divers (1980-1990)*.

25- *Le Parc - SH, (1935-1955)*.

26- *Le Parc - SH, (1937-1962)*.

27- Annonce des Crues, Cartes [404], [405], [406], [407]

Le Parc - SAC, cartes (s.d.).

28- *Le Parc - SH, comité météorologique (s.d.)*.

29- *Le Parc - SH, Ardèche, Association syndicale de riverains (1955-1978)*.

30- Service Central Hydrologique, 1962-1978 [445]

Observation hydrométriques et pluviométriques, jaugeages

1- Le Parc - SH, relevés, arrondissement-nord, météorologie, précipitations, températures (1948-1949, 1961-1966).

2- Service Hydraulique, 1945 à 1948 [385], [386], [387], [388], [389], [390], [391], [392], [393].

Le Parc - SH, observations journalières (1945-1948):

- Nord Ardèche , *Pluviométrie et Hydrométrie (1948)*.
- Sud Ardèche, *Hydro. (1948), pas Pluvio.*
- *Id. (1947), pas Pluvio.*
- *Id. Pluvio. et Hydro. (1946).*
- *Id. (X/XII-1945) (XI-1944 > IX-1945, à Paris).*

3- Service Hydraulique, Obs., 1949 à 53 [380], [381], [382], [383], [384].

Le Parc - SH, observations journalières (1949-1953):

- Nord Ardèche , *Pluvio. et Hydro. (1950)*.
- *Id. (1951)*.
- *Id. (1952)*.
- Sud Ardèche, *Hydro. (1949)*.
- *Id. (1950), pas Pluvio.*
- *Id. (1951), pas Pluvio.*
- *Hydro. et Pluvio. (1952)*.
- *Id. (1953)*.

4- Hydraulique, Observations, 1954-1957 [394], [395], [396], [397], [398], [399], [400], [401].

Le Parc - SH, observations journalières (1954-1957):

- Nord Ardèche , *Pluvio. (1954-1955), Hydro. (1953-55)*.
- *Id. (1956)*.
- *Id. (1957)*.
- Sud Ardèche, *Pluvio. et Hydro. (1954)*.
- *Id. (1955)*.
- *Id. (1956)*.
- *Id. (1957)*.

5- Annonce des Crues, Obs., 1960-61-59-58-57-56 [349], [350], [351], [352],[353], [354], [355], [356], [357], [358]

Le Parc - SH, observations journalières (1958-1960):

- Nord Ardèche, *Pluvio et Hydro (1958)*.
- *Id. (1959)*.
- *Id. (1960)*.
- Sud Ardèche, *Pluvio. et Hydro. (1958)*.
- *Id. (1959)*.

6- Annonce des Crues, Bulletins, 1951-52-53-54-55-56-57-58-59-60-61-62 [359], [360], [360], [361], [362], [363], [364], [365], [366], [367], [368], [369], [370], [371], [372], [373], [374], [375], [376], [377], [378], [379], [561], [562], [563], [564], [565], [566], [567], [568].

Le Parc - (dans même carton que Bulletin annuel 1956-62) SH, observations journalières (1950-1956):

- *Sud Ardèche, Pluvio. et Hydro. (1950), sur 2 cahiers.*
- *Id. (1951), sur 2 cahiers.*
- *Id. (1952), sur 3 cahiers.*
- *Id. (1953), sur 2 cahiers.*
- *Id. (1954), sur 2 cahiers.*
- *Id. (1955), sur 1 cahier.*
- *Id. (1956), sur 1 cahier jusqu'en mai seulement.*

Le Parc - SH, observations journalières (1956-1962):

- *Sud Ardèche, Pluvio. (VI-1956/VII-1959).*
- *Id. Pluvio. (VII-1959/X-1960).*
- *Id. Hydro. (VI-1956/VI-1959).*
- *Id. Hydro. (VI-1959/VIII-1960).*
- *Id. Hydro. (IX-1960/XII-1962).*
- *Id. Pluvio. et Hydro. (I et II-1960).*

7- Service Hydraulique, Obs., 61 à 62 [440], [441], [442].

Le Parc - SH, observations journalières (1961-1962):

- *Nord Ardèche, Pluvio. et Hydro. (1961, 1962).*
- *Sud Ardèche, Pluvio. et Hydro. (1962).*

8- Annonce des Crues, Observations hydrométriques, 64-63-62-61 [345], [346], [347], [348]

Le Parc - SH, observations journalières (1961-1964):

- *Sud Ardèche, Pluvio. (XI-1960/XI-1962), pas Hydro.*
- *Id. Pluvio. (XII-1962/XII-1963), pas Hydro.*
- *Id. Hydro. (I-1963/XII-1963).*
- *Id. Hydro. (I-1964/XII-1964), pas Pluvio.*

9- Service Hydraulique, 1963 [443], [444]

Le Parc - SH, observations journalières (1963):

- *Nord Ardèche, Pluvio. et Hydro. (1963).*
- *Sud Ardèche, Pluvio. et Hydro. (1963).*

10- *Le Parc - Département de l'Ardèche, Annales Météorologiques [ou Bulletin Annuel], Ardèche, Années 1952 (n° 3), 1956-62 (nn^{os} 7-13), 1963-1970 (nn^{os} 14-21), 1973, 1975.*

11- *Le Parc - SH, Hydrologie, météorologie, climatologie (1971-1972):*

- *Températures, précipitations journalières (1969).*

- *Pluies I-XII-1971 (Seulement qqes dates précises).*
 - *Id., 1972.*
 - *Températures, précipitations mensuelles (1971).*
- 12- *Le Parc - SH, observations journalières : Ardèche, Pluvio./26 stations, Hydro./16 stations (1976).*
- 13- *Le Parc - SH, observations journalières : Ardèche, Pluvio./25 stations, Hydro./17 stations (1977).*
- 14- *Le Parc - SH, Hydrologie des cours d'eau - Jaugeages (1953-1963) :*
- *Débits journaliers 1963 (Thinettes, Sauze).*
 - *Informations sur stations (Beaune, Vogüé,).*
 - *Installation de limnigraphes (1955).*
 - *Cartes installations EDF.*
 - *Débits 1958-1959 (Sauze St-Martin, du Doux, de l'Eyrieux).*
 - *Etat des stations de jaugeage en Ardèche en 1963 (p.43).*
 - *Carte des stations de l'Ardèche (1953) (p.3, 4).*
 - *Etat des stations en haute Ardèche (1958).*
- 15- *Le Parc - SH (1958-1975) :*
- *Observations journalières, Pluviométrie (1962, 1963).*
 - *Carte des stations Pluvio. et Hydro. + gendarmerie (1963).*
 - *Navigation, affaires diverses (1958-1962).*
 - *Id. (1973,1975).*
 - *SAC, télégrammes (XI/XII-1959, I/III-1960, VIII/IX-1960, I-1964).*
- 16- *Le Parc - SAC, stations de jaugeage, hydrologie de la Loire (1960-1961).*
- 17- *Le Parc - SAC (1961-1979) :*
- *Fonctionnement : état des stations (1967-1979).*
 - *Etat général des stations hydrométriques (1961).*
- 18- *Le Parc - SAC, règlements particuliers des stations hydrométrique et pluviométrique : liste stations ; observateurs, heures d'observation, feuille mensuelle, messages téléphonés, mesures d'ordre, principales crues observées, fonctionnement général (1963).*
- 19- *Le Parc - Commission météorologique départementale, perfectionnement des méthodes d'annonce des crues (1965-1971).*
- 20- *Le Parc - SAC, stations de jaugeage (1964-1968).*
- 21- *Le Parc - SAC, observateurs (1940-1963).*
- 22- *Navigation Intérieure, Rivières Navigables, Affaires Diverses, 1953-1958, 1926-1953*
- *sous-dossier : 14°section, Chapitre X. Navigation Intérieure, Rivières Navigables, Affaires diverses, P. et C., Dept Ardèche, Service R273 [448], [449], [450], [451]*
 - *sous-dossier : 14°section, Mesures de débits et jaugeages*
 - *chemise : 1953-55 [578]*
 - *chemise : 1955-63 [586], [587], [588], [589], [579], [580], [581], [582], [583], [584], [585]*
 - *chemise : 1964-72 [590], [591], [592], [594], [596], [595], [597], [598], [599], [600]*
- 23- *Crues, 30 sept. au 4 oct. 1958, 3 aout 1963, 9 et 10 sept. 71 [408], [409], [410], [411], [412], [413]*

Etudes

1- *Le Parc - SAC, dont étude CETE (1978), étude EDF (crue IX-1980), étude préliminaire CNA (1975) (1975-1980).*

2- *Le Parc - SAC, étude SOGREAH (1990).*

Police, travaux, inondations

1- Service Hydraulique, Prise d'eau, Barrage, Usine, Rivière l'Ardèche, 1813-1865

– sous-dossier : 15° section, Chapitre IV, Service Hydraulique, Usine Tourette, St Privat [432], [433], [434], [435]

– sous-dossier : Canal d'irrigation de Labégude [430], [431]

– sous-dossier : 15° section, Chapitre IV, Service Hydraulique, Usine Martin Eugène, Vallon [436]

Le Parc - SH, prises d'eau, barrages et usines sur l'Ardèche (1813-1965).

2- L'Ardèche, prises d'eau, barrages, usines, 1865-1881

– sous-dossier : Barrage Verny-Aubenas

– chemise : Barrage de Baras, usines de S. Verny et C. [616]

– chemise : Reconstruction d'un barrage, demande des S. Bouchard et Tourette [617]

– chemise : ss11, Chapitre 112, Service Hydraulique, usines [618]

3- Service Hydraulique, prises d'eau, barrages, usines, Rivières l'Ardèche, le Rhône, 1873-1939

– sous-dossier : 35, Usine du S. Bousquet [624]

– sous-dossier : 36, Demande du S. Boiron [623]

– sous-dossier : 39, Demande du S. Vigier [622]

– sous-dossier : Construction d'un barrage, demande du S. Chaze [619], [620], [621]

4- *Le Parc - SH, crue du Lavezon (1969, 1970) ; crue du Doux du 3-VIII-1963, digue de Lamastre (1958-1971).*

5- Service Hydraulique, V° Plan, Défense contre les inondations

– sous-dossier : 15° section, Chapitre III , travaux de défense contre les eaux, Plan quinquennal [649]

Le Parc - SH, défense contre les inondations : V^e plan (s.d.).

6-11- *Le Parc - SH, défense contre les inondations : V^e plan, travaux (6 cartons) (s.d.).*

12- *Le Parc - SH, Ardèche, nomenclature des digues de protection et des ouvrages de défense contre les eaux (1958-1962).*

13- Surveillance des barrages, Ruoms, Vallon, 1959-1979

– sous-dossier : Police des eaux, Affaires en cours [439]

– sous-dossier : Ruoms, Surrélévation du barrage [438]

14- Service Hydraulique, protection contre les inondations, travaux

– sous-dossier : Rivière d'Ardèche, défense des rives, programme des travaux [647], [648]

- sous-dossier : Rivière d'Ardèche, remise en état de la digue du petit Maletas [645], [646]

15- Navigation Intérieure, Affaires diverses, 1967-1973, 1962-1967, Service Hydraulique, Rivière Ardèche

- sous-dossier : 15° section, Chapitre IV, Service Hydraulique, Prise d'eau, Barrage, Usine, Rivière d'Ardèche [446], [447]

C.3.3.2 Archives au Service d'Annonce des Crues

Observations hydrométriques et pluviométriques

1- Hydraulique, Observations 1892 à 1912, 1901 à 1914 [529], [530], [531], [532], [533], [534], [535], [536], [537], [538], [539], [540], [541], [542], [543], [544], [545], [546], [547], [548], [549], [550], [551]

Le Parc - Service Hydraulique (SH), rapports de l'ingénieur relevés (1892-1911, 1912-1914).

2- Service Hydraulique, Obs., 1915-1923 [517], [518], [519], [520], [521], [522], [523], [524], [525], [526], [527], [528], [667], [668], [669], [670]

Le Parc - SH, annonce des crues, relevés pluviométriques (1915-1923).

3- Relevés pluviométriques et hydrographiques, 1928-29 à 1947 [452], [453], [454], [455], [456], [457], [458], [459], [460], [461], [462], [463], [464], [465], [466], [467], [468], [469], [470], [471], [472], [473], [474], [475], [476], [477], [478], [479], [480], [481], [482], [483], [484], [485], [486], [487], [488], [489], [490], [491], [492], [493], [494], [495], [496], [497], [498], [499], [500], [501], [502], [503], [504], [505], [506], [507], [508], [509], [510], [511], [512], [513], [514], [515], [516]

Le Parc - SH, relevés, arrondissement-sud (1928-1929, 1932-1950).

Articles

- s.n. - Esquisse géographique du Vivarais - essai de géographie régionale, chap V : Les cours d'eau et les inondations, 81-112.[16]
- Dauphiné Libéré (1993) - Coupures de presse du 13/10/93 au 17/10/93, 51p.[70]
- Deymié, P. (1959) - Conclusions de la réunion du 16 janvier 1959, La Houille Blanche (spécial A- 959), 715-717.[99]
- Guillot, P. (1959) - Aspect hydrométéorologique des crues cévenoles des 30 septembre et 4 octobre 1958, La Houille Blanche (spécial A-1959), 682-691.[109]
- Pardé, M. et Beauregard (de), J. (1959) - Quelques remarques sur les crues cévenoles de septembre et octobre 1958, La Houille Blanche (spécial A-1959), 670-681.[164]
- Reynier, E. (1947) - Le pays de Vivarais - Monographie des villes et villages de France, Chap IV, Les cours d'eau, 43 - 56.[203]
- Rouville (de), A. (1959) - Crues des cours d'eau du versant oriental des Cévennes en septembre-octobre 1958, La Houille Blanche (spécial A-1959), 662-664.[97]
- Vaschalde, H. (1873) - Chroniques météorologiques du Vivarais 1873, transcription d'un document manuscrit - Tapuscrit, 24p.[251]
- Vaschalde, H. (1890) - Les inondations du Vivarais depuis le XIIIème siècle, Imprimerie de Mme Robert, Aubenas, 127p.[252]
- Volle, M. J., Naud, G., Peloux, E. et Negre, A. (1991) - Quand les éléments se déchainent, Mémoire d'Ardèche - Temps présent (29), 1-17, 33-35, 41-42.[253]

Rapports d'étude

- BRL Ingénierie, BETURE et CEREC (1997) - Bassin versant de l'Ardèche amont et du Lignon - Elaboration d'un schéma de cohérence - Etude hydraulique, Volume I : rapport, pièces écrites - annexes, juillet, 221p.[24]
- BRL Ingénierie, BETURE et CEREC (1997) - Bassin versant de l'Ardèche amont et du Lignon - Elaboration d'un schéma de cohérence - Etude hydraulique, Volume III : L'Ardèche amont et le Lignon en images - Catalogue photographique - Fiches ouvrages, décembre, 74p.[25]
- Centre Départemental de la Météorologie (1990) - Catalogue des épisodes de précipitations supérieures à 100 mm en Ardèche - 1956-1990, Aubenas, 95p.[26]
- CETE Med, Service Hydraulique et DDE Ardèche, Service d'Annonce des Crues (1994) - Annonce et prévision des crues de l'Ardèche - Compte rendu d'activités, Saint Seine (de), J., décembre, 96p.[27]
- CETE Med, Service Hydraulique et DDE Ardèche, Service d'Annonce des Crues (1996) - Annonce et prévision des crues de l'Ardèche - Compte rendu d'activités - 1995-1996 - Bilan et perspectives, Saint Seine (de), J., août, 54p.[28]
- CETE Med, Service Hydraulique et DDE Ardèche, Service d'Annonce des Crues (1996) - Annonce et prévision des crues - Bassin de l'Ardèche - Les Zones vulnérables - Tronçon 4 - Tronçon 5 - Vals - Pont d'Ucel, janvier.[29]
- CETE Med, Service Hydraulique et DDE Ardèche, Service d'Annonce des Crues (1996) - Annonce et prévision des crues - Bassin de l'Ardèche - Les Zones vulnérables - Tronçon 6 - Tronçon 8 - Pont d'Ucel - Voguë, janvier.[30]
- CETE Med, Service Hydraulique et DDE Ardèche, Service d'Annonce des Crues (1996) - Annonce et prévision des crues - Bassin de l'Ardèche - Les Zones vulnérables - Tronçon 1 - Tronçon 3 - Pont de Labeaume - Vals, janvier.[31]
- CETE Med, Service Hydraulique et DDE Ardèche, Service d'Annonce des Crues (1996) - Annonce et prévision des crues - Bassin de l'Ardèche - Les Zones vulnérables - Tronçon 9 - Tronçon 10 - Voguë - Ruoms, janvier.[32]
- CETE Med, Service Hydraulique et DDE Ardèche, Service d'Annonce des Crues (1996) - Annonce et prévision des crues - Bassin de l'Ardèche - Les Zones vulnérables - Tronçon 11 - Tronçon 12 - Ruoms - Pont de Salavas, janvier.[33]
- CETE Med, Service Hydraulique et DDE Ardèche, Service d'Annonce des Crues (2000) - fichier Profilsentravers-Biefs13-14-15-16-17-18-19-20-21.doc.[839]
- CNR (1995) - Courrier du 02/06/1995 de Lafont, G. à Gigon, C., (DDE07, SAC), Objet : Courbe Q(H) à Vallon Pont d'Arc, 6p.[63]
- CNR et DDE Ardèche, Service d'Annonce des Crues (1995) - Jaugeages sur les bassins versants de l'Ardèche, l'Erieux, le Doux et la Cance - Campagne des 5 et 6 octobre 1995 (95-461 D4 GL/CLD), octobre, 29p.[64]
- CNR et DDE Ardèche, Service d'Annonce des Crues (1995) - Jaugeages sur les bassins versants de l'Ardèche - Campagne du 7 février 1995 (95-095), mars, 20p.[65]
- CNR et DDE Ardèche, Service d'Annonce des Crues (1995) - Jaugeages sur les bassins versants de l'Ardèche, l'Eyrieux, le Doux et la Cance (DX.HY 95-020), janvier, 73p.[66]
- CNR et DDE Ardèche, Service d'Annonce des Crues (1996) - Jaugeages sur les bassins versants de l'Ardèche et de l'Erieux - Campagne du 29 janvier 1996 (96-40 D4 SF/CLD), février, 29p.[67]

- CNR et DDE Ardèche, Service d'Annonce des Crues (1996) - Basses Eaux -Jaugeages sur les bassins versants de l'Ardèche et du Doux - Campagne du 27 aout et des 2 et 4 septembre 1996 (96-325 GL/CLD), septembre, 35p.[68]
- CNR et DDE Ardèche, Service d'Annonce des Crues (1997) - Basses Eaux -Jaugeages sur les bassins versants de l'Ardèche, du Doux, de l'Eyrieux et de la Cance - Campagne des 20, 21 et 27 aout 1997 (D4 97-458), octobre, 65p.[69]
- DDE07, SUAP/PR (1996) - Rapport de crues des 23 et 24 janvier 1996, Gigon, C. (ES/CRUE05), Privas, janvier, 25p.[88]
- DDE07, SUAP/PR (1996) - Rapport de crues des 12 et 13 janvier 1996, Gigon, C. (ES/CRUE03), Privas, janvier, 22p.[89]
- DDE07, SUAP/PR (1996) - Rapport de crues des 10 au 20 novembre 1996, Gigon, C. (ES/CRUE48), Privas, novembre, 39p.[90]
- DDE07, SUAP/PR (1997) - Rapport de crues des 3 au 9 novembre 1997, Gigon, C. (ES/CRUE48), Privas, novembre, 40p.[91]
- DDE07, SUAP/PR (1997) - Rapport de crues des 16 au 22 décembre 1997, Gigon, C. (ES/CRUE48), Privas, janvier, 43p.[92]
- DDE07, SUAP/PR (1997) - Crues de l'Ardèche à Pont de Labeaume, Gigon, C. (PONT12), Privas, février, 5p.[93]
- DDE07, SUAP/PR (1997) - Crues de l'Ardèche au Pont d'Aubenas-Ucel, Gigon, C. (UCEL12), Privas, décembre, 4p.[94]
- DDE07, SUAP/PR (1997) - Crues de l'Ardèche à Voguë, Gigon, C. (VOGUE12), Privas, décembre, 5p.[95]
- DDE07, SUAP/PR (1997) - Crues de l'Ardèche à Vallon Pont d'Arc, Gigon, C. (VALLON12), Privas, décembre, 11p.[96]
- Météo France (1995) - Inventaire des épisodes de fortes pluies en Ardèche - Tome I: 1807 - 1927 (ISSN 0242-8857), Aubenas, 84p.[131]
- Météo France (1995) - Inventaire des épisodes de fortes pluies en Ardèche - Tome II: 1928 - 1994 (ISSN 0242-8857), Aubenas, 308p.[132]
- Ponts et Chaussées, Service Hydraulique (1955) - Rivière Ardèche - Application du décret du 30 octobre 1935 relatif aux mesures à prendre pour assurer le libre écoulement des eaux de crue - Délimitation des surfaces submersibles, Soubeyrand, (ICPC), Privas, mai, 8p.[201]
- Ponts et Chaussées, Service Hydraulique (1958) - Crue de fin septembre et octobre 1958 - Circulaire S.C.V, n° 950/H du 13 octobre 1958 (Direction des Ports Maritimes et des Voies Navigables) - Rapport de l'ingénieur, Durand, Soubeyrand, (ICPC) (724/SH), Privas, décembre, 19p.[202]
- SINTEGRA (1988) - Ardèche - Secteur Ardèche amont, Planche 3 - Report de la ligne de crue du 22/09/92 - Plan photogrammétrique prises de vues du 28 juillet 1988 - Carte, N° 4453-6464, échelle: 1/5000, LAMBERT IGN 69 Altitudes Normales.[243]
- SINTEGRA (1988) - Ardèche - Secteur Ardèche amont, Planche 4 - Report de la ligne de crue du 22/09/92 - Plan photogrammétrique prises de vues du 28 juillet 1988 - Carte, N° 4453-6465, échelle: 1/5000, LAMBERT IGN 69 Altitudes Normales.[244]
- SINTEGRA (1990) - Ardèche - Secteur des Gorges, Planche 1 - Plan photogrammétrique prises de vues du 17 aout 1990 - Carte, N° 4436-6346, échelle: 1/5000, LAMBERT IGN 69 Altitudes Normales.[245]

- SINTEGRA (1990) - Ardèche - Secteur des Gorges, Planche 2 - Plan photogrammétrique prises de vues du 17 août 1990 - Carte, N° 4436-6347, échelle : 1/5000, LAMBERT IGN 69 Altitudes Normales.[246]
- SINTEGRA et DDE Ardèche (1988) - Vallée de l'Ardèche - Commune de Lalevade d'Ardèche commune du Pont de Labeaume commune de Vals les Bains - Plan topographique - Plan photogrammétrique prises de vues du 28 juillet 1988 - Carte, N° 2957-395?, échelle : 1/2000.[71]
- SINTEGRA et DDE Ardèche (1988) - Vallée de l'Ardèche - Commune de Vallon Pont d'Arc commune de Salavas - Plan topographique, Planche 2 - Plan photogrammétrique prises de vues du 28 juillet 1988 - Carte, N° 4156-5660, échelle : 1/2000.[72]
- SOGREAH (1994) - Etude Hydrologique et hydraulique de la crue du 22 septembre 1992 (300152), décembre, 54p.[247]
- SOGREAH (1994) - Etude hydraulique des zones inondables de la rivière Ardèche entre le Pont d'Aubenas et le Pont d'Arc (300243), décembre, 68p.[248]
- SOGREAH (1994) - Etude hydraulique des zones inondables de la rivière Ardèche entre Sauze Saint-Martin et Pont -Saint-Esprit (300232), juillet, 56p.[249]
- SOGREAH (1995) - Gorges de l'Ardèche - Définition des zones inondables et des zones à risque - Etude hydraulique (300341), août, 39p.[250]
- SOGREAH et DDE Ardèche (1994) - Zones inondables de l'Ardèche entre Aubenas et le Pont d'Arc- Secteur Aubenas-St Didier - Zones Inondables - Carte, N° 1, échelle : 1/5000, rapport N° 300243.[74]
- SOGREAH et DDE Ardèche (1994) - Zones inondables de l'Ardèche entre Aubenas et le Pont d'Arc- Secteur Vogué - Zones Inondables - Carte, N° 3, échelle : 1/2000, rapport N° 300243.[75]
- SOGREAH et DDE Ardèche (1994) - Zones inondables de l'Ardèche entre Aubenas et le Pont d'Arc- Secteur St Didier-Voguë - Zones Inondables - Carte, N° 2, échelle : 1/2000, rapport N° 300243.[76]
- SOGREAH et DDE Ardèche (1994) - Zones inondables de l'Ardèche entre Aubenas et le Pont d'Arc- Secteur Vogüë-Balazuc - Zones Inondables - Carte, N° 4, échelle : 1/2000, rapport N° 300243.[77]
- SOGREAH et DDE Ardèche (1994) - Zones inondables de l'Ardèche entre Aubenas et le Pont d'Arc- Secteur Balazuc - Zones Inondables - Carte, N° 5, échelle : 1/2000, rapport N° 300243.[78]
- SOGREAH et DDE Ardèche (1994) - Zones inondables de l'Ardèche entre Aubenas et le Pont d'Arc- Secteur Balazuc-Chauzon - Zones Inondables - Carte, N° 6, échelle : 1/2000, rapport N° 300243.[79]
- SOGREAH et DDE Ardèche (1994) - Zones inondables de l'Ardèche entre Aubenas et le Pont d'Arc- Secteur Chauzon-Pardon - Zones Inondables - Carte, N° 7, échelle : 1/2000, rapport N° 300243.[80]
- SOGREAH et DDE Ardèche (1994) - Zones inondables de l'Ardèche entre Aubenas et le Pont d'Arc- Secteur Pardon-Ruoms - Zones Inondables - Carte, N° 8, échelle : 1/5000, rapport N° 300243.[81]
- SOGREAH et DDE Ardèche (1994) - Zones inondables de l'Ardèche entre Aubenas et le Pont d'Arc- Secteur Ruoms-Salavas - Zones Inondables - Carte, N° 9, échelle : 1/5000, rapport N° 300243.[82]

