



ACTHYS Diffusion

***InondHis-LR*** : analyse régionale des précipitations et  
crues anciennes en Languedoc-Roussillon

Regional analyses of historical precipitations and discharges in the Languedoc-Roussillon  
region

Programme **RDT**  
Rapport scientifique de fin de contrat

UMR HydroSciences Montpellier  
Luc Neppel  
Maison des Sciences de l'Eau  
Université Montpellier II  
Place Eugène Bataillon  
34095 MONTPELLIER Cedex 5

Date : 02/02/2007

N° de contrat : **CV04000067**

Date du contrat : **02/11/2004**

## Table des matières

<i>I. Objectifs</i> .....	5
<i>II. Méthodologie générale</i> .....	6
<i>III. Choix des secteurs étudiés et Etat Général des Sources (EGS)</i> .....	8
III.1. Choix des sections .....	8
III.1.1. Choix des sections sur l’Hérault.....	8
III.1.2. Choix des sections sur le Gard.....	12
III.1.3. Choix des sections sur les bassins de l’Aude.....	13
III.1.4. Cartes de localisation des secteurs d’étude retenus .....	14
III.2. Etat Général des Sources .....	16
III.2.1. Bassins versant de l’Hérault et du Gard .....	16
III.2.2. Bassins versant Audois .....	19
III.3. Conclusion.....	21
<i>IV. Recueil des données</i> .....	23
IV.1. Données topographiques.....	23
IV.1.1. Données récentes disponibles .....	23
IV.1.2. Données anciennes extraites des archives (sources antérieures à 1950).....	24
IV.1.3. Critique et normalisation des données anciennes et récentes .....	25
IV.1.4. Méthode de reconstruction des profils — Généralités.....	26
IV.2. Hydrométrie – hydrologie .....	26
IV.2.1. Sources disponibles et données extraites .....	27
IV.2.2. Critique des données .....	27
IV.3. Exemple du gardon d’Anduze à Anduze .....	27
IV.3.1. Topographie et reconstitution de l’évolution verticale du lit.....	27
IV.3.2. Données hydrométriques à Anduze .....	30
IV.4. Conclusion. ....	33
<i>V. Analyse locale des crues</i> .....	34
V.1. Reconstitution hydraulique des débits de crue .....	34
V.1.1. Cas des bassins de l’Aude .....	34
V.1.2. Cas des bassins des Gardons et de l’Hérault .....	38
V.2. Analyse fréquentielle des débits .....	54
V.2.1. Modèles fréquentiels utilisés.....	54
V.2.2. Etude sur des données simulées .....	60
V.2.3. Le Gardon d’Anduze à Anduze .....	63
V.3. Conclusions sur l’analyse fréquentielle des débits.....	67
<i>VI. Analyse régionale des pluies et débits</i> .....	70
VI.1. Analyse fréquentielle des pluies .....	70
VI.1.1. Objectif.....	70
VI.1.2. Démarche.....	70
VI.1.3. Distribution des lames d’eau.....	72
VI.1.4. Localisation des plus forts volumes précipités.....	75
VI.1.5. Conclusions .....	77
VI.2. Méthode du Gradex et distribution des débits de crues historiques.....	78
VI.2.1. Application du gradex sur le bassin de l’Hérault à Ganges.....	78
VI.2.2. Application du Gradex sur les bassins versant de l’Aude.....	84
VI.2.3. Conclusion .....	85
<i>VII. Conclusion générale</i> .....	86

VIII. Bibliographie citée dans le texte:.....	87
IX. Publications scientifiques parues.....	89

## Liste des figures

Figure 1: Seuil de Granoupiac en aval de Gignac.....	9
Figure 2: état actuel des stations hydrométriques sur l'Hérault.....	10
Figure 3: échelle DIREN de Laroque, vue vers l'amont.....	12
Figure 4 : St Jean du Gard, vue aval du Pont de l'ancienne station SAC30.....	12
Figure 5 : Mialet, Pont des Camisards, vue vers l'aval.....	13
Figure 6 : Anduze, vue aval du Pont de l'ancienne station SAC30.....	13
Figure 7 : Aval du Pont de l'ancienne station SAC30 à Alès.....	13
Figure 8: Cartes de localisation des secteurs d'étude sur l'Hérault et le Gard.....	15
Figure 9 : Sites d'étude sur l'Aude.....	15
Figure 10. Profil en long du Gardon d'Anduze à Anduze – 1985.....	28
Figure 11. Lignes d'eau reconstituées du Gardon d'Anduze à Anduze de 1849 à 1996.....	29
Figure 12. Données anciennes exploitées pour la construction des modèles numériques - Gardon d'Anduze à Anduze.....	30
Figure 13 : Hauteurs minimales annuelles relevées à l'EAC d'Anduze, entre 1892 et 2006 — source K. Pobanz, 2006.....	31
Figure 14 : Evolution de l'altitude du Zéro de l'échelle d'annonce des crues d'Anduze entre 1892 et 2006. Les altitudes ont été normalisées dans le système de nivellement actuel. Les deux lignes indiquent les hypothèse haute et basse pour les cotes entre 1924 et 1948.....	32
Figure 15 : Hauteur des crues dépassant la cote d'alerte (3 mètres) à Anduze.....	33
Figure 16 : Résultats de la reconstitution des crues historiques de la Clamoux.....	36
Figure 17 : Résultats de la reconstitution des crues historiques de la Salz.....	36
Figure 18 : Schématisation de la méthode générale utilisée pour chaque secteur d'étude.....	38
Figure 19 : Profil en long du tronçon modélisé sur le Gardon d'Anduze à Anduze.....	39
Figure 20 : A gauche : plan du Gardon d'Anduze à Anduze datant de 1851 – A droite, profils en travers du Gardon d'Anduze à Anduze datant de 1861.....	40
Figure 21 : Courbe de tarage au niveau de l'échelle d'annonce de crue DDE établie par la SIEE.....	41
Figure 22 : Courbe de tarage à l'échelle d'Anduze prenant en compte la topographie récente.....	46
Figure 23 : Courbe de tarage à l'échelle d'Anduze prenant en compte la topographie ancienne.....	47
Figure 24 : Ressaut hydraulique au voisinage du pont routier d'Anduze.....	48
Figure 25 : Comparaison avec les courbes obtenues par la SIEE.....	49
Figure 26 : Détermination d'une loi $Q=f(h)$ pour la courbe de tarage moyenne établie à l'EAC d'Anduze.....	50
Figure 27 : Reconstitution des débits de crues au niveau de l'EAC d'Anduze de 1892 à 2004 (crue de septembre 2002 reconstituée d'après les laisses de crue).....	51
Figure 28 : Lignes d'eau calculées telles que la hauteur à l'EAC d'Anduze est de 7,60 m.....	52
Figure 29 : Lignes d'eau calculées au Gardon d'Anduze à Anduze, représentatives du débit déterminé pour la pointe de crue de 2002.....	53
Figure 30 : Distributions des erreurs de courbe de tarage (modèle M3). Min et max sont représentés par les traits verticaux.....	58
Figure 31 : Exemples de transformation d'une incertitude en hauteur en incertitude en débit.....	59
Figure 32. Tracés chronologiques des trois séries simulées.....	61
Figure 33 : Estimateurs des paramètres pour les trois jeux de données simulées, suivant les différents modèles considérés.....	63
Figure 34 : Estimateurs des quantiles pour les trois jeux de données simulées, suivant les différents modèles considérés.....	63
Figure 35 : Série de débit de pointe à Anduze (1741-2005).....	64
Figure 36 : Courbes de tarages ancienne et récente. Les traits rouges indiquent les courbes minimales et maximales obtenues en faisant varier les coefficients de Strickler. Les courbes vertes représentent le modèle d'erreur utilisé.....	65
Figure 37 : Distribution des paramètres de la loi GEV, et des erreurs sur la courbe de tarage.....	66
Figure 38 : Loi GEV sur les valeurs maximales annuelles à Anduze.....	67
Figure 39 : illustration de l'échantillonnage des lames d'eau journalières maximum par événements sur différentes surfaces de calcul, cas du 08 septembre 2002. Echelle des pluies journalières en mm.....	71

Figure 40 : distribution empirique des lames d'eau maximales pour différentes surfaces de calcul.....	72
Figure 41 : Calage du modèle LST sur les distributions empiriques des lames d'eau.....	74
Figure 42 : densité de l'occurrence des plus forts cumuls journaliers sur 1023 km <sup>2</sup> , année entière.....	76
Figure 43 : Densité de l'occurrence des plus forts cumuls journaliers sur 1023 km <sup>2</sup> respectivement de gauche à droite et de haut en bas : saison automne (septembre-novembre), hiver (décembre-février), printemps (mars-mai), été (juin-août).....	77
Figure 44 : Valeur du gradex retenue à partir de la courbe enveloppe régionale des précipitations.....	79
Figure 45 : Histogramme des lames d'eau journalières sur l'Hérault à Ganges, sachant que l'événement a généré au moins 190 mm en un point.....	80
Figure 46 : MEF pour les lames d'eau journalières sur l'Hérault à Ganges.....	80
Figure 47 : ajustement d'une GPD sur les lames dépassant 25 mm, bassin de l'Hérault à Ganges.....	81
Figure 48 Valeur du rapport de pointe de crue en fonction du débit de pointe (station Diren, Ganges, 1970-2005).....	82
Figure 49. Comparaison des distributions empiriques (période récente, et période historique) avec une loi GEV ajustée sur la période complète (erreurs de reconstitution des débits supposées indépendantes ou liées à la courbe de tarage), et avec une extrapolation avec le gradex des pluies (loi régionale-hypothèse haute ; loi locale : hypothèse basse).....	83
Figure 50 : Application de méthode du gradex sur le bassin versant du Lauquet.....	84

## Liste des tableaux

Tableau 1 : récapitulatif des chroniques disponibles aux stations DIREN de l'Hérault. En gras : stations retenues dans le cadre du projet Inondhis.....	11
Tableau 2 Répartition, par fonds documentaire d'origine, des cotes de l'EGS jugées dignes d'intérêt, et des références documentaires, extraites de ces cotes, puis utilisées pour l'inventaire des dates de crues (phase d'Analyse) et pour l'élaboration finale des chroniques de débits (phase de Traitement).....	19
Tableau 3 : synthèse des données topographiques récentes collectées.....	24
Tableau 4 : tableau de conversion des mesures locales.....	26
Tableau 5 : source pour la topographie ancienne à Anduze.....	27
Tableau 6 : hiérarchisation des crues sur le gardon d'Anduze à Anduze à partir des cotes. ....	33
Tableau 7 : nombre de crues collectées pour chaque secteur.....	34
Tableau 8. Estimations de débit réalisées pour la crue de 1874 sur l'Orbiel.....	35
Tableau 9 : Types de modèles hydrauliques retenus.....	42
Tableau 10 : Synthèse de la condition limite choisie, des ouvrages à représenter et de la situation de l'échelle sur le tronçon.....	43
Tableau 11 : Synthèse des modèles "anciens" développés.....	44
Tableau 12 : Synthèse sur les coefficients de Strickler retenus.....	45
Tableau 13 : Synthèse sur les principaux paramètres et résultats de l'analyse probabiliste.....	68
Tableau 14 : Synthèse sur l'estimation des quantiles Q10 et Q100 (avec intervalle de confiance à 90%) .....	69

## **I. Objectifs**

L'objectif global est le recensement et l'exploitation de l'information historique ancienne sur les précipitations et les crues majeures de la région Languedoc-Roussillon dans le but de mieux caractériser les aléas hydrologiques à l'origine des événements rares, et réduire ainsi l'incertitude attachée à la prédétermination des débits ou des pluies extrêmes.

Il entend sur le plan scientifique avancer dans la validation de méthodologies :

- Test et validation de la collecte critique des données historiques à un échelon régional, prolongeant en cela les travaux interdisciplinaires menés au cours des dernières années par les hydrologues et les historiens (Lang et al., 1998a, 2002 ; Cœur et al., 2000, 2002). L'enquête historique sera réalisée en collaboration avec plusieurs équipes d'historiens / géographes permettra de valider la méthodologie de collecte d'informations proposée.

- Test des méthodes d'analyse hydrométéorologique à différentes échelles d'espaces et de temps sur les sites d'études de la région Languedoc-Roussillon (LR) qui seront retenus.

Sur un plan opérationnel, la démarche permettra d'améliorer la définition des aléas référents retenus dans les dispositifs locaux de prévention.

Plusieurs terrains d'application seront envisagés :

L'analyse régionale des événements pluvieux extrêmes sur le Languedoc-Roussillon, en terme de superficie couverte et de cumuls atteints, en vue d'intégrer ces informations dans les analyses régionales des pluies journalières déjà existantes (Neppel, 1997, 2003).

L'analyse régionale des crues historiques majeures sur quelques grands bassins versants du Languedoc-Roussillon (supérieurs à 100 km<sup>2</sup>), pour apprécier les phénomènes de concomitance et confronter différentes méthodes de prédétermination des crues fortes. Les bassins concernés sont l'Hérault à Gignac et Laroque et le Gard à Mialet, Saint Jean du Gard, Anduze et Alès. Le choix de ces sections est justifié plus loin.

L'analyse régionale des crues du XIXe et du XXe siècles de cinq petits bassins versants de l'Aude (moins de 200 km<sup>2</sup>), afin de conforter les conclusions sur le fonctionnement hydrologique de ces bassins lors des événements rares, issues des retours d'expériences entrepris depuis 1999. Il s'agit en particulier de confirmer, par une approche régionale et historique, l'existence d'une nette rupture entre événements rares et événements courants dans la distribution des débits spécifiques de pointe sur les petits bassins versants méditerranéens à réaction rapide.

## **II. Méthodologie générale.**

Cette recherche associe les méthodes d'enquête historique, propres à valider des données tirées de témoignages anciens, aux méthodes spécifiques de l'analyse hydrométéorologique appliquées au traitement de ces mêmes données. Les 5 étapes de la méthodologie sont résumées ici.

### **Etape 1 : Cadrage général de l'enquête**

Cette étape vise :

- à définir les méthodologies de collecte et de traitement des données ;
- à constituer un état général des sources, c'est-à-dire à réaliser un inventaire des sources potentielles d'information disponible sur les crues et inondations anciennes sur la région ;
- à définir précisément les sections étudiées en fonction de la disponibilité d'informations récentes et anciennes sur les crues, de la disponibilité d'informations topographiques et de critères hydrauliques.

### **Etape 2 – Recueil des données**

Le recueil des données existantes est réalisé pour les sections précédemment définies en s'appuyant sur l'EGS, complétées de visites de terrain. L'objectif est d'établir, pour chaque section :

- un historique du lit récapitulant l'évolution de la morphologie du lit du cours d'eau et des principaux aménagements influençant l'écoulement en crue ;
- un historique des échelles hydrométriques : date de mise en service et position exacte des échelles et de leur zéro ;
- un historique des crues comprenant les hauteurs d'eau atteintes, les descriptifs des champs d'inondation et des dégâts, de la pluviométrie, etc...

A l'issue de ces étapes le corpus d'information disponible est intégré au sein d'une base de données. Les documents originaux les plus importants sont reproduits et annexés à la base. L'ensemble, base de données et documents, est fournis en annexe à ce rapport.

### **Etape 3 - Analyse locale de crues**

L'exploitation des données recueillies est menée en deux temps. Il s'agit dans un premier temps d'homogénéiser les données et la reconstitution des débits. Cette phase consiste en une critique des hauteurs relevées au droit des échelles. En effet les hauteurs sont relatives au zéro de l'échelle, qui est susceptible d'avoir été déplacée. Il s'agit donc d'homogénéiser en cote NGF les informations recueillies, puis de prendre en compte d'éventuelles modifications dans le temps de la forme du lit (exhaussement, incision, endiguement ...). Une approche hydraulique sommaire (petits bassins) ou plus complète (grands bassins) sera développée afin de reconstituer l'ordre de grandeur du débit des crues anciennes. Une analyse de sensibilité permettra d'affecter une incertitude aux valeurs reconstituées.

Dans un second temps on réalisera l'analyse fréquentielle des crues. Sur les grands bassins, il sera procédé au contrôle de l'homogénéité de l'échantillon des crues historiques, puis à un traitement fréquentiel de l'échantillon des plus fortes crues (période systématique récente, période historique). Le traitement portera sur les classes d'intensité de crue établies à partir d'un classement qualitatif des événements suivant les dommages constatés, et à partir d'un classement sur les hauteurs d'eau et sur les débits.

#### **Etape 4 - Analyse régionale des données hydro-météorologiques**

Cette étape comporte l'analyse régionale des pluies, avec la constitution des courbes intensité-surface-fréquence pour décrire l'aléa pluvieux et la comparaison des différentes méthodes de prédétermination de débits de pointe ne faisant pas intervenir les débits historiques (gradex par exemple) avec la distribution des débits issus de l'analyse historique qui servira de référence.

#### **Etape 5 – Valorisation opérationnelle des résultats**

Sur les différents secteurs étudiés, on cherchera à quantifier l'apport de l'approche régionale pour l'estimation du débit spécifique de pointe des crues exceptionnelles. L'objectif pour ces bassins est de préciser l'ordre de grandeur des quantiles de crue correspondant à des périodes de retour importantes (100 ans minimum), ainsi que l'événement historique de référence à partir de la hiérarchisation des crues. Une comparaison aux événements les plus importants de la période systématique est également attendue.

L'ensemble des données collectées sera à terme intégré à l'Observatoire Hydrométéorologique Méditerranéen Cévennes-Vivarais (OHMCV), qui comporte un volet sur l'utilisation des archives historiques pour une meilleure quantification des extrêmes. La diffusion des résultats de l'enquête historique et de son exploitation à différents publics est proposée à partir d'un outil numérique d'archivage multi-utilisateurs sur CD.

### **III. Choix des secteurs étudiés et Etat Général des Sources (EGS)**

#### **III.1. Choix des sections**

Ce choix est un compromis entre plusieurs contraintes et les intérêts des gestionnaires locaux :

- i) Contraintes hydrauliques : la reconstitution des débits de crues anciennes n'est possible que si la section est stable et ne subit pas de modifications géomorphologiques en période de crue.
- ii) Contraintes de disponibilité de données topographiques actuelles, aucune campagne de levées topographiques à grande échelle n'étant prévue dans le cadre de ce projet, et disponibilité de données topographiques anciennes dans le cas où la section a évolué dans le temps.
- iii) La disponibilité des chroniques contemporaines de débits.

Sur l'Hérault, la prédétermination des débits de pointe présente un intérêt pour la DIREN et le SAGE Hérault surtout dans les secteurs à enjeux qui se situent de Gignac - où les PPRI sont en cours d'élaboration - jusqu'à Agde et plus à l'amont dans la zone pré-cévennoise du bassin gangeois.

Sur le Gard, la DDE30 s'intéresse en particuliers aux secteurs des gorges, entre Russan St Anastasie et le Pont St Nicolas : l'objectif est de vérifier la concordance des informations historiques avec les résultats des analyses Paléo hydrologiques (Enzel et al., 2003) du gardon d'Alès et du Gard amont, de la réunion des Gardons d'Anduze et d'Alès jusqu'à l'entrée des gorges, les PPRI sur ce secteur étant en cours d'élaboration.

Les visites de terrain durant l'automne 2004 ont permis de repérer les différentes sections possibles sur l'Hérault et le Gard. Elles se sont déroulées avec M. Jacques Tailhan de la DIREN LR, responsable du réseau et des données Gard et Hérault. Il a largement contribué au développement du réseau de mesures au début des années 1970 et sa connaissance de l'historique récent des stations a été précieuse. Les objectifs de ces visites ont été de repérer les positions des échelles et capteurs, récents et anciens, de juger de la qualité des données de crues au droit des stations DIREN et DDE et de juger de la stabilité géomorphologique des sections. Cette phase de terrain a permis de cibler les sections pouvant se prêter à l'analyse des crues anciennes.

##### **III.1.1. Choix des sections sur l'Hérault.**

Sur le bassin de l'Hérault, en aval des gorges de St Guilhem-le-Désert se posent deux problèmes. Il s'agit d'abord d'une instabilité marquée du lit mineur avec par endroit des enfoncements du lit qui se trouvent aggravés par les exploitations de graviers qui figurent en nombre à l'aval de Gignac. Un rapport Cemagref-SIEE (1991) sur l'étude géomorphologique de l'Hérault entre Belarga et Gignac, montre un enfoncement du profil en long du cours d'eau entre 1967 et 1990. Dans le secteur de Canet et en aval de Gignac il dépasse 2 à 3 m sur certains tronçons. Plusieurs seuils ont été construits de manière à stopper l'érosion régressive en aval de Gignac.



**Figure 1: Seuil de Granoupiac en aval de Gignac**

Le second problème est lié à la présence de zones de débordement très étendues dans la plaine de l'Hérault. En particulier les stations de Montagnac et Florensac s'avèrent très peu fiables pour l'estimation des débits de pointe pour les crues fortes du fait des débordements. A Florensac les débits ne sont correctement estimés qu'en dessous de 750 m<sup>3</sup>/s.

Ainsi sur le secteur Hérault aval, la seule section retenue pour la reconstitution des crues anciennes est la station DIREN de Gignac, dont la section de contrôle actuelle est le seuil de Granoupiac (Figure 1: Seuil de Granoupiac en aval de Gignac). Elle draine un bassin d'environ 1300 km<sup>2</sup>. Plus en aval il semble illusoire de vouloir estimer des débits de crues à partir des cotes, compte tenu de la forte instabilité du lit.

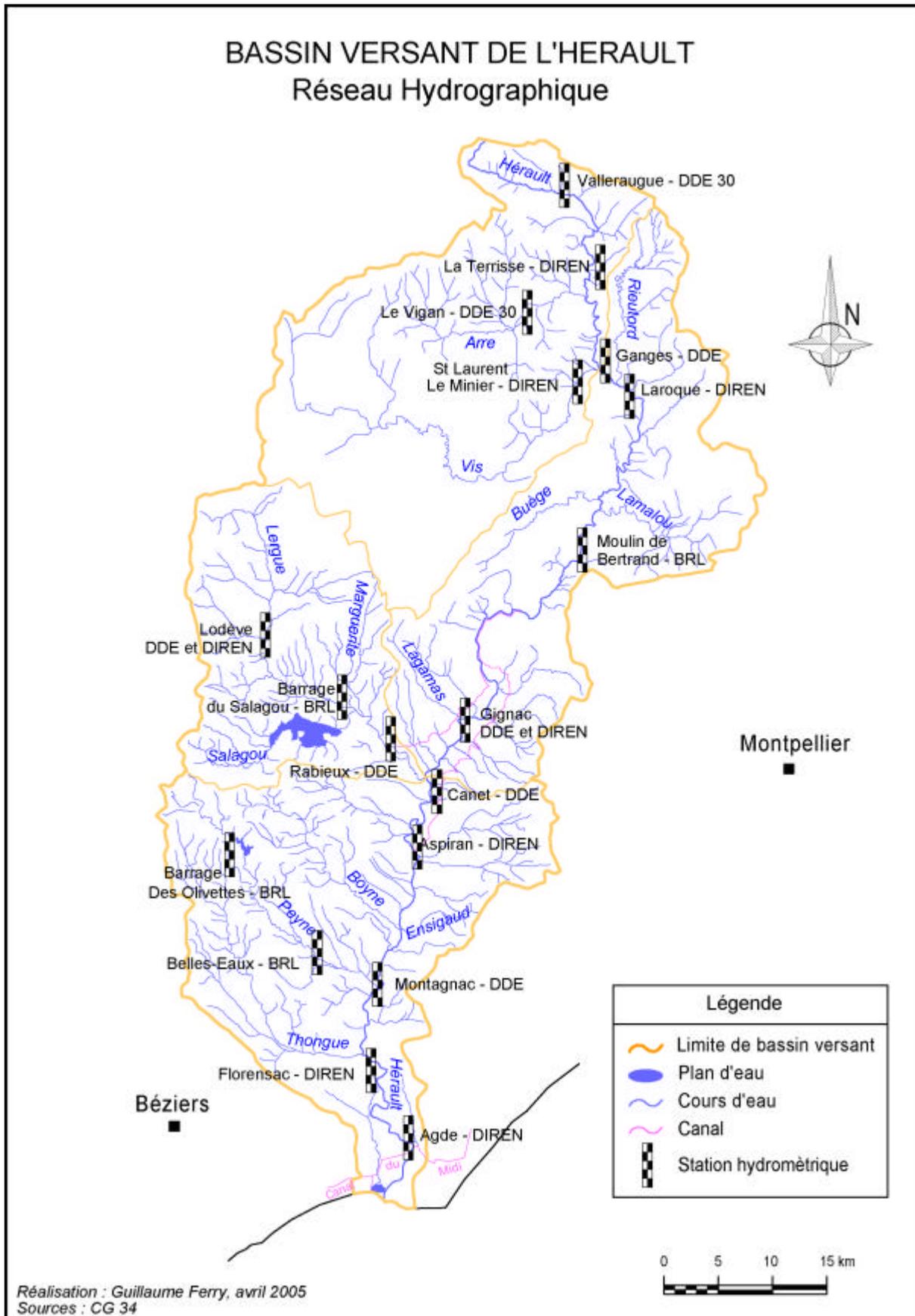


Figure 2: état actuel des stations hydrométriques sur l'Hérault

Les chroniques récentes proviennent de la DIREN LR (Tableau 1). Aux stations DDE, on dispose des crues ayant dépassées la cote d'alerte à l'une des stations depuis 1982. **Aucune autre donnée antérieure à 1982 ne semble avoir été conservée pour les stations d'annonce de crue de l'Hérault.** Le réseau actuel comprend 8 stations DDE (30 et 34), 10 stations DIREN et une station BRL à Moulin Bertrand (Figure 2).

Les chroniques les plus longues sont disponibles aux stations DIREN. La plus longue est la station de l'Arre en aval du Vigan avec 50 ans de mesures. 7 stations seulement disposent de plus de 20 ans de mesures et 7 d'entre elles présentent moins de 10 ans de mesures (Tableau 1).

INTITULE	S (km <sup>2</sup> )	An Début	Fin
L' ARRE AU VIGAN (LA TERRISSE)	159	50	1953
L' HERAULT A AGDE (ECLUSE DE PRADES)	2550	45	1952
LA VIS A ST-LAURENT-LE-MINIER	332	42	1961
LA LERGUE A LODEVE	228	41	1959
L' HERAULT A LAROQUE	756	34	1969
L' HERAULT A VALLERAUGUE	46.2	24	1960 1983
L' HERAULT A MONTAGNAC	2180	24	1961 1987
L' HERAULT A CAUSSE-DE-LA-SELLE (MOULIN DE BERTRAND)		15	1967 1981
L' HERAULT A GIGNAC	1312	14	1989
L' HERAULT A PUECHABON	1080	10	1971 1980
L' HERAULT A ST-ANDRE-DE-MAJENCOULES (PADENS)	97	9	1987 1995
L' HERAULT A ASPIRAN	1865	7	1993
L' HERAULT A FLORENSAC	2430	7	1993
LA VIS A BLANDAS (FOUX DE LA VIS)	198	4	1999
L' HERAULT A ST-JULIEN-DE-LA-NEF	291	3	1966 1968
LA PEYNE A VAILHAN [DEBIT ENTRANT]	29.5	3	1993
LE SALAGOU A CLERMONT-L'HERAULT (MAS AUDRAN)		1	1970 1970

**Tableau 1 : récapitulatif des chroniques disponibles aux stations DIREN de l'Hérault. En gras : stations retenues dans le cadre du projet Inondhis.**

Sur le secteur de l'Hérault amont, le choix de la section s'est porté sur la station DIREN de Laroque. Elle est située dans des gorges calcaires du massif du Thaurac. Le lit mineur constitué de dalles calcaires est stable par rapport à l'érosion, et le lit majeur bien délimité par le mur de soutènement de la D986 et les falaises calcaires (Figure 3). Elle draine un bassin de 760 km<sup>2</sup>, juste en aval du bassin Gangeois.



Figure 3: échelle DIREN de Laroque, vue vers l'amont.

### III.1.2. Choix des sections sur le Gard.

Les sections potentielles dans les gorges du Gard satisfont au critère de stabilité des sections, par contre aucune donnée topographique n'est disponible mise à part les relevés réalisés par l'équipe de Enzel lors de l'étude des paléocrues, relevés dont nous n'avons malheureusement pas pu disposer.

Le secteur de la Gardonnenque est également à exclure compte tenu de la largeur du lit majeur, des nombreuses zones de débordement et des nombreux aménagements dont ce secteur a fait l'objet.

Aussi le choix des sections s'est orienté vers les deux affluents principaux du Gard :

i) sur les gardons d'Anduze : à la station d'Anduze du SAC 30 (Figure 6) drainant 542 km<sup>2</sup> et les stations de Mialet (Figure 5) et de St Jean du Gard (Figure 4) respectivement sur les gardons de Mialet et de St Jean et drainant respectivement des bassins de 219 km<sup>2</sup> et 154 km<sup>2</sup>.

ii) le gardon d'Alès au vieux pont à Alès (Figure 7) drainant un bassin de 320 km<sup>2</sup>

Sur le secteur des gorges on se limitera à la collecte des données historiques sur les crues, sans reconstitution des débits. Cette étude « qualitative » permettra néanmoins d'avoir des éléments de comparaison avec les résultats de l'analyse palé-hydrologique.



Figure 4 : St Jean du Gard, vue aval du Pont de l'ancienne station SAC30



**Figure 5 : Mialet, Pont des Camisards, vue vers l'aval.**



**Figure 6 : Anduze, vue aval du Pont de l'ancienne station SAC30**



**Figure 7 : Aval du Pont de l'ancienne station SAC30 à Alès**

### **III.1.3. Choix des sections sur les bassins de l'Aude.**

Quatre bassins versants affluents de l'Aude ont été choisis (Figure 9). Le premier critère est la taille des bassins, moins de 200 km<sup>2</sup>. Un second critère a été de retenir des bassins ayant des caractéristiques physiques et géographiques différentes. La Clamoux (42 km<sup>2</sup> à Villeneuve

Minervois) et l'Orbiel (87 km<sup>2</sup> à Lastours) sont situés sur le massif de la montagne noire, la Salz (142 km<sup>2</sup> à Couiza) et le Lauquet (177 km<sup>2</sup> à Saint Hilaire) sur le massif des Corbières. La Clamoux et le Lauquet ont été affectés par les fortes crues de novembre 1999.

Le choix des sites étudiés sur ces bassins a du tenir compte de l'absence de relevés hydrométriques organisés au niveau des échelles de crue (hormis sur la Salz, où des relevés ont été effectués à l'échelle de Couiza à partir de 1932 au moins). Le critère de choix des sites a donc été avant tout la disponibilité de plans et documents d'archives indiquant le niveau et la section d'écoulement d'un nombre significatif de crues historiques.

Finalement, pour disposer d'une quantité d'informations suffisante, la reconstitution n'a pas pu être menée au niveau d'un section unique, mais sur un tronçon de chacun des cours d'eau (de quelques kilomètres de long) regroupant plusieurs sections intéressantes car bien documentées en archives. La surface drainée n'est donc pas totalement homogène au sein de chaque site étudié (même si elle varie dans des proportions limitées).

Dans la mesure du possible, les secteurs finalement retenus ont également été choisis pour leur configuration favorable en termes hydraulique (sections d'écoulement de largeur limitée notamment). Les secteurs aval des cours d'eau ont parfois été volontairement abandonnés car trop complexes de ce point de vue, même si l'information disponible en archives y était parfois fournie.

#### III.1.4. Cartes de localisation des secteurs d'étude retenus

Les cartes suivantes permettent de visualiser les sites étudiés sur les bassins des Gardons, de l'Hérault et de l'Aude.



Sites d'étude sur les Gardons



Sites d'étude sur l'Hérault

Figure 8: Cartes de localisation des secteurs d'étude sur l'Hérault et le Gard

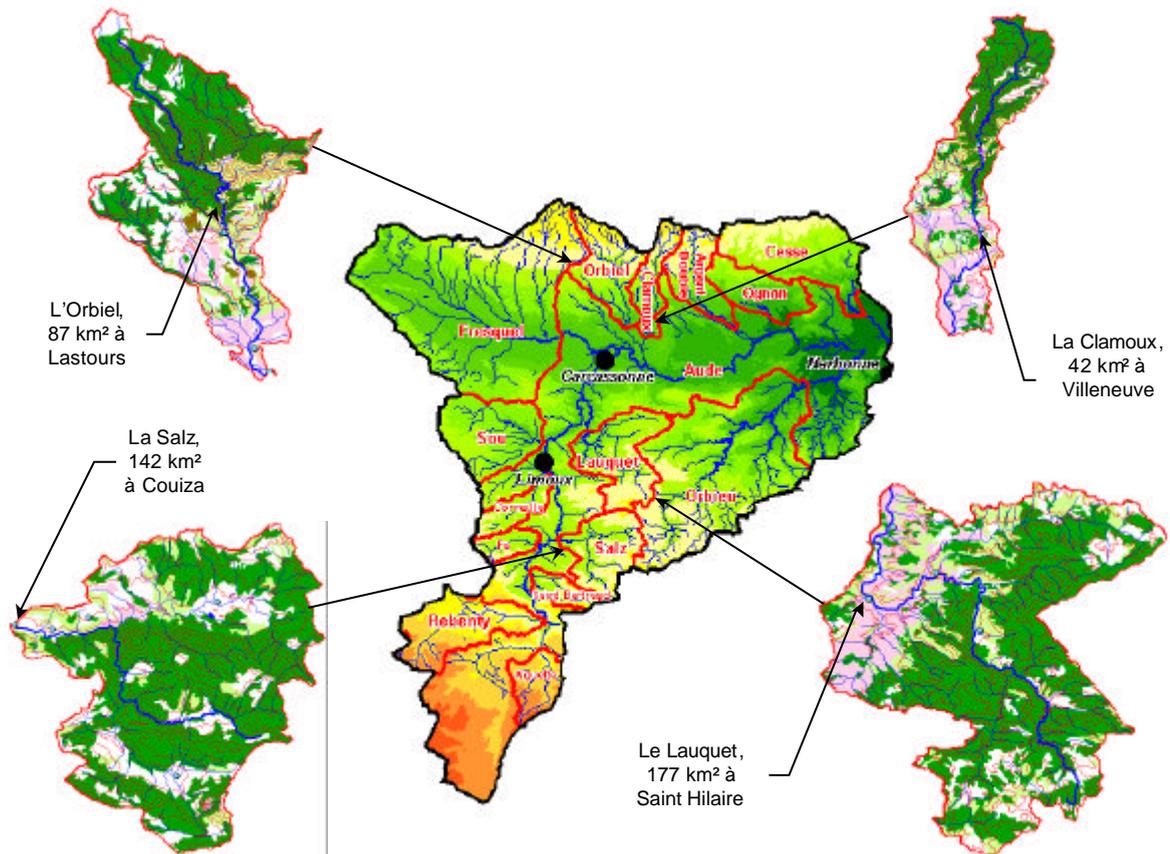


Figure 9 : Sites d'étude sur l'Aude

## III.2. Etat Général des Sources

Le repérage et l'identification des sources historiques (publications anciennes, documents manuscrits) ont été réalisés pour chacun des terrains d'étude dans les fonds d'archives nationaux, départementaux et locaux concernés. Compte tenu des attentes méthodologiques fixées par les hydrologues et les moyens engagés dans ce projet, la période des deux derniers siècles a été retenue comme principal champ chronologique de recherche. L'enquête a néanmoins intégré certains fonds du XVIII<sup>e</sup> siècle facilement accessibles en vue du repérage des événements hydrométéorologiques majeurs.

Une bibliographie générale sur l'hydrométéorologie des cours d'eau concernés est associée à cette liste de références. Cet Etat Général des Sources (EGS) a servi de base à la collecte des données. Il constitue au terme de l'enquête un outil de référence qui pourra être enrichie par les études historiques à venir.

### III.2.1. Bassins versant de l'Hérault et du Gard

En ce qui concerne les Gardons, la richesse des collections disponibles correspond à peu près à ce qui était attendu notamment pour les sources issues du service hydraulique au XIX<sup>e</sup> siècle. L'ensemble est comparativement nettement plus important ici que sur la rivière Hérault. A noter que le fonds des routes est également relativement riche en ce qui concerne les ouvrages d'art. Outre les relevés hydrométriques et pluviométriques journaliers aux stations, disponibles depuis la création officielle du service en 1892, les archives du Service Hydrométrique et d'Annonce des Crues (SHAC) conservées à la DDE du Gard ont permis de disposer, depuis le début du XX<sup>e</sup> s., d'un certain nombre de rapports annuels sur le fonctionnement du service avec, parfois, des détails sur l'état du réseau d'observation, l'installation ou le déplacement d'échelles de mesure, des notes de synthèse sur la situation hydrologique des bassins, des documents variés sur certaines crues (textes, profils, hydrogrammes, cartes, etc.).

Pour le bassin de l'Hérault, tous les fonds d'archives conservés aux AD34 à Montpellier et susceptibles de contenir des données de crues anciennes dans le secteur de Ganges à Gignac ont été inventoriés et dépouillés. C'est la série S en particulier (archives des Ponts et Chaussées de 1800 à 1940) qui s'avère la plus riche et la plus intéressante. G. Ferry a notamment pu exploiter toute une série de documents inédits appartenant à la liasse 3S 200, « documents statistiques sur le régime des eaux et les hauteurs des crues de 1869 à 1914 ». La DDE de l'Hérault, ainsi que les subdivisions de Ganges et de Clermont l'Hérault ont également été visitées pour compléter l'EGS. L'enquête s'est poursuivie au service hydraulique du Conseil Général, aux archives des Voies Navigables de France à Toulouse, à la DIREN. Des témoignages indubitables de l'existence de mesures sur l'Hérault et ses affluents sont donnés par des tableaux récapitulatifs des stations de jaugeage dépendant de la 5<sup>ème</sup> circonscription hydraulique (basée à Toulouse). Ces tableaux couvrent la période 1920 à 1944 et indiquent que des échelles de crue existaient sur la Vis, la Lergue, l'Hérault (Laroque, ...). Des jaugeages étaient effectués. Malheureusement, les données afférentes n'ont pu être retrouvées. En particulier, les relevés hydrométriques journaliers aux stations du service d'Annonce de Crue de la DDE 34, réalisés depuis la création du service en 1890 jusqu'à sa modernisation en 1968, ne se trouvent ni à la DDE, ni aux AD34, ni à la DIREN, ni à VNF Toulouse. Malgré les tentatives pour retrouver des doubles archivés ou rassemblés ailleurs, les recherches se sont avérées infructueuses et constituent une lacune importante,

même si d'autres sources permettent de disposer de données exploitables sur la période (notamment le tableau des hauteurs maximales de toutes les crues de 1890 à 1959 aux stations de Ganges et Gignac retrouvé à la DDE-subdivision de Ganges).

La disponibilité et la qualité des sources archivistiques utilisées au cours de cette recherche renvoient à l'histoire générale de l'aménagement et de l'occupation de l'espace fluvial. Il n'est pas dans notre intention de rentrer dans les détails de celle-ci, ce n'était pas l'objectif du programme. En revanche, nous souhaiterions donner quelques éclairages ponctuels plus en rapport avec le choix des sources utilisées.

Pour la période d'Ancien Régime - le XVIII<sup>e</sup> s. en particulier, deux acteurs publics principaux se partagent le terrain de la lutte contre les crues des Gardons. Les Etats du Languedoc tout d'abord qui assurent un suivi technique et comptable général des dossiers. Les délibérations des Etats fournissent de ce point de vue une trame chronologique sûre pour le repérage des principales crues destructrices et des grands projets et réalisations de travaux qui les ont suivis. Les rapports ou mémoires dressés à cette occasion par les ingénieurs des Etats apportent à partir des années 1740-1750 des descriptions de plus en plus fines des phénomènes hydrologiques en jeu et de leurs impacts sur le territoire. On citera en exemple les différents rapports rendus par l'ingénieur Henri Pitot sur la crue de septembre 1741 et les grands projets d'alignement et d'endiguement continu du Gardon qui ont suivi, notamment dans le secteur d'Alès. Ils seront suivis un peu plus tard par ceux de l'ingénieur Grangent. Les dispositifs techniques et juridiques avancés à cette époque (endiguement continu, fixation de seuils, servitudes, etc.) seront largement repris et développés tout au long du XIX<sup>e</sup> s., à travers notamment le contrôle assuré par les ingénieurs du service hydraulique départemental (cf. police de l'eau).