- SOGREAH et DDE Ardèche (1994) - Zones inondables de l'Ardèche entre Aubenas et le Pont d'Arc- Secteur Salavas - Pont d'Arc - Zones Inondables - Carte, N° 10, échelle : 1/5000, rapport N° 300243.[83]
- SOGREAH et DDE Ardèche (1994) - Zones inondables de l'Ardèche entre Sauze St-Martin et Pont St-Esprit - Secteur St-Martin d'Ardèche-Aigueze - Zones Inondables - Carte, N° 1, échelle : 1/2000, rapport N° 300232.[84]
- SOGREAH et DDE Ardèche (1994) - Zones inondables de l'Ardèche entre Sauze St-Martin et Pont St-Esprit - Secteur St-Martin d'Ardèche-St-Paulet de Caisson - Zones Inondables - Carte, N° 2, échelle : 1/5000, rapport N° 300232.[85]
- SOGREAH et DDE Ardèche (1994) - Zones inondables de l'Ardèche entre Sauze St-Martin et Pont St-Esprit - Secteur St-Paulet de Caisson-Pont St-Esprit - Zones Inondables - Carte, N° 3, échelle : 1/5000, rapport N° 300232.[86]
- SOGREAH et DDE Ardèche (1994) - Zones inondables de l'Ardèche entre Sauze St-Martin et Pont St-Esprit - Secteur St-Just - Zones Inondables - Carte, N° 4, échelle : 1/5000, rapport N° 300232.[87]

C.3.4 Archives Départementales de l'Ardèche (ADA)

C'est à l'échelon départemental (Privas) qu'est rassemblée la majeure partie des sources d'archives utiles à notre recherche. En matière d'aménagement et de travaux publics postérieurs à la Révolution, les séries S (de 1800 à 1940) et W (après 1940) sont les premières à investir. Il faut savoir que les séries S des archives départementales ont rarement fait à ce jour l'objet d'un classement définitif et donc d'inventaires complets. La lenteur des versements des DDE explique en partie cette situation. Il faut donc souvent compléter l'enquête en archives par une visite dans les documentations des services en activité, comme nous l'avons fait, mais aussi consulter, parallèlement aux inventaires de la série S, l'état de la série W qui regroupe officiellement tous les documents postérieurs à 1940. En réalité, elle regroupe bon nombre de pièces antérieures faute de les avoir incorporées dans les séries déjà existantes. Elles sont dans l'attente d'un (re)classement définitif, et cette situation intermédiaire peut durer des années... C'est le cas pour nombre de documents relevant de la série S.

On regardera plus particulièrement dans cette série les dossiers relatifs aux voies de communication longeant ou enjambant le cours d'eau étudié (routes départementales, nationales, ponts). Le tracé, l'aménagement de ces infrastructures ont donné lieu à toute une série de documents bien connus des ingénieurs (P.-V., devis, états estimatifs, baux, plans, etc.). Tous peuvent nous renseigner sur l'état de la rivière. Sans parler bien sûr des dossiers relatifs aux travaux en réparation menés après le passage d'une crue destructrice. On trouve également aux Archives Départementales l'ensemble des dossiers sur l'aménagement et la police des cours d'eau (*Service Hydraulique*).

D'autres séries méritent d'être investies ensuite. La série M (administration générale) peut conserver des dossiers spécifiques aux catastrophes naturelles et aux inondations en particulier. On trouve notamment dans la correspondance entre autorités municipales, préfectorales et des Ponts et Chaussées des descriptions parfois très précises des crues avec pour les événements les plus catastrophiques des états détaillés de dégâts dans le cadre des procédures d'indemnisation. La série O (contrôle de l'administration et de la comptabilité communales) livre parfois des dossiers complets sur l'aménagement de cours

d'eau. On pourra trouver dans la série P (finances, cadastre, postes) les plans cadastraux des communes (extraits ou totalité), fort utile parfois, faute d'une autre cartographie, pour avoir un aperçu général et fixer des repères début XIX^e siècle (habitat, pont, digue, etc.). Pour la période antérieure à 1800, la série L est traditionnellement réservée aux documents de la période révolutionnaire. Quant à l'Ancien Régime, les sources sont très fluctuantes d'une région à l'autre en fonction du contexte administratif local. En règle générale, sont rassemblés dans la série C les documents émanant de l'administration royale et/ou de l'administration provinciale. En ce qui concerne l'Ardèche, les archives des *Etats du Vivarais* nous livrent une série fort intéressante de documents sur les inondations et les travaux d'endiguement des cours d'eau au XVIII^e s., dont notamment une série continue de procès verbaux sur les dégâts des inondations au cours de la seconde moitié du siècle. On retrouve aussi déjà les rapports des premiers ingénieurs des Ponts et Chaussées sur les routes, ponts et cours d'eau.

On notera que seules 6 cotes sur les 99 répertoriées, particulièrement ciblées sur les crues historiques, ont été exploitées pour l'étape 2 de collation des données (1262W151, 1262W152, 1262W153, 1262W154, 1262W170 et 1270W1). On rappelle à ce sujet que la démarche de collecte des informations historiques est itérative, des renseignements complémentaires pouvant alors être recherchés dans les cotes non exploitées (histoire d'un pont en particulier, d'une route, etc.).

C.3.4.1 Série C (Etats du Vivarais)

- C 100 - Travaux d'art, dont ponts sur l'Ardèche, Chassezac (1723-1787).
- C 103 - Travaux d'art, dont devis des ouvrages pour le nouveau canal de l'Ardèche à St-Just (vers 1780).
- C 104 - Travaux d'art, dont construction du pont de St-Just sur l'Ardèche (1754-1764).
- C 111 - Plan de l'Ardèche près du pont St-Just (1776).
- C 320 - Etats généraux du Languedoc accordant une somme en réparation du pont d'Aubenas (1772) ; dont réparation d'un moulin à foulon sur le Doux détruit par les inondations (1773).
- C 700 - PV des pertes causées par les inondations et intempéries : inondations 1684, 1686 ; Rhône 1697 ; hiver 1729.
- C 706 - Id. dont Aubenas (1756).
- C 707 - Ibid. (1757-1760).
- C 708 - Ibid. (1761-1763).
- C 709-715 - Ibid. (1764-1789).
- C 806 - Plan du pont de la Motte sur l'Ardèche, route de Thueyts à Mayres (XVIII^e s.).
- C 810 - Plan et élévation du pont d'Aubenas sur l'Ardèche (1776-1779).
- C 846 - Rapport, devis, travaux sur la route d'Aubenas au diocèse d'Uzès avec passage à Vogüé, Vallon Pont d'Arc (1686-1788).
- C 861 - Dont dégâts sur le chemin de Labégude à Vals par les inondations (1772).
- C 868 - Rapport, devis des ouvrages à exécuter sur les routes limitrophes des cours d'eau dans le Bas-Vivarais, dont l'Ardèche, le Chassezac, la Volane, etc. (1685-1784) - Lettres des maires, dont celui d'Aubenas en réparation des ponts suite au désastre dû au débordement extraordinaire de l'Ardèche du 25 octobre 1768.

- C 869 - Id., travaux sur les routes limitrophes des cours d'eau, dont Ardèche, etc. (1718-1784).
- C 871 - Dont dégâts sur la communauté de St-Péray par inondations (1788?).
- C 878 - Rapport, devis, travaux en réparation des ponts, dont Labeaume sur l'Ardèche (1726-1786).
- C 922 - Dont requête de la communauté de St-Alban-sous-Champzon sollicitant des secours contre les irrutions du Chassezac (?).
- C 1334 - Indemnités au Vivarais suite aux inondations et intempéries (1772-1773).
- C 1428 - Compte des emprunts pour travaux dont ouvrages en amont du pont d'Aubenas pour contenir l'Ardèche dans son lit (1771-1777).

C.3.4.2 Série L

- L 527 - Travaux de défense sur les rivières et cours d'eau (1791-1798).
- L 530 - Dignes, barrages et prises d'eau sur les cours d'eau (1790-1799).

C.3.4.3 Série M

- 1 MP 310 - Inondations et autres calamités (1928-1939).
- 1 MP 311 - Inondations et autres calamités (1931-1936).
- 1 MP 312 - Inondations et autres calamités (1931-1936).
- 7 M 6 - Débordement de l'Ardèche de 1828, 27-X/4-XI-1840, et autres (1828-1949).
- 7 M 9 - Inondation de 1890, état des pertes (1890).
- 7 M 10 - Inondations (1891-1924).
- 7 M 11 - Inondations (1927-1939).

C.3.4.4 Série S

- 2 S 5 - Usines et établissements sur cours d'eau, dont inondations, service hydraulique, inventaire des archives des Ponts et Chaussées avant 1790.
- 2 S 57 bis - Nationale 102, dont pont de St-Didier (1831-1866).
- 2 S 69 - N 102, dont plan de l'Ardèche entre St-Didier et St-Pierre avec les cotes atteintes par les eaux lors de la crue du 22-IX-1890 (1890).
- 2 S 74 - N 102, dont réparations après la crue de 1890 et celle de 1891. (1890-1891).
- 2 S 88 - N 104 (ex 124), dont pont d'Aubenas avec plan (1829-1830).
- 2 S 134 - Pont de Salavas, pont suspendu (1906-1925) ; Vallon (1827-1863) ; Vals-Labégude (1828-1892).
- 2 S 134bis - Pont de Vogüe (1825-1878).
- 2 S 296 - N 102, grosses réparations (1810-1933).
- 7 S 1 - Service Hydraulique (SH) : barrages, prises d'eau sur Ardèche dont Mayres (1871-1896).
- 7 S 2 - Id., dont Meyras, Pont de Labeaume, Lalevade (1855-1941).
- 7 S 3 - Id., dont Vals, Labégude, Ucel (1837-1923).
- 7 S 4 - Id. dont Aubenas (pont de Labégude) (1820-1925).

- 7 S 5 - Id., St-Privas (1820-1892).
- 7 S 61 - Id., dont Voguë, Lanas, Balazuc (1829-1886).
- 7 S 62 - Id., Chauzon (1860-1880).
- 7 S 7 - Id., Ruoms (1843-1941).
- 7 S 8 - Id., dont Sampzon, Vallon, Salavas (1856-1920).
- 7 S 91 - Id., dont St-Martin-d'Ardèche (1807-1899).
- 7 S 49-50 - Dignes sur l'Ardèche par communes (1821-1891).
- 7 S 59 - SH, cours d'eau et usines, dont Ardèche (fonds préfectoral) (1894-1936).
- 7 S 75 - SH, alignements sur les rivières, dont Ardèche (1820-1827).
- 7 S 79 - Tableaux descriptifs des rivières non navigables (1839, 1897).
- 7 S 80 - Autorisations de ponts et passerelles, dont Ardèche (1850-1931).

C.3.4.5 Série W

- 1109 W 138 - Service Hydraulique (SH) : prises d'eau usines (dont Ardèche à Malpas et Vallon) (1855-1869).
- 1109 W 139 - SH, police des cours d'eau (1891-1902).
- 1109 W 140 - SH, associations syndicales, irrigations (1868-1904).
- 1109 W 141 - SH, prise d'eau usines, dont Ardèche (1887-1900).
- 1109 W 142-143 - SH, Associations syndicales, endiguements, Ardèche (1900-1915).
- 1109 W 144 - SH, Bacs et bateaux (1837-1882).
- 1109 W 145 - SH, Associations syndicales, endiguements (Chauzon) (1900-1916).
- 1109 W 146 - SH, Associations syndicales, endiguements (1892-1924).
- 1109 W 147 - SH, Police des cours d'eau, dont Ardèche (1855-1881).
- 1109 W 148 - SH, Prises d'eau usines, dont Ardèche (1820-1874).
- 1109 W 149 - SH, Associations syndicales, endiguements dont Ardèche (1829-1885).
- 1109 W 249 - Inondation des 8-21 octobre 1878 : réparations aux chemins vicinaux (1880-1883).
- 1109 W 350 - SH, Associations syndicales, endiguements (1860-1887).
- 1109 W 351 - SH, Police des cours d'eau (1882-1892).
- 1109 W 352 - SH, Associations syndicales, endiguements (1828-1829 ; 1859-1887).
- 1109 W 353 - SH, Travaux contre les inondations et autres, dont Ardèche (1806-1881).
- 1109 W 354 - SH, Prises d'eau, irrigations (1845-1882).
- 1109 W 355 - SH, Associations syndicales, irrigations (1856-1874).
- 1109 W 356 - SH, Prise d'eau, usines (1866-1880).
- 1109 W 357 - SH, Police des cours d'eau (1904-1911).
- 1109 W 358 - SH, Associations syndicales, dessèchements, irrigations, endiguement (1879-1908).
- 1109 W 359 - SH, Prises d'eau, usines (1903-1913).
- 1109 W 360 - SH, Bacs et bateaux (1870-1905).
- 1109 W 361 - SH, Associations syndicales, irrigations (1845-1877).
- 1109 W 362 - SH, Assainissement de la plaine de Tournon (1887-1893).

- 1109 W 363 - SH, Divers, dont inondation de 1907 (1899-1907).
- 1156 W - Dossiers « Ardèche Claire » versée en 1985 (août), repris en partie en décembre 1985 par la DDE (entreposé au « Parc »), dont limnigrammes et hydrogrammes des crues, profils, topographie, tarage, photos, fiches par secteurs, etc. (1984).
- 1262 W 25-34 - Nationale 102 (1811-1936).
- 1262 W 38-41 - N 104 (1841-1911).
- 1262 W 146-147 - Routes Départementales : ouvrages d'Art (1859-1946).
- 1262 W 151 - Service Hydraulique, observations pluviométriques à Aubenas avec différents types de pluviomètres, fiches mensuelles avec observations : années 1861, 1862, 1863 (1853-1870).
- 1262 W 152 - SH, Observations faites aux échelles métriques de divers cours d'eau avec tableaux et courbes : Ardèche à Vallon / Digue Valladier (mars, avril 1857) ; pont suspendu (Juillet 1861, août-décembre 1875 ; janvier, mars-octobre, décembre 1876) ; Ardèche / Pont d'Aubenas (1878-1882, 1884-1885) ; Chassezac à Chambonas / Pont (juillet 1860 ; Janvier, février 1861) ; Ardèche à La Beaume / Pont (février, mars, juillet, octobre 1861 ; novembre, décembre 1862 ; juin 1875) (1857-1885). [743], [744], [745], [746], [747], [748], [749], [750], [751], [752], [753], [754], [755], [756], [757], [758], [782], [783], [784], [785], [786].
- 1262 W 153 - Service d'Annonce des Crues (SAC), instructions pour observations pluviométriques, règlement portant création d'un service hydrométrique, correspondances, tableaux indicatifs des observations des hauteurs d'eau des affluents du Rhône et de l'Ardèche, dommages causés par les pluies torrentielles des 27 et 28 octobre 1882, dépêches officielles de service (1853-1883). [761], [762], [763], [764], [765], [766], [767], [768], [769], [770], [771], [772], [773], [774], [775], [776], [777], [778], [779], [780], [781].
- 1262 W 154 - Etude relative aux inondations de la rivière d'Ardèche et de ses affluents : 28-IX-1846, 9/10-X-1827, 26-X/30-XI-1853, 10-V/16-VII-1856 (1827-1856) ; études relatives aux inondations de diverses rivières : l'Ardèche, la Ligne, le Chassezac, avec des graphiques, des plans des ouvrages, les courbes des débits, les extraits des P.V. des Etats du Vivarais concernant les crues de 1522, 1772, 1779, 1782, 1789, 1827, 1846 ; cartes générales, coupe transversale des affluents de l'Ardèche, calculs de volume (1856-1857) ; études relatives aux inondations de l'Ardèche : 10-IX et 5-X-1857, plan du cours de l'Ardèche (1857) (1827-1857). [787], [788], [789], [790], [791], [793], [794], [795], [796], [797], [798], [799], [800], [801], [802], [803], [804], [805], [806], [807], [808], [809], [810], [811], [812], [813], [834], [835], [836], [837], [838].
- 1262 W 155 - Calques de plans, profils en long et en travers de barrages et rivières dont Ardèche sur la commune de Balazuc (projet de barrage Tastevin, 1912) : plan 1/2500, profil long, 5 profils en travers - Ardèche : profil en long et 8 profils en travers à l'aval du pont de Vals (vers 1910).
- 1262 W 156 - Prises d'eau d'usine, dont Ardèche (1869-1878).
- 1262 W 157 - Prises d'eau d'usine, dont Ardèche (1885-1891).
- 1262 W 158 - Prises d'eau d'usine, dont Ardèche (1897-1910).
- 1262 W 159 - SH, Associations syndicales, endiguements, Ardèche (1893-1949).
- 1262 W 160 - SH, Associations syndicales, endiguement (plaine de Boudenas, commune de Chauzon) (1921-1924).
- 1262 W 170 - Calques divers, dont inondation de 1907 (1905-1912).

- 1270 W 1 - Dossier Paul De Mardigny sur les rivières de l'Ardèche, avec mémoires, plans, relevés, correspondance (1857-1860). [633], [691], [759], [760], [792].

C.3.4.6 Autres fonds aux ADA

Service Restauration des Terrains de Montagne (RTM)

- RTM 387 - Aubenas - Inondation des 22 et 23-IX-1890, 11 photos (1890).
- RTM 223 - Valgorge - Inondation 1890 (1890-?).
- RTM 250, 268 - Ardèche à Mayres (?).

Fichier du fonds ancien et moderne des ADA

- Inondation, Ardèche: Inondation de 1837, le 22-X à Vals. Récit du notaire Jean Lafont (1ère p. de son registre 1637-38, n° 2 E 223) ADA, 2 E Reg. 1864.

C.3.4.7 Bibliothèque

- 8° Br 157 - Molinier, A. (1969) - Stagnation et croissance. Le Vivarais aux XVIIe et XVIIIe siècles, Thèse.[1220]
- 8° Br 197 - Vaschalde, H. (1909) - Phénomènes météorologiques anormaux en Vivarais.[1221]
- 8° Br 547 - Association Histoire au présent (1993) - Histoire des catastrophes naturelles. Paysages, environnement, travaux historiques (33), Paris, 96p.[1218]
- Pr 2392 - Volle, M. J., Naud, G., Peloux, E. et Negre, A. (1991) - Quand les éléments se déchainent, Mémoire d'Ardèche - Temps présent (29), 1-17, 33-35, 41-42.[253]

C.3.5 Archives communales (AC)

Les archives des communes peuvent compléter les sources conservées dans les fonds départementaux. Mais les situations sont très variables d'une municipalité à l'autre. A noter que certaines communes ont pu verser une partie ou l'ensemble de leurs archives dans les fonds départementaux. Elles sont conservées alors au nom de la commune dans une sous-série de la série E. On peut trouver également des dossiers complémentaires dans une sous-série O des services de la préfecture consacrée au contrôle de la gestion communale. A l'intérieur des archives municipales, les principales pièces à repérer (dossiers distincts) sont celles relatives aux travaux publics, à la police des eaux (séries DD et O), aux impôts, sans oublier les délibérations municipales ou consulaires. A noter que les registres paroissiaux d'Ancien Régime sont conservés dans les mairies. Des doubles peuvent exister après 1737 aux Archives Départementales. Tous les fonds communaux d'archives n'ont pas été investis.

C.3.5.1 Commune d'Aubenas

Pas de dépôts aux Archives Départementales de l'Ardèche.
En mairie :

- BB 1 - Délibérations consulaires (1549-1563).
- BB 2 - Id. (1684-1737).

- BB 3 - Id. (1737-1750).
- BB 4 - Id. (1750-1760).
- BB 5 - Id. (1760-1778).
- BB 6 - Id. (1778-1790).
- BB 7 - Requêtes des consuls, dont inondations de l'Ardèche (1752-1756).
- CC 31 - Remise d'impôts pour calamités naturelles (grêle, gelée, orage, inondation (1710-1759).
- 3 I 30 - Police - Associations syndicales de l'Ardèche, dont syndicat du Pont d'Aubenas (1881-1890), syndicat des propriétaires pour l'Ardèche (1879, 1891), syndicat de Tartary (1879, 1893) (1866-1898).
- 2 S 1 - Plan de la ville d'Aubenas (1812).
- 1 O 14 - Dossier sur les chemins ruraux, CIC, Chemin Vieux du Pont (1882-1885), tableau des chemins communaux (1837-1881) (1837-1896).
- 3 O 1 - Aménagement de l'Ardèche - Digue (1862), quai National du Pont d'Aubenas (1891), projet de bac (1920) (1862-1920).
- 3 O 2 - Correspondance relative aux canaux, barrages, digues le long de l'Ardèche (1807-1866).
- 3 O 3 - Id. (1866-1898).
- 4 Q 3 - Secours accordés aux victimes de la grêle et de l'incendie (1828-1844).
- 2 S 5 - Plan de machine hydraulique (1848).
- 2 S 6 - Plan du canal du pont d'Aubenas (1848).
- 2 S 8 - Plan de la défense de Tartary : projet digue contre Ardèche à l'aval du Pont-d'Aubenas (1848).

C.3.5.2 Autres communes

Communes	Versement aux ADA	En mairie
St-Privat	non	à voir
St-Sernin	non	à voir
Vogué	non	à voir
Pont-de-Labeaume (Nieigles)	ADA, E 20 (42) - Travaux Publics, dont chemins vicinaux (1836-1917)	à voir
Salavas	Versement aux ADA mais rien concernant l'enquête Historique	à voir
Vallon-Pont-d'Arc	non	à voir
Aiguèze	non	à voir
St-Martin-d'Ardèche	Versement aux ADA mais rien concernant l'enquête Historique	à voir

C.3.6 Archives Nationales (AN)

Les Archives Nationales rassemblent et conservent les documents relatifs au gouvernement central de la France et des ministères. Dans l'ordre de consultation des fonds, leur parcours intervient après celui des collections départementales dont il conserve souvent un

double, notamment pour tout ce qui relève de la police des eaux aux XIX^e et XX^e siècles. On comprendra l'intérêt de leur lecture en cas de perte ou de non classement des fonds locaux. Par contre, un certain nombre d'études ou d'enquêtes générales ou de synthèse ne se trouvent nul par ailleurs comme par exemple les pièces relatives à la création d'un nouveau service (cf. Grandes Forces Hydrauliques).

Les sous-séries F¹⁰ (Agriculture) et F¹⁴ (Travaux Publics) intéressent plus particulièrement notre étude et embrassent un champ chronologique très large depuis le XVII^e siècle, même si la majeure partie de leurs collections est postérieure à la Révolution. On pourra regarder utilement en F² (affaires départementales du ministère de l'Intérieur) les pièces relatives aux travaux sur cours d'eau pour lesquelles un inventaire a été établi il y a peu. D'une manière générale, chaque ensemble de cotes relatif à un thème donné se partage entre un certain nombre de dossiers généraux et un classement départemental et/ou alphabétique des lieux. Dans la sous-série F¹⁰, outre les ensembles explicitement dévolus aux inondations et à l'endiguement, on regardera avec intérêt les rapports et la correspondance des règlements d'eau (*barrages et prises d'eau*) qui fournissent en général des états détaillés de dégâts après inondation. En marge de ces événements relativement rares, ils fournissent toute une série d'informations ponctuelles sur la topographie de la rivière (plans). Cette remarque s'applique également aux dossiers de police des cours d'eau. La sous-série F¹⁴ est sans doute la plus riche. On retrouve notamment ici par cours d'eau la plupart des dossiers de travaux, projets et réalisations, avec des rapports d'état des lieux, des plans, etc. A noter qu'un grand nombre de ces plans on fait l'objet d'un classement spécifique dans le fonds des « *Cartes et Plans* ». Il faudra donc se reporter à l'inventaire particulier des cartes et plans sur les fleuves et rivières.

On notera que le nombre de références extraites des Archives Nationales (numéro d'enregistrement entre crochet) est relativement faible, 9 seulement.

C.3.6.1 Sous-série F² (Administration départementale)

- F² I 904/1 - Ardèche (dépt.) : détournement de cours d'eau (1806).
- F² I 904/6 - Ucel : usines, rive gauche en amont du pont d'Aubenas (1819).
- F² I 904/13 - Ardèche (dépt.) : reconstruction de barrages détruits par les inondations (1854).

C.3.6.2 Sous-série F¹⁰ (Agriculture)

- F¹⁰ 309-319 - Dessèchements, travaux hydrauliques (1725- AN VIII).
- F¹⁰ 321-323 - Dessèchement (1791-AN IV).
- F¹⁰ 2296 - Inondations (1907 ; 1909-1910).
- F¹⁰ 2758-3124 - Règlements d'eau (barrages, prise d'eau) : arrêtés, correspondances, rapports par départements (XIX^e-début XX^e).
- F¹⁰ 277810 - Chassezac, règlement d'eau (1900-1905).
- F¹⁰ 29627 - Id., (1878-1881).
- F¹⁰ 22961 - Inondation 1907 : subventions aux syndicats pour réparations des dégâts (1908-1917).
- F¹⁰ 22962 - Inondation 1909-1910 : secours, travaux de défense (1910-1911).

- F¹⁰ 2777 - Règlement d'eau de l'Ardèche, dont les communes de Labégude, Ucel, St-Etienne-de-Fombellon, Aygueze, St-Maurice (1863-1900).
- F¹⁰ 2778 - Id., dont Chassezac (1900-1905).
- F¹⁰ 3245 - Canaux d'irrigation de l'Ardèche.
- F¹⁰ 32456 canal de dérivation du Chassezac (1887-1952).
- F¹⁰ 4140-4348 - Endiguement contre les inondations : projets, études départementales (XIX^e-XX^e).
- F¹⁰ 4179 - Endiguement de la rivière Ardèche (1891-1923).
- F¹⁰ 4180 - Id., dont Chassezac, Erioux (1888-1934).
- F¹⁰ 4374-4384 - Comité d'étude scientifique : PV de séance, rapport divers (1839-1939).
- F¹⁰ 4381 - 13e section : détermination du profil en long des cours d'eau (1906-1913) ; 14e section : étude des glaciers des Alpes et des Pyrénées (1905-1913).
- F¹⁰ 4394-4404 - Service de l'hydraulique et de l'amélioration agricole : organisation, projets, études, etc. (1848-1945).
- F¹⁰ 4405-4417 - Organisation du Service des Forces Hydrauliques (1903-1934).
- F¹⁰ 4440-4476 - Service des Grandes Forces Hydrauliques.
- F¹⁰ 4455-4476 : Région Alpes Sud Est (1897-1941).
- F¹⁰ 4512-4884 - Police des cours d'eau par départements (XIX^e- XX^e).
- F¹⁰ 4530 - Dont Chassezac, améliorations agricoles (1910-1914).
- F¹⁰ 5706-5775 - Statistique cours d'eau non navigables ni flottables par départements (1860-1900).
- F¹⁰ 5711 - Ardèche (1865-1892) ; réponse des services départementaux aux circulaires ministérielles des 30/07/1861 et 04/07/1878 ordonnant un recensement des cours d'eau non navigables ni flottables et un état de leurs utilisations industrielles et agricoles.

C.3.6.3 Sous-série F¹⁴ (Travaux Publics)

- F¹⁴ 123-219 - Ponts et Chaussées, fleuves, rivières, dont F¹⁴ 123-181b des généralités d'Auch à Tours (1675 - AN III).
- F¹⁴ 1186-1216 - Fleuves et rivières : correspondances, mémoires, projets, etc. sur les rivières (1700-1800).
- F¹⁴ 6050-6317 - Moulins et usines situés sur des cours d'eau non navigables ni flottables (XIX^e s.).
- F¹⁴ 6501-6820 - Rivières dont F¹⁴ 6501-6787 classement départemental (1732-1780).
- F¹⁴ 6515-6520 - Ardèche (1813-1870).
- F¹⁴ 6520(6)1-4 - Ardèche, rivière (1847-1869). [721], [722], [723].
- F¹⁴ 6520(6)1 - Lignon, torrent (1848).
- F¹⁴ 7546-7586 - Inondations par bassins (1808-1889). [724], [725], [726], [727], [728], [729].
- F¹⁴ 9773-10006 - Collection générale des actes concernant les Ponts et Chaussées (« Collection Poterlet ») dont F¹⁴ 99681-21 - Catalogue chronologique.
- F¹⁴ 10048-10083 - Cartes et Plans sur les fleuves ou rivières (1494-1891).
- F¹⁴ 10195(6) - Projet d'un pont en bois à construire sur les ruines du pont de l'Ardèche entre le St-Esprit et St-Just (Farell, IPC-chef, an IX).

- F¹⁴ 11157-11166 - Fleuves, rivières, canaux (1724-1884).
- F¹⁴ 14667-14721 - Rivières (1835-1954).
- F¹⁴ 14722 - Inondations (1867-1944).
- F¹⁴ 14723-14733 - Annonce des crues par bassins (1853-1936).
- F¹⁴ 14732 - Bassin particulier du Rhône et mesures générales sur l'ensemble du bassin (1875-1907 ; 1926-1929).

C.3.7 Ecole Nationale des Ponts et Chaussées (ENPC)

Quatre ensembles documentaires spécifiques ont été particulièrement investis à la bibliothèque de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées : (1) le « *fichier Richard* » qui regroupe sous forme de classeurs des notes biographiques sur les ingénieurs des Ponts et Chaussées des XVIII^e et XIX^e siècles ; le *fonds Ancien* , subdivisé en (2) fonds des *manuscrits*, (3) fonds des *imprimés* et enfin (4) *Annales des Ponts et Chaussées*.

C.3.7.1 Fichier Richard

Note bibliographique des ingénieurs affectés sur l'Ardèche : Bouvier, Combiér, Mardigny (de), Morlière, Perret, Vigouroux (note : nous avons pu retrouver des rapports de Combiér, de Mardigny, Morlière et Perret aux archives départementales de l'Ardèche).

C.3.7.2 Fonds Anciens

Constitué dès le XVIII^e siècle, le fonds ancien de l'ENPC compte plus de 60 000 documents : manuscrits, imprimés des XVIII et XIX^e siècles, périodiques, cartes, photographies et dessins.

Manuscrits

Le fonds des manuscrit regroupe des documents fort divers dont certains rapports, études, P.-V., etc. ou projets d'aménagement relatifs à tel ou tel secteur du territoire français ou étranger. Il complète les collections départementales et celles des Archives Nationales. *Aucune information intéressant l'Ardèche n'a été trouvée.*

Imprimés

On retrouve, au sein du fonds des imprimés, certaines des grandes études et publications théoriques et/ou régionales des ingénieurs présentes aux AN, ADA et dans les Annales des Ponts et CHaussées (cf. étude l'Inspecteur Général Belin, 1866, de de Mardigny, 1860). On présente ci-après les différents documents qui intéressent notre étude, il couvrent la période 1644-1891 et sont classés par cote suivant quatre thèmes : crues historiques (7 documents), prévision des crues (1 doc.), hydrométrie (4 doc.) et topographie (2 doc.).

Crues historiques (Ardèche et autres rivières)

- ? - Champion, M. (1862) - Les inondations en France depuis le VI^{ème} siècle jusqu'à nos jours, IV, Dunod, Paris.[845]

- 273-4976 v. 18524 - Mardigny (de) (1860) - Mémoire sur les inondations des rivières de l'Ardèche, Dalmont et Dunod, Paris.[738]
- 594 - Chapelle, F. (1875) - Mémoire sur les inondations, figures, Janchène, Paris, 1 broch. in-8°[842]
- 801 v. 14973 - Belin, E. F. (1866) - Rapport sur les résultats des études de 1862, sur les inondations dans le bassin du Rhône, (ICPC), Paris.[740]
- 4896 - Coulon, M. (1644) - Les rivières de France, ou Description géographique et historique du cours et du débordement des fleuves du Royaume de France, T. II, Clousier, Paris.[735]
- 11608 - Belgrand, E. et Lemoine, G. (1877) - Notice sur les crues des principales rivières de France en mars 1876, Gauthier-Villars, Paris, 1 broch. petit in-fol. oblong.p.[844]
- 11876 v. 11608 - Belgrand, E. (1875) - Coup d'oeil d'ensemble sur le régime des principales rivières du Nord, du centre et du midi de la France, Gauthier-Villars, Paris.[741]

Prévision des crues

- 981 - Allard, E. - Note sur la prévision des crues, Paris, 1 cah. in-4° lithogr.[843]

Hydraulique-Hydrométrie

- 583 - Bazaine, A. (1876) - Mémoire sur une nouvelle formule de jaugeage des cours d'eau, MM. Ganguillet et Kutter, 1 broch. in-8°.[841]
- 847 - Chézy (de), A. (1776) - Formule pour trouver la vitesse de l'eau conduite dans une rigole donnée.[1180]
- 2385 - Boileau, M. (1854) - Traité de la mesure des eaux courantes, Mallet-Bachelier, Paris.[737]
- 2397 - Prony (de), G. R. (1802, an X) - Mémoire sur les jaugeages des eaux courantes, Imprimeries de la République, Paris.[736]

Nivellement

On présente ci-après par ordre chronologique les principaux ouvrages traitant du nivellement, entre le XVII^e et le XIX^e siècle, disponibles à la bibliothèque de l'ENPC. Ces documents sont également disponibles à la Bibliothèque Nationale (53 références).

- 4322 - Bourdaloue, P. A. (1858) - Nivellement général de la France. Le Rhône, de la mer à Genève, Bourges.[739]
- 18894 - Ministère des Travaux Publics (1889-1891) - Nivellement général de la France - Répertoire graphique définissant les emplacements et altitudes des repères du réseau fondamental, Vol. I, Marchadier, Paris.[742]
- Picard, J. (Abbé) (1684) - Traité de nivellement, par M. Picard,... Avec une Relation de quelques nivellements faits par ordre du Roy, et un Abrégé de la mesure de la terre du même auteur. Mis en lumière par les soins de M. de La Hire, Michallet, E. [1069]
- Bullet, P. (1688) - Traité du nivellement, contenant la théorie et la pratique de cet art, avec la description d'un niveau nouvellement inventé, Langlois, N., Paris. [1082]
- Torar (Du) (1688) - Leçons de géométrie pratique... avec la pratique du nivellement et un traité du toisé des bois selon la coutume de Paris, Houry (d'), L., Paris. [1070]

- La Hire (de), P. (1689) - L'École des arpenteurs, où l'on enseigne toutes les pratiques de géométrie qui sont nécessaires à un arpenteur. On y a ajouté un abrégé du nivellement et les propriétés des eaux et les manières de les jauger... une méthode... pour faire des toisez... les ordonnances des rois sur l'arpentage., Moette, T., Paris. [1081]
- Clermont (de) (1723) - La Géométrie pratique de l'ingénieur, ou l'Art de mesurer, Doulssecker, J. R., Strasbourg. [1083]
- Ozanam, J. (1758) - Traité de l'arpentage et du toisé, ou Méthode facile pour arpenter et mesurer toutes sortes de superficies, Jombert, C. A., Paris. [1084]
- Lespinasse (de), A. (1768) - Traité sur la théorie et la pratique du nivellement, à l'usage des anciennes écoles du corps royal de l'artillerie, Avignon. [1085]
- Dupain de Montesson (1803) - La Science de l'arpenteur dans toute son étendue. 3e édition corrigée et augmentée du spectacle de la campagne exprimé par des couleurs sur les plans et sur les cartes, Goeury, Paris. [1086]
- Busson-Descars, P. (1805) - Essai sur le nivellement. [1092]
- Puissant, L (1807) - Traité de topographie, d'arpentage et de nivellement, Courcier, Paris. [1087]
- Fabre, J. A. (1809) - Traité complet sur la théorie et la pratique du nivellement, Draguignan. [1088]
- Busson-Descars, P. (1813) - Traité du nivellement, impr. de Bodoni, Parme. [1089]
- Prony, Gaspard-Clair-François-Marie Riche, Bon de (1822) - Nouvelle méthode de nivellement trigonométrique, F. Didot père et fils, Paris. [1093]
- s.n. (1827) - Instruction sur la reconnaissance des rivières, à l'usage de l'Ecole d'application du corps royal d'état-major, Anselin et Pochard, Paris. [1091]
- Lacroix, S. F. (1834) - Manuel d'arpentage ou Instruction élémentaire sur cet art et sur celui de lever les plans, Roret, Paris. [1090]
- Goulier, C. M. (1843) - Ecole d'application de l'artillerie et du génie. Cours de topographie. A. Extrait de l'instruction sur l'exercice de construction des levers à la boussole, Ecole d'application de l'artillerie et du génie. [1095]
- Bourdalouë, P. A. (1847) - Nouvelle Notice sur les nivellements, par Bourdalouë,... Amélioration, construction de mires et instrumens nouveaux. Nivellement général. Tables des repères du Midi... Tracés et nivellemens de Lyon à Avignon, Carilian-Goeury, Paris. [1101]
- Breton de Champ, P. E. (1848) - Traité de nivellement, comprenant la théorie et la pratique du nivellement ordinaire et des nivellements expéditifs dits préparatoires ou de reconnaissance, Mathias, L., Paris. [1102]
- Bourdalouë, P. A. (1851-1855) - Ponts et chaussées. Nivellement général du département du Cher, impr. de Jollet-Souchois, Bourges. [1098]
- Chauvin, F. L. (1854) - Nouveau niveau de pente. Innovations dans les nivellements et instructions pour l'entretien des routes ordinaires, impr. de Appert et Vavas seur, Paris. [1104]
- Collin, A. et Bourdalouë, P. A. (1855) - Ponts et chaussées. Nivellement général de la Loire entre Saint-Nazaire et Briare, impr. de Jollet-Souchois, Bourges. [1100]
- Laterrade, A. (1855) - Note sur l'application de la stadia à l'éclimètre et au niveau, impr. de Véronèse, Pau. [1105]
- Bourdalouë, P. A. (1856) - Isthme de Suez. Parallèle entre le nivellement de 1799 et celui de 1847, impr. de Jollet-Souchois, Bourges. [1143]

- Collin, A. et Bourdalouë, P. A. (1856) - Ponts et chaussées. Nivellement général de la Loire entre Saint-Nazaire et Briare, impr. de Jollet-Souchois, Bourges. [1099]
- Bourdalouë, P. A. et Bonnet, M. (1858) - Nivellement général de la ville de Lyon, exécuté en 1857, impr. de Jollet-Souchois, Bourges. [1110]
- Kleitz, C. et Bourdalouë, P. A. (1858) - Ponts et chaussées. Nivellement général du Rhône entre la Méditerranée et Genève, exécuté en 1856 et 1857 par Bourdalouë, sous la direction de M. Kleitz, impr. de Jollet-Souchois, Bourges. [1097]
- Féline-Romany (1859) - Ponts et chaussées. Navigation de la Seine (3e section). Partie comprise entre Paris et Rouen. Nivellement de précision, impr. de J. Juteau, Paris. [1146]
- Julien, F. (1859) - Instructions pratiques sur les opérations de nivellement et sur le piquetage d'ordre des courbes circulaires de raccordement dans le tracé des lignes de chemins de fer, des routes et des canaux, Bounet, J., Périgueux. [1106]
- Féline-Romany (1860) - Ponts et chaussées. Département de la Seine. Navigation de la Seine (2e section). Partie comprise entre le pont suspendu de Bercy et le pont d'Argenteuil (Seine-et-Oise). Nivellement de précision, impr. de J. Juteau, Paris. [1145]
- Breton de Champ, P. E. (1861) - Traité de nivellement, comprenant la théorie et la pratique du nivellement ordinaire et des nivellements expéditifs dits préparatoires ou de reconnaissance, Mallet-Bachelier, 2e éd., Paris. [1103]
- Chanoine et Bourdalouë, P. A. (1861) - Nivellement général de la France ; ligne de base ; navigation de la Seine. 1ere section de Marcilly (Aube) au pont de Bercy (Paris). Nivellement de précision exécuté en 1859 sous la direction de M. Chanoine..., par les brigades de M. Paul-Adrien Bourdalouë, imp. de A. Jollet fils, Bourges. [1166]
- Cotelle, A. (1861) - Méthode rapide et économique des levés de plans et des nivellements, Saint-Quentin. [1094]
- Féline-Romany, Bourdalouë, P. A., Chanoine, J. H. M. et Emmery de Sept-Fontaines, L. (1861) - Nivellement général de la France. Ligne de base : navigation de la Seine... Nivellement de précision exécuté en 1859, impr. de A. Jollet fils, Bourges. [1144]
- Laussedat, A. (1861) - Leçons sur l'art de lever les plans, comprenant les levés de terrain et de bâtiment, la pratique du nivellement ordinaire, et le lever des courbes horizontales à l'aide des instruments les plus simples, Impr. impériale, Paris. [1107]
- Ministère de l'Agriculture, du Commerce et des Travaux Publics (1862) - Nivellement général de la France. Bases, Jollet, A., Bourges. [1158]
- Bourdalouë, P. A. (1864) - Nivellement général de la France. Résultats des opérations exécutées pour l'établissement du réseau des lignes de base, Ministère de l'Agriculture, du commerce et des travaux publics, impr. de E. Pigelet, Bourges. [1147]
- Breton de Champ, P. E. (1865) - Traité du lever des plans et de l'arpentage, précédé d'une introduction qui renferme des notions sur l'emploi pratique des logarithmes, la trigonométrie, l'algèbre et l'optique, Bouchard-Huzard, Paris. [1153]
- Moinot, I. (1865) - Levés de plans à la stadia, notes pratiques pour études de tracés, Bounet, G., Périgueux. [1108]
- Hirsch, A. et Plantamour, E. (1867-1880) - Nivellement de précision de la Suisse, exécuté par la Commission géodésique fédérale, Georg, H., Genève. [1109]
- Barthaud, J. (1873) - Notice sur le lever des plans cotés au tachéomètre, Lacroix, E., Extrait des Annales du Génie civil. Novembre 1873, Paris. [1152]

- Lehagre, A. (1876-79) - Ecole d'application de l'artillerie et du génie. Cours de topographie, Impr. nationale, Paris. [1119]
- Duplessis, J. (1877) - Traité du nivellement, comprenant les principes généraux, la description et l'usage des instruments, les opérations et les applications, Baudry, J., Paris. [1155]
- Barré, H. et Roussel, L. (1878) - Notice sur les procédés de lever des plans et sur leur application au cadastre et aux autres services publics, Impr. nationale, Paris. [1156]
- Ministère des Travaux Publics (1878) - Nivellement général de la France. Résultat des opérations de nivellement exécutés dans le bassin inférieur de la Gironde, Imp. de E. Pigelet, Bourges. [1165]
- Vauthier, G., Fontanges (de), M., Bernard, H. et Villiers Du Terrage (de), E. (1879) - Nivellement général de la France. Établissement d'un repère fixe départemental. Rapport de la sous-commission, Chaix, A., Ministère des travaux publics. Département de la Seine, Paris. [1148]
- Holleaux, E. (1880) - Ministère des Travaux publics. Ponts et chaussées. Service spécial de la navigation entre la Belgique et Paris. Nivellement général de la France. Résultat des opérations de nivellement exécutées sur le canal de Saint-Quentin... le canal de jonction de la Sambre à l'Oise, le canal de Manicamp... Opérations confiées à M. Leclère, Ministère des Travaux publics. Ponts et chaussées. Service spécial de la navigation entre la Belgique et Paris. Ed., impr. de Pigelet et fils et Tardy, Bourges. [1149]
- Ministère des travaux publics, Direction des cartes et plans (1881) - Nivellement général de la France. Lignes de base. Tableau des rectifications à faire au recueil publié en 1864. (art. 6 du règlement du 17 février 1877), Imp. nationale, Paris. [1150]
- Ministère des Travaux Publics (1881) - Nivellement général de la France. Résultat des opérations de nivellement exécutées dans le bassin inférieur de la Gironde, Imp. de Pigelet et fils et Tardy, Bourges. [1164]
- Loir, E. (1883) - Suppression du chaînage dans le nivellement et le lever des plans. Méthode simple, précise, rapide, donnant simultanément la configuration et le relief des terrains de toute étendue, impr. de E. Deligne et Lenglet, Cambrai. [1116]
- Meyer, J. P. (1885) - Mémoire sur la stadia topographique et son application aux levés de plans et aux études de chemins de fer, routes, canaux, etc., Baudry, Extrait des Mémoires de la Société des ingénieurs civils, Paris. [1151]
- Ministère des travaux publics (1887) - Nivellement général de la France. Lignes de base du réseau Bourdalouë. Rectifications à faire au recueil publié en 1864. 2e édition, Imp. nationale, Paris. [1154]
- Lallemand, C. (1889) - Ministère des Travaux publics. Nivellement général de la France, réseau fondamental. Instructions préparées par le comité du nivellement pour les opérations sur le terrain, Baudry, Ministère des Travaux publics. Ed., Paris. [1132]
- Pelletan, A., Durand-Claye, C. L. et Lallemand, C. (1889) - Lever des plans et nivellement, Opérations sur le terrain, opérations souterraines, nivellement de haute précision, Baudry, Encyclopédie des travaux publics fondée par M.-C. Lechallas, Paris. [1157]

Annales des Ponts et Chaussées (1831-1999)

La revue des Annales des Ponts et Chaussées a été dépouillée dans son intégralité entre 1831 et 1999, avec de nombreux ajouts depuis le rapport de Coeur et al. (1999) (dépouil-

lement dorénavant a priori exhaustif pour les thèmes qui intéressent l'étude HISTORIQUE). Elle fut au XIX^e siècle l'un des principaux organes de publication des sciences et techniques de l'ingénieur, des questions hydrauliques en particulier. A ce titre nous avons choisi de présenter le détail des articles car ils constituent en eux-mêmes une source de l'histoire de la science hydraulique en France (cf. rapports sur l'Ardèche par de Mardigny, 1860 ; Marchegay, 1861 ; Delemer, 1904). Les articles sont classés par ordre chronologique autour de six grands thèmes : articles relatifs à des crues sur différentes rivières (45 articles), articles relatifs à la prévision des crues, aux Services Hydrométriques et d'Annonce des Crues en France et à l'étranger (27 art.), articles relatifs à l'hydrologie (14 art.), articles relatifs à l'hydrométrie (30 art.), articles relatifs à l'hydraulique (45 art.), articles relatifs à la topographie (22 art.).