Les Etats du Languedoc n'assuraient pas en revanche la gestion financière directe et quotidienne des travaux de réparation ou d'aménagement. Elle était réalisée par l'administration du diocèse civil d'Alès. On retrouve dans ses archives les devis et procès verbaux de réception des ouvrages effectivement réalisés avec parfois cartes et plans à l'appui. A noter qu'aux Archives Départementales du Gard nombre de ces documents iconographiques ont été retirés de la consultation pour des raisons de conservation. On trouve néanmoins dans ces liasses une abondante correspondance provenant des riverains et des communautés d'habitants, les projets des ingénieurs ayant souvent donné lieu à des débats houleux. C'est le cas en particulier à Alès où, après 1750, les nouveaux alignements du Gardon vont avoir des conséquences importantes sur les niveaux et la capacité hydraulique des anciennes prises d'eau des moulins dont les canaux participaient à l'assainissement de la cité. Les projets des ingénieurs, plus peut être que les grandes crues elles-mêmes, participèrent à la transformation de l'économie hydraulique locale.

Les archives des communautés rendent compte aussi de ce contexte et fournissent certains éléments techniques complémentaires sur l'aménagement et les usages des berges, la surélévation ou le prolongement d'un quai, le confortement ou déplacement d'un pont, la reconstruction d'un seuil, etc.

Pour la période postérieure à 1800, les séries O et S des Archives Départementales sont les principales sources d'information, complétées pour le XX<sup>e</sup> siècle par celles disponibles dans les services. On sait l'importance du développement de la vicinalité en France au XIX<sup>e</sup> siècle

à partir notamment de la loi du 21 mai 1836. Dans le Gard comme dans l'Hérault, les Agents voyers assurent après 1850 un développement et encadrement minutieux de la petite voirie. Dans ce cadre, et grâce au financement relativement régulier assuré par le département et les communes, ils réalisent, entretiennent et transforment toute une série de petits aménagements à caractère hydraulique le long des chemins (gués, ponts, passerelles, digues, canaux et rigoles, etc.). Ces dossiers de réalisation ou d'entretien fournissent des témoignages précieux sur les crues destructrices (profils et cotes aux ouvrages). Dans le secteur de St-Jean-du-Gard, les épisodes d'octobre 1861, septembre 1890 ou encore octobre 1907 n'auraient pu être appréhendés sans les rapports dressés par les Agents voyers (sous série 30). La mobilisation, plus précoce, sur le réseau des Nationales et Départementales (décret de décembre 1811), fournit des données de nature comparable pour certains événements de la première moitié du XIXe siècle (1811, 1834, 1840).

On ne s'étonnera pas de retrouver dans les dossiers du Service Hydraulique la majeure partie des informations recherchées. L'encadrement et le suivi des questions touchant à l'eau prend une tournure nouvelle à partir de la fin des années 1840, où l'on assiste au sein de l'administration locale des Ponts et Chaussées à la création d'un premier service hydraulique. Ce dernier couvre à l'époque les trois départements du Gard, de l'Hérault et de l'Aude. La lutte contre les crues, notamment à travers la réalisation d'ouvrages d'endiguement, fait l'objet d'un suivi particulier dès les années 1830 dans un contexte général de très forte exploitation de la ressource hydraulique. D'un côté le monde agricole défend et cherche à étendre ses droits en matière d'irrigation, de l'autre une exploitation mécanique à vocation industrielle (cf. moulinage) connaît un fort développement dans et à proximité des principaux bourgs. Pour les Gardons, les compagnies minières introduisent par ailleurs un important changement d'échelle tant par les volumes d'eau mobilisés que par les conséquences directes de l'extraction du minerai sur l'espace fluvial lui-même (cf. pollutions, engravements par rejets de matériaux dans les lits, etc.). Les conflits entre usagers sont nombreux et les crues destructrices ont souvent été l'occasion pour les municipalités de dénoncer les abus. Ce fut le cas à Alès par exemple après la grande crue de septembre 1846, événement qui fut aussi l'occasion d'une première réflexion globale sur le développement de la cité le long du Gardon (loi de 28 mai 1858).

En ce qui concerne la surveillance des rivières contre les crues, compte tenu de la vitesse de propagation, les rivières cévenoles ont longtemps été dans l'impossibilité de pouvoir disposer d'une annonce efficace. Avant 1890, quelques échelles hydrométriques existaient le long de l'Hérault (cf. Ganges) et du Gard (cf. Ners), mais aucune observation systématique (hauteurs ou débits) n'était encore pratiquée. Elles furent mises en place à partir de la fin des années 1850 et servaient à enregistrer les hauteurs des événements remarquables. Mais rien encore de systématique, tout était laissé à l'appréciation des ingénieurs locaux. Si les événements de juin 1875 sur le bassin de la Garonne marquent un tournant dans l'organisation des services hydrométriques et d'annonce des crues (SHAC) à l'échelle nationale, dans la région cévenole c'est la crue de septembre 1890 qui va être l'événement accélérateur. Communes et administrations sont fortement mobilisées. A partir de l'été 1891, le premier réseau de stations hydrométriques est établi. Il comporte à l'époque 8 échelles (Collet-d'Eze, Alais, Ste-Croix-Vallée-Française, Mialet, St-Jean-du-Gard, Anduze, Ners, Remoulins) où vont être enregistrées journalièrement les hauteurs. Le dispositif est complété par quelque 16 stations pluviométriques. Les premières séries d'observations et les études menées par le service sur les dernières grandes crues vont rapidement permettre d'affiner les règlements de chaque

station. L'amélioration à compter de l'été 1892 des liaisons télégraphiques entre l'amont et l'aval du bassin va être décisive pour l'établissement d'une alerte efficace. Ce premier réseau technique d'observations ne va cesser d'être amélioré au fil du temps. Il est à l'origine des séries de données hydrométéorologiques mobilisées au cours de la présente recherche.

### III.2.2. Bassins versant Audois

L'enquête historique a été menée en utilisant les mêmes fonds d'archives que pour les bassins de l'Hérault et du Gard. Toutefois, à l'issue de cette enquête, nous savons maintenant que l'étude historique des petits cours d'eau pourra probablement à l'avenir être menée de façon plus efficace en privilégiant l'examen de certains de ces fonds, et en ciblant les cotes examinées en fonction du contexte rencontré.

L'état général des sources établi regroupe 652 cotes, réparties de la façon suivante:

Archives départementales: 419 cotes.

Archives Nationales: 89 cotes.

Archives de la DDE: 66 cotes.

Fonds M.PARDE: 46 cotes.

Fonds historique de l'ENPC: 20 cotes.

Bibliothèque Nationale de France: 12 cotes.

Cet EGS repose donc en grande partie sur les fonds des archives départementales. Toutefois dans ce type de reconstitution historique, l'apport d'un fonds d'archives ne peut réellement être évalué qu'à l'issue de la collecte et de l'analyse des documents présents. A ce titre le tableau 2 présente la répartition des cotes jugées dignes d'intérêt, et des références documentaires extraites de ces cotes (une cote d'archives ayant pu fournir plusieurs références documentaires) et finalement valorisées, tout d'abord pour établir un simple inventaire des dates de crues (Etape 2 : recueil des données), puis pour la reconstitution des débits de pointes de crue (Etape 3 : Analyse locale de crues).

Fonds documentaire	Nombre de cotes jugées dignes d'intérêt	Nombre total de références documentaires extraites	Nombre de références utilisées pour l'inventaire des crues (Etape 2)	Nombre de références utilisées pour les chroniques de débits (Etape 3)
Archives départementales de l'Aude	117	164	90	23
Archives de la DDE de l'Aude (SAC)	62	139	92	56
Archives Nationales	12	17	5	1
Bibliothèque Nationale de France	7	11	0	0
Fonds M.Pardé	20	38	7	2
Fonds historique de l'ENPC	4	8	0	0
<b>Total</b>	<b>222</b>	<b>377</b>	<b>194</b>	<b>82</b>

**Tableau 2 Répartition, par fonds documentaire d'origine, des cotes de l'EGS jugées dignes d'intérêt, et des références documentaires, extraites de ces cotes, puis utilisées pour l'inventaire des dates de crues (phase d'Analyse) et pour l'élaboration finale des chroniques de débits (phase de Traitement)**

A la lecture de ce tableau, il apparaît que dans le cas de petits cours d'eau étudiés, les fonds qui fournissent une grande majorité de l'information, sont les archives départementales et celles des services déconcentrés de l'Etat chargés de l'annonce des crues (DDE dans le cas de l'Aude). Les autres fonds investigués (Archives Nationales, Fonds historique ENPC, Fonds Pardé) ne s'avèrent pas totalement inutiles, mais fournissent généralement une information à caractère beaucoup trop général pour pouvoir être réellement valorisée dans le cas de l'étude de petits cours d'eau. Ces fonds peuvent cependant, de façon marginale, fournir quelques documents utiles à la reconstitution des chroniques de débits, et méritent à ce titre d'être examinés. Toutefois, dans un souci de gain de temps, il semble préférable de n'investiguer ces fonds que dans un deuxième temps, de façon à rechercher des informations éventuellement manquantes à l'issue de l'examen des archives départementales et des fonds des services déconcentrés de l'Etat. Il en est de même pour la presse: si un examen systématique de celle-ci ne semble pas constituer une source d'information exhaustive et précise, elle pourra intervenir en complément de façon à affiner et à compléter une première reconstitution historique.

L'examen des fonds d'archives des services locaux de l'Etat s'avère parfois très laborieux en raison de l'absence d'inventaires des documents présents. Mais cet examen semble malgré tout devoir être mené de façon poussée et sans trop chercher à sélectionner les documents examinés. En effet, en l'absence de réel classement, un mélange des dossiers et documents peut s'effectuer, et il paraît réellement utile, à l'issue de l'étude des quatre cours d'eau de l'Aude, d'examiner l'ensemble des documents présents, dans la mesure où le volume de ces fonds n'est pas réellement énorme (les 66 cotes identifiées à la DDE de l'Aude représentent l'ensemble des documents "anciens" qui ont pu être retrouvés, et la plupart d'entre eux ont fourni des références documentaires intéressantes). Pour l'anecdote, nous signalerons ici qu'un des plans les plus riches en informations n'a été retrouvé qu'à notre troisième visite à la DDE, alors que nous pensions avoir à peu près fait le tour de ce fonds. Tout ceci amène à s'interroger sur la fragilité de ce type d'archives. En l'absence de conservation organisée des documents, les risques de pertes et destructions à l'avenir paraissent importants.

La recherche aux archives départementales, pour sa part, semble pouvoir être ciblée sur certaines séries, ou parties de séries, en fonction du contexte rencontré. Il peut être rappelé ici qu'en l'absence de relevés réalisés au niveau des échelles de crue, la recherche doit s'élargir à l'ensemble des sections du cours d'eau pour lesquelles des documents (plans notamment), indiquant le niveau atteint par des crues historiques, pourraient exister:

L'examen de la série O (administration communale) par exemple ne semble s'avérer utile que lorsque le cours d'eau étudié est traversé par des ouvrages d'art, ou longé par des axes routiers n'appartenant pas au réseau national (les archives relatives au réseau national seront retrouvées dans la série S). Ainsi, un recensement préalable des ouvrages d'art et voies routières présentes permet de cibler rapidement les quelques cotes de la série O qui pourront s'avérer intéressantes. Dans le cas des quatre cours d'eau étudiés dans l'Aude, ces cotes concernaient généralement 3 à 4 communes, avec pour chacune d'entre elles 1 à 5 cotes relatives à la vicinalité (soit une dizaine de cotes au total). Parfois une à deux cotes concernant des voies départementales ont également été valorisées: la dénomination ancienne de ces voies a généralement été retrouvée dans les plans relatifs à la vicinalité communale, ce qui a facilité la recherche des cotes concernant ces voies.

Au sein de la série S (travaux publics), les fonds à examiner en priorité sont ceux issus du Service Hydraulique des Ponts et Chaussées. La richesse de ces fonds justifie qu'ils soient examinés en totalité. Dans le cas de archives départementales de l'Aude, ces fonds sont relativement aisément identifiables dans les inventaires car présentant des appellations assez évocatrices comme "Cours d'eau et Usines", "Navigation intérieure", "Police de l'eau", ou encore tout simplement "Service hydraulique". De plus, ces fonds présentent (toujours dans le cas des archives départementales de l'Aude) un classement par cours d'eau et par commune qui a permis de limiter de façon importante le nombre de cotes de l'EGS (élimination d'office des cours d'eau non étudiés ainsi que des communes trop éloignées de la zone d'étude, par exemple situées à l'extrême amont des cours d'eau étudiés). Au total, au sein de l'EGS les cotes issues du service hydraulique des Ponts et Chaussées représentent un total de 141 cotes. Ces cotes sont, du fait de leur quantité, de loin les plus lourdes à examiner, mais la richesse des informations qu'elles peuvent contenir justifie pleinement leur consultation.

Toujours au sein de la série S, les fonds issus du Service Ordinaire des Ponts et Chaussées, semblent, de la même façon que pour la série O, n'apporter une information utile qu'en fonction du contexte rencontré, et notamment de la présence, dans la zone d'étude, de grands axes de communication gérés par le Service Ordinaire et susceptibles d'être coupés ou endommagés lors des crues. Dans le cas des quatre cours d'eau que nous avons étudié, seule la Salz était dans ce cas (présence du pont de la RD118, ancienne RN118, à l'extrême aval de la zone d'étude).

Enfin les autres séries (notamment M,W, et séries relatives aux ouvrages reliés) doivent également être examinées mais la recherche dans ces séries a semblé moins laborieuse dans la mesure où les cotes pouvant se rapporter aux catastrophes naturelles et / ou aux cours d'eau étudiés se sont avérées relativement limitées en nombre. L'information apportée par ces séries est de plus restée très marginale. Il est d'ailleurs inquiétant de constater le faible nombre de documents d'intérêt présents dans les versements récents (série W).

### **III.3. Conclusion**

Sur les bassins versants de l'Hérault et du Gard, la collecte des données hydrométéorologiques anciennes a été menée à partir de la visite de trois ensembles documentaires principaux. Elle a conduit à un EGS fourni en annexe.

Pour tout ce qui concerne le suivi événementiel des crues, le repérage des lignes d'eau, la connaissance topographique des sites, etc., les Archives Départementales restent les principaux pourvoyeurs d'informations. L'accessibilité des documents n'a posé ici aucun problème particulier.

La consultation des archives encore conservées dans les services des Directions Départementales de l'Équipement s'est avérée en revanche plus problématique. Ainsi, il apparaît aujourd'hui presque certain que l'ensemble des archives de l'annonce des crues de l'Hérault, notamment toutes les séries hydrométriques de la période 1890-1980 ont disparu au cours des vingt dernières années. Après avoir craint une situation analogue sur le bassin du Gard, la mise à disposition des archives de l'ancien SHAC a permis de récupérer l'ensemble des relevés hydrométriques journaliers, ainsi qu'un certain nombre d'autres données.

Les Archives Nationales (Centre Historique et Centre Contemporain) ont apporté relativement peu de choses essentielles en matière de données techniques de terrain. Elles disposent en

revanche de dossiers administratifs généraux sur la mise en place et le développement des services dépendant des Travaux Publics, notamment sur l'Annonce des Crues. A noter que les collections de relevés pluviométriques originaux gardées au Centre des Archives Contemporaines à Fontainebleau restent à ce jour encore incommunicables pour raison technique. Le travail d'inventaire et de numérisation des données météorologiques anciennes actuellement en cours à Météo-France devrait apporter un gain notable de données pluviométriques sur la période postérieure à 1863.

Sur les quatre cours d'eau Audois, la reconstitution historique des crues sur de petits cours d'eau ne semble reposer que sur un nombre de références documentaires limité, et dont la provenance est assez facilement identifiable en fonction du contexte rencontré. L'étude de nouveaux cours d'eau dans l'Aude s'avèrerait probablement beaucoup plus rapide si elle était entreprise aujourd'hui. Le nombre de cotes à consulter pour un résultat complet ne semble pas devoir excéder la soixantaine par cours d'eau.

## IV. Recueil des données

Rappelons que pour des raisons de disponibilité et de qualité des données, l'enquête a avant tout porté sur la période postérieure à 1800. Avant cette date, les données topographiques, hydrométriques et hydrologiques existent mais restent peu nombreuses, parcellaires et de qualité souvent douteuse. Elles ne permettent pas de réaliser les analyses hydrauliques envisagées par les hydrologues dans le cadre de la démarche proposée. En revanche, la description qualitative des événements et leur classement par ordre d'importance peuvent apporter des éléments aux analyses statistiques.

Les données sont regroupées en deux catégories :

i) données topographiques : elles visent à décrire les sections d'écoulements du cours d'eau et son profil en long

ii) données hydrométriques : elles concernent toutes les informations permettant de décrire le niveau atteint par les crues et les informations relatives à l'historique des échelles limnimétriques

Les deux paragraphes qui suivent synthétisent le type de données topographiques et hydrométriques disponibles, pour les périodes récente et ancienne, et la critique dont ces données ont fait l'objet.

Enfin un dernier paragraphe présente de manière plus détaillée les informations collectées sur bassin versant d'Anduze à Anduze, on trouvera en annexe le recueil détaillé et la critique de données pour les autres secteurs.

### IV.1. Données topographiques

#### IV.1.1. Données récentes disponibles

Les profils en longs des profils récents ont été levés entre 1948 et 2006. Certains ont été levés pour les besoins de bureaux d'études qui nous les ont transmis directement et d'autres ont été conservés et fournis ; ils ont servi de base aux reconstructions topographiques et ont été complétés par des levés récents faits par le CEMAGREF pour les besoins de cette étude. Ils sont présentés par bassin dans le tableau ci-dessous (Tableau 3).

Rivière	Stations	Superficie du BV	Origine de la topographie	Type	Date des levés	Linéaire	Distance entre les profils
Gardons	Toutes	—	Service des Grandes Forces Hydrauliques	Fil d'eau	1948	Total	Variable
Gardon de Saint-Jean	Saint-Jean du Gard	154 km <sup>2</sup>	Cabinet de géomètres Richer	Radier		565	Variable
—	—	—	SIEE - "Validation des relevés hydrométriques de l'événement des 8 et 9 septembre 2002" à l'attention de la DDE 30		2002	600 m	40 m
Gardon de Mialet	Mialet	219 km <sup>2</sup>	Cemagref de Lyon - campagne topographique pour les besoins de l'étude		2006	2 000 m	150 m

Gardon d'Alès	Alès	320 km <sup>2</sup>	BCEOM	Radier	1992	6 350 m	Variable
—	—	—	DDE 30	Fil d'eau	1996	14 820	Variable
—	—	—	Coyne et Bellier	Radier	1985	34 350 m	Variable
—	—	—	DDE 30	Radier	2003	8 000 m	300 m
Gardon d'Anduze	Anduze	542 km <sup>2</sup>	CERIC	Fil d'eau	1974	18 825 m	Variable
—	—	—	Coyne et Bellier	Radier	1985	22 300m	Variable
—	—	—	DDE 30	Fil d'eau	1996	14 290 m	Variable
—	—	—	SIEE - "Validation des relevés hydrométriques de l'événement des 8 et 9 septembre 2002" à l'attention de la DDE 30 + Cemagref de Lyon - campagne topographique pour les besoins de l'étude		2003 + 2006	2 000 m	100 m
Hérault	Toutes	—	Service des Grandes Forces Hydrauliques	Fil d'eau	1921	Total	Variable
Hérault	Ganges	756 km <sup>2</sup>	SIEE - PPRI à l'attention de la DDE 34		2000	4 000 m	300 m
Hérault	Gignac	1312 km <sup>2</sup>	BCEOM - "Etude des crues de l'Hérault" à l'attention de la DDE 34		1999	7 000 m	300 m

**Tableau 3 : synthèse des données topographiques récentes collectées.**

NB : les profils des Grandes Forces Hydrauliques ont nécessité des conversions altimétriques pour les rendre compatibles avec le réseau de nivellement actuel

#### **IV.1.2. Données anciennes extraites des archives (sources antérieures à 1950)**

Les profils topographiques anciens ont permis de préciser l'évolution du lit dans chaque section étudiée depuis le milieu du XIX<sup>e</sup> siècle. Les plus anciens remontent à 1847 pour le site d'Alès et à 1849 pour le site d'Anduze. Quelques données topographiques ponctuelles existaient pour la fin du XVIII<sup>e</sup> siècle. On expose ici les principes de reconstitution que nous avons suivis.