Crues historiques (Ardèche et autres rivières)

- Vicat (1836) - Note sur les différences des niveaux simultanés que peuvent prendre les eaux d'une rivière aux abords d'un pont pendant une crue, Annales des Ponts et Chaussées, 2eme sem. (273), 90-92.[1041]
- Laval (1841) - Notes et tableaux statistiques sur la crue extraordinaire de la Saone dans les premiers jours du mois de novembre 1840, Annales des Ponts et Chaussées, 2eme sem. (26), 240-250.[961]
- Baumgarten (1847) - Notice sur les rivières de la Lombardie et principalement sur le Po, Annales des Ponts et Chaussées, 1er sem. (166), 129-199.[951]
- Baumgarten (1848) - Notice sur la portion de la Garonne qui s'étend en aval de l'embouchure du lot dans le département du Lot-et-Garonne, et sur les travaux qui y ont été exécutés de 1836 a 1847, Annales des Ponts et Chaussées, 2eme sem. (197), 1-157.[1078]
- Boulange (1848) - Notice sur l'inondation de la Loire des 17 et 18 octobre 1846, sur l'effet produit dans cette inondation par les digues de Pinay et de la Roche, sur l'équipement et le but de la construction de ces digues, et sur les moyens qui pourraient être employés pour diminuer la hauteur des crues de la Loire, Annales des Ponts et Chaussées, 2eme sem. (201), 325-346.[904]
- s.n. (1853) - Chronique juillet et aout 1853, Amelioration du régime du Mississipi et de l'Ohio, Annales des Ponts et Chaussées, 2eme sem., 134-137.[906]
- Chaix, P. (1857) - Observations sur le régime de l'Arve et du Rhône, Annales des Ponts et Chaussées, 2eme sem. (180), 204-221.[1044]
- Gras, S. (1857) - Etudes sur les torrents des Alpes, Annales des Ponts et Chaussées, 2eme sem. (174), 1-96.[947]
- Chanoine (1858) - Note sur les crues de l'Yonne, de la Marne et de la Seine, Annales des Ponts et Chaussées, 2eme sem. (211), 113-124.[940]
- Jollois (1858) - Note sur le débit de la Loire pendant la crue de juin 1856, Annales des Ponts et Chaussées, 1er sem. (205), 360-369.[953]
- s.n. (1860) - Quelques renseignements sur le Po et les autres fleuves du nord de l'Italie, Annales des Ponts et Chaussées, 2eme sem. (266), 257-304.[950]
- Mardigny (de) (1860) - Mémoire sur les inondations des rivières de l'Ardèche, Annales des Ponts et Chaussées, 1er sem. (258), 3ème sér., 10ème ann., 3ème cah., Chap. Memoires, 249-296, pl. 174 et 175.[675]
- Marchegay (1861) - Rapport sur les inondations qui ont eu lieu en 1857 dans les vallées des principaux torrents du département de l'Ardèche, et en particulier sur les inondations

- du 10 septembre 1857, *Annales des Ponts et Chaussées*, 1er sem. (1), 4ème sér., 1ère ann., 1er cah., Paris, 1-16.[676]
- Chanoine (1862) - Note sur la crue de la Seine de janvier 1861, *Annales des Ponts et Chaussées*, 1er sem. (27), 97-105.[909]
 - Belgrand, E. (1865) - Notice sur le régime de la pluie dans le bassin de la Seine, *Annales des Ponts et Chaussées*, 2eme sem. (107), 30-58.[854]
 - Belgrand, E. et Lemoine, G. (1868) - Note rectificative sur les observations pluviométriques de Chateau-Chinon (Nièvre), *Annales des Ponts et Chaussées*, 2eme sem. (208), 633-634.[862]
 - Lemoine, G. et Belgrand, E. (1868) - Etude sur le régime des eaux du bassin de la Seine pendant les crues du mois de septembre 1866, *Annales des Ponts et Chaussées*, 2eme sem. (195), 235-312.[861]
 - Jollois (1869) - Note sur la détermination des longueurs des déversoirs à construire sur les levées de la Loire, pour régulariser l'introduction des eaux dans les vals endigués pendant les grandes crues exceptionnelles - chronique septembre 1869, commentaire sur cette note, *Annales des Ponts et Chaussées*, 2eme sem. (231), 108-129.[1043]
 - Belgrand, E. et Lemoine, G. (1870) - Note sur l'état probable des eaux courantes du bassin de la Seine dans l'été et l'automne de 1870, *Annales des Ponts et Chaussées*, 1er sem. (255), 532-546.[860]
 - s.n. (1873) - Les inondations en Italie, *Annales des Ponts et Chaussées*, 1er sem. (17), 255-258.[908]
 - Deglaude (1873) - Sur les grandes crues survenues dans le bassin de la Loire pendant l'hiver 1872-1873, note, *Annales des Ponts et Chaussées*, 1er sem. (21), 277-290.[973]
 - Poincare (1873) - Distribution et marche des pluies dans le département de la Meuse, le bassin supérieur de la rivière de Meuse et une zone avoisinante du bassin de la Seine, notice, *Annales des Ponts et Chaussées*, 2eme sem. (46), 227-267.[954]
 - Belgrand, E. et Gariel (1874) - Chronique mai 1874, la Seine : études hydrologiques - Régime de la pluie, des sources, des eaux courantes - Application à l'agriculture, *Annales des Ponts et Chaussées*, 1er sem. (16), 561-568.[858]
 - Lemoine, G. et Belgrand, E. (1874) - Chronique juin 1874, abaissement probable du débit des eaux courantes du bassin de la Seine, note présentée à l'Académie des Sciences le 17 juin 1874 par E. Belgrand et G. Lemoine, *Annales des Ponts et Chaussées*, 1er sem. (19), 668-670.[859]
 - Deglaude (1875) - La Loire à Orléans, Régimes d'hiver et d'été, Discussion des observations hydrométriques depuis 1830 et pluviométriques depuis 1862, *Memoire*, *Annales des Ponts et Chaussées*, 1er sem. (20), 457-480.[910]
 - Belgrand, E. et Lemoine, G. (1877) - Etude de la grande crue de la Seine en mars 1876, *Annales des Ponts et Chaussées*, 1er sem. (30), 435-466.[857]
 - Michelier (1879) - Note sur la distribution de la pluie dans les Pyrénées pendant les jours qui ont précédé les inondations dans les bassins de la Garonne et de l'Adour en juin 1875, *Annales des Ponts et Chaussées*, 1er sem. (23), 233-249.[1038]
 - Mocquery, C. (1879) - Etude de quelques questions relatives aux eaux courantes dans la partie supérieure du bassin de la Saone, *Annales des Ponts et Chaussées*, 2eme sem. (54), 219-249.[922]

- Preaudeau (de), A. (1880) - Note sur les glaces et la débacle de la Seine pendant l'hiver 1879-1880, Annales des Ponts et Chaussées, 2eme sem. (63), 346-367.[958]
- Gros (1881) - Note sur l'insuffisance des réservoirs pour atténuer le danger des inondations, Annales des Ponts et Chaussées, 2eme sem. (40), 5-14.[1039]
- Jollois (1881) - Mémoire sur les crues de la Loire supérieure, Annales des Ponts et Chaussées, 1er sem. (16), 273-322.[917]
- Bouquet de la Grye (1882) - Chronique, étude sur le régime de la Loire maritime, Annales des Ponts et Chaussées, 2eme sem. (56), 388-390.[1028]
- Lemoine, G. et Preaudeau (de), A. (1883) - Etude sur les crues de l'hiver 1882-1883 dans le bassin de la Seine, Annales des Ponts et Chaussées, 2eme sem., 314-346.[864]
- Remise (1884) - Notice sur les crues de la Saone et de ses principaux affluents en 1882, Annales des Ponts et Chaussées, 1er sem. (15), 238-259.[969]
- Imbeaux, E. (1892) - La Durance, régime crues et inondations, Annales des Ponts et Chaussées, 1er sem. (1), 5-200.[978]
- Ritter, C. (1896) - Note sur le jaugeage de la Seine à Paris pendant la crue de novembre 1896, (chronique novembre 1896), Annales des Ponts et Chaussées, 2eme sem. (63), 598-603.[920]
- Bresse (1897) - Etude sur la statistique des jaugeages effectués dans les principaux bassins français, Annales des Ponts et Chaussées, 3eme trim. (29), 5-90.[733]
- Delemer (1904) - Etude sur les crues de l'Ardèche, mémoire, Annales des Ponts et Chaussées, T. XIII (18), Paris, 130-216, pl. 6 et 7.[98]
- Maillet, E. (1906) - Les grandes crues de la saison froide dans les bassins de la Seine et de la Loire, Annales des Ponts et Chaussées, 3eme trim. (32), 53-67.[967]
- Goupil, A. (1910) - Note sur les grandes crues de la Seine au XVIIeme siecle, Annales des Ponts et Chaussées, ii (23), mars-avr., 192-197.[979]
- Arana (1911) - Observations faites sur la Seine à Paris pendant la crue de janvier-février-mars 1911, Annales des Ponts et Chaussées, vi (71), nov.-dec., 600-617.[960]
- Delachenal et Lefort, R. (1911) - Observations faites sur la Seine à Paris pendant la grande crue de 1910, Annales des Ponts et Chaussées, iv (47), juill.-aout, 11-53.[945]
- Normandin, A. (1925) - Les crues du Fleuve Rouge et la défense du delta du Tonkin contre les inondations, Annales des Ponts et Chaussées (1), janv.-fev., 5-55.[866]
- Lang (1926) - Note sur les débits de la Seine à Paris, Annales des Ponts et Chaussées, v (10), sept.-oct., 184-195.[963]
- Imbeaux, E. (1935) - Le Nil et son bassin (4 volumes), par MM. Hurst et Phillips, compte rendu hydrologique par le docteur Ed. Imbeaux, Annales des Ponts et Chaussées, ix (18), 339-379.[949]

Services Hydrométriques et d'Annonce des Crues

- Belgrand, E. (1846) - Etudes hydrologiques dans les granites et les terrains jurassiques formant la zone supérieure du bassin de la Seine, Annales des Ponts et Chaussées, 2eme sem. (153), 129-183.[856]
- Belgrand, E. (1857) - Service hydrométrique du bassin de la Seine, mémoire: 1- sur les observations faites du 1er mai 1854 au 30 avril 1855, 2- sur la qualité des eaux de sources du bassin, Annales des Ponts et Chaussées, 1er sem. (168), 257-307.[852]

- Poincare (1864) - Notice sur le service de correspondance pour l'annonce des crues de la Meuse, Annales des Ponts et Chaussées, 2eme sem. (88), 334-358.[974]
- Allard, E. (1884) - Note sur le manuel hydrologique du bassin de la Seine, Annales des Ponts et Chaussées, 2eme sem. (70), 610-634.[959]
- Lemoine, G. et Mahan, F. (1884) - Sur l'annonce des crues de l'Ohio, Annales des Ponts et Chaussées, 2eme sem. (60), 487-493.[865]
- Lemoine, G. (1886) - Note historique sur le service hydrometrique du bassin de la Seine, Annales des Ponts et Chaussées, 1er sem. (8), 250-261.[863]
- Voisin (1888) - Memoire sur l'organisation et le fonctionnement du service hydrométrique et d'annonce des crues du bassin de la Liane (Pas-de-Calais), Annales des Ponts et Chaussées, 1er sem. (14), 464-510.[912]
- Allard, E. (1889) - Note sur la prevision des crues, Annales des Ponts et Chaussées, 1er sem. (20), 629-685.[932]
- Mazoyer (1890) - Note sur le service de la prévision des crues dans la Loire centrale, Annales des Ponts et Chaussées, 2eme sem. (38), 441-511.[980]
- Holtz (1891) - Note sur l'annonce des crues de l'Elbe en Bohême, Annales des Ponts et Chaussées, 1er sem. (17), 477-484.[981]
- Breuille, P. (1896) - Etude sur la prévision des crues de l'Yonne, du Serein et de l'Armancon, Annales des Ponts et Chaussées, 2eme sem. (39), 128-159.[975]
- Lemoine, G. (1896) - Essai sur le problème de l'annonce des crues pour les rivières des départements de l'Ardèche, du Gard et de l'Hérault, Annales des Ponts et Chaussées, 2eme sem. (61), novembre, 523-567.[129]
- Tavernier, R. (1900) - Les forces hydrauliques des Alpes en France en Italie et en Suisse, statistique, mode d'utilisation, législation, rapport de mission, Annales des Ponts et Chaussées, 2eme trim. (19), 1-167.[924]
- Babinet (1903) - Situation actuelle des études et des annonces des crues dans les principaux bassins francais, Annales des Ponts et Chaussées, 2eme trim. (16), 222-225.[968]
- Maillet, E. (1903) - Etude hydrologique du Rhin allemand et du Main, les crues et leur prévision, Annales des Ponts et Chaussées, 2eme trim. (15), 200-221.[965]
- Maillet, E. (1906) - Etude hydrologique de la Moselle, les crues et leurs previsions (d'après MM. Honsell et Von Tein), Annales des Ponts et Chaussées, 3eme trim. (31), 44-72.[966]
- Tavernier, R. (1907) - Etude des Grandes Forces Hydrauliques de la région des Alpes Provençales, compte rendu de 1905, rapport général, Annales des Ponts et Chaussées, v (57), sep.-oct., 88-135.[732]
- Mougny (1908) - Etude des Grandes Forces Hydrauliques dans la région des Alpes, bassin de la Haute Isère, station de jaugeage N 37 de Moutier sur l'Isère. Etude de controle des débits par la mesure des pentes, Annales des Ponts et Chaussées, i (3), janv.-fév., 94-99.[731]
- Breuille, P. (1911) - Etude sur la prévision des crues de l'Yonne à Auxerre d'après les pluies tombées dans le Morvan, Annales des Ponts et Chaussées, i (4), janv.-fév., 92-102.[971]
- Pigeaud (1919) - Note sur la propagation des crues et leur prévision journalière, Annales des Ponts et Chaussées, iv (22), juil.-août, Paris, 29-57.[730]
- Maillet, E. (1922) - Sur les procédés d'annonces des crues fondés en théorie et leur équivalence, Annales des Ponts et Chaussées, ii (8), mars-avr., 145-156.[970]

- Bachet (1934) - Note sur la propagation et l'annonce des crues, Annales des Ponts et Chaussées, iii (34), 409-465.[927]
- Callet (1937) - Note sur la prevision des crues, Annales des Ponts et Chaussées, i (3), janv., 37-46.[931]
- Bachet et Beau (1940) - Prévision des crues, retour sur les principes des nouvelles méthodes francaises de prévision et leur mise au point, analyse des résultats obtenus et enseignements dégagés lors de leur généralisation aux divers besoins francais, Annales des Ponts et Chaussées, vii (2), juill.-aout, 23-42.[964]
- Larras, J. (1965) - Prévision des hauteurs maximales de crue de la Loire et du Cher, Annales des Ponts et Chaussées (2), mars-avr., 75-87.[956]
- Lazard, R., Lacroix, J. L., Molenat, J. et Auge, C. (1966) - Annonce des crues dans le bassin de la Dordogne, Annales des Ponts et Chaussées (1), janv.-févr., 3-18.[977]
- Larras, J. (1971) - Le bassin Loire-Bretagne sous Louis XIV, Annales des Ponts et Chaussées (1), 5-9.[955]

Hydrologie, Risque inondation

- Belgrand, E. (1852) - Etudes hydrologiques dans le bassin de la Seine entre la limite des terrains jurassiques et Paris, Annales des Ponts et Chaussées, 1er sem. (24), 1-228.[853]
- Belgrand, E. (1854) - Hydrologie - De l'influence des forêts sur l'écoulement des eaux pluviales, Annales des Ponts et Chaussées, 1er sem. (61), 1-27.[855]
- Duponchel (1857) - Note sur le régime des torrents des cévennes et l'influence des barrages fixes sur les inondations, Annales des Ponts et Chaussées, 1er sem. (166), 234-244.[948]
- Valles, F. (1860) - Mémoire sur les inondations, Annales des Ponts et Chaussées, 1er sem. (253), 58-144.[916]
- Valles, F. (1862) - Etudes expérimentales sur les inondations, considérations sur l'intensité respective des écoulements qui ont lieu après la pluie à la surface des terrains boisés et des terrains déboisés, Annales des Ponts et Chaussées, 1er sem. (33), 177-210.[905]
- Gauckler, G. (1868) - Mémoire sur la défense du territoire contre les inondations, Annales des Ponts et Chaussées, 2eme sem. (204), 521-550.[915]
- s.n. (1869) - Chronique novembre 1869, influence des forêts sur les crues des cours d'eau, Annales des Ponts et Chaussées, 2eme sem., 417-422.[972]
- Maillet, E. (1909) - Sur une loi hydrologique de Minard et Belgrand, Annales des Ponts et Chaussées, i (5), 107-111.[957]
- Hegly, V. M. (1922) - Note sur le coefficient d'écoulement ou rendement hydrologique du bassin de la Meuse, Annales des Ponts et Chaussées, v (12), sept.-oct., 181-183.[1016]
- s.n. (1937) - Documents administratifs (protection contre les inondations et le régime des surfaces submersibles), Annales des Ponts et Chaussées, xii (35), 826-835.[907]
- Tarbouriech (1945) - Les projets de défense de Toulouse contre les inondations de la Garonne, Annales des Ponts et Chaussées (16), juill.-aout, 361-374.[1037]
- Jacquier, E. (1959) - Essai sur la formation des crues, Annales des Ponts et Chaussées (23), sept.-oct., 551-577.[983]
- Coulomb, R. (1963) - L'aménagement du bassin de la Seine au moyen de barrages-réservoirs : écrêtement des crues, amélioration du débit d'étiage, conception des ouvrages et exploitation, Annales des Ponts et Chaussées (27), juil.-aout, 481-511.[1042]

- Gendreau, N. (1998) - La gestion du risque d'inondation et l'aménagement des cours d'eau, Annales des Ponts et Chaussées (nouv. serie no 87), aout, 53-59.[1040]

Hydrométrie

- Baumgarten (1847) - Note sur le moulinet de Woltman destiné a mesurer les vitesses de l'eau, sur son perfectionnement et sur les expériences faites avec cet instrument, Annales des Ponts et Chaussées, 2eme sem. (184), 326-374.[847]
- Darcy (1858) - Note relative a quelques modifications à introduire dans le tube de Pitot, Annales des Ponts et Chaussées, 1er sem. (204), 351-359.[902]
- Laterrade (1858) - Note sur la manière de calculer les vitesses au moyen du moulinet de M. Woltmann, Annales des Ponts et Chaussées, 1er sem. (193), 121-125.[1031]
- L'evaille (1860) - Note sur le tarage du moulinet de Woltmann et sur son emploi dans la mesure du débit des rivières, Annales des Ponts et Chaussées, 1er sem. (257), 215-239.[1027]
- Michal (1870) - Note sur le jaugeage des eaux courantes au moyen des déversoirs, Annales des Ponts et Chaussées, 2eme sem. (268), 387-403.[1036]
- Michal (1871) - Deuxieme note sur le jaugeage des eaux courantes au moyen des déversoirs, Annales des Ponts et Chaussées, 2eme sem. (16), 23-34.[1035]
- Kvassay (de), E. (1877) - Note sur le moulinet de Woltmann, Annales des Ponts et Chaussées, 1er sem. (20), 236-242.[1026]
- Perrodil (de) (1877) - Notice sur un instrument applicable au jaugeage des eaux ou plus généralement à l'observation des lois de l'hydraulique, Annales des Ponts et Chaussées, 1er sem. (31), 467-475.[1052]
- Perrodil (de) (1880) - Note sur le tarage de l'hydro-dynamomètre ou dynamomètre hydraulique, nouvel instrument pour le jaugeage des cours d'eau et l'observation des lois de l'hydraulique, Annales des Ponts et Chaussées, 1er sem. (2), 11-28.[935]
- Ritter, C. (1880) - Expose d'un mode de notation et de représentation des observations hydrométriques, Annales des Ponts et Chaussées, 1er sem. (33), 579-598.[921]
- Lagrene (de), H. (1883) - Note sur la mesure des vitesses et des débits dans un cours d'eau rapide et profond, Annales des Ponts et Chaussées, 1er sem. (12), 219-246.[962]
- s.n. (1884) - Chronique mars 1884, emploi du thermomètre dans le jaugeage des petits cours, Annales des Ponts et Chaussées, 1er sem. (18), 323-328.[1054]
- Bazin, H. (1884) - Notice sur l'emploi des doubles flotteurs pour la mesure des vitesses dans les grands cours d'eau, Annales des Ponts et Chaussées, 1er sem. (34), 554-591.[848]
- Chatelier (Le) (1885) - Sur un appareil enregistreur de niveau, Annales des Ponts et Chaussées, T. IX (47), Paris, 1038-1040, pl. 1885 p. 1040 bis.[674]
- Ritter, C. (1885) - Sur quelques changements dans la disposition et les procédés de tarage des instruments de jaugeage et dans le mode de calcul des debits, Annales des Ponts et Chaussées, 1er sem. (54), 1058-1182.[919]
- Berard (1886) - Note sur la marche des flotteurs dans les courants, Annales des Ponts et Chaussées, 2eme sem. (78), 830-835.[899]
- Ritter, C. (1886) - Méthode et procédé de jaugeage rapide et approximatif des crues, Annales des Ponts et Chaussées, 2eme sem. (75), 697-724.[673]
- Bazin, H. (1887) - Note sur la mesure des vitesses a l'aide du tube jaugeur, Annales des Ponts et Chaussées, 2eme sem. (46), 195-229.[849]

- Mocquery, C. (1890) - Notice sur un fluviographe électrique avertisseur, Annales des Ponts et Chaussées, 2eme sem. (27), mai-juin, 118-130, pl. 26.[672]
- Schoendoerfer (1891) - Note sur un appareil enregistrant automatiquement les profondeurs du thalweg d'une riviere, Annales des Ponts et Chaussées, 1er sem. (18), 485-487.[1055]
- Ritter, C. (1892) - Instruments nouveaux et procédés auxiliaires de jaugeage des eaux courantes, Annales des Ponts et Chaussées, 1er sem. (17), 805-879.[734]
- Ritter, C. (1895) - Chronique septembre 1895, Application de la notation hydrograde à la représentation des variations journalières de niveau constatées aux diverses stations hydrométriques des rivières de la Hongrie, Annales des Ponts et Chaussées, 2eme sem. (35), 358-361.[901]
- Hegly, V. M. (1898) - Note sur un enregistreur des débits d'un déversoir, Annales des Ponts et Chaussées, 1er trim. (10), 286-289.[1014]
- Pech, J. et Hajos, S. (1898) - Jaugeages en hongrie, 1- les procédés du département hydrographique de Hongrie, 2- nouveau procédé de jaugeage et son outillage, Annales des Ponts et Chaussées, 3eme trim. (40), 287-329.[1013]
- Tavernier, R. (1905) - Considérations théoriques sur les jaugeages des cours d'eau à fond mobile, Annales des Ponts et Chaussées, iv (45), juill.-aout, 53-88.[923]
- Vidal et Kauffmann (1905) - Note sur les indicateurs de hauteur d'eau à courant d'air continu, Annales des Ponts et Chaussées, 2eme trim. (27), 188-200.[1056]
- Auric (1906) - Appareil enregistreur a niveau d'eau, systeme Chateau, Annales des Ponts et Chaussées, 1er trim. (11), 261-265.[846]
- Parenty (1906) - Mémoire descriptif sur la construction d'un appareil à enregistrer les vitesses et à totaliser les débits des conduites forcées et des canaux découverts, Annales des Ponts et Chaussées, 1er trim. (6), 170-197.[1051]
- Camichel, C., Eydoux, D. et Lheriaud, J. (1917) - Mesure des débits, le jaugeur Venturi, Annales des Ponts et Chaussées, ii (7), mars-avr., 185-209.[900]
- Staimesse, J. (1963) - La mesure des débits des cours d'eau, Annales des Ponts et Chaussées (15), mai-juin, Paris, 299-319.[671]

Hydraulique

- Navier, Prony (baron de), G. R. et Girard (1831) - Rapport de MM. de Prony, Navier et Girard sur un mémoire de MM. Poncelet et Lesbros, et sur les expériences faites à Metz en 1827 et 1828 pour déterminer le coefficient de contraction de la veine fluide, Annales des Ponts et Chaussées, 2eme sem. (23), 287-302.[911]
- Prony (baron de), G. R., Girard et Navier (1832) - Rapport fait à l'Academie des Sciences sur un memoire de M. Raucourt relatif à la mesure des vitesses de la Neva, Annales des Ponts et Chaussées, 2eme sem. (54), 1-10.[1062]
- Prony (baron de), G. R. (1835) - Note sur l'application du calcul à la mesure des remous occasionnés soit par le rétrécissement des lits de riviere dans lequel on construit des piles de pont, soit par des barrages avec écoulement de fond, Annales des Ponts et Chaussées, 1er sem. (224), 237-256.[937]
- Coriolis (1836) - Mémoire sur l'établissement de la formule qui donne la figure des remous, et sur la correction qu'on doit y introduire pour tenir compte des différences de vitesse dans les divers points d'une même section d'un courant, Annales des Ponts et Chaussées, 1er sem. (268), 314-335.[918]