Types de sources anciennes exploitées :

Les levés topographiques faits au XIX<sup>e</sup> siècle par les ingénieurs des Ponts et Chaussées (profils en long et profils en travers). Ces profils renseignent surtout sur la période 1850-1920. Par la suite, ce type de documents tend à disparaître des dossiers. Ces documents comportent parfois la cote PHE d'une crue historique qui a précédé de quelques années la date d'établissement des plans. Dans le cas des petits cours d'eau de l'Aude, ces documents ont parfois permis, à eux seuls, d'estimer le débit de pointe de la crue.

Des indications topographiques en altitudes relatives, données par rapport à des points de repère fixes dans des descriptions d'ouvrages. Ces données concernent la fin du XVIII<sup>e</sup> siècle. Les rapports ou lettres indiquant l'altitude du zéro des échelles hydrométriques.

Les relevés hydrométriques journaliers faits depuis 1892, qui permettent aussi de détecter des variations altitudinales du zéro de l'échelle.

#### IV.1.3. Critique et normalisation des données anciennes et récentes

La reconstitution des profils en long et en travers des sections étudiées est capitale pour l'estimation des débits dans la mesure où des variations importantes de la cote du fond du lit ont une influence sur la ligne d'eau des crues. Toutefois les sources utilisées ne sont pas homogènes : les profils en long et les profils en travers correspondent soit à l'altitude du fond du lit, soit l'altitude du *fil d'eau*, c'est-à-dire de l'étiage. Il convient donc de justifier certains choix méthodologiques.

On a considéré que, en dehors des sections comprenant une retenue d'eau, l'altitude de l'étiage et celle du fond du lit pouvait être confondues dans la mesure où les lits des rivières cévenoles connaissent des écoulements très faibles en été. Néanmoins, dans les cas où les documents le permettaient, les deux profils ont été figurés. La comparaison, dans ces cas, montre que la différence n'excède jamais 0,5 m ce qui peut être considéré comme négligeable pour l'écoulement des crues.

Les profils topographiques expriment les altitudes en fonction du réseau de nivellement en vigueur au moment où ils ont été levés. Le nivellement topographique de la France a connu trois réseaux caractérisés par un zéro de référence différent (le niveau moyen des eaux dans le port de Marseille). Ces trois réseaux sont successivement celui de Bourdalouë, en vigueur entre 1857 et 1892, celui de Lallemand, dit orthométrique, en vigueur entre 1892 et 1969 et celui de l'IGN, dit IGN69 ou normal, valable depuis 1969 (Landon, 1999).

En conséquence, il est nécessaire de transformer les altitudes figurant sur les profils anciens pour pouvoir les confronter à des profils levés depuis 1969. On utilise pour cela un tableau de conversion. Sur l'ensemble de notre secteur d'étude, il faut retrancher selon les sites de -10 à -15 cm aux altitudes Bourdalouë pour obtenir les altitudes orthométriques et ajouter 5 à 10 cm pour passer du système Lallemand aux altitudes normales. Pour les reconstitutions topographiques, on a appliqué les corrections altimétriques suivantes, en utilisant le tableau de conversion donné par l'IGN (<http://www.ign.fr> lien : grille de conversion des altitudes) et N. Landon (1999) ; par exemple pour Anduze, feuille 2841 :

- conversion des altitudes Bourdalouë en altitudes Lallemand : soustraction de 0,20 m aux altitudes Bourdalouë ;
- conversion des altitudes Lallemand en altitudes IGN69 : ajout de 0,07 m aux altitudes Lallemand ;

Ce qui correspond, pour Anduze, à une soustraction de 0,13 m pour passer des altitudes Bourdalouë aux altitudes IGN69.

Les profils exprimés en altitude relative, qui sont monnaie courante en particulier dans la première moitié du XIX<sup>ème</sup> siècle, ne peuvent être rattachés aux échelles hydrométriques (à moins qu'ils indiquent leur position). Mais ils peuvent cependant être valorisés lorsqu'ils indiquent la ligne d'eau d'une crue. C'est ce type de document, pour l'essentiel, qui a été valorisé pour la reconstitution des débits de crue sur les cours d'eau Audois de petite taille.

Enfin, on doit ajouter que certaines données produites sous l'Ancien Régime ont nécessité une conversion dans le système métrique pour être exploitées. Le tableau ci-dessous donne le mode de conversion pour les mesures locales (unités du Languedoc).

Toise	Pied	Pouce	Ligne
194,9 cm	32,483 cm	2,707 cm	0,2256 cm

**Tableau 4 : tableau de conversion des mesures locales**

#### **IV.1.4. Méthode de reconstruction des profils — Généralités.**

L'ensemble des données topographiques a été converti en altitudes normales.

Le profil topographique qui a servi de base de travail est celui des Grandes Forces Hydrauliques (levé dans le bassin du Rhône entre 1921 et 1949). Pour nos secteurs, les levés datent de 1948 sur le Gard et 1921 sur l'Hérault, les altitudes indiquées sont celles du fil d'eau (étiage) et les points kilométriques sont exprimés à partir de l'aval (la confluence avec le Rhône pour les Gardons, ou l'exutoire en mer pour l'Hérault).

La méthode de recalage des profils disponibles pour un secteur consiste à déterminer un point d'ancrage (point kilométrique, en abscisse, ou altimétrique, en ordonnée) qui permette de rattacher chaque profil au profil de base. Le travail est aisé pour les données topographiques exprimées par rapport à un des trois réseaux de nivellement. Il est en revanche plus délicat de traiter les données exprimées en hauteurs relatives. Il convient alors de déterminer un point d'ancrage qui soit à la fois kilométrique et altimétrique. Les ouvrages d'art présents sur la longueur des profils (parapets des ponts, cordon des quais, couronnement des seuils de prise d'eau ou des barrages) peuvent être utilisés à cette fin, à condition de disposer de bonnes connaissances historiques à leur sujet (éventuels rehaussements ou déplacements au cours du temps). La critique de ces données et les choix seront exposés séparément pour chaque section d'étude.

La compilation de ces données topographiques permet de mettre en évidence les fluctuations altitudinales du fond du lit dans chaque secteur.

Dans l'ensemble, sur la période allant de 1845-1850 à nos jours, les lits des cours d'eau sont marqués par un enfoncement du fond du lit qui dépasse trois mètres en certains secteurs. Le phénomène correspond à une incision du matériau alluvial caillouteux et à sa vidange progressive à partir du moment où les apports sédimentaires aux chenaux se sont taris dans les bassins versants. Comme dans la plupart des cours d'eau du bassin versant du Rhône, le processus paraît irréversible à partir des années 1950.

Une analyse des données topographiques et hydrométriques permet parfois de déterminer plus finement des périodes caractérisées par une altitude du fond du lit. Pour chaque période, une courbe de tarage (relation hauteur-débit) peut être proposée. Les données hydrométriques, en particulier les variations du zéro des échelles limnimétriques, ont servi à déterminer les bornes chronologiques de ces périodes. Les décrochements du niveau d'étiage qui apparaissent pérennes dans le temps, dans la chronique des débits de 1892 à nos jours, peuvent ainsi être interprétés comme un abaissement durable du fond du lit.

## **IV.2. Hydrométrie – hydrologie**

Les données hydrométriques et hydrologiques recueillies étaient hétérogènes et diversement exploitables. Nous donnons ci-dessous une présentation synthétique des données disponibles et de leur exploitation.

### IV.2.1. Sources disponibles et données extraites

Il s'agit :

- i) des mentions d'événements hydrologiques (crues inondations) qui ont servi à dresser une chronique des événements en complétant notamment la base de donnée disponible à la DDE du Gard (Antoine et Desailly).
- ii) des cotes de PHE (plus hautes eaux) atteintes par des événements anciens et indiquées dans des dossiers déposés aux archives.
- iii) des informations relatives à la fixation et des échelles limnimétriques et à leur éventuel déplacement ultérieur.
- iv) des relevés hydrométriques journaliers faits depuis 1892, qui permettent aussi de détecter des variations altitudinales du zéro de l'échelle.

### IV.2.2. Critique des données

Les cotes de PHE des événements anciens doivent être considérées de plusieurs manières. Les cotes pour lesquelles une indication d'altitude est disponible doivent être corrigées en fonction du système de nivellement auquel elles se rattachent. Les opérations sont les mêmes que celles qui ont été exposées plus haut pour les profils topographiques.

Les cotes données en altitudes relatives doivent être recalées en fonction d'un point de repère encore existant. C'est le cas de quelques indications trouvées dans des dossiers datant de la fin du XVIII<sup>e</sup> siècle. Il est aussi nécessaire de corriger les cotes en fonction des éventuels changements constatés aux échelles limnimétriques. Ces conversions seront exposées en détail pour chaque section étudiée.

Les cotes indiquées de manière qualitative, du type « *eaux ayant dépassés le niveau du quai* » ou « *eaux par-dessus le parapet du pont* » ne peuvent pas être utilisées pour la reconstitution des valeurs de débits mais peuvent être indicatrices de la fréquence de dépassement de certains seuils. C'est par exemple le cas de la crue de 1815 à Alès, dont les eaux sont réputées avoir dépassé la hauteur des ponts.

## IV.3. Exemple du gardon d'Anduze à Anduze

### IV.3.1. Topographie et reconstitution de l'évolution verticale du lit

*Sources utilisées pour la topographie et les PHE anciennes à Anduze*

On a récapitulé dans le tableau suivant les sources utilisées pour la topographie ancienne à Anduze.

Références	Date	Informations
AD30 7 S 596	1849	Topographie
AD30 7 S 284a	1861	Topographie + PHE crue de 1861
AD30 3 O 847	1910	Topographie + PHE crue de 1861
AD30 C 117	1781	Topographie 1773 + PHE crue de 1768

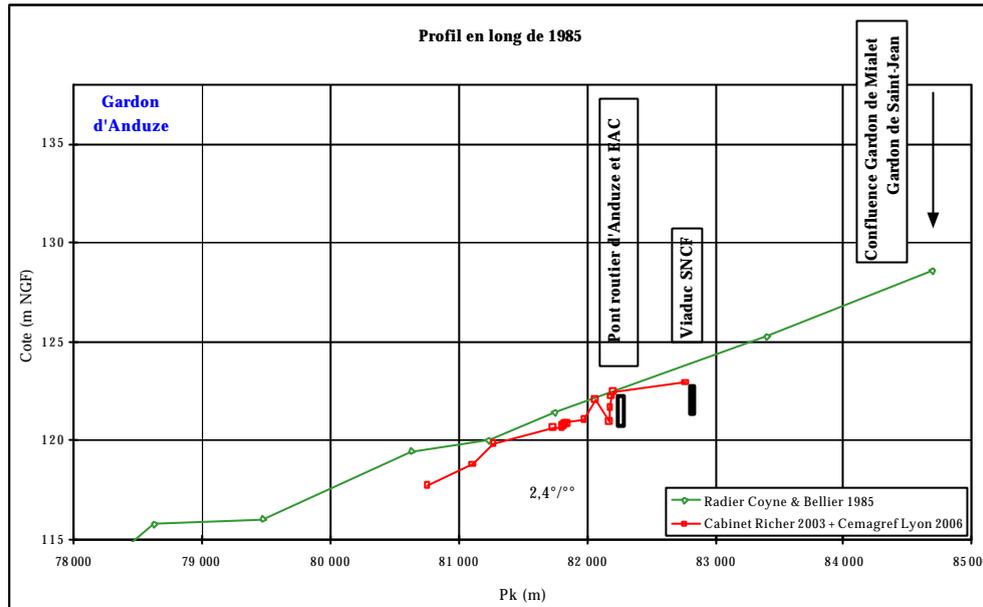
**Tableau 5 : source pour la topographie ancienne à Anduze**

On dispose d'un petit nombre d'informations anciennes pour ce secteur, mais la ligne d'eau d'étiage de 1849 est de très bonne qualité.

*Profils en long du lit à Anduze : critique des données*

La *Figure 10* présente le profil en long de 1985 du Gardon d'Anduze à Anduze. La topographie récente y a été reportée.

Le profil en long reconstitué, datant de 1985, nous informe sur le niveau général du fond du lit à cette époque. Cependant, les points qui forment cette courbe sont relativement espacés (de l'ordre du kilomètre), ce qui limite l'interprétation en ce qui concerne l'évolution précise du fond du lit (présence éventuelle d'un seuil en 1985 par exemple). De plus, il résulte de ce graphique qu'au niveau du tronçon d'étude d'Anduze, le fond du lit a baissé d'un mètre en moyenne de 1985 à 2003 (et 2006).



**Figure 10. Profil en long du Gardon d'Anduze à Anduze – 1985**

Les conclusions que l'on peut tirer de ce type de données sont complétées par les données hydrométriques anciennes que l'on a pu récolter ; les données topographiques des documents anciens sont souvent accompagnées d'informations sur les lignes d'eau d'étiage.

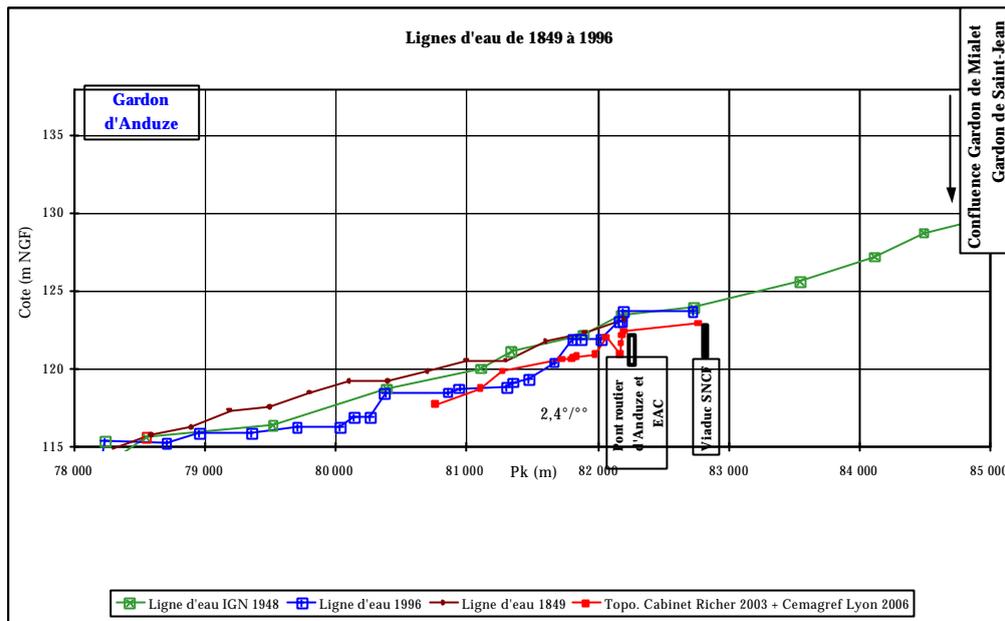


Figure 11. Lignes d'eau reconstituées du Gardon d'Anduze à Anduze de 1849 à 1996

Les lignes d'eau d'étiage (Figure 11) ont un rôle important car en plus de nous informer sur la présence éventuelle d'un ouvrage, elles peuvent également nous renseigner sur le profil en long de la rivière lorsque la topographie est manquante. La topographie récente y a été reportée (linéaire rouge).

Nous constatons que les lignes d'eau d'étiage de 1849 et de 1948 sont très proches. En étiage, peu d'eau s'écoule dans les petites rivières telles que les Gardons et les lignes d'eau d'étiage sont représentatives du fond du lit. On considérera donc que la topographie a peu varié de 1849 à 1948 et un modèle numérique « ancien » sera développé pour cette période. De même, la ligne d'eau d'étiage de 1996 est proche de la topographie actuelle. Le modèle « récent » concernera alors la période allant de 1996 à 2006.

La Figure 12 est obtenue en superposant les données des Figure 10 et Figure 11: On s'aperçoit que la topographie de 1985 est située entre les deux grandes périodes définies ci-dessus. A défaut de plus d'informations, nous considérerons que cette date est la date de transition entre la période « ancienne » et la période « récente ». Plus précisément, les débits des crues datant de 1849 à 1985 seront reconstitués à l'aide du modèle « ancien » et les débits de crues étant survenues de 1985 à 2006 seront reconstitués grâce au modèle « récent »

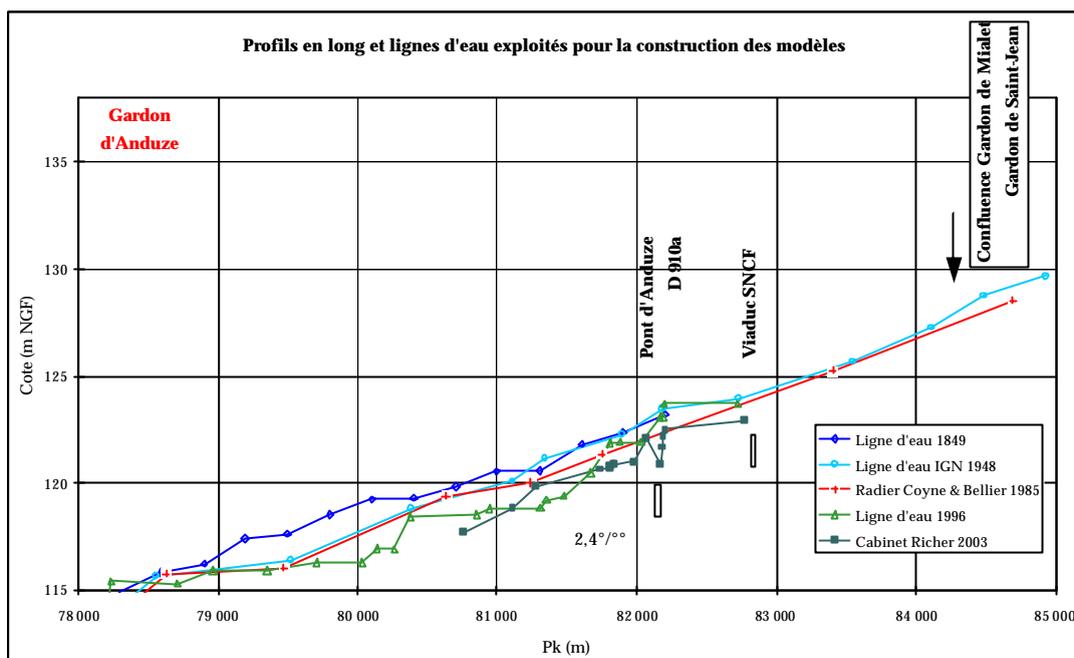


Figure 12. Données anciennes exploitées pour la construction des modèles numériques - Gardon d'Anduze à Anduze

### IV.3.2. Données hydrométriques à Anduze

#### *Rattachement des échelles d'annonce des crues au nivellement général*

Les données recueillies permettent une synthèse de l'évolution du zéro d'échelle à Anduze :

- i) En 1892, l'échelle d'annonce de crue DDE a été installée sur la face aval du pont routier d'Anduze, l'altitude du zéro de l'échelle (Z0) étant de 124,16 m NGF (source : rapport de L. Bianciotto).
- ii) En 1924, l'échelle a été remplacée et Z0=124,04 m NGF (source : DDE 30, divers rapports).
- iii) Le 27 novembre 1952, une nouvelle échelle a été mise en place mais aucune information n'est donnée sur l'altitude du zéro (source : fichier des cotes hydrométriques).
- iv) Le 23 juin 1971, l'échelle a été remplacée après avoir été emportée par une crue le 14 juin 1971, mais aucune précision n'est donnée sur l'altitude du zéro (source : fichier des cotes hydrométriques).
- v) L'échelle a été restaurée en 1997 ; avant sa restauration l'altitude du zéro est donnée à 123,92 m NGF (source : DDE 30).
- vi) Après cette restauration, l'altitude du zéro est 123,87 m NGF (source : DDE 30).

#### *Hauteurs d'eau enregistrées depuis 1892 à l'EAC d'Anduze*

L'étude des hauteurs d'eau enregistrées depuis 1892 ne permet pas de préciser la date des changements d'échelle. En principe, on devrait voir apparaître des cassures dans le graphique et un relèvement relatif des cotes des plus basses eaux puisque l'échelle n'a cessé de s'abaisser durant la période. Mais ce n'est pas le cas. Aucune cassure n'apparaît en 1924, à la date du premier changement. Il faut mentionner en outre que les observateurs ne notaient pas les valeurs négatives entre 1896 et 1952, ce qui ne facilite pas l'interprétation.