- Prony (baron de), G. R. (1836) - Formules pour les calculs relatifs à l'écoulement de l'eau dans les rigoles demi-circulaires, Annales des Ponts et Chaussées, 2eme sem. (274), 93-95.[933]
- Vauthier, P. (1836) - Note sur la correction que M. l'ingenieur en chef Coriolis propose de faire subir à la formule du mouvement permanent des eaux courantes, pour tenir compte des différences de vitesse des molecules fluides aux divers points d'une même section transversale de courant, Annales des Ponts et Chaussées, 2eme sem. (291), 362-385.[914]
- Vauthier, P. (1836) - De la theorie du mouvement permanent des eaux courantes et de ses applications à la solution de plusieurs problèmes d'hydraulique, Annales des Ponts et Chaussées, 1er sem. (267), 241-335.[939]
- Saint-Guilhem (1838) - Formules pour résoudre divers problèmes d'hydraulique, équation générale du mouvement permanent des eaux courantes, Annales des Ponts et Chaussées, 1er sem. (347), 249-256.[944]
- Vauthier, P. et Vauthier, L. L. (1848) - Hydraulique des cours d'eau - Indication sommaire des résultats d'expériences faites à Roanne pour l'étude de quelques conséquences de la formule du mouvement permanent, Annales des Ponts et Chaussées, 1er sem. (190), 129-149.[946]
- s.n. (1857) - Chronique novembre et décembre 1857, bibliographie, Annales des Ponts et Chaussées, 2eme sem., 370-381.[1045]
- Stapfer (1869) - Note sur l'usage des formules de MM. Gauckler et de Prony relatives au mouvement de l'eau dans les canaux decouverts, Annales des Ponts et Chaussées, 2eme sem. (228), 51-64.[936]
- Bazin, H. (1871) - Etude comparative des formules nouvellement proposées pour calculer le débit des canaux découverts, Annales des Ponts et Chaussées, 1er sem. (2), 9-43.[851]
- Kleitz (1877) - Note sur la theorie du mouvement non permanent des liquides et sur son application à la propagation des crues des rivières, Annales des Ponts et Chaussées, 2eme sem. (48), 133-196.[930]
- Flamant, A. (1885) - Note sur le traité d'hydraulique de M. Graeff Inspecteur Général des Ponts et Chaussées, Annales des Ponts et Chaussées, 1er sem. (4), 89-95.[941]
- Kleitz (1885) - Note sur la théorie de l'écoulement de l'eau par déversoir, Annales des Ponts et Chaussées, 2eme sem. (105), 1157-1164.[942]
- Saint-Venant (de) (1885) - Des diverses manières de poser les équations du mouvement varié des eaux courantes (extrait), Annales des Ponts et Chaussées, 1er sem. (12), 148-228.[943]
- Bazin, H. (1888) - Expériences nouvelles sur l'écoulement en déversoir (1er article), Annales des Ponts et Chaussées, 2eme sem. (52), 393-448.[1020]
- Bazin, H. (1890) - Expériences nouvelles sur l'écoulement en déversoir (2eme article), Annales des Ponts et Chaussées, 1er sem. (2), 9-82.[1021]
- Bazin, H. (1891) - Expériences nouvelles sur l'écoulement en déversoir (3eme article), Annales des Ponts et Chaussées, 2eme sem. (48), 445-520.[1022]
- Bazin, H. (1894) - Expériences nouvelles sur l'écoulement en déversoir (4eme article), Annales des Ponts et Chaussées, 1er sem. (7), 249-357.[1023]
- Bazin, H. (1896) - Expériences nouvelles sur l'écoulement en déversoir (5eme article), Annales des Ponts et Chaussées, 2eme sem. (68), 645-731.[1024]

- Bazin, H. (1897) - Etude d'une nouvelle formule pour calculer le débit des canaux découverts, Annales des Ponts et Chaussées, 4eme trim. (41), 20-70.[850]
- Bazin, H. (1898) - Expériences nouvelles sur l'écoulement en déversoir (6eme article), Annales des Ponts et Chaussées, 2eme trim. (24), 151-264.[1025]
- Fournie, V. (1898) - Note sur deux formules relatives à l'écoulement permanent et uniforme des liquides, Annales des Ponts et Chaussées, 3eme trim. (33), 1-10.[938]
- Ocagne (d'), M. (1898) - Abaque de la nouvelle formule de M. Bazin relative aux canaux découverts, Annales des Ponts et Chaussées, 1er trim. (14), 304-314.[1050]
- Bazin, H. (1904) - Note sur l'état instable et les changements de forme de certaines veines liquides, Annales des Ponts et Chaussées, 1er trim. (6), 181-189.[1019]
- Fargue (1907) - Les équations des lois empiriques de l'hydraulique fluviale, Annales des Ponts et Chaussées, iii (34), mai-juin, 121-138.[1004]
- Goupil, A. (1917) - Chronique, sur la théorie des ondes de crues par le professeur P. Alibrandi, Annales des Ponts et Chaussées, v (29), sept.-oct., 200-210.[976]
- Mouret, G. (1917) - Le principe de Clémens Herschel concernant l'écoulement sur les déversoirs noyés et les formules de Bazin, Annales des Ponts et Chaussées, iv (24), juill.-aout, 48-91.[1046]
- Mouret, G. (1917) - Déversoirs noyés, représentation graphique directe des lois expérimentales de l'écoulement, Annales des Ponts et Chaussées, vi (34), nov.-dec., 272-298.[1047]
- Maillet, E. (1918) - Sur la propagation des crues, Annales des Ponts et Chaussées, v (22), 197-204.[925]
- Maillet, E. (1919) - Etude sur le mouvement graduellement varié non permanent et la propagation des crues, Annales des Ponts et Chaussées, iii (11), 289-331.[929]
- Mouret, G. (1920) - Chronique, nouvelle forme de déversoir de jauge, Annales des Ponts et Chaussées, iii (18), mai-juin, 341-345.[1048]
- Hegly, V. M. (1921) - Expériences sur des déversoirs à nappe libre avec contraction latérale, Annales des Ponts et Chaussées, vi (31), nov.-dec., 290-389.[1015]
- Mouret, G. (1921) - Antoine Chezy, Histoire d'une formule d'hydraulique, Annales des Ponts et Chaussées, ii (9), mars-avr., 165-269.[903]
- Rabut, C. (1923) - L'influence de Bazin dans l'enseignement de l'hydraulique, Annales des Ponts et Chaussées, i (5), 65-73.[1053]
- Bonneau (1924) - Etude sur la propagation des crues, Annales des Ponts et Chaussées, iii (14), mai-juin, 282-325.[926]
- Chary (1934) - Influence du calibrage partiel d'un cours d'eau sur la propagation des crues, Annales des Ponts et Chaussées, iii (34), 394-399.[928]
- Hegly, V. M. (1936) - L'écoulement de l'eau dans un canal à profil complexe, Annales des Ponts et Chaussées, v (23), mai, 445-528.[1017]
- Hegly, V. M. (1937) - Sur le coefficient des déversoirs à nappe libre, Annales des Ponts et Chaussées, x (20), oct., 566-577.[1018]
- Hegly, V. M. (1944) - Expériences nouvelles sur la propagation des ondes dans un canal trapézoïdal, Annales des Ponts et Chaussées (11), mai-juin, 209-244.[982]
- Lazard, A. (1947) - Contribution à l'étude théorique du mouvement graduellement varié en hydraulique, Annales des Ponts et Chaussées (9), mars-avr., 185-219.[934]

- Nizery (1948) - Le laboratoire national d'hydraulique, Annales des Ponts et Chaussées (42), nov.-dec., 767-849.[1049]
- Larras, J. (1968) - Problèmes d'hydraulique fluviale, Annales des Ponts et Chaussées (4), juil-aout, 195-209.[1034]
- Bernier, J. (1984) - Les études générales menées par le LNH pour le compte des services techniques de l'administration, Annales des Ponts et Chaussées, 3eme trim. (31), 19-46.[952]

Topographie

- Blondat (1840) - Résultat d'études faites pour perfectionner les niveaux, Annales des Ponts et Chaussées, 2eme sem. (415), 141-148.[1073]
- Cousinery (1840) - Du niveau à réflecteur vertical et des simplifications qu'on peut encore lui faire subir, Annales des Ponts et Chaussées, 2eme sem. (419), 173-178.[1074]
- Boisvillette (de) (1842) - Des nivellements préparatoires ou de reconnaissance au moyen d'opérations géodésiques, et de la mesure des angles avec la verticale, Annales des Ponts et Chaussées, 2eme sem. (47), 75-104.[1071]
- Lefranc (1846) - Description d'un nouveau baromètre à siphon destiné à la mesure des hauteurs, Annales des Ponts et Chaussées, 2eme sem. (158), 316-327.[1067]
- Porro (1852) - Mémoire sur de nouveaux instruments et procédés de géodésie, de nivellement et d'arpentage, Annales des Ponts et Chaussées, 2eme sem. (38), 273-390.[913]
- s.n. (1854) - chronique septembre et octobre 1854, topographie, Annales des Ponts et Chaussées, 2eme sem., 254-256.[1079]
- Favier (1855) - Observations sur les nivellements exécutés dans l'isthme de Suez en 1799 et 1847, Annales des Ponts et Chaussées, 1er sem. (116), 257-309.[1076]
- Stoecklin (1858) - Notice sur un niveau de pente portatif de V. Mayer, géometre en chef à la direction generale des travaux publics de Carlsruhe, Annales des Ponts et Chaussées, 1er sem. (198), 201-206.[1075]
- Michel, J. (1872) - Le nivellement de précision de la Suisse, Annales des Ponts et Chaussées, 1er sem., 419-425.[1064]
- Raillard (1878) - Notice historique sur le nivellement général du departement du Nord et sur la carte au 40.000, annexe de cette opération, Annales des Ponts et Chaussées, 1er sem. (25), 566-591.[1068]
- s.n. (1880) - Chronique mars 1880, nivellement expéditif, Annales des Ponts et Chaussées, 1er sem., 235-237.[1063]
- Laterrade (1881) - Note sur le nivellement expéditif, Annales des Ponts et Chaussées, 1er sem. (19), 364-365.[1029]
- Laterrade (1882) - Note sur le nivellement de précision à un seul coup, chronique mars 1882, Annales des Ponts et Chaussées, 1er sem. (15), 349-351.[1030]
- Durand-Claye, L. (1887) - Chronique mai 1887, note sur les opérations au niveau de pente, Annales des Ponts et Chaussées, 1er sem. (36), 684-686.[1077]
- Lallemand, C. (1887) - Note sur la théorie du nivellement, Annales des Ponts et Chaussées, 2eme sem. (59), 491-521.[1140]
- Laterrade (1887) - Notice sur le nivellement de pente par les tangentes et sur la stadia tangentielle, Annales des Ponts et Chaussées, 1er sem. (19), 339-371.[1032]

- Laterrade (1888) - Note sur les opérations au niveau tangentes, Annales des Ponts et Chaussées, 1er sem., 1032-1034.[1033]
- Ocagne (d'), M. (1895) - Formules générales pour la compensation d'un réseau topographique, Annales des Ponts et Chaussées, 1er sem. (6), 240-242.[1080]
- Lallemand, C. (1897) - Note sur la précision comparée de divers modes de repérage de la verticale dans les instruments d'astronomie de géodésie et de topographie, Annales des Ponts et Chaussées, 2eme trim. (22), 351-359.[1141]
- Zurcher (1897) - Note sur le niveau de la mer dans la Méditerranée, Annales des Ponts et Chaussées, 1er trim. (8), 295-297.[1065]
- Ocagne (d'), M. (1904) - Leçons sur la topométrie et la cubature des terrasses, compte rendu par M. Debauve, Annales des Ponts et Chaussées, 4eme trim. (52), 231-233.[1066]
- Predhumeau (1919) - Bibliographie. Construction description et emploi des appareils de mesure et d'observation, géographie mathématique d'H. Bouasse, professeur à la faculté de sciences de Toulouse 1917-1918, Annales des Ponts et Chaussées, iv (25), juill.aout, 75-77.[1072]

C.3.8 Société Hydrotechnique de France (SHF)

La SHF (association loi 1901) a été créée en 1912 suite au 1er congrès de La Houille Blanche tenu à Grenoble en 1902. Elle a depuis l'origine pour objet de favoriser les échanges entre scientifiques et techniciens dans le domaine de l'eau, et ce par le biais de colloques et de la publication d'un certain nombre de travaux de son Comité Scientifique dans un certain nombre de revues spécialisées : La Houille Blanche (depuis 1902), Revue Générale de l'Electricité (1912-1936) ; Revue Générale de l'Hydraulique (1936-1939). La SHF a également directement participé à la création d'un des tous premiers laboratoire expérimental d'hydraulique en France sur le site de Beauvert à Grenoble (1922). On y réalisait entre autres à l'époque le tarage des moulinets. Ce laboratoire a été arrêté en 1942 lors de la création du Laboratoire National d'Hydraulique (LNH) de Chatou. La SHF participa également pendant quelques années à la mise en oeuvre d'un service d'études générales de statistique et d'hydrologie (1941), sous la direction de P. Masse et R. Gibrat. Il s'agissait avant tout de collecter les informations sur les profils en long de cours d'eau et leurs débits. La SHF se chargera d'ailleurs de la publication des *annuaires hydrologiques* de 1939 à 1968.

Il faut savoir que d'un point de vue documentaire, la SHF ne conserve pas dans ses collections de documents d'archives au sens propre du terme, c'est-à-dire de manuscrits originaux relatifs par exemple à tel ou tel aspect de l'hydraulique, problèmes théoriques, techniques ou d'aménagement. Sa bibliothèque rassemble par contre toute une série de travaux édités sur ces sujets et notamment sur les techniques de mesure des débits. On y retrouve l'ensemble des actes des séminaires et congrès organisés par cette société, plus un certain nombre de revues et ouvrages spécialisés parfois anciens, comme la Houille Blanche. Comme nous l'avons fait pour les articles des Annales des Ponts et Chaussées, mais également ici pour des raisons liées à la rareté et à la faible diffusion de ses publications, nous les avons intégrées à l'EGS.

Les références sont présentées par ordre chronologique.

C.3.8.1 La Houille Blanche (1902-1999)

Les références sont organisées autour de cinq thèmes : crues historiques, hydrologie (Ardèche, Loire, Seine) (23 articles), analyse fréquentielle des crues (10 art.), hydrométrie (41 art.), histoire des services (7 art.) et divers (4 art.). On notera que dans ce cas et contrairement aux Annales des Ponts et Chaussées, la liste présentée n'est pas exhaustive.

Crues historiques, hydrologie (Ardèche, Loire, Seine)

- Pardé, M. (1932) - Quelques chiffres sur les crues des cours d'eau, La Houille Blanche (SHF) (185-186), Ed. Arthaud, mai-juin, Grenoble, 65-72.[1197]
- Pardé, M. (1957) - Sur les crues survenues en France de 1951 à 1956, La Houille Blanche (SHF) (A), 284.[986]
- Deymié, P. (1959) - Conclusions de la réunion du 16 janvier 1959, La Houille Blanche (SHF) (spécial A- 959), 715-717.[99]
- Guillot, P. (1959) - Aspect hydrométéorologique des crues cévenoles des 30 septembre et 4 octobre 1958, La Houille Blanche (SHF) (spécial A-1959), 682-691.[109]
- Pardé, M. et Beauregard (de), J. (1959) - Quelques remarques sur les crues cévenoles de septembre et octobre 1958, La Houille Blanche (SHF) (spécial A-1959), 670-681.[164]
- Rouville (de), A. (1959) - Crues des cours d'eau du versant oriental des Cévennes en septembre-octobre 1958, La Houille Blanche (SHF) (spécial A-1959), 662-664.[97]
- Babillot, P. et Margat, J. (1996) - Ressources et utilisations de l'eau du bassin de la Loire. Essai de comptabilité régionale de l'eau, La Houille Blanche (SHF) (6/7), 41.[1003]
- Bachoc, A. et Thepot, R. (1996) - Stratégie d'écrêtement des crues en Loire moyenne méthode, limites et impacts, La Houille Blanche (SHF) (6/7), 63.[1006]
- Bethemont, J. (1996) - L'homme et la Loire, La Houille Blanche (SHF) (6/7), 32.[1002]
- Dacharry, M. (1996) - Les grandes crues historiques de la Loire, La Houille Blanche (SHF) (6/7), 47-53.[710]
- Dauge, Y. (1996) - Le patrimoine ligérien, La Houille Blanche (SHF) (6/7), 20.[1000]
- Duband, D. (1996) - La genèse des crues dans le bassin de la Loire, La Houille Blanche (SHF) (6/7), 54.[1005]
- Dumay, H. (1996) - Stratégie de prévention. Exemple : l'aménagement de la Loire à Brives-Charensac, La Houille Blanche (SHF) (6/7), 81.[1009]
- Gilard, O. (1996) - Rôle et intérêt des zones d'écrêtement des crues, La Houille Blanche (SHF) (6/7), 74.[1008]
- Grassin, J. (1996) - Evolution de la politique de prévention des inondations et aménagement de la Loire, La Houille Blanche (SHF) (6/7), 70.[1007]
- Poitrineau, A. (1996) - L'histoire de la Loire de la guerre de Cent ans à nos jours, La Houille Blanche (SHF) (6/7), 15.[999]
- Wasson, J. G. (1996) - Structures régionales du bassin de la Loire, La Houille Blanche (SHF) (6/7), 25.[1001]
- Goubet, A. (1997) - Les crues historiques de la Seine à Paris, La Houille Blanche (SHF), 52 (8), Grenoble, 23-27.[711]
- Marti, R. et Lepelletier, T. (1997) - L'hydrologie de la crue de 1910 et autres grandes crues du bassin de la Seine, La Houille Blanche (SHF), 52 (8), Grenoble, 33-39.[714]

- Mesny, M. (1997) - Crise et gestion de crise - Application à l'eau, La Houille Blanche (SHF), 52 (8), Grenoble, 11-17.[715]
- Riom, N. (1997) - Aperçu des crues à Paris jusqu'au début du XVIIème siècle, La Houille Blanche (SHF), 52 (8), Grenoble, 20-22.[718]
- Schneider, M. (1997) - Caractérisation météorologique de la crue de 1910, La Houille Blanche (SHF), 52 (8), Grenoble, 28-32.[719]
- Thoraval, M. J. (1997) - Allocution d'ouverture au colloque « le risque crue en région parisienne », La Houille Blanche (SHF), 52 (8), Grenoble, 18-19.[720]

Analyse fréquentielle des crues

- Cam (Le), L. et Morlat, G. (1949) - Les lois des débits des rivières françaises, La Houille Blanche (SHF).[683]
- Morlat, G. (1951) - Note sur l'estimation des débits de crue, La Houille Blanche (SHF).[686]
- Larrieu, J. (1954) - Contribution à l'étude des crues, La Houille Blanche (SHF).[677]
- Halphen, E. (1955) - Sur l'hydrologie statistique, La Houille Blanche (SHF) (spécial).[678]
- Gumbel, L. J. (1956) - Méthode graphique pour l'analyse des débits de crue, La Houille Blanche (SHF), V, 709.[680]
- Bernier, J. (1959) - Comparaison des lois de Gumbel et de Fréchet sur l'estimation des débits maxima de crue, La Houille Blanche (SHF) (1), janv.-fév.[681]
- Tiercelin, J. R. (1973) - Modèles probabilistes en hydrologie, La Houille Blanche (SHF) (VII).[995]
- Larras, J. (1979) - Durées de retour des maximums annuels de hauteur des cours d'eau, La Houille Blanche (SHF) (IV-V), 259.[997]
- Bobée, B. (1999) - Estimation des événements extrêmes de crue par l'analyse fréquentielle une revue critique, La Houille Blanche (SHF) (7/8), 100.[1012]
- Bois, P. (1999) - Approches probabilistes de la prédétermination des crues de la normale à l'extrême, La Houille Blanche (SHF) (7/8), 96.[1011]

Hydrométrie

- Barral, L. et Cote, E. F. (1903) - Jaugeur différentiel pour déversoir, La Houille Blanche (SHF), 198-202.[867]
- Dejean, P. (1903) - Méthode de M. Bouty pour la mesure de l'intensité des champs magnétiques: son application à la mesure des débits, La Houille Blanche (SHF), 180-181.[868]
- Racine, J. (1903) - Indication à distance de niveau d'eau: système Siemens et Halsh, La Houille Blanche (SHF), 194-195.[869]
- s.n. (1904) - Mesure de la vitesse d'un cours d'eau, La Houille Blanche (SHF) (10), 331-332.[870]
- Bellet, H. (1904) - Méthode différentielle de jaugeage, La Houille Blanche (SHF), 51-58.[871]
- Cote, E. F. (1905) - Essais comparatifs de jaugeage, La Houille Blanche (SHF), 265-269.[872]
- Ribourt, L. (1905) - Jaugeages effectués à Brides-Les-Bains par des procédés divers et contradictoirement, La Houille Blanche (SHF), 32-35.[873]

- Lea, M. J. E. (1906) - Appareil servant à mesurer et enregistrer la quantité d'un courant de liquide s'écoulant par dessus un déversoir ou à travers un orifice, La Houille Blanche (SHF), 117-118.[874]
- Cote, E. F. (1907) - Essais comparatifs de jaugeage, La Houille Blanche (SHF) (10), 221.[878]
- s.n. (1910) - Sur la vitesse moyenne d'un cours d'eau, La Houille Blanche (SHF) (7), 195.[885]
- Bureau, H. (1910) - Nouvelle méthode de jaugeage par flotteurs, La Houille Blanche (SHF) (5), 117-122.[881]
- Bureau, H. (1910) - Nouvelle méthode de jaugeage par flotteurs, La Houille Blanche (SHF) (6), 158-163.[882]
- Bureau, H. (1910) - Nouvelle méthode de jaugeage par flotteurs, La Houille Blanche (SHF) (7), 190-191.[883]
- Bureau, H. (1910) - Nouvelle méthode de jaugeage par flotteurs, La Houille Blanche (SHF) (9), 242-248.[884]
- s.n. (1912) - Nouvelles formules pour déterminer la vitesse des cours d'eau, La Houille Blanche (SHF) (6), 170.[888]
- Schoesing (1912) - Jaugeage par l'analyse chimique, La Houille Blanche (SHF) (12), 325-326.[887]
- s.n. (1923) - Jaugeage par moulinet électrique DBF, La Houille Blanche (SHF), 196.[890]
- s.n. (1927) - Expériences américaines sur les déversoirs, La Houille Blanche (SHF), 21.[891]
- s.n. (1929) - Nouveau moulinet hydrométrique Ott, La Houille Blanche (SHF), 126-127.[893]
- Montagne, E. (1929) - Expériences sur les moulinets pour de faibles vitesses, La Houille Blanche (SHF), 97-100.[892]
- s.n. (1930) - Moulinet pour la détermination de la vitesse et de la direction des courants fluviaux marins, La Houille Blanche (SHF), 80-82.[894]
- Goguel, J. (1946) - Jaugeage chimique continu du Guil, La Houille Blanche (SHF), 199-207.[895]
- s.n. (1950) - Quelques perfectionnements à la capacité jaugée, La Houille Blanche (SHF) (III), 363-368.[896]
- s.n. (1950) - Micro-moulinet pour la mesure de vitesses rapidement variables, La Houille Blanche (SHF) (V), 574-576.[897]
- Bouvard, M. (1950) - Matériel de jaugeage léger - Méthode chimique, La Houille Blanche (SHF) (IV), 466.[898]
- Gridel, H. (1950) - La mesure précise et l'enregistrement des niveaux stables ou fluctuant au moyen de pointes limnimétriques à vibrations entretenues, La Houille Blanche (SHF), novembre.[682]
- Crump, E. S. et Rigard, J. (1953) - Nouvelle méthode de jaugeage de cours d'eau sous une faible chute par un seuil noyé de profil rectangulaire, La Houille Blanche (SHF) (5), 670.[985]
- Dumas, H. (1953) - La méthode chimique pour la mesure du débit des cours d'eau, La Houille Blanche (SHF) (5-1952, 1 et 3-1953), 5-36.[101]

- Pardé, M. (1953) - Remarques sur l'évaluation des très gros débits des rivières en fonction des hauteurs d'eau, à la lumière récente de récents jaugeages de grandes crues (résumé), La Houille Blanche (SHF) (B), 700-701.[984]
- Terrier (Le), G. (1955) - Niveaumètre enregistreur, La Houille Blanche (SHF) (spécial).[679]
- André, M. (1959) - L'amélioration des mesures de débits dans les aménagements hydroélectriques - Un cas concret: le bassin de la Romanche, La Houille Blanche (SHF) (II-1959), 155-165.[18]
- André, M. (1960) - Méthode chimique de dilution - Procédé par intégration, La Houille Blanche (SHF) (II-1960), 163-173.[19]
- Kolupaila, A. (1960) - Les jaugeages dans les ouvrages et les centrales hydroélectriques (résumé historique), La Houille Blanche (SHF) (IV), 344.[987]
- André, H. et Lacoste, A. (1962) - Analyse des limnigrammes. L'ADL61, La Houille Blanche (SHF) (3), 466.[989]
- Salvo, M. (1962) - Mesures de débit dans un écoulement à filets non parallèles, La Houille Blanche (SHF) (1), 58.[988]
- Combes (1968) - Quelques réflexions sur l'évolution des systèmes de mesure de débits et niveaux dans les canaux, La Houille Blanche (SHF) (45).[991]
- s.n. (1969) - La mesure des débits liquides, La Houille Blanche (SHF) (spécial-5).[992]
- s.n. (1969) - Tendances actuelles en matière de mesure des débits liquides, La Houille Blanche (SHF), Comité Technique de la SHF, Session 087 (5).[1138]
- Goubet, A. (1969) - Détermination des débits dans les rivières herbeuses, La Houille Blanche (SHF), 489-492.[994]
- Rodier, J. A. (1969) - Mesure des débits de crue de faible fréquence dans les pays d'outre-mer, La Houille Blanche (SHF), 483-488.[993]
- Kinghorn, F. C. et Hugh, M. A. (1977) - An international comparison of integration techniques for traverse methods in flow measurement, La Houille Blanche (SHF) (I), 49.[996]