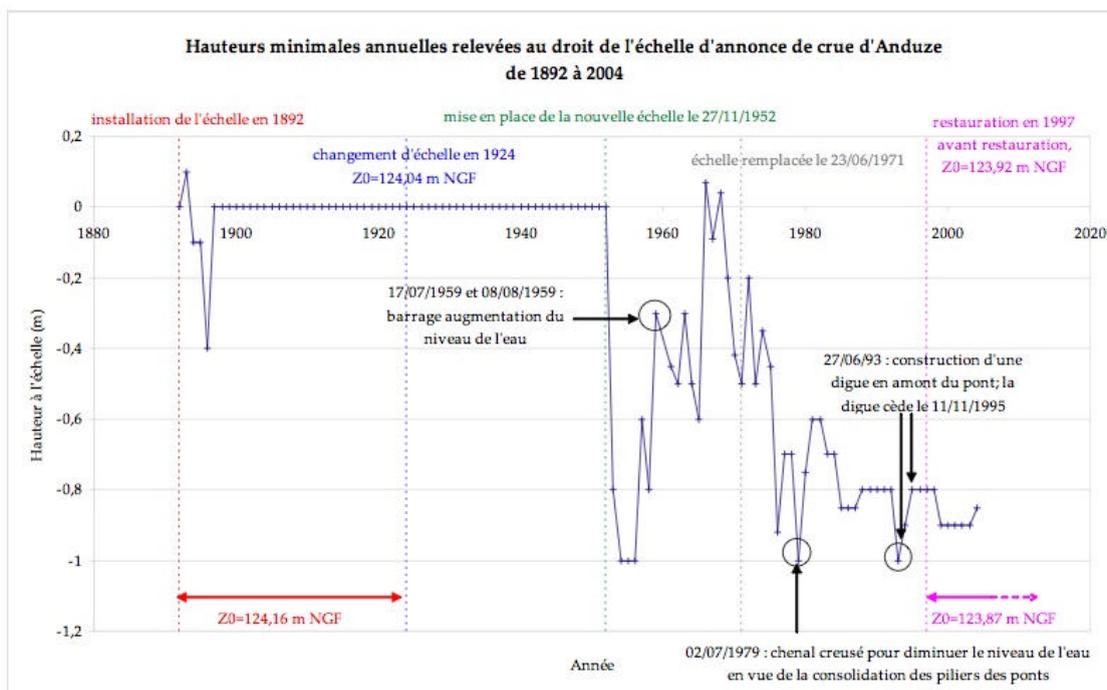


Figure 13 : Hauteurs minimales annuelles relevées à l’EAC d’Anduze, entre 1892 et 2006 — source K. Pobanz, 2006.

En revanche, l’analyse de ces hauteurs d’eau confirme la tendance du lit à l’enfoncement puisque malgré l’abaissement de la cote du zéro de l’EAC, les cotes minimales annuelles tendent aussi à s’abaisser sur la période considérée.

*Hypothèses faites sur l’altitude du zéro d’échelle*

Il s’agit de déterminer à quelle date l’altitude du zéro de l’échelle est passée de 124,04 m NGF (valeur de 1924) à 123,92 m NGF d’altitude (valeur avant la restauration de 1997).

Deux changements d’échelle ont été effectués entre ces deux dates :

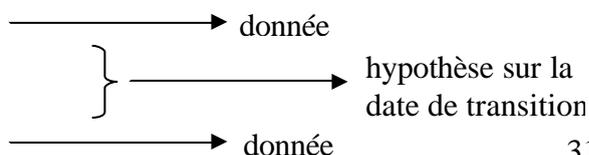
- le premier a eu lieu le 27/11/1952 ; l’interprétation des informations de cette période est délicate puisque les valeurs négatives n’ont pas été relevées par l’observateur avant le changement d’échelle.
- le second s’est produit le 23/06/1971 ; aucune « cassure » dans les valeurs des hauteurs relevées (maximales journalières et minimales annuelles) n’est visible et la modification du zéro de l’échelle n’aurait a priori pas été voulue puisque le changement est survenu après que l’échelle ait été emportée par une crue.

Cette dernière remarque nous laisse supposer que la modification de l’altitude du zéro d’échelle s’est effectuée lors du premier changement le 27/11/1952.

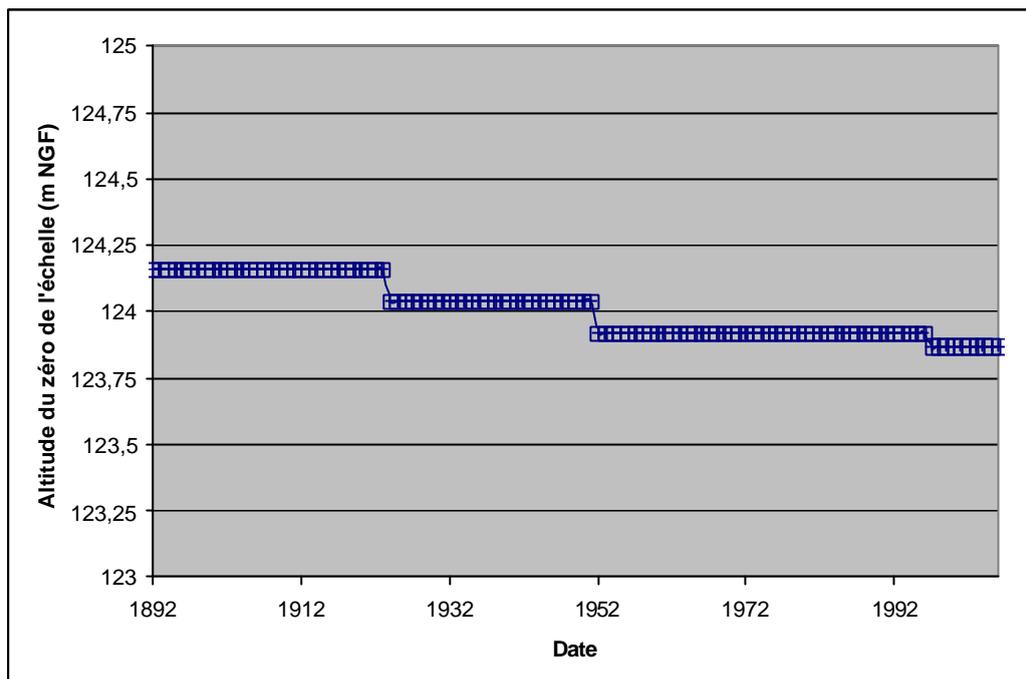
Le graphique des hauteurs minimales annuelles relevées à l’échelle ne nous donne aucune information supplémentaire en ce qui concerne l’altitude des zéros d’échelle.

**Synthèse des valeurs prises en compte pour la suite de l’étude**

de 1892 à 1924, Z0=124,16 m NGF  
 de 1924 au 27/11/1952, Z0=124,04 m NGF  
 du 27/11/1952 à 1997, Z0=123,92 m NGF



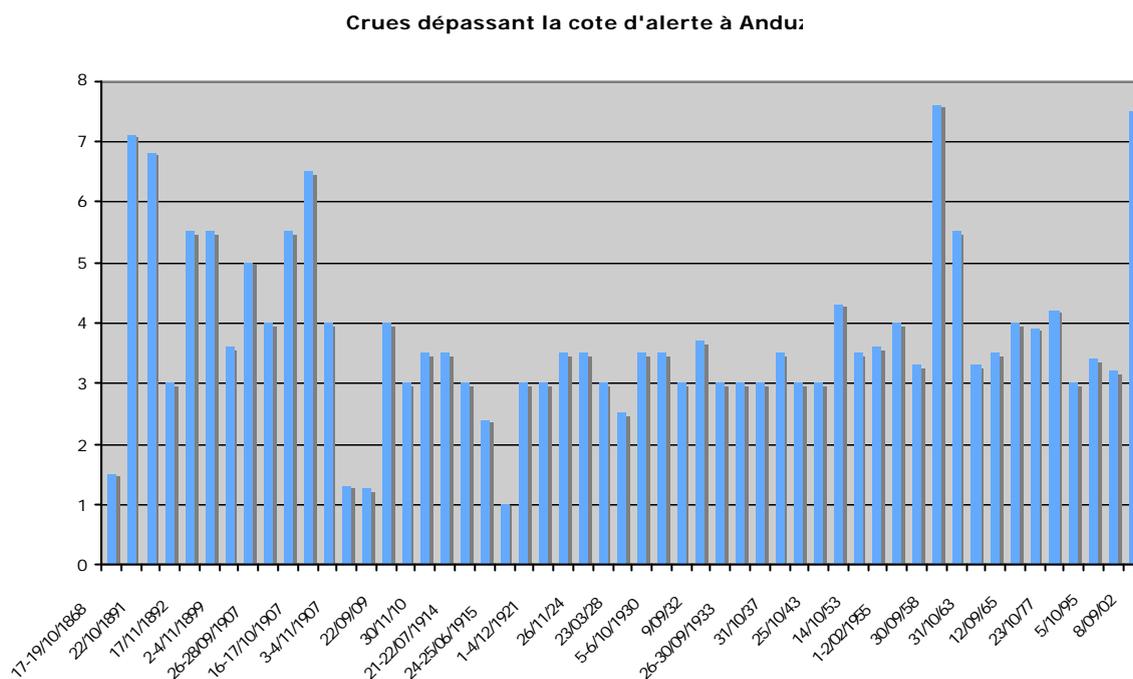
de 1997 à 2006, Z0=123,87 m NGF



**Figure 14 : Evolution de l'altitude du Zéro de l'échelle d'annonce des crues d'Anduze entre 1892 et 2006. Les altitudes ont été normalisées dans le système de nivellement actuel. Les deux lignes indiquent les hypothèse haute et basse pour les cotes entre 1924 et 1948**

### *Crues anciennes à Anduze*

L'ensemble des crues dépassant la cote d'alerte et enregistré sur les Gardons aux stations d'Alès, d'Anduze, de Saint-Jean-du-Gard et de Mialet a été répertorié dans un tableau général donné en annexe. Nous donnons ci-dessous un graphique de ces crues historiques à Anduze.



**Figure 15 : Hauteur des crues dépassant la cote d'alerte (3 mètres) à Anduze.**

#### *Hiérarchisation des crues majeures du Gardon à Anduze*

On a classé les principales crues par ordre d'importance décroissante.

Date	H. en mètres	Cote en NGF
30 septembre 1958	7,6	131,54
9 septembre 2002	7,5	131,37
22 septembre 1890	7,1	131,33
16 octobre 1907	6,5	130,73
9 octobre 1907	5,5	129,73
4 octobre 1958	5,5	129,44
28 septembre 1900	5	129,23
10 novembre 1951	4,3	128,24

**Tableau 6 : hiérarchisation des crues sur le gardon d'Anduze à Anduze à partir des cotes.**

#### **IV.4. Conclusion.**

L'accueil favorable dont nous avons bénéficié auprès des administrations et bureau d'étude nous a permis de construire les modèles topographiques et de collecter les données hydrométriques pour la période actuelle. Les données anciennes collectées sont plus denses sur les bassins du Gard, du fait de l'existence des chroniques de hauteurs depuis la création du SAC. Sur l'Hérault ces données n'ont pu être retrouvées. D'importantes incertitudes subsistent sur le niveau des crues à cause de l'historique des échelles de crues qui n'est souvent que partiellement reconstitué. Les données hydrométriques collectées pour chaque secteur, ainsi que les incertitudes qui les entachent, figurent dans une base de données libre

d'accès sur le site RDT. Pour les secteurs du Gard, elles comprennent deux fichiers : le premier contient une chronique des crues avec les hauteurs des crues, le second est un classement qualitatif des crues, incluant aussi les crues pour lesquelles aucune information sur les cotes atteintes n'a pu être retrouvé. Sur l'Hérault est fournie une chronique des crues pour lesquelles une cote a pu être retrouvée. Suivant les secteurs, 127 à presque 250 crues ont été collectées, pour la plus part, des cotes ont pu être reconstitué (Tableau 7 ). La majorité concerne le XIXe et le XXe siècle, peu de cotes ont pu être reconstituées avant 1800.

	Alès	Anduze	St Jean du Gard	Mialet	Ganges	Gignac
Nombre de crues dont la cote NGF a pu être estimée	177	213	116	172	185	199
Nombre de crues caractérisées uniquement par une information qualitative	34	36	11	8	--	--
Crue la plus ancienne répertoriée	1604	1741	1745	1745	1733	1812

**Tableau 7 : nombre de crues collectées pour chaque secteur.**

Ces données sont exploitées pour l'analyse locale des crues.

## **V. Analyse locale des crues**

### **V.1. Reconstitution hydraulique des débits de crue**

Le traitement probabiliste des crues ne peut se faire directement sur la chronologie des hauteurs maximales. En effet, en raison du fonctionnement général des cours d'eau (évolution de la topographie) et des aménagements liés aux activités humaines, deux cotes de crues identiques ne sont pas forcément garantes de phénomènes d'intensité équivalente. Il faut bien comprendre que la hauteur d'eau est un paramètre très sensible, exploitable uniquement dans le contexte d'un état donné et invariant de la topographie. A l'inverse, le débit, une fois reconstitué, n'est pas influencé par des modifications éventuelles de la topographie. Il pourra par ailleurs être plus facilement transféré ou comparé spatialement, alors que les cotes d'inondation peuvent fortement varier d'amont en aval.

La série des débits reconstitués sera alors traitée par un modèle probabiliste, en vérifiant le caractère stationnaire des propriétés de l'échantillon. L'analyse hydraulique permet d'intégrer la connaissance sur l'évolution du lit de la rivière (incision, exhaussement), la réalisation de modifications sur les ouvrages hydrauliques (barrages, digues, seuils, ponts ...) ou d'aménagements situés dans le lit majeur et pouvant modifier les conditions d'écoulement hydraulique.

#### **V.1.1. Cas des bassins de l'Aude**

Compte-tenu du faible volume d'informations collectées pour un site unique, l'estimation des débits des crues historiques a été entreprise au sein d'une "zone d'étude", constituée d'un tronçon de quelques kilomètres de long pour chaque cours d'eau étudié. De ce fait, la surface drainée n'est pas tout à fait homogène au sein des séries de débits de crues historiques finalement obtenues, ce qui nous a obligé à travailler sur des valeurs "normées" de ces débits. La variable de normalisation retenue est le débit pseudo-spécifique ( $Q/S^{0.8}$ ). Les estimations

de débit ont été réalisées à partir d'informations locales, généralement fournies par des plans d'archives, concernant la section d'écoulement et la pente de la ligne d'eau de la crue (ou à défaut du fond du lit). Les vitesses moyennes d'écoulement ont été dans chaque cas estimées en se basant sur les ordres de grandeur donnés par les formules de Manning-Strickler et celle de la vitesse critique ( $V = (g.h)^{1/2}$  en section rectangulaire). D'importantes sources d'incertitude affectent les estimations de débit finalement obtenues: fiabilité parfois incertaine des sources d'information, possibles évolutions de la section d'écoulement, impossibilité fréquente d'appliquer la formule de Manning Strickler, et, lorsque cette formule peut s'appliquer, estimation délicate des coefficients de Strickler  $K$  à l'époque de la crue considérée. Compte tenu de ces sources d'incertitude, nous avons préféré présenter les estimations de débit effectuées sous forme d'intervalles des valeurs de débits possibles, ces intervalles incluant fréquemment des valeurs allant du simple au double (cf. Tableau 8). Les valeurs de débit probable définies relèvent par conséquent du dire d'expert. Il convient de rester très prudent en ce qui concerne ces valeurs, l'information réellement fiable étant constituée par les intervalles de débit possible définis pour chaque crue. Ces intervalles ont d'ailleurs souvent pu être validés par recoupement entre plusieurs estimations réalisées pour une même crue (cf. Tableau 8).

On peut également ajouter que dans bon nombre de cas, l'estimation du débit des crues historiques s'avère tout simplement impossible (crues en pointillé sur la Figure 16 et Figure 17). Ceci ajoute une difficulté lors de la définition du seuil de perception, qui doit à la fois garantir qu'aucune crue dépassant ce seuil n'est restée inconnue, et permettre de savoir si les crues historiques connues, mais dont le débit ne peut être estimé, ont dépassé ou non ce seuil. Ceci nous a parfois contraint à limiter la période de validité du seuil retenu, et à choisir ce seuil à un niveau relativement élevé, de façon à acquérir la quasi certitude que ce seuil n'était pas dépassé par les crues historiques au débit non estimé. Cette "quasi-certitude" repose toutefois parfois sur des hypothèses bien fragiles...

Section	Surface drainée en km <sup>2</sup>	Section mouillée en m <sup>2</sup>	Méthode d'estimation des vitesses	Débit pseudo spécifique estimé $Q/S^{0.8}$		
				Borne inférieure	Valeur probable	Borne supérieure
1 – Lastours – Barrage Roger	73	64	Choix d'un intervalle	4,20	5,17	7,27
2 – Lastours – pont	87	52	Manning Strickler	4,21	5,05	6,18
3 – Lz Caunette – passerelle	95,5	64 à 73	Manning Strickler	2,61	4,04	5,99
4 – Pont de la Fonde	97	51 à 83	Choix d'un intervalle	2,70	6,43	8,49

**Tableau 8. Estimations de débit réalisées pour la crue de 1874 sur l'Orbiel**

Malgré toutes ces difficultés, les résultats obtenus nous semblent encourageants. En effet, nous ne nous sommes jamais heurtés à un échec complet au cours des quatre reconstitutions menées sur de petits bassins. Pour chacun des quatre cours d'eau étudiés, une chronique de crues historiques, d'une longueur d'un siècle au minimum, et pouvant aller jusqu'à deux siècles, a pu être ajoutée aux chroniques de mesures systématiques issues des stations limnigraphiques. Ces chroniques donnent de plus une idée du débit atteint, pour chaque crue historique ayant dépassé le seuil de perception. On peut ajouter que, aussi imprécises soient-elles, les estimations de débit réalisées pour les crues historiques supportent tout à fait la comparaison avec les données de débit issues des enregistrements limnigraphiques récents :

pour les crues importantes, on en est réduit dans les deux cas à utiliser les mêmes méthodes d'estimation, avec les mêmes facteurs d'imprécision. L'examen des chroniques finalement obtenues laisse peu de doute quant à l'apport des données historiques reconstituées, pour la connaissance des crues extrêmes des cours d'eau étudiés (cf. Figure 16 et Figure 17).

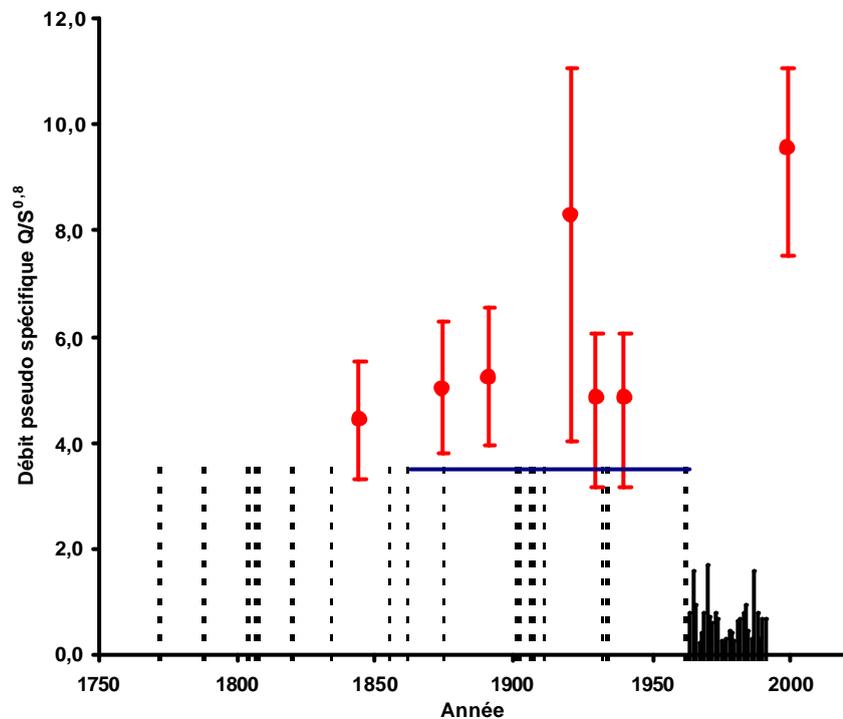


Figure 16 : Résultats de la reconstitution des crues historiques de la Clamoux

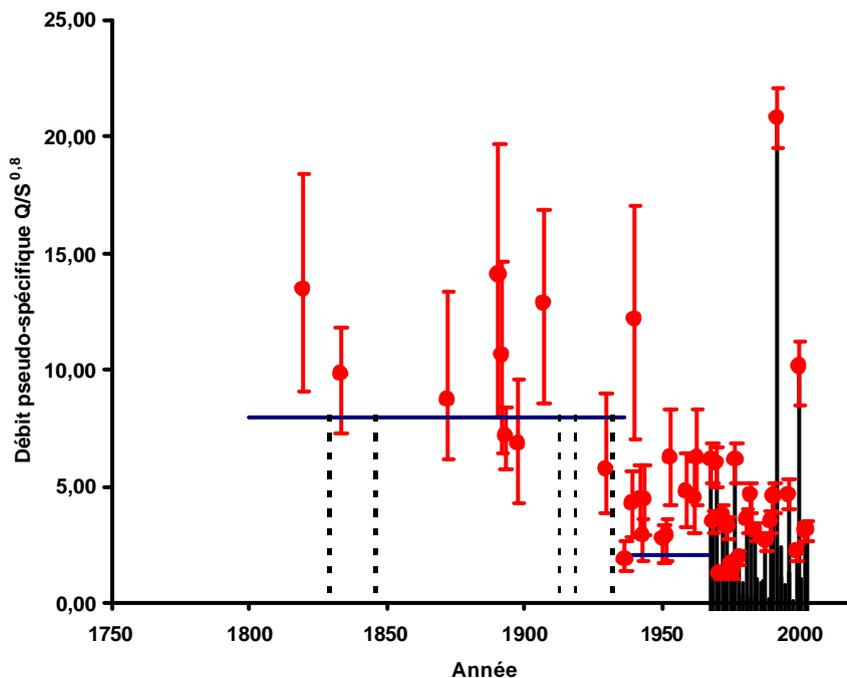
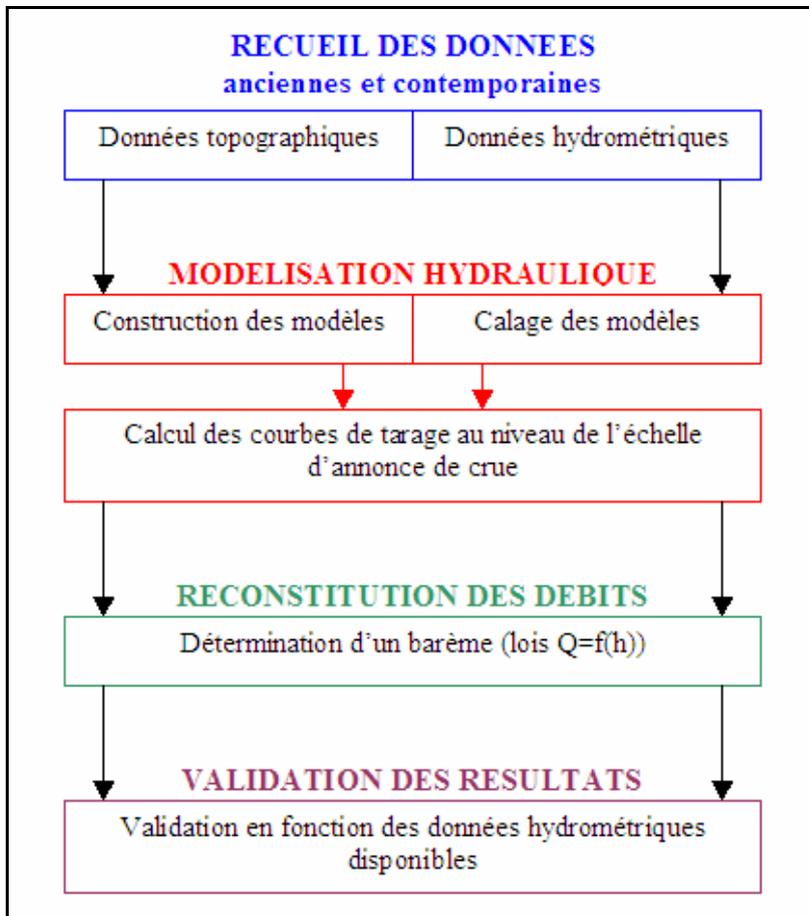


Figure 17 : Résultats de la reconstitution des crues historiques de la Salz

On pourra enfin remarquer que la qualité des reconstitutions historiques obtenues semble très liée au contexte local. La reconstitution la plus complète, du moins en ce qui concerne le XX<sup>ème</sup> siècle, a été obtenue pour La Salz, pour la bonne et simple raison que ce cours d'eau, intégré dès le début du siècle au réseau d'annonce des crues, était équipé d'échelles de crue auxquelles des lectures régulières étaient organisées. Un autre contexte favorable a été rencontré dans le cas de l'Orbiel, du fait de la forte activité industrielle et agricole existant au XIX<sup>ème</sup> siècle sur les rives de ce cours d'eau, avec de très nombreux ouvrages (notamment des barrages ou prises d'eau). De ce fait, les sources d'information disponibles permettent de remonter plus loin dans le temps que pour la Salz. Enfin, Le Lauquet et La Clamoux constituent des contextes moins favorables, du fait de l'absence de lectures organisées aux échelles de crues (qui existaient pourtant dès le début du XX<sup>ème</sup> siècle), et du faible nombre d'aménagements hydrauliques présents au XIX<sup>ème</sup> sur ces cours d'eau. Toutefois, dans ces deux cas, l'exploitation des informations liées à la présence des ponts a permis une reconstitution historique intéressante, sur une durée d'un siècle au minimum (dans le cas de la Clamoux). Dans le cas du Lauquet, la reconstitution effectuée a même pu remonter au début du XIX<sup>ème</sup>, grâce aux archives relatives à l'un des (très rares) barrages présents sur ce cours d'eau.

### V.1.2. Cas des bassins des Gardons et de l'Hérault

La **Figure 18** présente la méthode générale utilisée pour l'analyse de chaque secteur d'étude.



**Figure 18** : Schématisation de la méthode générale utilisée pour chaque secteur d'étude

Après avoir trié et exploité les données récoltées, la première étape consiste à construire puis à caler un modèle hydraulique sur la période contemporaine à partir de levés topographiques récents et des jaugeages disponibles. Un ou plusieurs modèles complémentaires sont ensuite développés en fonction de l'évolution dans le temps du lit mineur (exhaussement, incision...), d'éventuelles modifications des ouvrages hydrauliques ou de changements sur le lit majeur. Dans un second temps, les courbes de tarage obtenues à l'issue des simulations permettent d'établir un barème en vue de la reconstitution des débits de crues : à partir des lois définies, il est possible de déterminer le débit de pointe  $Q$  d'une crue connaissant sa hauteur maximale  $H$ . Une analyse de sensibilité permet d'affecter une incertitude aux valeurs de débits reconstitués en fonction des erreurs estimées sur les différents paramètres intervenant dans la modélisation hydraulique. Les débits reconstitués peuvent être validés lorsque les informations concernant les niveaux des plus hautes eaux (NPHE) sont disponibles.

Nous avons choisi d'illustrer la démarche à partir des résultats obtenus sur le Gardon d'Anduze à Anduze. Les résultats de la première étape de collecte et de critique des données

topographiques et hydrométriques ont été présentés au §IV. L'étude complète de ce secteur est présentée en annexe, ainsi que les rapports d'étude des cinq autres secteurs.

### Exploitation des données topographiques recueillies.

Les données morphologiques récentes concernent la topographie du lit mineur et du lit majeur ainsi que celle de tous les ouvrages présents sur le tronçon étudié. Cette topographie est formée de sections en travers espacées de 40 à 300 mètres en moyenne selon les secteurs. C'est sous cette forme que la topographie devra être intégrée lors de la construction du modèle. Dans la majorité des cas, le lit mineur est bien renseigné alors que le lit majeur manque d'information. L'objectif étant de simuler des débits de crue, le lit majeur a été complété à partir de plans ou de cartes IGN.

Ces données permettront de construire un modèle numérique que l'on qualifiera de « récent » pour chaque secteur d'étude. La vue de la Figure 19, obtenue avec le logiciel de simulation, présente le profil en long du tronçon modélisé sur le Gardon d'Anduze à Anduze ainsi que la localisation des ouvrages et des échelles (échelle d'annonce de crue et station automatique DDE). Les traits rouges verticaux correspondent à l'emplacement des profils en travers le long du tronçon. La ligne jaune est la ligne directrice correspondant à la rive gauche, la verte à la rive droite. A noter que les cotes sont exprimées en mètres NGF.

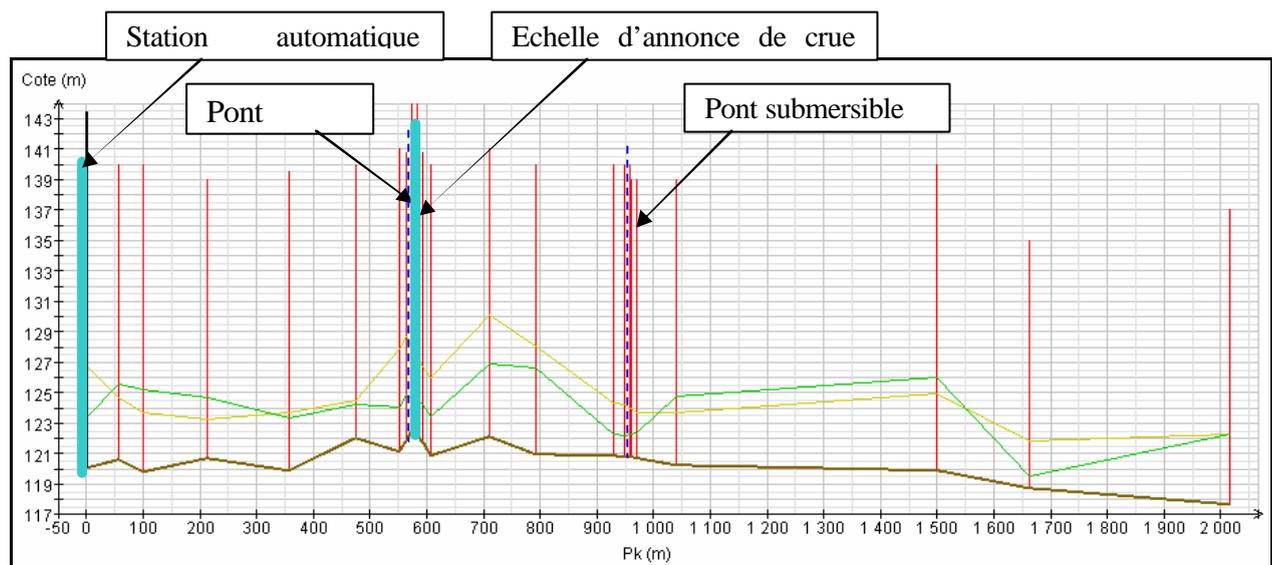


Figure 19 : Profil en long du tronçon modélisé sur le Gardon d'Anduze à Anduze

Les données morphologiques historiques sont issues de documents anciens retrouvés aux Archives Départementales du Gard et de l'Hérault. Des plans, profils en long et profils en travers y ont été récoltés pour les différents secteurs d'étude (cf. **Figure 20** sur le secteur d'Anduze).



Figure 20 : A gauche : plan du Gardon d'Anduze à Anduze datant de 1851 – A droite, profils en travers du Gardon d'Anduze à Anduze datant de 1861

Les données récoltées aux archives ont été exploitées et des profils en long ont pu être reconstitués. Leur analyse sur le gardon d'Anduze a conduit à retenir un modèle hydraulique, que l'on dit « ancien », valable de 1849 à 1996, s'appuyant sur un profil levé en 1985.

### Exploitation des données hydrométriques

Les données hydrométriques récentes recueillies sont des chroniques de débits, des jaugeages, des courbes de tarage et des NPHE. Les chroniques de débits ont directement été extraites de la Banque HYDRO. Les jaugeages sont des éléments importants puisqu'ils permettent de caler les modèles hydrauliques. Les NPHE ont également leur importance puisque c'est grâce à eux que les débits reconstitués pourront être vérifiés et validés. Les courbes de tarage recueillies seront comparées avec celles que nous établirons.

Dans le cas du secteur d'Anduze, deux jaugeages sont disponibles et ont été exploités pour caler le modèle hydraulique. Nous disposons également d'une courbe de tarage au niveau de l'échelle d'annonce de crue DDE. Cette courbe, représentée Figure 21, a été établie par le bureau d'étude SIEE lors de l'étude de la crue de septembre 2002, à l'aide d'un modèle hydraulique local, puis calée grâce aux jaugeages disponibles. Les débits de crue de période de retour 10 et 50 ans ainsi que la hauteur maximale atteinte connue y ont été reportés. La courbe rouge médiane est la courbe de tarage moyenne proposée par SIEE. Les courbes extrêmes représentent l'enveloppe d'incertitude due à différents paramètres intervenant lors de la modélisation numérique.

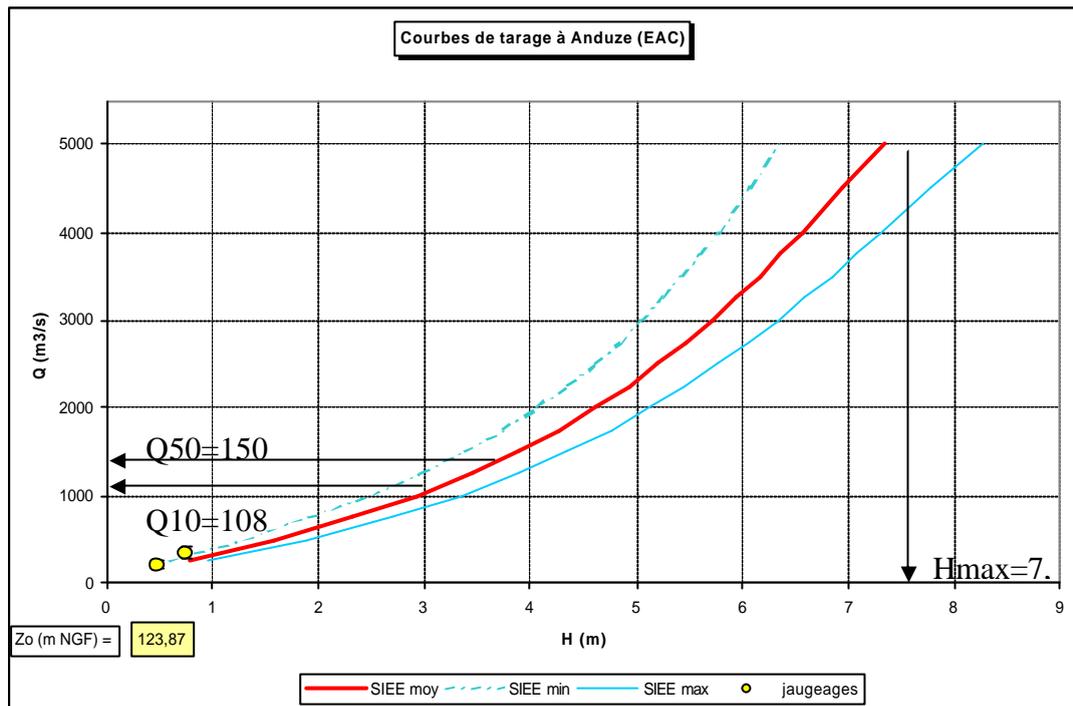


Figure 21 : Courbe de tarage au niveau de l'échelle d'annonce de crue DDE établie par la SIEE

### Modélisation hydraulique

Nous avons utilisé deux logiciels de simulation numérique des **écoulements à surface libre** développés au Cemagref, à partir de la résolution numérique des **équations de Barré de Saint-Venant** (1871) qui régissent les écoulements à surface libre quasi-horizontaux (shallow water equations) :

MAGE est un logiciel de simulation monodimensionnelle utilisable uniquement en régime fluvial ; il prend en compte les débordements en lit majeur. Son application privilégiée est la simulation des crues et des zones inondées. Les équations utilisées sont les équations de Barré de Saint-Venant avec la formule de perte de charge de **Manning-Strickler**.

RUBARBE est un modèle unidimensionnel utilisable pour des écoulements en régime fluvial ou torrentiel.

Le logiciel MAGE a été utilisé prioritairement, au vu de la rapidité de la résolution numérique. Le logiciel RUBARBE a ensuite été retenu lorsque la modélisation faisait apparaître des tronçons avec un régime torrentiel. Ces deux modèles prennent en compte la géométrie réelle du lit de la rivière définie par des profils en travers et utilisent une modélisation géométrique de la rivière en lit composé – mineur, majeur – avec calcul de la répartition des débits. Le **Tableau 9** récapitule les différents modèles utilisés pour chaque site d'étude.

Rivière	Station	Type de modèle			
		1D (MAGE)	fluvial	1D (RUBARBE)	fluvial et torrentiel
Gardon de Saint-Jean	St-Jean du Gard			x	
Gardon de Mialet	Mialet	x			
Gardon d'Alès	Alès			x	
Gardon d'Anduze	Anduze			x	
Hérault	Ganges			x	
Hérault	Gignac			x	

**Tableau 9 : Types de modèles hydrauliques retenus**

Une fois récoltées, les données topographiques récentes du lit mineur et du lit majeur sont traitées puis assemblées pour construire le modèle dit « récent ». Lors d'une modélisation hydraulique, une condition limite aval doit être imposée. Il convient alors d'effectuer une analyse de sensibilité à cette condition. A l'issue de cette analyse, deux cas sont possibles :

si le bief d'étude est suffisamment long pour que la condition aval n'ait pas d'influence au niveau de l'échelle, une condition de régime uniforme est appliquée sur la dernière section ; s'il s'avère que la condition aval a une influence sur la ligne d'eau au niveau de l'échelle, la solution retenue pour ne pas prendre en compte une incertitude supplémentaire est de modéliser un bief fictif de pente moyenne égale à celle du bief et de section similaire. Celui-ci doit être intégré suffisamment loin en aval pour que l'influence de la condition aval de régime uniforme soit négligeable.

Précisons tout de même que si l'échelle est soumise à l'influence d'un ouvrage en aval, il n'y a pas lieu de rajouter ce bief fictif (cas du Gardon de Mialet à Mialet).

Les conditions d'écoulement dans les ouvrages (seuil, pont) peuvent être très éloignées des hypothèses de Saint Venant (en particulier passage du régime graduellement varié au régime fortement varié) du fait de fortes pentes locales, de resserrments prononcés impliquant des vitesses verticales ou transversales non négligeables, etc. Dans ce cas, on abandonne localement le calcul « classique » pour relier directement le débit aux autres variables hydrauliques par le biais d'une loi d'ouvrage. Ces lois sont des formules essentiellement empiriques. Les seuils peuvent être représentés de plusieurs façons en fonction du régime d'écoulement. Dans le cas d'un modèle « fluvial », la zone en aval immédiat du seuil qui passe en torrentiel invite à choisir une modélisation par une loi d'ouvrage. Dans le cas d'un modèle torrentiel, les seuils peuvent être intégrés par leur section en travers.

Bien que nous ayons à disposition les sections topographiées des ponts, il n'est généralement pas possible de les intégrer au modèle. En effet, en raison des arches qui forment chaque pont, les sections sont constituées d'un nombre de points supérieur à ce que peuvent accepter les logiciels de simulation (où chaque transect ne doit pas contenir plus de 24 points précisément). La méthode utilisée consiste alors à intégrer des sections équivalentes en « largeur-cote » : il s'agit de faire correspondre une largeur mouillée à chaque cote considérée. Nous prenons en compte la rugosité, plus élevée au niveau des ponts (due à une

surface de frottement plus importante à cause des piliers), en prenant un couple de coefficients de Strickler plus faibles au niveau des sections équivalentes. Cependant, si la géométrie du pont est simple, les sections topographiées sont intégrées sans modification.

Notons ici que l'échelle étant accolée en amont ou en aval d'un pont pour tous nos cas d'étude, la bonne modélisation de l'ouvrage est primordiale. Le **Tableau 10** fait la synthèse des éléments retenus pour la construction des modèles hydrauliques « récents ».