Histoire des services

- Brosse (de la), R. (1906) - Le Service d'Etude des Forces Hydrauliques de la région des Alpes, La Houille Blanche (SHF), 145-151.[875]
- s.n. (1907) - Les services météorologiques de la France, La Houille Blanche (SHF) (8), 183-184.[877]
- Tavernier, R. et Brosse (de la), R. (1909) - Publication par la Mission d'étude des grandes forces hydrauliques des Alpes et Pyrénées, La Houille Blanche (SHF) (9), 245.[880]
- Brosse (de la), R. (1911) - Le Service d'Etude des Grandes Forces Hydrauliques, La Houille Blanche (SHF) (3), 72-73.[886]
- s.n. (1963) - La décennie Hydrologique Internationale, La Houille Blanche (SHF) (4), 348.[990]
- Duband, D. (1995) - L'hydrométéorologie opérationnelle à Electricité de France, La Houille Blanche (SHF) (4), 17.[998]
- Hermitte (L'), E. (1996) - EDF et la Loire 50 ans d'histoire, La Houille Blanche (SHF) (6/7), 92.[1010]

Divers

- s.n. (1907) - Circulaire du Ministère de l'Agriculture du 1er juin 1906, relative au nouveau règlement de police des cours d'eau non navigables, ni flottables, La Houille Blanche (SHF) (3), 52-57.[876]
- s.n. (1908) - Ecoulement de l'eau dans les canaux, La Houille Blanche (SHF) (6), 129-130.[879]
- s.n. (1912) - Nivellement Général de la France, La Houille Blanche (SHF) (10), 282.[889]
- s.n. (1980) - Relations « Pluie-débit », La Houille Blanche (SHF), Comité Technique de la SHF, Session 114 (4-5).[1212]

C.3.8.2 La Revue Générale d'Hydraulique

- Bourgeat, R. (1936) - L'étalonnage des moulinets au laboratoire de Beauvert, Revue Générale de l'Hydraulique (SHF) (9), 499-502.[1184]
- Bourgeat, R. (1936) - Recherches expérimentales sur l'étalonnage des moulinets en eau calme, Revue Générale de l'Hydraulique (SHF) (12), 659-665.[1185]
- Bourgeat, R. (1937) - Recherches expérimentales sur l'étalonnage des moulinets en eau calme, Revue Générale de l'Hydraulique (SHF) (13), 23.[1186]
- Masson, M. A. (1939) - Contribution à l'étude de la mesure des débits d'eau par la méthode Allen, Revue Générale de l'Hydraulique (SHF) (28), 177-194.[1187]
- Pardé, M. (1939) - Notes, mémoires et rapports (liste dressée le 01/07/1938), Revue Générale de l'Hydraulique (SHF) (25), 45-47.[1189]
- Pardé, M. (1956) - Jaugeage récents de gros débits sur certaines rivières française, Revue Générale de l'Hydraulique (SHF), 27ème année, novembre-décembre, Paris, 115-135.[162]

C.3.8.3 Comité Technique de la SHF, Mémoires et Travaux de la SHF

- s.n. (1912-1937) - Compte-rendu des travaux 1912 - 1937, Comité Technique de la SHF, Session 058, 3 vol. de compilation.[1211]
- s.n. (1919-1930) - Compte-rendu des travaux 1919 - 1930, Comité Technique de la SHF. [1188]
- Laurent (1927) - Note sur le tarage des moulinets hydrométriques, Mémoires et Travaux de la SHF.[690]
- Leroux, P. et Bourgeat, R. (1927) - Station d'étalonnage en eau courante d'appareils de mesures hydrométriques du laboratoire d'essais de la SHF à Beauvert (Grenoble), Comité Technique de la SHF, Paris.[702]
- Coutagne (1930) - Enquête sur les débits de crue - Le contrôle hydrologique d'un bassin, Mémoires et Travaux de la SHF.[684]
- Coutagne (1937) - L'étude statistique des débits de crue, Mémoires et Travaux de la SHF.[685]
- Léo (1944) - Mesure et estimation des débits, Annuaire Hydrologique de la France, Mémoires et Travaux de la SHF (supplément).[696]
- Jonte (1949) - Note sur l'étude des coupures des boucles de l'Isère, Mémoires et Travaux de la SHF.[689]

- Remenieras, G. (1949) - L'hydraulique des stations limnimétriques pour la mesure du débit des cours d'eau, Annuaire Hydrologique de la France, Mémoires et Travaux de la SHF (supplément).[697]
- Remenieras, G. (1951) - L'hydraulique des stations limnimétriques pour la mesure du débit des cours d'eau, Mémoires et Travaux de la SHF (supplément) (I), 22.[1191]
- Gaspard, B. (1952) - Note sur la détermination des débits de la Seine à Paris, Mémoires et Travaux de la SHF (II), 110.[1190]
- Grand, L. (1955) - Mesure de débits de crue par moulinet suspendu. Perfectionnement du mode opératoire et premiers résultats obtenus, Mémoires et Travaux de la SHF.[687]
- s.n. (1956) - Utilisation de la statistique dans les problèmes d'hydraulique et d'hydrologie, Comité Technique de la SHF, Session 058, Mémoires et Travaux de la SHF (Supplément au n°II), 15 mars.[695]
- Guilhot, R. (1959) - Note sur les crues de septembre-octobre 1958 dans le bassin du Chassezac, Mémoires et Travaux de la SHF.[688]
- s.n. (1987) - Préviation des crues, Comité Technique de la SHF, Session 135, 4 vol. non paginés.[1213]
- s.n. (1995) - La Loire, Comité Technique de la SHF, Session 153, 192.[1214]
- s.n. (1997) - Le risque crue en région parisienne, Comité Technique de la SHF, Session 155, 179.[1215]
- s.n. (1999) - Crues de la normale à l'extrême : précipitations, infiltrations, ruissellements, entraînements, Comité Technique de la SHF, Session 161, 182.[1216]
- s.n. (1999) - La gestion des risques liés aux inondations rapides et lentes, Comité Technique de la SHF, Session 161, 244.[1217]

C.3.8.4 Bibliothèque de la SHF

- SHF, Service d'essais et de contrôle permanent - Mesure des débits au moulinet.[700]
- Bureau Hydrométrique Fédéral Suisse (1909) - Le développement de l'hydrométrie en Suisse.[704]
- Ministère des Travaux Publics et des Transports (1919) - Aménagement hydraulique du bassin de l'Isère, 21p.[705]
- Pacoret, E. (1919) - La technique de la Houille Blanche, T. I, 1197p.[694]
- Jarre, P. (1929) - La tachéométrie de précision.[703]
- SHF, Laboratoire (1943) - Moulinets - Etude de mars/avril.[699]
- Remenieras, G. (1951) - Les jaugeages au moulinet, EDF-DER, 40p.[701]
- Bourguignon, P. (1952) - Jaugeages au moulinet ...[698]
- Halphen, E. (1954) - Une méthode d'analyse statistique des débits, Association Générale de Rome, T. III (38), Association Internationale d'Hydrologie Scientifique, Rome.[692]
- Morlat, G., Billiet, A. et Bernier, J. (1956) - Les crues de la haute Durance et la théorie statistique des valeurs extrêmes, Symposia Darcy (42), Association Internationale d'Hydrologie Scientifique, Dijon.[693]
- Roy, M. J. (1971) - Congrès sur le débit : sa mesure et son contrôle dans la science et l'industrie.[706]
- Vacher, J.P. (1971) - Contribution à l'étude du bassin versant de l'Isère, 200p.[707]

C.3.9 Bibliothèque Nationale (BN)

Dans le cas de la Bibliothèque Nationale, qui regroupe un nombre considérable de documents édités (6 millions de volumes), seuls ceux relatifs aux crues historiques de l'Ardèche (19 documents) sont le fruit d'une recherche exhaustive. Les autres références regroupées dans les thèmes : topographie (33 doc.), hydraulique-hydrométrie (13 doc.) et histoire des Pont et Chaussées (6 doc.), sont présentées soit pour leur caractère fondateur (tels les ouvrages de Mariotte, d'Alembert, Darcy, Bourdalouë, Lallemand,...), soit ils sont issus d'une recherche sur les auteurs ayant émergés dans les autres fonds de l'EGS. Les codes du type (FRBNF...) correspondent aux notices des catalogues en ligne de la BNF.

Crues historiques de l'Ardèche

- Champion, M. (1858) - Les inondations en France depuis le VIème siècle jusqu'à nos jours, I, Paris. (FRBNF30219126)[829]
- Champion, M. (1859) - Les inondations en France depuis le VIème siècle jusqu'à nos jours, II, Paris. (FRBNF30219126)[830]
- Champion, M. (1861) - Les inondations en France depuis le VIème siècle jusqu'à nos jours, III, Paris. (FRBNF30219126)[831]
- Champion, M. (1862) - Les inondations en France depuis le VIème siècle jusqu'à nos jours, IV, Paris. (FRBNF30219126)[832]
- Champion, M. (1863) - Les inondations en France depuis le VIème siècle jusqu'à nos jours, V, Paris. (FRBNF30219126)[833]
- Champion, M. (1864) - Les inondations en France depuis le VIème siècle jusqu'à nos jours, VI, originale Dunod, ré-édition du Cemagref, 2000, Paris. (FRBNF30219126)[815]
- Mignot frères et Cie (1865) - Mémoire au conseil de préfecture de l'Ardèche pour MM. Mignot frères et Cie, d'Annonay, concessionnaires du pont de Ville sur leur demande relative à la rupture de la chaussée rive gauche de ce Pont par la crue de l'Ardèche en 1859, imp. de H.-C. Ranchon, Annonay. (FRBNF36779841)[1178]
- Vaschalde, H. (1890) - Les inondations du Vivarais depuis le XIIIème siècle, Imprimerie de Mme Robert, Aubenas, 127p. (FRBNF31545655)[252]
- Arène, E. (1891) - Chambre des Députés... Rapport fait au nom de la Commission du budget chargée d'examiner le projet de loi portant ouverture au ministre de l'Intérieur d'un crédit extraordinaire de 250,000 francs destiné à la réparation des dégâts causés par les inondations aux routes départementales de l'Ardèche, impr. de Motteroz, Paris. (FRBNF30025906)[1168]
- Arène, E. (1891) - Rapport fait au nom de la commission du budget chargée d'examiner le projet de loi portant ouverture, au Ministre de l'Intérieur, d'un crédit extraordinaire de 250000 fr. destiné à la réparation des dégâts causés par les inondations aux routes départementales de l'Ardèche, Impr. de Motteroz, Paris. (FRBNF36212524)[1176]
- Boulanger, E. (1891) - Rapport... (Ouverture au ministre de l'Intérieur d'un crédit extraordinaire de 250,000 francs destiné à la réparation des dégâts causés par les inondations aux routes départementales de l'Ardèche), impr. de P. Mouillot, Paris. (FRBNF30141794)[1177]
- Constans, J. A. E. (1891) - Projet de loi, adopté par la Chambre des députés, portant ouverture, au ministre de l'intérieur, d'un crédit extraordinaire de 250,000 francs, destiné à la réparation des dégâts causés par les inondations aux routes départementales de l'Ardèche, Impr. de P. Mouillot, Paris. (FRBNF36218407)[1170]

- Constans, J. A. E. (1891) - Projet de loi portant ouverture au Ministre de l'Intérieur, d'un crédit extraordinaire de 250000 francs destiné à la réparation des dégâts causés par les inondations aux routes départementales de l'Ardèche, Motteroz, Paris. (FRBNF36218346) [1171]
- Rouvier, M. (1891) - Projet de loi, adopté par la Chambre des députés, portant ouverture au ministre de l'intérieur, d'un crédit extraordinaire de 250,000 fr. destiné à la réparation des dégâts causés par les inondations aux routes départementales de l'Ardèche, Impr. de P. Mouillot, Paris. (FRBNF36242031)[1169]
- Lemoine, G. (1896) - Essai sur le problème de l'annonce des crues pour les rivières des départements de l'Ardèche, du Gard et de l'Hérault, Annales des Ponts et Chaussées, 2eme sem. (61), novembre, 523-567.[129]
- Arène, E. (1900) - Chambre des Députés... Rapport fait au nom de la Commission du budget chargée d'examiner le projet de loi portant ouverture au ministre de l'Intérieur d'un crédit extraordinaire de 250,000 francs destiné à la réparation des dégâts causés par les inondations aux routes départementales de l'Ardèche, Impr. de Motteroz, Paris. (FRBNF30025906)[1175]
- Barrot, O. (1900) - Proposition de loi tendant à ouvrir aux ministres de l'agriculture et de l'intérieur un crédit de 500000 fr. pour venir en aide aux inondés de l'arrondissement de Largentière (Ardèche) et réparer les dégâts causés par ces inondations aux chemins communaux et ruraux, Impr. de Motteroz, Paris. (FRBNF36213312)[1174]
- Gailhard-Bancel (de), H (1900) - Proposition de loi ayant pour objet d'ouvrir au ministre de l'agriculture, sur l'exercice 1900, un crédit de 200000 fr. pour venir en aide aux victimes des orages et des inondations des 28 et 29 septembre 1900 dans l'arrondissement de Tournon (Ardèche), Impr. de Motteroz, Paris. (FRBNF36223418)[1172]
- Gailhard-Bancel (de), H (1900) - Proposition de loi tendant à décider qu'aucune dépense extraordinaire pour travaux neufs ne sera imposée d'office aux communes des départements qui ont été éprouvés par les inondations du mois de septembre 1900 (Ardèche, Gard, Aveyron, Lozère), Impr. de Motteroz, Paris. (FRBNF36223417)[1173]

Topographie

- Ministère des Travaux Publics - Nivellement général de la France, Paris. (FRBNF34079474) [1159]
- Ministère des Travaux Publics - Nivellement général de la France. Répertoire définissant les emplacements et altitudes des repères, Impr. nationale, Paris. (FRBNF33977380)[1160]
- Mariotte, E. (1672) - Traité du nivellement, avec la description de quelques niveaux nouvellement inventez, Cusson, J., Paris. (FRBNF30886102)[1139]
- Lefebvre, S. (1753) - Nouveau traité du nivellement, Duponcet, Paris. (FRBNF30772444) [1115]
- Lecoy, François (1803) - Méthode simple et facile pour lever les plans, suivie d'un Traité du nivellement et d'un abrégé des règles du lavis, Duponcet, Paris. (FRBNF30769015)[1114]
- Taviel de Mastaing, J. B. (1824) - L'Art de lever les plans et nouveau traité de l'arpentage et du nivellement... suivi d'un traité du lavis, 2e édition... augmentée d'un traité de stéréométrie, Noellat, Dijon. (FRBNF30904924)[1118]
- Goulard-Henrionnet (1849) - Guide du géomètre pour les opérations d'arpentage et le rapport des plans, suivi d'un traité de topographie et de nivellement, Bureau des Annales Forestières, Paris. (FRBNF30527556)[1113]

- Bourdalouë, P. A. (1856) - Société d'études de l'isthme de Suez. Travaux de la brigade française. Rapport de l'ingénieur (Paulin Talabot, sur les travaux exécutés par P.-A. Bourdalouë), impr. de C. Durand-Belle, Nîmes. (FRBNF30144213)[1096]
- Bourdalouë, P. A. (1867) - Circulaire n 19... Pantosymètre fil à plomb, impr. de E. Pigelet, Bourges. (FRBNF30144204)[1142]
- Loir, E. (1877) - La Tachéométrie, ou l'Art d'obtenir rapidement avec une haute précision et sans aucun chaînage, le plan et le nivellement des terrains, impr. de R.-A. Brissy, Arras. (FRBNF30828176)[1117]
- Lallemand, C. (1885) - Ministère des Travaux publics. Nivellement général de la France. Les Abaques hexagonaux, nouvelle méthode générale de calcul graphique, avec de nombreux exemples d'application, autographie et impr. de J. Marchadier, Paris. (FRBNF30723047)[1131]
- François, J. (1890) - Le Guide du niveleur, traité pratique de nivellement à l'usage des géomètres, des agents-voyers, des conducteurs de travaux et des élèves géomètres, impr. de A. Wesmael-Charlier, Namur. (FRBNF30459339)[1112]
- Goulier, C. M. (1891) - Ecole d'application de l'artillerie et du génie. Cours de topographie. Instruction sur le lever d'itinéraire, Ecole d'application de l'artillerie et du génie, Fontainebleau. (FRBNF32184655)[1120]
- Goulier, C. M. (1892) - Etudes théoriques et pratiques sur les levés topométriques et en particulier sur la tachéométrie, Gauthier-Villars et fils, Paris. (FRBNF30527771)[1122]
- Lallemand, C. (1893) - La Détermination du niveau moyen de la mer par le médimarémètre, Hôtel des sociétés savantes, Paris. (FRBNF30723033)[1125]
- Goulier, C. M. (1894) - Nivellements de haute précision. Etude sur les corrections nécessitées par les variations de la gravité, Impr. nationale, Paris. (FRBNF30527776)[1123]
- Lallemand, C. (1895) - Le Nivellement général de la France, Clowes, W., Extrait des Comptes rendus du sixième Congrès géographique international, tenu à Londres en juillet 1895, London. (FRBNF30723050)[1135]
- Lallemand, C. (1896) - Le Médimarémètre, nouvel appareil pour la détermination du niveau moyen de la mer, Bona, V., Extrait de la Rivista di topografia e catastro, Turin. (FRBNF30723045)[1128]
- Lallemand, C. (1897) - L'erreur de réfraction dans le nivellement géométrique, Bona, V., Extrait de la Rivista di topografia e catastro, Turin. (FRBNF30723035)[1126]
- Lallemand, C. (1897) - Les erreurs systématiques et la précision comparée des grands réseaux européens de nivellement, Bona, V., Extrait de la Rivista di topografia e catastro, Turin. (FRBNF30723036)[1127]
- Goulier, C. M. (1898) - Etudes sur les méthodes et les instruments des nivellements de précision, par C.-M. Goulier,... revues, annotées et accompagnées d'une étude sur les variations de longueur des mires, d'après les expériences du colonel Goulier, par Charles Lallemand, Ministère des Travaux publics. Commission du nivellement général de la France, Impr. nationale, Paris. (FRBNF30527770)[1121]
- Lallemand, C. (1898) - Ministère des Travaux publics. Commission du nivellement général de la France. Etude sur les variations de longueur des mires de nivellement, d'après les expériences du colonel Goulier, Impr. nationale, Paris. (FRBNF30723037)[1129]
- Lallemand, C. (1899) - Le Nivellement général de la France, Dunod, C., Extrait des Annales des mines, livraison de septembre 1899, Paris. (FRBNF30723051)[1136]

- Ministère des Travaux Publics (1901) - Nivellement général de la France. Réseau fondamental. Répertoire graphique définissant les emplacements et altitudes des repères. Opérations effectuées pendant les campagnes de 1884, Impr. du commerce, Nantes. (FRBNF34079475)[1167]
- Ministère des Travaux Publics (1904-1910) - Nivellement général de la France. Répertoire des emplacements et altitudes des repères. Réseau de troisième ordre et première partie du réseau de quatrième ordre, Impr. de M. Schwob, Nantes. (FRBNF33977381)[1162]
- Lallemand, C. (1909) - Les Plans cadastraux et la triangulation générale de la France, Extrait de la Revue scientifique du 13 novembre 1909, Paris. (FRBNF30723056)[1137]
- Lallemand, C. (1909) - Les Plans cadastraux et la triangulation générale de la France, Extrait de la Revue scientifique du 13 novembre 1909, Paris. (FRBNF30723056)[1138]
- Ministère des Travaux Publics (1909-1911) - Nivellement général de la France. Répertoire des emplacements et altitudes de repères, Impr. de M. Schwob, Nantes. (FRBNF33977382)[1161]
- Ministère des Travaux Publics (1910) - Nivellement général de la France. Nivellement de la voie navigable de la Belgique sur Paris entre le canal de la Sensée et la Seine. Répertoire définissant les emplacements et les altitudes des repères, Impr. de M. Schwob, Nantes. (FRBNF34079516)[1163]
- Lallemand, C. (1911) - Nivellement général de la France. Notice sur le nivellement des vallées des Alpes et sur le relevé et la publication des profils en long de cours d'eau, Extrait du T. IV des Comptes rendus des travaux du service des grandes forces hydrauliques, publiés par le ministre de l'Agriculture. (FRBNF30723049)[1134]
- Lallemand, C. (1912) - Compensation d'un réseau de nivellements par la méthode des coefficients indéterminés, Béranger, C., Paris et Liège. (FRBNF30723030)[1124]
- Lallemand, C. (1912) - Ministère des Travaux publics. Nivellement général de la France. Compte rendu des travaux effectués en 1912, Ministère des Travaux publics. Ed. (FRBNF30723046)[1130]
- Prévot, E. et Lallemand, C. (1920) - Nivellement des vallées des Alpes et relevé des profils en long des cours d'eau, Impr. nationale, Extrait du T. IX des Comptes rendus des études et travaux du service des grandes forces hydrauliques de la région du Sud-Est, Paris. (FRBNF31150667)[1133]

Hydraulique-Hydrométrie

- Perrault, P. (1674) - De l'Origine des fontaines, Le Petit, P., Paris. (FRBNF31084898)[1179]
- Mariotte, E. (1686) - Traité du mouvement des eaux et des autres corps fluides, ... mis en lumière par les soins de M. de La Hire, Michallet, E., Paris. (FRBNF30886099)[1060]
- Pitot, H. (1732) - Description d'une machine pour mesurer la vitesse des eaux courantes et le sillage des vaisseaux, Histoire de l'Académie royale des sciences, avec les mémoires de mathématiques et de physique, pour la même année tirés des registres de cette académie, 1735-1742, Paris, 363-373.[1181]
- Belidor, Bernard Forest de (1737-1770) - Architecture hydraulique, ou L'art de conduire, d'élever et de ménager les eaux pour les différents besoins de la vie, Jombert., Paris. (FRBNF33986034)[1061]
- Alembert (Le Rond d'), J. (1743) - Traité de dynamique, David., 2ème Ed., Paris. (FRBNF30009170)[1059]

- Alembert (Le Rond d'), J. (1744) - Traité de l'équilibre et du mouvement des fluides : pour servir de suite au traité de dynamique, David,, Paris. (FRBNF30009172)[1058]
- Alembert (Le Rond d'), J. (1752) - Essai d'une nouvelle théorie de la résistance des fluides, David l'ainé,, C. Dunod, Paris. (FRBNF30009144)[1057]
- Borda (de), J. C. (1763) - Expériences sur la résistance des fluides, Histoire de l'Académie royale des sciences, avec les mémoires de mathématiques et de physique, pour la même année tirés des registres de cette académie, 1744-1767, Paris, 358-376.[1182]
- Darcy, H. P. G. (1857) - Recherches expérimentales relatives au mouvement de l'eau dans les tuyaux, Mallet-Bachelier, Paris. (FRBNF30300206)[1111]
- Boussinesq, J. (1877) - Essai sur la théorie des eaux courantes, Mémoires présentés par divers savants à l'Académie des Sciences, 23, Paris.[1183]
- Lechalas, M. C. (1884) - Hydraulique fluviale, Encyclopédie des Travaux Publics, Baudry, Paris, 464p. (FRBNF30764357)[823]
- Mas (de), F. B. (1899) - Cours de navigation intérieure de l'École Nationale des Ponts et Chaussées - Rivières à courant libre, Encyclopédie des Travaux Publics, Baudry, Paris, 480p. (FRBNF30900583)[822]
- Flamant, A. (1900) - Hydraulique, Encyclopédie des Travaux Publics, C. Béranger, Paris, 689p. (FRBNF30439718)[824]

Histoire des Ponts et Chaussées

- Duclos, C. (1759) - Essais sur les Ponts et Chaussées, la voiries et les corvées, Chatelain, Amsterdam, 408p. (FRBNF33990595)[818]
- Vignon, E. J. M. (1862) - Études historiques sur l'administration des voies publiques en France : aux dix-septième et dix-huitième siècles, II, Dunod, Paris, 117p. (FRBNF36064109)[820]
- Vignon, E. J. M. (1862) - Études historiques sur l'administration des voies publiques en France : aux dix-septième et dix-huitième siècles., III, Paris, 281p. (FRBNF36064110)[827]
- Vignon, E. J. M. (1862) - Études historiques sur l'administration des voies publiques en France : aux dix-septième et dix-huitième siècles., I, Paris, 415p. (FRBNF36064108)[828]
- Aucoc, L. (1886) - Des autorités administratives préposées à la Direction des travaux publics et spécialement des ingénieurs des Ponts et chaussées, C. Dunod, Paris, 117p. (FRBNF30036274)[819]
- Petot, J. (1958) - Histoire de l'administration des Ponts et Chaussées 1599-1815, M. Rivière et Cie, Paris. (FRBNF32523095)[817]

C.4 Bibliographie

Coeur, D., Gigon, C., Lang, M., Naulet, R. et Recking, A. (2001). Historique-Ardèche - Utilisation de l'information historique pour une meilleure définition du risque d'inondation sur la rivière de l'Ardèche, *Rapport Final*, Contrat de Plan Etat-Région Rhône-Alpes, Cemagref Lyon, UPMF Grenoble, DDE Ardèche, juillet, 94 p.