Rivière	Station	Conditions aval fictives	Situation de l'échelle	Situation des ouvrages par rapport à l'échelle d'annonce de crue
Gardon de Saint-Jean	St-Jean du Gard	non	accolée en aval de l'Ancien pont (RD 153)	Ancien pont et pont Neuf en aval
Gardon de Mialet	Mialet	non	accolée en aval du pont des Camisards	pont des Camisards et un seuil en aval
Gardon d'Alès	Alès	non	accolée en aval du pont Vieux	pont Vieux et trois autres ponts en aval
Gardon d'Anduze	Anduze	non	accolée en aval du pont routier	pont routier et passage submersible en aval
Hérault	Ganges	non	accolée en amont du pont de Cazilhac	pont de Cazilhac (pont Vieux), pont Neuf et seuil de Laroque en aval
Hérault	Gignac	non	accolée en amont du pont de Lagamas	Pont de Gignac en amont et pont de Lagamas, seuil de Carabote et seuil de Granoupiac en aval de l'échelle

**Tableau 10 : Synthèse de la condition limite choisie, des ouvrages à représenter et de la situation de l'échelle sur le tronçon**

La construction de modèles hydrauliques pour la période ancienne se base sur l'exploitation des documents anciens. Comme nous l'avons vu lors de la présentation des données anciennes récoltées, les profils en long et les lignes d'eau, qui sont les seules données anciennes disponibles, permettent de visualiser l'évolution du lit de la rivière au cours du temps. Nous ne disposons pas de profils en travers anciens, pourtant nécessaires à la construction du modèle hydraulique aussi bien sous MAGE que sous RUBARBE. La méthode employée est d'utiliser la topographie récente comme base de notre (nos) modèle(s) « ancien(s) » : le fond du lit de la topographie récente est abaissé ou diminué en fonction de l'évolution du fond du lit, des ouvrages sont rajoutés, supprimés ou déplacés. Le nombre de modèles « anciens » à développer est défini en fonction de l'évolution de la topographie (évolution du fond du lit, modification des ouvrages) mais aussi et surtout en fonction des données disponibles.

Dans la majorité des cas, un seul modèle « ancien » est développé, excepté pour le cas de Gignac où d'importantes modifications du lit de l'Hérault ont été constatées suite à des extractions massives de graviers à partir des années 1860 en aval du pont de Lagamas. Pour l'étude du Gardon d'Anduze à Anduze, la topographie récente sera élevée d'en moyenne 1,50 mètres (uniquement le fond du lit) pour reconstituer la topographie ancienne.

Le **Tableau 11** dresse un bilan des modèles « anciens » développés pour les différents secteurs d'étude.

Rivière	Station	Modèles "anciens"	
		Nombre	Evolution par rapport à la topographie récente
Gardon de Saint-Jean	St-Jean Gard	1	Topographie récente + de 0 à 2 m suivant les sections
Gardon de Mialet	Mialet	1	Topographie récente + env. 1 m suivant les sections
Gardon d'Alès	Alès	1	Topographie récente – 1 à 6 m suivant les sections
Gardon d'Anduze	Anduze	1	Topographie récente + 1,50 m
Hérault	Ganges	1	Topographie récente + 1 à 6 m suivant les sections
Hérault	Gignac	3	1/ Topographie récente – seuil de Carabote 2/ Topographie récente + 0 à 7 m suivant les sections 3/ Topographie récente + 4 à 7 m suivant les sections

**Tableau 11 : Synthèse des modèles "anciens" développés**

Une fois le modèle construit, il est nécessaire de vérifier sa cohérence ainsi que d'effectuer plusieurs simulations dans le but de comprendre le fonctionnement de la rivière et sa sensibilité aux différents paramètres. Après s'être assuré que le lit mineur et le lit majeur sont correctement définis dans le modèle, il convient d'effectuer des simulations avec plusieurs débits afin de repérer les débits d'étiage, les débits à la limite du débordement et les débits fortement débordants. Il est alors possible de situer les débits correspondant aux éventuels jaugeages disponibles.

Dans la majorité des cas, en raison de la pauvreté des données de jaugeages, les coefficients de Strickler sont déterminés à l'aide des tables de Ven Te Chow qui s'appuient sur la forme et la composition du terrain pour évaluer le coefficient de Manning :

[http://www.cetmef.equipement.gouv.fr/projets/hydraulique/clubcourseau/lecons\\_html/notice/calage/tableau.html](http://www.cetmef.equipement.gouv.fr/projets/hydraulique/clubcourseau/lecons_html/notice/calage/tableau.html)

ou

<http://wwwrcamnl.wr.usgs.gov/sws/fieldmethods/Indirects/nvalues/index.htm>

Lorsque suffisamment de jaugeages sont disponibles, il est possible de caler le modèle, en distinguant les coefficients de Strickler du lit mineur  $K_{min}$  et du lit majeur  $K_{maj}$ . La précision du calcul de calage ne doit pas faire oublier qu'il est basé sur des données physiques mesurées sur le terrain et donc comportant des imprécisions sur les cotes et surtout sur les débits correspondants. Les incertitudes liées aux mesures sont estimées à +/- 5 cm sur la hauteur et +/- 10% sur le débit. Bien que ces incertitudes varient d'un secteur d'étude à un autre en fonction, par exemple, du mode de jaugeage, il a été décidé de retenir ces mêmes valeurs pour toutes les zones d'étude à défaut d'informations précises sur les différents sites.

Le calage de  $K_{min}$  est effectué à l'aide des jaugeages de débits avant débordement. A noter qu'il est préférable d'utiliser des jaugeages de débits mettant pleinement en eau le lit mineur car la loi utilisée dans l'équation de Barré de Saint-Venant n'est pas adaptée pour les débits d'étiage, la hauteur d'eau étant trop faible par rapport au diamètre représentatif des matériaux du fond du lit.

Il est important de déterminer à partir de quel débit le coefficient de Strickler du lit majeur entre en jeu et peut être calé. Dans la plupart des cas, les jaugeages maximaux disponibles ne correspondent pas à un débit suffisamment élevé ; ils sont alors utilisés pour le calage du coefficient de Strickler du lit mineur.  $K_{maj}$  est alors estimé à l'aide des tables de Ven Te Chow. Si les jaugeages de débits de crues sont suffisamment élevés pour que le coefficient de Strickler du lit majeur ait une influence sur l'écoulement lors de l'utilisation de jaugeages de débits de crues, alors on fixe  $K_{min}$  et on fait varier  $K_{maj}$  dans le but de le caler à partir de ces jaugeages.

Le **Tableau 12** présente une synthèse des coefficients de Strickler retenus pour chaque site d'étude ainsi que leur mode de détermination.

Rivière	Station	Coefficients de Strickler retenus		Méthode de détermination
		$K_{min}$ (min-max)	(moy- $K_{maj}$ max)	
Gardon de Saint-Jean	St-Jean du Gard	20-25-30	15-20-25	tables de Ven Te Chow
Gardon de Mialet	Mialet	15-20-25	10-15-20	tables de Ven Te Chow
Gardon d'Alès	Alès	20-25-30	10-15-20	tables de Ven Te Chow
Gardon d'Anduze	Anduze	20-25-30	10-15-20	calage + tables de Ven Te Chow
Hérault	Ganges	13-19,8-33	5-10-15	Étude Renouf et al.
Hérault	Gignac	20-25-30	10-15-20	tables de Ven Te Chow

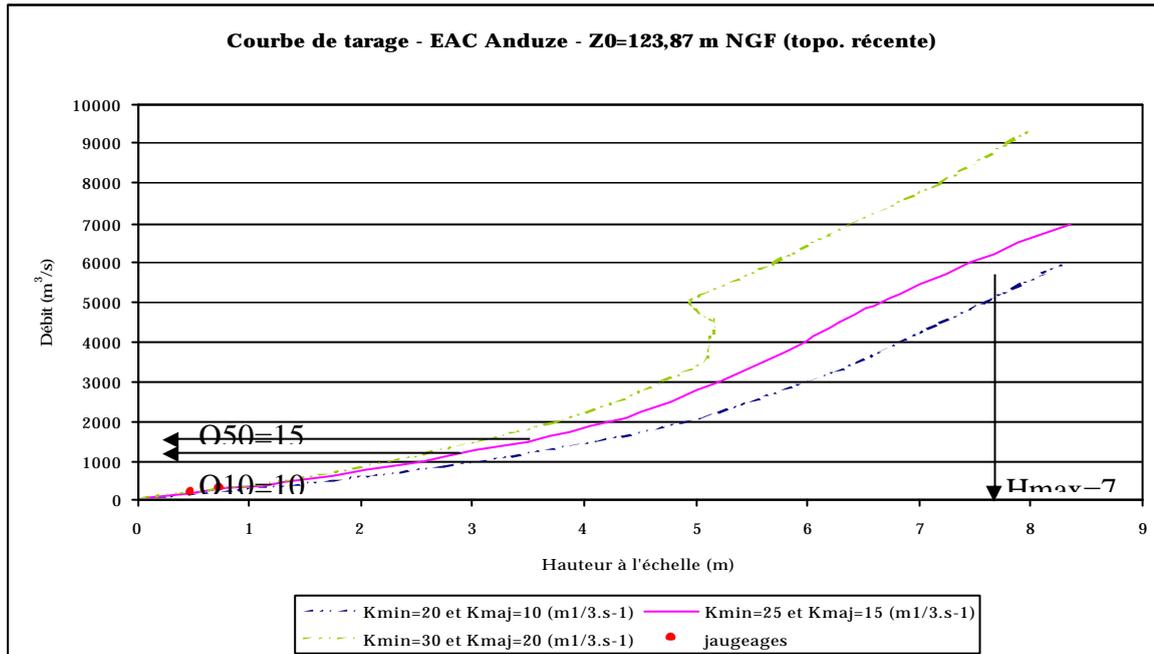
**Tableau 12 : Synthèse sur les coefficients de Strickler retenus**

Une fois les coefficients de Strickler déterminés, il est possible d'établir des courbes de tarage moyennes et d'estimer des incertitudes en vue de la reconstitution des débits. Trois courbes sont déterminées et ce pour trois combinaisons de Strickler :

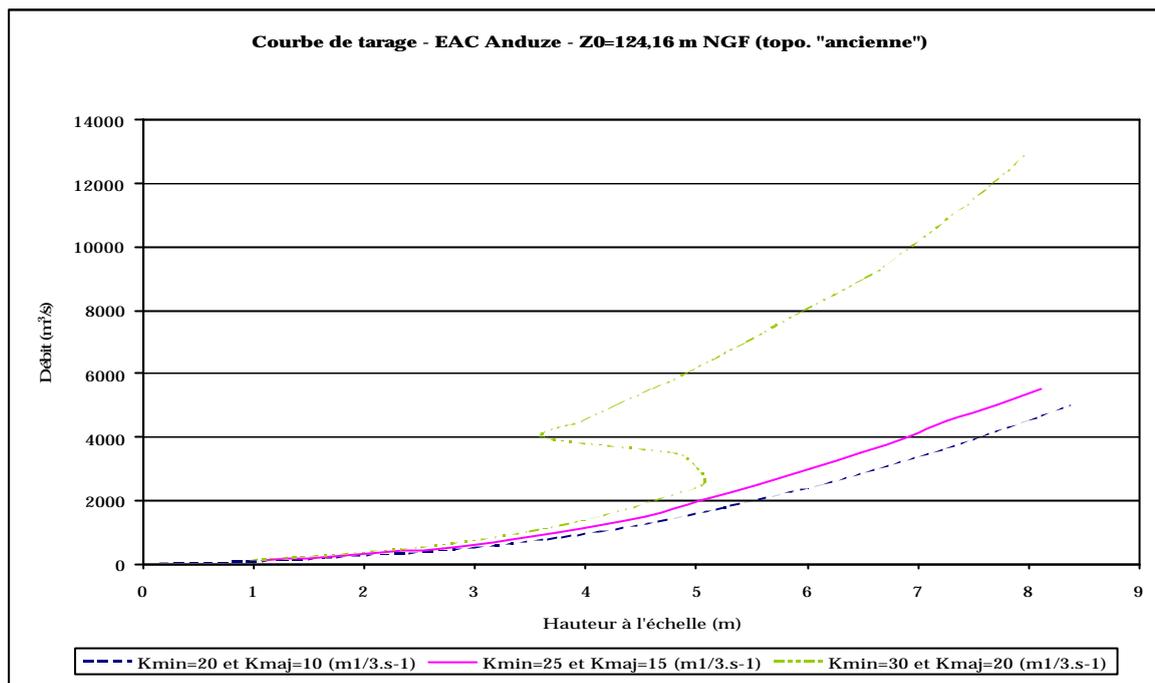
la courbe moyenne définie en utilisant le couple  $((K_{min})_{moy} ; (K_{maj})_{moy})$  et relative à une hauteur d'eau moyenne ;

les deux courbes correspondant aux cas extrêmes : le cas maximal (relatif à une hauteur d'eau maximale) est obtenu en utilisant le couple  $((K_{min})_{min} ; (K_{maj})_{min})$  et le cas minimal (relatif à une hauteur d'eau minimale) est obtenu en utilisant le couple  $((K_{min})_{max} ; (K_{maj})_{max})$ .

Ainsi, l'incertitude sur les débits reconstitués sera due aux coefficients de Strickler. La Figure 22 et la Figure 23 présentent les courbes de tarage à l'échelle d'annonce de crues d'Anduze obtenues à l'issue des simulations, respectivement avec les modèles «récent » et «ancien ». Les débits de période de retour 10 et 50 ans ainsi que la hauteur maximale atteinte connue ont été reportés sur le graphique de la **Figure 22**.



**Figure 22 : Courbe de tarage à l'échelle d'Anduze prenant en compte la topographie récente**



**Figure 23 : Courbe de tarage à l'échelle d'Anduze prenant en compte la topographie ancienne**

Dans les deux cas, la courbe de tarage correspondant au cas maximal (couple de Strickler minimaux) présente un point de rebroussement, c'est-à-dire que plusieurs valeurs de débits correspondraient à une même hauteur relevée à l'échelle (jusqu'à 3 valeurs possibles pour  $h=4,7$  cm pour le cas du modèle « ancien » par exemple). Après une étude de la ligne d'eau au voisinage du pont routier d'Anduze où est située l'échelle d'annonce de crue DDE, il s'avère que ce résultat est lié à la formation d'un ressaut hydraulique au voisinage de l'échelle (**Figure 24**).

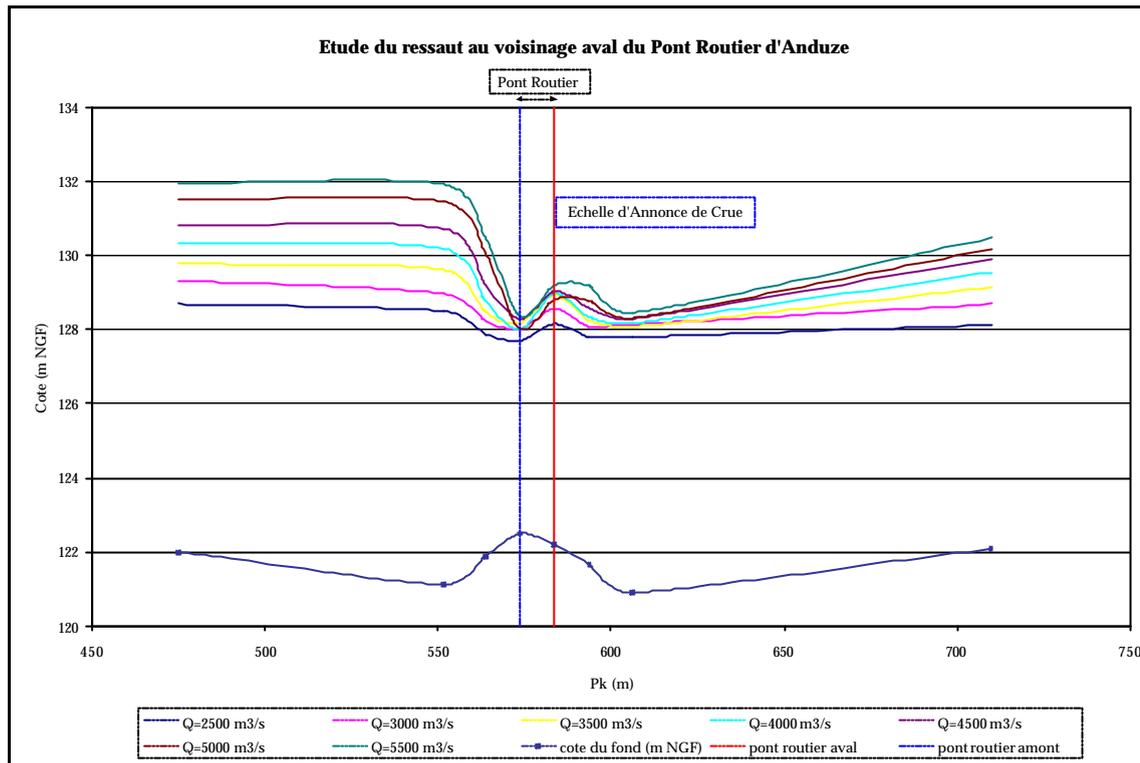
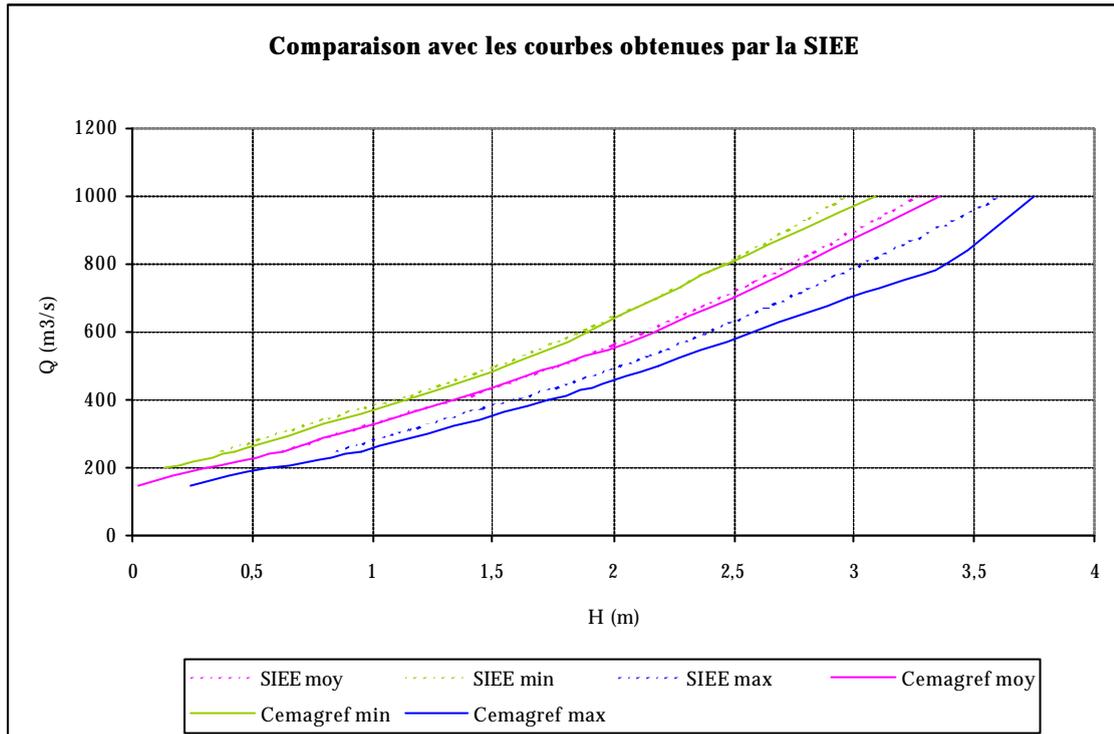


Figure 24 : Ressaut hydraulique au voisinage du pont routier d'Anduze

Il n'est pas commun de rencontrer des courbes de tarage présentant un point de rebroussement telles que celles que nous avons établies (Figure 22 et Figure 23). Cependant, rappelons que l'échelle d'annonce de crue est accolée sur l'un des piliers du pont routier d'Anduze, face aval, et que la topographie du lit mineur nous montre qu'un affouillement est présent en amont et en aval du pont (Figure 24). L'écoulement passe alors en régime torrentiel et il est tout à fait possible qu'un ressaut se crée au voisinage du pont pour de forts débits.