Annexe D

Historique des crues de l'Ardèche

Sommaire

D.1	Crues de l'Ardèche avant le XIX^e siècle	308
D.2	Crues de l'Ardèche de 1805 à 1830	313
D.3	Inventaire des relevés hydrométriques disponibles aux stations de Vallon Pont d'Arc et St-Martin d'Ardèche	318
	D.3.1 Station de Vallon Pont d'Arc	319
	D.3.2 Station de St-Martin d'Ardèche	320
D.4	Bibliographie	320

Cette annexe présente en premier lieu l'historique des crues de l'Ardèche recensées entre 1500 et 1830.

Nous avons séparé cette présentation en deux parties. La première est relative aux crues antérieures au XIX^e siècle, pour lesquelles nous disposons principalement de descriptions qualitatives (cf. §D.1, p. 308). La seconde concerne les crues de la période 1805-1830. Les cotes ne sont également pas disponibles en général, cependant nous disposons dans ce cas des quantités de pluies sur le premier poste pluviométrique installé en Ardèche (cf. D.2, p. 313). Ces deux parties présentent en préambule un tableau résumant les événements répertoriés ainsi que toutes les sources d'informations y faisant référence (cf. numéro d'enregistrement entre crochet de la base de donnée des références sous EndNote 4.0). Un paragraphe détaille ensuite chaque événement. Nous nous sommes attaché à retracer la source originelle des informations souvent reprises par les auteurs contemporains et parfois déformées au cours du temps. La critique des données est essentiellement réalisée par recoupement des différentes informations hydrométriques et pluviométriques.

En second lieu nous présentons l'inventaire des relevés hydrométriques disponibles aux stations de Vallon Pont d'Arc et de St-Martin d'Ardèche (cf. §D.3, p. 318).

D.1 Crues de l'Ardèche avant le XIX^e siècle

TAB. D.1 – Résumé des crues de l'Ardèche avant le XIX^e siècle

Date	Classe ¹	H ²	Références BD EndNote
26/07/1508	3		[251, 252]
mi/09/1522	3		[203, 251, 252, 611, 675, 738, 741, 789, 792, 831]
09/09/1559	2		[251]
01/10/1567	2		[251, 252]
03/09/1609	2		[251, 252]
10/02/1626	2		[251, 252]
13/09/1636	2		[251, 252]
03/09/1644	3	16.88 m	[96, 129, 167, 168, 190, 203, 251, 252, 675, 738, 741, 787, 789, 790, 792, 832]
28/09/1679	2		[251, 252]
10/1730	-		www.gard.equipement.gouv.fr
09/09/1772	3	14.70 m	[96, 129, 167, 168, 190, 203, 251, 252, 675, 738, 741, 787, 789, 790, 792, 832]
17/08/1774	1		[251]
28/09/1779	2		[203, 251, 675, 738, 741, 792, 832]
19/09/1780	0	2.56 m	www.gard.equipement.gouv.fr
16/09/1782	2		[203, 251, 252, 675, 738, 741, 789, 792, 832]
03/09/1789	2		[203, 251, 252, 675, 738, 741, 832]
28/11/1790	2		[832]
03/09/1794	2		[251, 675, 738, 741, 791, 792]

1- Intensité de l'événement d'après l'ampleur des dégâts rapportés

2- Hauteur au dessus de l'étiage au moulin de Salavas

26 juillet 1508 Cette crue est citée par Vaschalde (1873, 1890), d'après les *Ephémérides Vivaraises* : « Les ravages causés par l'inondation furent considérables dans le Vivarais et le Velay. Elle fut tellement forte que dans la suite on l'appela le déluge de Sainte-Anne, dont l'église célèbre la fête le 26 juillet ».

mi septembre 1522 L'ingénieur ordinaire de l'arrondissement d'Aubenas Combier semble être le premier à avoir consulté les *procès-verbaux des Etats du Vivarais*. Il cite cette crue dans son rapport du 15 février 1857 (Combier, 1857c). Il présente cette crue comme très forte puisqu'elle n'a laissé aucun pont et moulin intacts contrairement à celle de 1827. Tous les autres documents (Belgrand, 1875 ; Reynier, 1947 ; s.n., 1970) qui présentent cette crue se réfèrent plus ou moins directement aux rapports de de Mardigny (1857b, 1860a, 1860b), eux même identiques et directement issus de celui de Combier (les deux rapports de 1860 sont strictement identiques, celui manuscrit de 1857 recueille les observations météorologiques faites à Joyeuse par M. de Montravel). Champion (1861, p. 213) se contente de citer le premier extrait paru dans les rapports de de Mardigny. Vaschalde (1873, 1890) semble être retourné à la source et donne un extrait plus complet des procès-verbaux : « A la mi-septembre 1522, il y eut des inondations extraordinaires dans le Vivarais. On ne saurait nombrer les maisons abattues. Aucun pont, aucun moulin ne sont restés debout. Tous les bateaux ont été emportés, les chemins et les passages rompus. Les pluies empêchèrent les semailles et la famine commença bientôt à se faire

sentir. Le commerce put se faire nulle part ». « Plus de 600 personnes manquèrent dans leurs familles et leurs cadavres délaissés çà et là par les eaux et dans les marécages y pourrirent au milieu des dépôts de vases et de boues pestilentielles. Le commerce fut interrompu. La famine se fit sentir et des maladies contagieuses vinrent aggraver le mal ».

9 septembre 1559 Une seule référence cite cette inondation (Vaschalde, 1873); d'après des *notes de M. H. Deydier* il s'agit d'une grande inondation de l'Ardèche qui envahit toute la plaine de St Privas à l'Echette.

1 octobre 1567 Cette crue est citée par Vaschalde (1873, 1890), d'après le *Livre de raison de Malmazet*: « L'Ardèche et la Volane débordèrent considérablement; deux maisons, au bas de Labégude, furent emportées; une partie de la route qui conduit à la montagne fut endommagée sur une longueur de plus de quinze cannes; les tanneries de Vals, tout près de la source Marquise, furent rasées complètement. »

3 septembre 1609 Cette crue est citée par Vaschalde (1873, 1890), d'après un poème du *président du Parlement de Grenoble, Claude Expilly* et d'après un document de l'*Assemblée des Etats du Vivarais*.

10 février 1626 Cette crue est citée par Vaschalde (1873, 1890), d'après un document du *notaire Lafaisse*: « on put voir toute la plaine d'Aubenas inondée. »

13 septembre 1636 Cette crue est citée par Vaschalde (1873, 1890), d'après les *Mémoires de Jacques de Bannes*: « Pendant un orage épouvantable qui fit grossir l'Ardèche considérablement... »

3 septembre 1644 Il s'agit de la première crue dont on conserve une indication quantitative. L'ingénieur Combier (1856), dans son rapport du 19 septembre qui est le brouillon de celui du 15 février 1857 (Combier, 1857c), précise « sur un angle du *moulin de Salavas* sont indiquées les 3 plus fortes crues dont on ait ainsi conservé la trace. » « La plus forte a été celle de 1644 qui dépasse de 5 ou 10 centimètres celle de 1827 » (la troisième étant celle de 1772).

Cependant, dans les documents postérieurs, Combier situe la crue de 1644 en dessous de celle de 1827. Ainsi il écrit dans son rapport manuscrit final du 15 février 1857 (Combier, 1857c): « Celle de 1827 est la plus forte, elle s'éleva de 16.10 m au dessus de l'étiage à l'emplacement du pont suspendu de Vallon, et de 19.25 m au Pont d'Arc. Celle de 1644 eut à Vallon douze centimètres de moins ce qui est insignifiant. » Dans un courrier du 4 mai 1857 (Combier, 1857d) adressé à son supérieur, l'ingénieur en chef de Mardigny, il confirme que la crue de 1644 est située en dessous de celle de 1827 (1644: 19.10 m au dessus de l'étiage au Pont d'Arc, soit 9500 m³/s; 1827: 19.25 m au dessus de l'étiage au Pont d'Arc, soit 9660 m³/s).

L'ensemble des auteurs postérieurs va reprendre ces résultats. Les différents rapports de de Mardigny reprennent complètement celui de Combier. Il semble alors établi que la crue de 1644 a atteint 16.88 m au dessus de l'étiage au moulin de Salavas.

Champion (1862, p. 18) reprend cette hauteur, Vaschalde (1873), dans son premier écrit dit: « J'ai reconnu les hauteurs d'eau auxquelles les eaux de l'Ardèche s'élevèrent

en 1644, 1772 et 1827, elles sont repérées ainsi qu'il suit au moulin de Salavas, situé sur l'Ardèche, à 400 mètres en amont du pont suspendu de Vallon : Inondation du 3 septembre 1644 : 16.88 m de hauteur ». Les mots employés ressemblent trop à ceux utilisés par de Mardigny (1860b) pour penser que l'auteur ait réellement vérifié cette élévation, d'ailleurs dans son deuxième écrit (Vaschalde, 1890), il cite uniquement la hauteur atteinte sans faire mention qu'il l'a personnellement constatée, en déformant par ailleurs le terme étiage en « niveau normal » (il semble qu'à cette époque les deux appellations avaient le même sens en référence au courrier du Directeur de la Vallée du Rhône, s.n., 1841). Cette source sera également exploitée par Belgrand (1875) et Reynier (1947) qui citent 1644 comme une grande crue de l'Ardèche. Lemoine (1896), en se basant également sur les rapports de de Mardigny, cite une hauteur de 16.9 m à l'échelle du moulin de Salavas.

Pardé (1925a, 1925b) qui a consulté les archives d'Aubenas propose lui une hauteur de 16 m au niveau du pont suspendu de Vallon. Cette hauteur n'a jamais été observée effectivement mais il semble qu'il ait utilisé le profil en long de la crue de 1827 établi par Combiér (1849). Ce dernier fait apparaître une différence de 0.9 m entre la hauteur au moulin de Salavas et celle au niveau du pont suspendu. Enfin le service d'Annonce des crues de la DDE 07 (Gigon, 2002) a repris cette estimation.

28 septembre 1679 Cette crue est citée par Vaschalde (1873, 1890) d'après le *Livre de raison de Malmazet* : « La Volane, devenue épouvantable, emporta la seconde arche du pont de Vals et treize maisons au-dessous de la rue qu'on appelait du Figeyras. Deux arches du pont d'Aubenas furent aussi emportées par les eaux de l'Ardèche. »

octobre 1730 Le « Recueil des Crues Historiques dans le Gard » (cf. www.gard.equipement.gouv.fr, L'eau et l'environnement) présente une crue sur le Chassezac : « Berrias-et-Casteljau (Ardèche) : matériaux de construction du pont sur le Granzon emportés. » Source : Archives Départementales du Gard (ADG, C1237).

9 septembre 1772 Il s'agit de la seconde crue dont on conserve une indication quantitative. L'ingénieur Combiér (1856), dans son premier rapport du 19 septembre : « Celle de 1772 est à 70 centimètres en contrebas de celle de 1827 ». Ici encore cette valeur est corrigée dans son rapport manuscrit final du 15 février 1857 (Combiér, 1857c) : « Celle de 1772 eut 2.30 m de moins que celle de 1827 et surpassa encore de près d'un mètre celle du 28 septembre 1846 ». Dans son courrier du 4 mai (Combiér, 1957d), il donne également une hauteur de 16.75 m au dessus de l'étiage au niveau du Pont d'Arc avec un débit estimé à 8000 m³/s. Les différents rapports de de Mardigny présentent finalement une hauteur de 14,70 m au dessus de l'étiage au moulin de Salavas. L'ensemble des auteurs reprennent cette hauteur (Vaschalde, 1873 ; Vaschalde, 1890 ; Belgrand, 1875 ; Reynier, 1947 ; Champion, 1862).

Lemoine (1896) cite également : « On observa 14.70 m, le 9 septembre 1772 au moulin de Salavas, situé à 430 mètres en amont du pont de Vallon (ce qui peut correspondre à 13.8 m à l'échelle du pont de Vallon) ». La précision donnée à la distance qui sépare le moulin de Salavas du pont suspendu, « 430 m », nous confirme qu'il a consulté le profil en long de la crue de 1827 rédigé par Combiér (1849). Pour obtenir la hauteur au niveau du pont suspendu à partir de celle du moulin il a donc retiré la différence observée en 1827, soit 0.9 mètres. Autant cette démarche semble justifiée pour la crue de 1644 qui est

relativement proche de celle de 1827 (0.12 m de différence), autant pour la crue de 1772 elle devient plus discutable puisqu'elle se situe à 2.3 m en dessous de celle 1827. D'ailleurs le document de Combiér (1849) qui présente également la ligne d'eau de la crue du 28 septembre 1846, située à 1.15 m en dessous de celle de 1772 au moulin, fait apparaître, pour cette crue, une différence de seulement 0.45 m au lieu de 0.9 m entre la hauteur au moulin de Salavas et celle au pont suspendu.

Pardé (1925a, 1925b) a dû faire le même raisonnement et propose une hauteur de *14 m au pont suspendu de Vallon*, soit une correction intermédiaire de 0.7 m. Le service d'Annonce des crues de la DDE 07 (Gigon, 2002) a repris cette estimation.

17 août 1774 Une seule référence cite cette inondation. Vaschalde (1873) ne donne aucune précision sur celle-ci et sa source, elle est présente au sein d'une chronologie des grandes inondations du Vivarais.

28 septembre 1779 Cette crue est citée par de Mardigny (1857b, 1860a, 1860b) comme faisant partie des grandes inondations de l'Ardèche sans plus d'information sur la source. Les autres auteurs (Vaschalde, 1873 ; Vaschalde, 1890 ; Belgrand, 1875 ; Reynier, 1947 ; Champion, 1862) reprennent cette information.

19 septembre 1780 Le « Recueil des Crues Historiques dans le Gard » (cf. www.gard.equipement.gouv.fr, L'eau et l'environnement) présente une crue sur l'Ardèche : « Inondation de l'Ardèche les 18-19/09 : 8 pieds (2,56 m) au-dessus de la normale. » (ADG C127 & 1076).

16 septembre 1782 Cette crue est citée par de Mardigny (1857b, 1860a, 1860b) comme faisant partie des grandes inondations de l'Ardèche sans plus d'information sur la source. Vaschalde (1890) précise d'après le *Livre de raison de M. Teyssier* : « Tout le bassin du Pont-d'Aubenas fut inondé par les eaux de l'Ardèche, sans franchir toutefois la chaussée. Ce jour là, à 10 heure du soir, le pont en bois que M. de Vogüé avait fait construire vis-à-vis la commune de Vogüé fut emporté, ... ». Les autres auteurs (Belgrand, 1875 ; Reynier, 1947 ; Champion, 1862) reprennent cette information.

3 septembre 1789 Cette crue est citée par de Mardigny (1857b, 1860b, 1860a) comme faisant partie des grandes inondations de l'Ardèche sans plus d'information sur la source. Vaschalde (1890) précise d'après le *Livre de raison de Malmazet* : « L'Ardèche et la Volane débordèrent avec fureur, au point qu'il y eut trois pieds d'eau dans la cuisine et le salon Malmazet, à Vals (aujourd'hui à M. A. Delubac), au bateau, à 9 heures du soir. Six jours après, ces deux rivières débordèrent encore et donnèrent quatre pieds et demi d'eau dans les mêmes appartements ». Les autres auteurs (Belgrand, 1875 ; Reynier, 1947 ; Champion, 1862) reprennent cette information.

28 novembre 1790 Champion (1862, p. 79 et pièce justificative 237, p. LXXIV) présente une lettre du *procureur général syndic du département de l'Ardèche* adressée au ministre des finances. Celle-ci, jointe à l'état des pertes occasionnées par les inondations de l'automne, précise : « ...la destruction de ses chemins, le renversement de ses ponts, parmi lesquels elle compte celui de Saint-Just sur l'Ardèche, nombre de maisons et la plupart

des moulins et chaussées emportés,... ». Cette crue n'est pas relevée par de Mardigny qui contrairement à Champion en cite une en 1794.

3 septembre 1794 Cette crue est citée par de Mardigny (1857b, 1860a, 1860b) comme faisant partie des grandes inondations de l'Ardèche sans plus d'information sur la source. Dans un courrier adressé à de Mardigny, l'ingénieur Combier (1857b) dit : « Je crois qu'elle a eu lieu en novembre, M. de Montravel la signale dans son manuscrit mais je n'ai pas pu trouver la date exacte ». Vaschalde (1890) précise la date (le 3 septembre : contradiction avec Combier) dans un tableau de synthèse sans spécifier sa source, cette crue ne fait pas l'objet d'une description par l'auteur. Les autres auteurs (Belgrand, 1875 ; Reynier, 1947) reprennent cette information.

Remarque D.1 *Il y a sûrement une confusion entre les crues de 1790 et 1794. D'après Champion (1862, p. 79 et pièce justificative 237, p. LXXIV) elle aurait eu lieu en novembre 1790 comme le suggère Combier mais pour l'année 1794 (à partir des documents de M. de Montravel).*

D.2 Crues de l'Ardèche de 1805 à 1830

TAB. D.2 – Résumé des crues de l'Ardèche de 1805 à 1830

Date	Pe ¹	Pm ²	Lieu	Inondation	Références
1805	-	-	Tout BV	aucune	[792]
03/11/1806	-	147.1	Tout BV	faible	[792]
09-14/08/1807	406	411.1	Beaume	<i>max. depuis 1794</i>	[131, 792]
11/1808	-	337.8	Chassezac	dommages aux riverains	[792]
13/11/1809	95	221.1	Tout BV	faible	[792]
05/1810	-	600.2	Tout BV	moyenne ou forte (6.8 m à Vogüé)	[791, 792]
22/10/1811	122	306.6	Tout BV	<i>max. depuis 1801</i>	[131, 792]
05-06/10/1812	241	380.9	Tout BV	<i>max. depuis 1794</i>	[131, 792]
05/09/1813	170	329.4	Ardèche	« énorme »	[131, 792]
14/10/1814	-	216.5	Tout BV	<i>max. après 1794 depuis 1772</i>	[792]
1815	-	-	Tout BV	aucune	[791, 792]
07/1816	-	158.5	Ardèche	aucune ou 4.5 m env. en contrebas de 1827 à Vallon	[791, 792]
08/09/1817	126	89.8	Tout BV	<i>max. depuis 1794</i>	[131, 792]
1818	-	-	Tout BV	aucune	[792]
1819	-	-	Tout BV	aucune	[792]
1820	-	-	Tout BV	aucune	[792]
21/10/1821	131	157.9	-	-	[131, 792]
16/11/1822	142	250.6	-	-	[131, 792]
15/09/1823	208	289.9	Tout BV	faible	[131, 792]
1824	-	-	Tout BV	aucune	[202, 792]
1825	-	-	Tout BV	aucune	[792]
09/07/1826	183	211.1	Ardèche	4.5 m env. en contrebas de celle de 1827 à Vallon	[131, 791, 792]
10/10/1827	792	974	Tout BV	<i>max. de mémoire d'homme</i> 17 m au dessus de l'étiage au moulin de Salavas 16.1 m au dessus de l'étiage au pont suspendu de Vallon 19.25 m au dessus de l'étiage à l'amont du Pont d'Arc 15 m au dessus de l'étiage à l'aval du Pont d'Arc 8.9 m au dessus de l'étiage au pont de Saint Martin	[16, 96, 129] [131, 164, 167] [168, 190, 202] [203, 251, 252] [611, 659, 675] [676, 738, 740] [741, 759, 780] [787, 789, 790] [792, 793, 794] [795, 798] [801, 811, 812] [813, 832, 835]
1828	-	-	Tout BV	aucune	[792]
1829	-	-	Tout BV	aucune	[792]
1830	-	-	Tout BV	aucune	[792]

1- Cumul de précipitation (mm) de l'événement à Joyeuse (M. de Montravel)

2- Cumul mensuel de précipitation (mm) du mois de l'événement à Joyeuse (M. de Montravel)

1805 Le rapport manuscrit de de Mardigny (1857b) présente les *observations météorologiques faites à Joyeuse par M. de Montravel* (savant ardéchois) de 1805 à 1830. Elles sont constituées des précipitations mensuels et d'observations sur des événements particuliers. On note pour 1805 : « Année sans grandes pluies ».

3 novembre 1806 D'après le rapport manuscrit de de Mardigny (1857b) on note : « La plus grande élévation de nos rivières a eu lieu le 3 novembre ; elle a surpassé celles des années précédentes, mais quoique ces rivières ce jour là soient sorties de leurs lits, il n'y a pas eu d'inondation proprement dites. » On observe une précipitation mensuelle de **147.1 mm** en novembre 1806 (plus forte précipitation mensuelle de l'année).

9-14 août 1807 D'après le rapport manuscrit de de Mardigny (1857b) on note : « ...les 6 jours qui ont fourni dans ce mois plus de 15 pouces (**406 mm**) d'eau. Le 14 il en tomba plus de 42 lignes (95 mm). Mais le 9 fut un jour véritablement mémorable : en moins de 20 heures, la quantité d'eau tombée s'éleva à plus de 9 pouces 2 lignes (**248 mm**). Du soleil couchant à 11 heures, elle fut à raison de plus de 14 lignes à l'heure (32 mm). Dans ce dernier intervalle de temps, une grêle horrible ravagea la partie du Nord Ouest du territoire de Joyeuse ; et partout les torrents débordés laissèrent des traces de dévastation. De mémoire d'homme, ces torrents n'avait été au point où ils furent ce jour là. *La rivière de la Beaume fut plus forte qu'elle ne l'avait été depuis 1794.* » Cette description est également présente dans l'inventaire des épisodes de fortes pluies en Ardèche de Météo France (1995a). On observe une précipitation mensuelle de **411.1 mm** en août 1807 (plus forte précipitation mensuelle depuis janvier 1805).

novembre 1808 D'après le rapport manuscrit de de Mardigny (1857b) on note : « Toutes les rivières ont été plusieurs fois très pleines et assez fortes les 4 juin, 31 octobre, 7, 9 et 18 novembre pour causer des dommages aux riverains, particulièrement sur les bords du Chassezac ». On observe une précipitation mensuelle de **337.8 mm** en novembre 1808 (plus forte précipitation mensuelle de l'année).

13 novembre 1809 D'après le rapport manuscrit de de Mardigny (1857b) on note : « Le 13 novembre, il tomba au delà de 42 lignes (**95 mm**) d'eau sans que la hauteur de la rivière en fût considérablement augmentée. » On observe une précipitation mensuelle de **221.1 mm** en novembre 1809 (plus forte précipitation mensuelle de l'année).

mai 1810 Dans un courrier de 1857, l'ingénieur Combier rend compte à de Mardigny de l'enquête auprès de la population qu'il a été chargé d'effectuer sur l'époque des inondations de l'Ardèche (Combier, 1857b) : « ...le percepteur du pont de Vogüé se souvient d'en avoir vu une au mois de mai il y a environ 40 ans qui s'éleva à *Vogüé à 2 mètres en contrebas de celle de 1846*. La hauteur des eaux était donc de 6.8 m au dessus de l'étiage ce qui est déjà une grande crue. » D'après le rapport manuscrit de de Mardigny (1857b), les observations de M. de Montravel montrent que le plus fort cumul mensuel des mois de mai est de **600.2 mm** en 1910 (également plus forte précipitation mensuelle depuis janvier 1805), ce qui pourrait correspondre à la crue précédemment décrite. M. de Montravel note : « En 1810, il est tombé une énorme quantité d'eau mais nos rivières, à la vérité, n'ont pas été aussi débordées qu'on pouvait le craindre ».

22 octobre 1811 D'après le rapport manuscrit de de Mardigny (1857b) on note : « ...et octobre. Cette dernière *inondation, plus forte qu'aucune de celles qui avaient eu lieu depuis 1801*, est arrivée le 22, jour où il était tombé 54 lignes (**122 mm**) d'eau. » Cette description est également présente dans l'inventaire des épisodes de fortes pluies en Ardèche de Météo France (1995a). On observe une précipitation mensuelle de **306.6 mm** (plus forte de l'année).

5-6 octobre 1812 D'après le rapport manuscrit de de Mardigny (1857b) on note : « Le 5 octobre il tomba 51 lignes (**115 mm**) d'eau et le 6, il en tomba 56 (**126 mm**). Les torrents et les ruisseaux se précipitèrent avec une promptitude et une impétuosité dont il n'y avait pas d'exemple et occasionnèrent des dégâts et des pertes très considérables. La Beaume devint grosse. L'Ardèche et le Chassezac encore plus ; *leur élévation surpassa tout ce qu'elle avait été depuis 1794*. Mais ces deux rivières semblaient se contenir mutuellement, en sorte que leurs eaux débordées n'ayant pas une vitesse proportionnée et à leur masse, les terrains adjacents ont peu souffert, et le mal s'est réduit à l'avarie de quelques récoltes pendantes. » Cette description est également présente dans l'inventaire des épisodes de fortes pluies en Ardèche de Météo France (1995a). On observe effectivement au mois d'octobre 1812 à Joyeuse un cumul mensuel de **380.9 mm**.

5 septembre 1813 D'après le rapport manuscrit de de Mardigny (1857b) on note : « Le 5 septembre, il tomba 75 lignes et demi (**170 mm**) d'eau et cependant l'inondation de la Beaume, ce jour-là, n'a été que moyenne, mais *celle de l'Ardèche, d'Ouvèze et autres rivières ou torrents qui se jettent dans le Rhône, depuis le Pouzin, jusqu'au pont St-Espirit ont été énormes*. Les ravages qu'elles ont occasionnés sont évalués dans l'opinion publique à un million. » Cette description est également présente dans l'inventaire des épisodes de fortes pluies en Ardèche de Météo France (1995a). On observe une précipitation mensuelle de **329.4 mm** en septembre 1813.

14 octobre 1814 D'après le rapport manuscrit de de Mardigny (1857b) on note : « le 14 octobre, toutes les rivières du pays furent débordées et *l'inondations fut après celle de 1794, la plus forte qu'on eût vue depuis 1772*. Mais les dommages ont été peu considérables. » On observe une précipitation mensuelle de **216.5 mm** en octobre 1814.

1815 D'après le rapport manuscrit de de Mardigny (1857b) on note : « année sans grandes averses, ni inondations. » D'après le courrier de 1857 de l'ingénieur Combier (1857b) il y aurait peut être eu une crue importante en juillet (cf. crue du 9 juillet 1826) ce qui semble peu probable compte tenu de l'observation ci-avant et du fait que la précipitation mensuelle de juillet est de 47.2 mm.

1816 D'après le rapport manuscrit de de Mardigny (1857b) on note : « année sans grandes averses, ni inondations. » D'après le courrier de 1857 de l'ingénieur Combier (1857b) il y aurait peut être eu une crue importante en juillet (cf. crue du 9 juillet 1826). On observe une précipitation mensuelle en juillet de **158.5 mm**.

8 septembre 1817 D'après le rapport manuscrit de de Mardigny (1857b) on note : « Le 8 septembre, il tomba près de 56 lignes (**126 mm**) d'eau. Toutes nos rivières furent

débordées de 10 heures du matin à minuit, et *l'inondation surpassa toutes celles arrivées depuis 1794*. » Cette description est également présente dans l'inventaire des épisodes de fortes pluies en Ardèche de Météo France (1995a). On observe une précipitation mensuelle de **89.8 mm** en septembre 1817 ce qui est *en contradiction avec l'événement du 8 septembre*.

1818 D'après le rapport manuscrit de de Mardigny (1857b) on note : « année sans averses, ni inondations. »

1819 D'après le rapport manuscrit de de Mardigny (1857b) on note : « année sans averses, ni inondations. »

6 septembre 1820 D'après le rapport manuscrit de de Mardigny (1857b) on note : « Le 6 septembre, jour d'un grand orage, le tonner est tombé à la Bourgade. »

21 octobre 1821 D'après le rapport manuscrit de de Mardigny (1857b) on note : « le 22 septembre, il tomba plus de 50 lignes (**113 mm**) d'eau et le 21 octobre, il en tomba près de 58 (**131 mm**) » Cette description est également présente dans l'inventaire des épisodes de fortes pluies en Ardèche de Météo France (1995a). On observe des précipitations mensuelles de **191.7 mm** en septembre et **157.9 mm** en octobre 1821.

16 novembre 1822 D'après le rapport manuscrit de de Mardigny (1857b) on note : « Deux averses arrivées les 17 juillet et 16 novembre ont donné, la première 57 lignes (**128 mm**) d'eau, et la seconde 63 (**142 mm**), ensemble 10 pouces (270 mm) quart de l'année entière. » Cette description est également présente dans l'inventaire des épisodes de fortes pluies en Ardèche de Météo France (1995a). On observe la plus forte précipitation mensuelle de l'année en novembre (**250.6 mm**).

15 septembre 1823 D'après le rapport manuscrit de de Mardigny (1857b) on note : « Le 15 septembre, depuis le coucher du soleil jusqu'à son lever le lendemain matin, il est tombé 92 lignes (**208 mm**) d'eau dont 15 (34 mm) dans la première heure et 20 (45 mm) dans les deux heures suivantes. Pendant tout le temps de sa durée les éclairs et de grands coups de tonnerre se succédèrent sans interruption ; il paraît que l'orage ne fut pas aussi terrible vers les sources de nos rivières qui ne furent pas débordées. » Cette description est également présente dans l'inventaire des épisodes de fortes pluies en Ardèche de Météo France (1995a). On observe la plus forte précipitation mensuelle de l'année en septembre (**289.9 mm**).

1824 D'après le rapport manuscrit de de Mardigny (1857b) on note : « année sans averses, ni inondations. » Un rapport des ingénieurs Durand et Soubeyrand (1958), ingénieurs du Service Hydraulique des Pont et Chaussées, établi à l'occasion des crues de fin septembre et octobre 1958, présente notamment les crues supérieures ou égales à 10 mètres à l'échelle de Vallon. Parmi celles-ci se trouve une crue le *18 octobre 1824* notée à 16.1 m. On ne retiendra cependant pas cette crue qui n'est citée que par cette source.

Il semble en effet qu'on ne puisse pas donner beaucoup de valeur à ce document émanant pourtant des services officiels. On relève de nombreuses erreurs :

- la crue de 1827 est notée à 17 m à l'échelle de Vallon comme la plus forte connue alors que l'ensemble des autres documents s'accordent à affirmer qu'elle est la seconde après celle de 1890.
- Cette dernière est d'ailleurs notée à 16.7 m à l'échelle de Vallon au lieu de 17.3 m.
- Dans la liste des crues supérieures ou égales à 10 mètres il manque celle du 16 octobre 1907 (alors qu'elle est notée par les observateurs de l'époque de ce même service).

1825 D'après le rapport manuscrit de de Mardigny (1857b) on note : « année sans averses, ni inondations. »

9 juillet 1826 Dans son courrier de 1857, l'ingénieur Combier (1857b) note : « M. Laffaye, propriétaire riverain de l'Ardèche à Vallon, âgé de 75 ans, a souvenir d'une crue en 1815 ou 1816 qui s'éleva à 4.5 m environ en contrebas de celle de 1827. Ce qui est déjà une crue très remarquable 12.5 m au dessus de l'étiage. Elle eu lieu au mois de juillet puisqu'elle lui emporta des gerbes de blé. » « Un autre propriétaire fixe au 9 juillet 1926 la crue semblable à celle indiquée par M. Laffaye pour 1816, il lui attribue la hauteur indiquée par M. Laffaye. » D'après le rapport manuscrit de de Mardigny (1857b) on note : « Le 9 juillet, il tomba 81 lignes (**183 mm**) d'eau, le 1^{er} septembre 90 (**203 mm**) et dans la nuit du 19 au 20 septembre il tomba 55 lignes (124 mm) d'eau en moins de 5 heures. Il y eut inondation de notre rivière, mais cela arrive souvent, sans dégâts d'une importance majeure. » Cette dernière description est également présente dans l'inventaire des épisodes de fortes pluies en Ardèche de Météo France (1995a). On observe des précipitations mensuelles de **211.1 mm** en juillet et **422.2 mm** en septembre.

10 octobre 1827 D'après le rapport manuscrit de de Mardigny (1857b) on note : « ...plus de 36 pouces (**974 mm**) dans le seul mois d'octobre et 29 pouces trois lignes (**792 mm**), le neuf de ce mois, dans l'espace de 21 heures...Les inondations désastreuses qui ont été occasionnées par ces mêmes pluies ont surpassé tout ce dont on avait mémoire d'homme jusqu'à présent. ». On renvoie aux §4.4.2.2, p. 137, pour les détails de cette crue aux stations de Vallon et de Saint Martin.

1828 D'après le rapport manuscrit de de Mardigny (1857b) on note : « année sans averses, ni inondations. »

1829 D'après le rapport manuscrit de de Mardigny (1857b) on note : « année sans averses, ni inondations. »

1830 D'après le rapport manuscrit de de Mardigny (1857b) on note : « année sans averses, ni inondations. »

Remarque D.2 *Le système métrique est rendu obligatoire en France par le décret du 18 germinal An III (le 7 avril 1795), cependant un décret impérial du 12 février 1812*

autorisera, à côté du système légal, l'emploi des mesures « usuelles » accommodées au besoin du peuple : toise de 2 m, aune de 12 dm, livre de 500 g, etc. d'où les mesures utilisées par M. de Montravel. Finalement la loi du 4 juillet 1837 abroge le décret du 12 février 1812 et interdit, à partir du 1 janvier 1840, tous les poids et mesures autres que ceux du système métrique décimal.

Remarque D.3 *Les renseignements hydrométriques présentés ci-avant sont essentiellement de nature descriptive, cependant les informations du type « plus forte crue depuis... » peuvent être exploitées dans l'analyse fréquentielle.*

D.3 Inventaire des relevés hydrométriques disponibles aux stations de Vallon Pont d'Arc et St-Martin d'Ardèche

Nous présentons aux §D.3.1 et §D.3.2 des tableaux de synthèse qui répertorient les relevés mensuels des observateurs que nous avons retrouvés aux stations hydrométriques de Vallon Pont d'Arc et de St-Martin d'Ardèche. Chaque document (feuilles mensuelles volantes ou rassemblées dans un cahier d'une ou plusieurs années) est enregistré dans la base de données des références sous EndNote 4.0 (cf. numéros d'enregistrement entre crochet qui permettent notamment de retrouver, via la BD, la localisation exacte des documents). Pour chaque année une croix signifie que la feuille du mois est disponible. Nous avons également répertorié les informations annexes qui pouvaient être notées sur ces documents :

- altitude du zéro de l'échelle d'après l'observateur (à Vallon l'altitude réelle est différente, cf. §5.3.1.1, p. 171),
- nom de l'observateur,
- heures des relevés : le « D » signifie que le pas de temps est variable lors des crues ce qui n'implique toutefois pas obligatoirement que le maximum réel de la crue soit observé (cf. §4.4.2.2, p. 137),

D.3.1 Station de Vallon Pont d'Arc

TAB. D.3 – Relevés hydrométriques - feuilles mensuelles - station de Vallon

Années	j f m a m j j a s o n d	Altitude NGF du zéro	Nom Observateur	Heures des relevés D : détail des crues	Numéro des références dans la base de données
1861	- - - - - X - - - - -		Julien Louis	12h + D	[747]
1875	- - - - - XXXXX	étiage	Julien Louis	12h + D	[745]
1876	X - XXXXXXXXXXXXX	étiage	Julien Louis	12h + D	[745]
1896	- - - - - X - - - - -	83.70 m	Guévaudan	7h + D	[529]
1904	- - - - - X - - - - -	83.70 m	-	7h, 12h, 17h + D	[530]
1910	- - - - - XX	83.70 m	-	7h, 12h, 17h + D	[531]
1911	- X - - - - - X -	83.70 m	Roure	7h, 12h, 17h + D	[532, 533]
1912	XXXXXXXXXX - XX	83.70 m	Roure	7h, 12h, 17h + D	[534, 535, 548]
1913	XXXXXXXXXXXXXX	83.70 m	Roure	7h + D	[547]
1914	XXXXXXXXXXXXXX	83.70 m	Roure	7h + D	[546]
1915	XXXXXXXXXXXXXX	83.70 m	Roure	7h + D	[518]
1917	XXXXXXXXXXXXXX	83.70 m	Roure	7h + D	[519]
1919	XXXXXXXXXXXXXX	83.70 m	-	7h + D	[517]
1928	XXXXXXXXXXXXXX	-	-	7h	[511]
1929	XXXXXXXXXXXXXX	-	-	7h	[509]
1932	- X - - - - X - XXX	-	-	7h	[507]
1933	XXXXXXXXXXXXXX	-	-	7h + D	[505]
1934	XXXX - XX - - - -	-	-	7h + D	[504, 503]
1935	- XXXXX - XXXXX	-	-	7h + D	[494]
1936	XXXXXXXXXXXXXX	-	-	7h + D	[492]
1937	XXXXXXXXXXXXXX	-	-	7h + D	[490, 489]
1938	XXXXXXXXXXXXXX	-	-	7h	[484]
1939	XX - XXXXX - XXX	-	-	7h	[482, 484]
1940	XXXXXXXXXXXXXX - -	-	-	7h	[478]
1941	XXXXXXXXXXXXXX - -	-	-	7h + D	[474, 476]
1942	XXXXXXXXXXXXXX	-	-	7h	[470, 472]
1943	XXXXXXXXXXXXXX	-	-	7h	[468, 470]
1944	XXXXXXXXXXXXXX	-	-	7h	[466, 468]
1945	XXXXXXXXXXXXXX	-	-	7h + D	[462, 464, 386]
1946	XXXXXX - XXXXXXX	-	-	7h + D	[460, 464, 389, 388]
1947	XXXXXXXXXXXXXX	-	-	7h + D	[391, 456, 458, 460]
1948	XXXXXXXXXXXXXX	-	-	7h + D	[454, 456, 392]
1949	XXXXXXXXXXXXXX	83.70 m	Chahanés	7h + D	[452, 454, 380]
1950	XXXXXXXXXXXXXX	83.70 m	Chahanés	7h + D	[452, 381, 366]
1951	XXXXXXXXXXXXXX	83.70 m	Chahanés	7h + D	[382]
1952	XXXXXXXXXXXXXX	83.70 m	Chahanés	7h	[383]
1953	XXXXXXXXXXXXXX	83.70 m	Chahanés	7h + D	[384]
1954	XXXXXXXXXXXXXX	-	-	7h + D	[396, 377]
1955	XXXXXXXXXXXXXX	-	-	7h + D	[396, 377]
1956	XXXXXXXXXXXXXX	-	-	7h + D	[353, 395, 377]
1957	XXXXXXXXXXXXXX	-	-	7h + D	[353, 394]
1958	XXXXXXXXXXXXXX	-	-	7h + D	[353]
1959	XXXXXXXXXXXXXX	-	-	7h + D	[352, 353]
1960	XX - - XXXXXXXXX	83.70 m	Champetier	7h + D	[351, 352, 354, 355]
1961	XXXXXXXXXXXXXX	83.70 m	Champetier	7h + D	[351]
1962	XXXXXXXXXXXXXX	83.70 m	Champetier	7h + D	[345, 443]
1963	XXXXXXXXXXXXXX	83.70 m	Champetier	7h + D	[345, 443]
1964	XXXXXXXXXXXXXX	83.70 m	Champetier	7h + D	[346]

D.3.2 Station de St-Martin d'Ardèche

TAB. D.4 – Relevés hydrométriques - feuilles mensuelles - station de St-Martin

Années	j f m a m j j a s o n d	Altitude NGF du zéro	Nom Observateur	Heures des relevés D: détail des crues	Numéro des références dans la base de données
1912	XXXXX - XXXXXX	-	-	7h + D	[548]
1913	XXXXXXXXXXXXX	-	-	7h + D	[547]
1914	XXXXXXXXXXXXX	-	-	7h + D	[546]
1915	XXXXXXXXXXXXX	-	-	7h	[518]
1917	XXXXXXXXXXXXX	-	-	7h + D	[519]
1919	XXX - XXXXXXXX	-	-	7h + D	[517]
1928	XXXXXXXXXXXXX	-	-	7h	[511]
1929	XXXXXXXXXXXXX	-	-	7h	[509]
1932	-XX - - - X - XXX	-	-	7h	[507]
1933	XXXXXXXXXXXXX	-	-	7h	[505]
1934	XXXX - - X - - - -	-	-	7h	[504, 503]
1935	- XXXXX - - - XXX	-	-	7h + D	[494]
1936	XXXXX - - XX - XX	-	-	7h	[492]
1937	XX - X - - - - XX -	-	-	7h	[490, 489]
1938	XX - - - - - XXX	-	-	7h	[484]
1939	XXXXXXXXXXXXX	-	-	7h	[480, 482, 484]
1940	XXXX - - - X - - -	-	-	7h	[478]
1942	- - - XXXXXXXXX	-	-	7h	[470, 472]
1943	XXXXXXXXXXXXX - XX	-	-	7h	[468, 470]
1944	XXXXXXXXXXXXX	-	-	7h	[466, 468]
1945	XXXXXXXXXXXXX	-	-	7h + D	[462, 464, 386]
1946	XXXXX - XXXXXX	-	-	7h, 12h, 17h + D	[460, 464, 389, 388]
1947	XXXXXXXXXXXXX	-	-	7h, 12h, 17h + D	[391, 456, 458, 460]
1948	XXXXXXXXXXXXX	-	-	7h, 12h, 17h + D	[454, 456, 392]
1949	XXXXXXXXXXXXX	-	-	7h, 12h, 17h + D	[452, 454, 380]
1950	XXXXX - XXXXXXXX	-	-	7h, 12h, 17h + D	[452, 381, 366]
1951	XX - XXXXXXXXX	-	-	7h, 12h, 17h + D	[382]
1952	XXXXXXXXXXXXX	-	-	7h, 12h, 17h + D	[383]
1953	XXXXXXXXXXXXX	-	-	7h, 12h, 17h	[384]
1954	XXXXXXXXXXXXX	-	-	7h, 12h, 17h + D	[396, 377]
1955	XXXXXXXXXXXXX	-	-	7h, 12h, 17h	[396, 377]
1956	XXXXXXXXXXXXX	-	-	7h, 12h, 17h + D	[353, 395, 377]
1957	XXXXXXXXXXXXX	-	-	7h, 12h, 17h	[353, 394]
1958	XXXXXXXXXXXXX	-	-	7h, 12h, 17h + D	[353]
1959	XXXXXXXXXXXXX - -	-	-	7h, 12h, 17h + D	[352, 353, 356]
1960	XX - XX - - - XXXX	-	Laget	7h + D	[351, 352, 355]
1961	XXXX - XX - XXXX	-	-	7h + D	[351]
1962	XXXXXXXXXXXXX	-	-	7h	[345, 443]
1963	X - XXXXXXXXX	-	-	7h + D	[345, 443]
1964	XXXXXXXXXXXXX	-	-	7h + D	[346]

D.4 Bibliographie

- Belgrand, E. (1875). *Coup d'oeil d'ensemble sur le régime des principales rivières du Nord, du centre et du midi de la France*, Paris (ENPC, Fond Ancien, 11876 v. 11608 [741]).
- Champion, M. (1861). *Les inondations en France depuis le VIème siècle jusqu'à nos jours*, Vol. III, édition originale Dunod, ré-édition du Cemagref, 2000, Paris.
- Champion, M. (1862). *Les inondations en France depuis le VIème siècle jusqu'à nos jours*, Vol. IV, édition originale Dunod, ré-édition du Cemagref, 2000, Paris.
- Combiér (1849). Rivière d'Ardèche - Profil en long d'une partie de la rivière d'Ardèche, depuis le moulin de Salavas jusqu'au Pont d'Arc, *Plan dressé par l'Ing. Ordinaire*, Ponts et Chaussées, Département de l'Ardèche, Aubenas (ADA, 1262W154 [812]).
- Combiér (1856). Du régime de l'Ardèche - De l'importance et de la durée des crues de cette rivière - Renseignements provoqués par la circulaire du 26 juillet 1856, *Rapport de l'Ing. Ordinaire*, Ponts et Chaussées, Arrondissement d'Aubenas, Aubenas, 19 septembre (ADA, 1262W154 [790]).
- Combiér (1857a). Carte générale du bassin de l'Ardèche, d'après Cassini, *Plan de l'Ing. Ordinaire*, Ponts et Chaussées, Département de l'Ardèche, Arrondissement d'Aubenas, Aubenas, 16 février (ADA, 1262W154 [837]).

- Combier (1857b). Etudes relatives aux inondations, *Courrier de l'Ing. Ordinaire adressé à l'Ing. en Chef de Mardigny*, Ponts et Chaussées, Arrondissement d'Aubenas, Aubenas (ADA, 1262W154 [791]).
- Combier (1857c). Etudes relatives aux inondations - 1er rapport fourni le 15 février 1857 en réponse à la circulaire du 26 juillet 1856, *Rapport de l'Ing. Ordinaire*, Ponts et Chaussées, Arrondissement d'Aubenas, Aubenas, 15 février (ADA, 1262W154 [789]).
- Combier (1857d). Réponse au courrier du 20 mars 1857 de l'Inspecteur Général Belin, *Courrier de l'Ing. Ordinaire adressé à l'Ing. en Chef de Mardigny*, Ponts et Chaussées, Arrondissement d'Aubenas, Aubenas, 4 mai (ADA, 1262W154 [787]).
- Durand et Soubeyrand (1958). Crue de fin septembre et octobre 1958 - Circulaire S.C.V, n° 950/H du 13 octobre 1958 (Direction des Ports Maritimes et des Voies Navigables) - Rapport de l'ingénieur, *Rapport des Ing. en Chef*, n° 724/SH, Ponts et Chaussées, Service Hydraulique, Privas, décembre (DDE07, Service d'Annonce des Crues, Rapport d'étude [202]).
- Gigon, C. (2002). Crues de l'Ardèche à Vallon Pont d'Arc, *Rapport technique*, n° VALLON 12, DDE07, SUAP/PR, Service d'Annonce des Crues, Privas, décembre (DDE07, Service d'Annonce des Crues, Rapports d'étude [96]).
- Lemoine, G. (1896). Essai sur le problème de l'annonce des crues pour les rivières des départements de l'Ardèche, du Gard et de l'Hérault, *Annales des Ponts et Chaussées*, 2eme sem. (61) : 523-567.
- Mardigny (de), P. (1857a). Etudes relatives aux inondations - Echelles métriques, *Courrier de l'Ing. en Chef adressé à l'Ing. Ordinaire Combier*, Ponts et Chaussées, Département de l'Ardèche, Privas, 3 février (ADA, 1262W153 [763]), 3 février.
- Mardigny (de), P. (1857b). Etudes relatives aux inondations - Rivière d'Ardèche, *Rapport de l'ingénieur en chef*, Ponts et Chaussées, Département de l'Ardèche, Privas, 1er avril (ADA, 1270W1 [792]).
- Mardigny (de), P. (1860a). *Mémoire sur les inondations des rivières de l'Ardèche*, Dalmont et Dunod, Paris (ENPC, Fond Ancien, 273-4976 v. 18524 [738]).
- Mardigny (de), P. (1860b). Mémoire sur les inondations des rivières de l'Ardèche, *Annales des Ponts et Chaussées*, T. XIX (258) : 249-296, pl. 174 et 175.
- Météo France (1995a). *Inventaire des épisodes de fortes pluies en Ardèche - Tome I : 1807 - 1927*, Aubenas.
- Météo France (1995b). *Inventaire des épisodes de fortes pluies en Ardèche - Tome II : 1928 - 1994*, Aubenas.
- Pardé, M. (1925a). *La genèse des crues, Etude Générale*, Thèse principale de doctorat, Institut des Etudes Rhodaniennes de l'Université de Lyon et P. Mason, Grenoble (UJF, Bibliothèque de l'Institut Dolomieu - Géologie, cote: TH/PAR/1925/T.2 [167,168,190,1194]).
- Pardé, M. (1925b). *Le régime du Rhône, Etude hydrologique*, Thèse principale de doctorat, Institut des Etudes Rhodaniennes de l'Université de Lyon et P. Mason, Grenoble (UJF, Bibliothèque de l'Institut Dolomieu - Géologie, cote: TH/PAR/1925/T.1 [167,168,190,1194]).
- Reynier, E. (1947). *Le pays de Vivarais*, Yssingeaux [203].

- s.n. (1841). Crue de l'Ardèche du 28 octobre 1840, *Courrier de l'Ing. en Chef, Directeur de la Vallée du Rhône, au Secrétaire d'Etat des Travaux Publics*, Ponts et Chaussées, Valence, 30 juin (AN F14 7560, sous-dossier : Inondations, Bassin du Rhône, 1843-55 [729]).
- s.n. (1970). Risques d'inondations, *Rapport technique*, DDE07, Service d'Annonce des Crues, Privas (DDE07, Archives au Parc, dossier : Annonce des Crues, 1970-1980 [611]).
- Vaschalde, H. (1873). Chroniques météorologiques du Vivarais, *Transcription d'un document manuscrit*, (DDE07, Service d'Annonce des Crues, Articles [251]).
- Vaschalde, H. (1890). *Les inondations du Vivarais depuis le XIIIème siècle, prédiction et historique de celle du 22 septembre 1890*, Aubenas (BNF, LK2- 3834 [252]).