Lorsque nous disposons de courbes de tarage de référence, il convient de les comparer avec celles que nous avons établies. Nous pouvons alors vérifier nos résultats et les situer par rapport aux études existantes. En règle générale, les courbes de tarage moyennes proposées sont cohérentes avec celles établies par les différents bureaux d'études. Les principales différences concernent les courbes enveloppes caractéristiques des incertitudes sur les débits.

Pour le cas d'Anduze, il n'y a pas de différence notable entre nos résultats et ceux du bureau d'étude SIEE en ce qui concerne la courbe de tarage moyenne proposée (Figure 25). On notera un décalage de 0,2m entre les deux courbes pour les plus fortes hauteurs. La borne inférieure sur la reconstitution de la courbe de tarage est par contre bien plus faible dans notre modélisation, du fait de la présence d'un ressaut hydraulique.



**Figure 25 : Comparaison avec les courbes obtenues par la SIEE**

### Reconstitution des débits

Une fois les courbes de tarage définies et les incertitudes déterminées, il convient d'établir un barème en vue de la reconstitution des débits de crues. Ce barème permet de déterminer le débit de pointe  $Q$  d'une crue connaissant sa hauteur maximale  $H$  (lois  $Q=f(H)$ ). Ainsi, nous définissons une loi pour chaque courbe de tarage correspondant à chaque période. La **Figure 26** présente la courbe de tarage moyenne établi à l'EAC d'Anduze avec le modèle «récent ». Des lois sont également définies sur les courbes extrêmes en vue de reconstituer l'incertitude sur les débits.

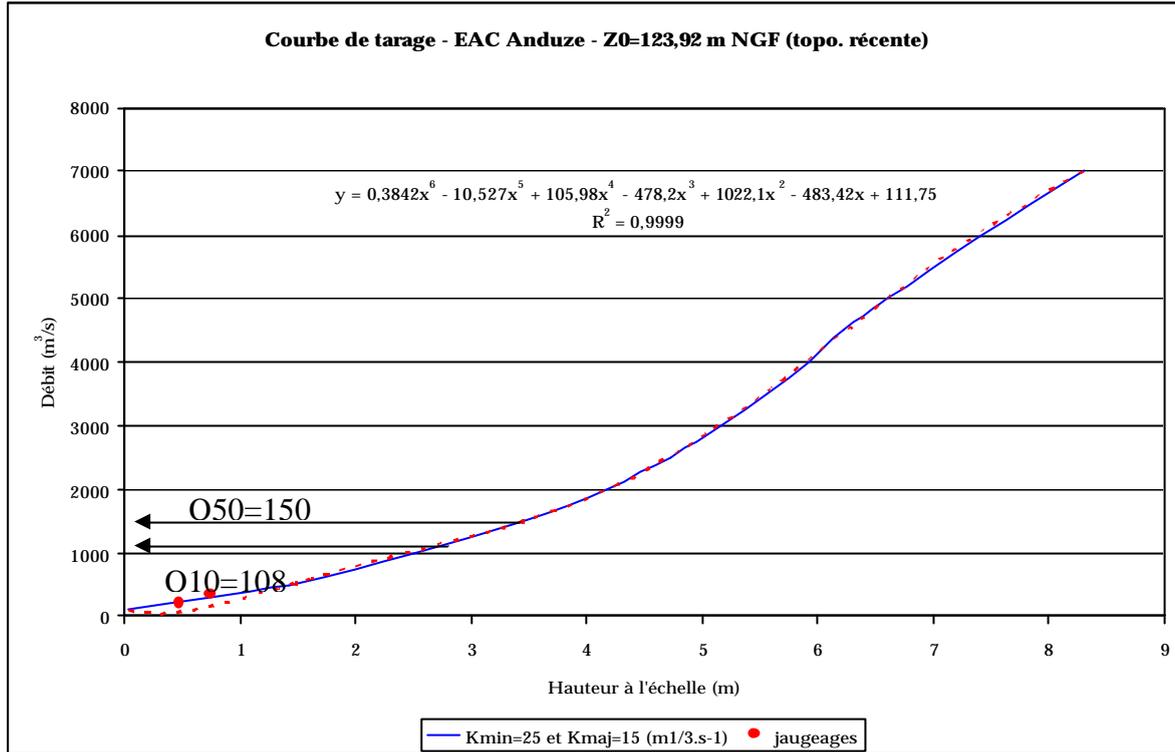


Figure 26 : Détermination d'une loi  $Q=f(h)$  pour la courbe de tarage moyenne établie à l'EAC d'Anduze

Il est alors possible de connaître le débit d'une crue donnée. Pour cela, il suffit de connaître la date de la crue, sa hauteur maximale puis d'appliquer la formule du barème mis en place. L'incertitude sur les débits est déterminée de la même façon. La **Figure 27** présente de manière graphique les débits reconstitués au niveau de l'échelle d'annonce de crue d'Anduze de 1892 à 2004. Dans un souci de clarté, seules les crues dont la hauteur maximale atteinte est supérieure à 1,50 mètres à l'échelle sont représentées, ce qui est suffisant puisque la cote d'alerte est de 3,50 m à Anduze.

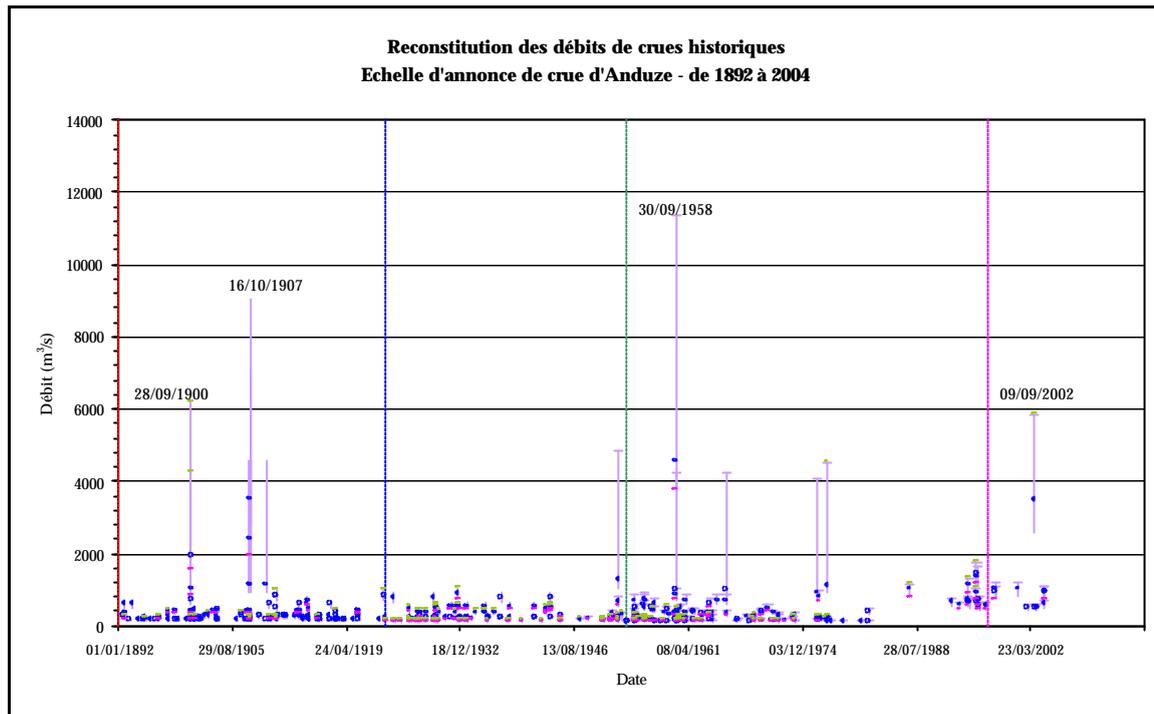


Figure 27 : Reconstitution des débits de crues au niveau de l'EAC d'Anduze de 1892 à 2004 (crue de septembre 2002 reconstituée d'après les laisses de crue)

Le rond bleu indique le débit reconstitué d'une crue. L'incertitude sur les débits est représentée en violet, les extrémités symbolisant les débits maximaux (extrémité haute en vert) et les débits minimaux (extrémité basse en rose). Les traits verticaux sont représentatifs des changements d'échelles d'annonce de crue. L'incertitude maximale sur les débits a été déterminée à l'aide des courbes présentant un point de rebroussement (Figure 22 et Figure 23), ce qui implique une forte incertitude sur les débits reconstitués supérieurs à  $3000 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$  pour la période récente et  $2000 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$  pour la période ancienne.

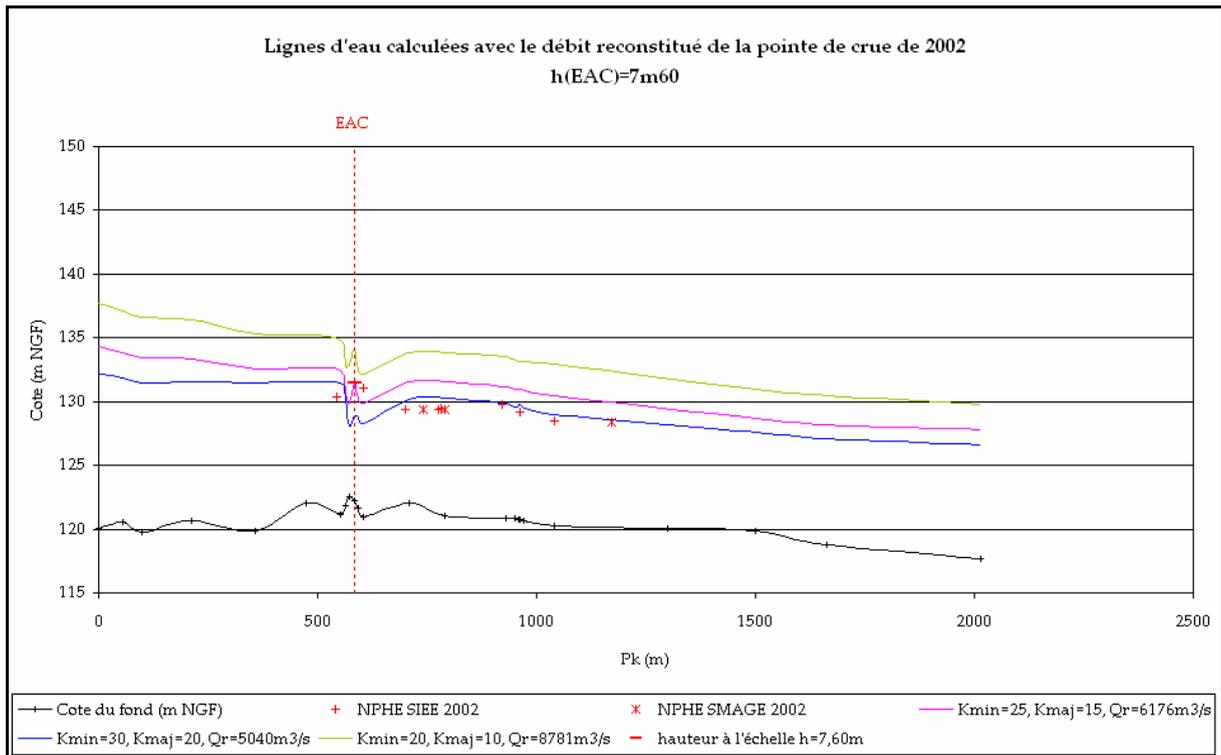
### Validation des résultats

Un modèle ne peut être considéré comme étant fiable si les résultats n'ont pu être validés. Il est donc nécessaire de vérifier les résultats obtenus à l'issue de la reconstitution des débits. Rappelons cependant que cette validation s'effectue en fonction des données disponibles. Nous choisissons donc de vérifier les résultats obtenus pour les crues dont les NPHE sont disponibles. Prenons comme exemple la crue de 2002 à Anduze :

- i) nous relevons la hauteur maximale  $H$  atteinte à l'échelle d'annonce de crue d'Anduze lors de la crue de 2002;
- ii) à l'aide du barème, nous reconstituons le débit de pointe moyen associé à la hauteur  $H$ , puis l'enveloppe d'incertitude sur le débit ainsi reconstitué ;
- iii) nous simulons ensuite les différentes lignes d'eau pour ces débits ;
- iv) enfin, nous représentons graphiquement ces lignes d'eau ainsi que les NPHE dont nous disposons pour la crue de 2002 puis nous vérifions les écarts obtenus.

D'après le document répertoriant les cotes de crues journalières de 1892 à 2004, la hauteur maximale atteinte à l'EAC d'Anduze en 2002 est de 7,60 m (le 09/09/2002). D'après notre

barème, le débit moyen correspondant est de  $6176 \text{ m}^3/\text{s}$ . La ligne d'eau calculée avec ce débit et un couple de coefficients de Strickler moyens ( $K_{min} = 25$  et  $K_{maj} = 15 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$ ) est représentée Figure 28. La ligne d'eau minimale est obtenue pour un débit de  $5040 \text{ m}^3/\text{s}$  et pour un couple de Strickler maximal ( $K_{min} = 30$  et  $K_{maj} = 20 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$ ). De même, la ligne d'eau maximale est obtenue pour un débit de  $8781 \text{ m}^3/\text{s}$  et pour un couple de Strickler minimal ( $K_{min} = 20$  et  $K_{maj} = 10 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$ ). La Figure 28 présente un profil en long du tronçon d'étude, les NPHE disponibles ainsi que les lignes d'eau calculées pour ces débits et les différents couples de Strickler mentionnés ci-dessus.



**Figure 28 : Lignes d'eau calculées telles que la hauteur à l'EAC d'Anduze est de 7,60 m**

Si la cote à l'échelle est cohérente avec la ligne d'eau reconstituée, on constate que le modèle surestime considérablement les hauteurs d'eau le long du tronçon d'étude. Cependant, la hauteur relevée à l'échelle d'annonce de crue semble anormalement haute par rapport à l'ensemble des repères de crue représentés ci-dessus. D'après l'étude SIEE, la hauteur annoncée de 7,60m, qui n'a pas été directement relevée par l'observateur de crue, correspondrait plutôt au niveau d'eau à l'amont du pont routier et non à celui de l'échelle située immédiatement à l'aval de l'ouvrage (cf. information issue de la DDE du Gard).

Nous effectuons alors un second calcul en cherchant cette fois-ci à minimiser la somme des écarts entre la ligne d'eau calculée et les différentes laisses de crue. Par itération, nous estimons que pour la crue de 2002, la hauteur maximale atteinte à l'échelle d'annonce de crue d'Anduze est de 5,60 mètres, pour un débit de  $3500 \text{ m}^3/\text{s}$  ([2590 ; 5870]). La ligne d'eau calculée avec ce débit et un couple de coefficients de Strickler moyens ( $K_{min} = 25$  et  $K_{maj} = 15 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$ ) est représentée Figure 29. La ligne d'eau minimale est obtenue pour un débit de  $2590 \text{ m}^3/\text{s}$  et pour un couple de Strickler maximal ( $K_{min} = 30$  et  $K_{maj} = 20 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$ ). De même, la ligne

d'eau maximale est obtenue pour un débit de 5870 m<sup>3</sup>/s et pour un couple de Strickler minimal ( $K_{min} = 20$  et  $K_{maj} = 10$  m<sup>1/3</sup>/s).

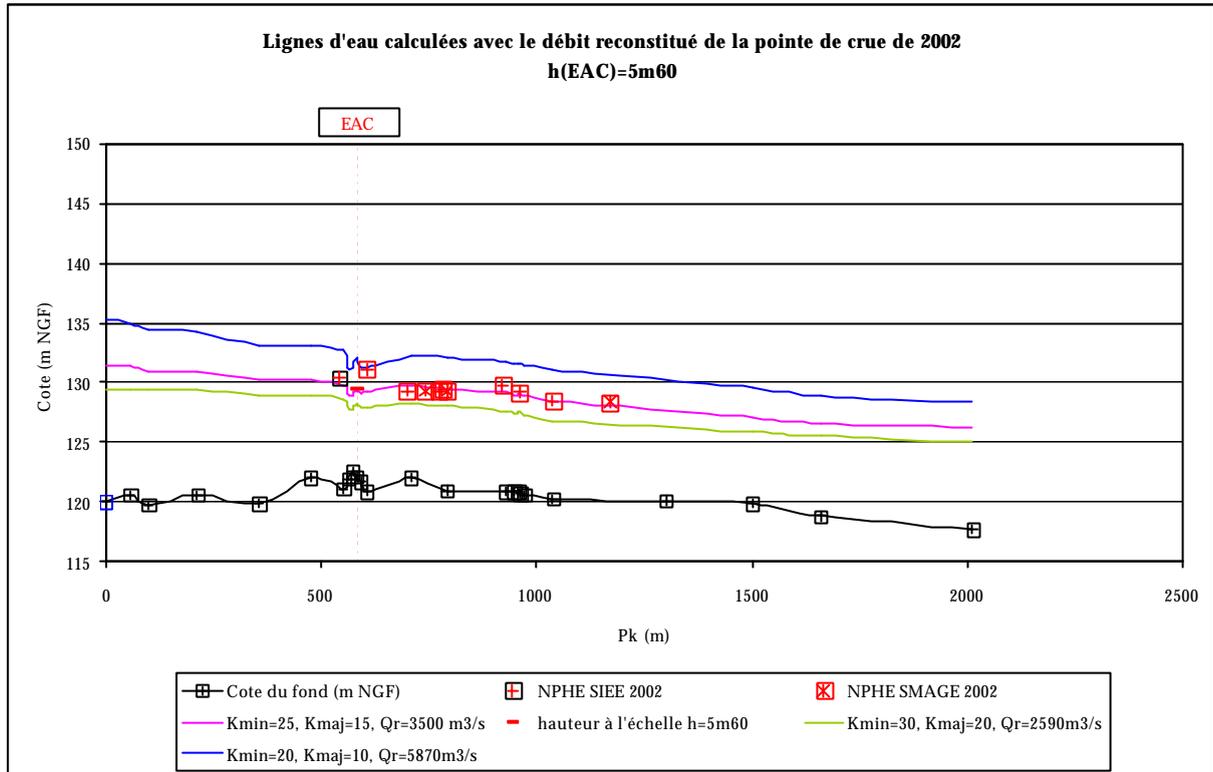


Figure 29 : Lignes d'eau calculées au Gardon d'Anduze à Anduze, représentatives du débit déterminé pour la pointe de crue de 2002

Notons que le débit de la crue de 2002 est estimé dans l'étude SIEE à 3200 m<sup>3</sup>/s pour une hauteur de 5,54 m à l'échelle d'annonce de crue DDE, avec une fourchette [3100-3600 m<sup>3</sup>/s].

## V.2. Analyse fréquentielle des débits

Nous allons maintenant réaliser l'analyse fréquentielle des débits maximaux annuels (MAXAN) issus du travail de collecte des données historiques et récentes. La particularité de l'analyse est d'une part de raisonner sur des données incomplètes, et d'autre part sur des valeurs de débits journaliers reconstituées par modélisation hydraulique, ce qui implique que les données peuvent être entachées d'erreurs significatives. L'objectif principal est donc de proposer et comparer plusieurs modèles d'erreur afin de prendre en compte cette importante source d'incertitude dans l'analyse. Nous évaluerons également l'effet du modèle d'erreur adopté sur les résultats, notamment en terme de distribution des quantiles.

### V.2.1. Modèles fréquents utilisés

Notons  $X_i^*$  la variable aléatoire représentant le débit MAXAN réel à la station de mesure pour une année  $i$ . Nous supposons classiquement que ce débit est issu d'une loi  $GEV(\mathbf{a}, \mathbf{b}, \mathbf{x})$ . Le but de l'étude est d'estimer les paramètres de cette distribution. Malheureusement, les débits réels ne sont pas accessibles à l'observation. Les valeurs en notre possession, notées  $X_i$ , vont donc être considérées comme une estimation de ces débits réels, entachée d'une certaine erreur  $e_i$ . Par exemple, un modèle d'erreur que nous emploierons ultérieurement est le modèle multiplicatif,  $X_i = e_i X_i^*$ . Nous adopterons en fait la notation équivalente  $\gamma_i = 1/e_i$  qui nous permettra de spécifier plus simplement la loi des erreurs. Si l'on suppose que l'erreur est connue, alors il est facile de montrer que la distribution de  $X_i$  sachant l'erreur  $\gamma_i$  est une  $GEV(\mathbf{a} / \mathbf{g}_i, \mathbf{b} / \mathbf{g}_i, \mathbf{x})$ .

Dans la pratique, l'erreur est bien évidemment inconnue, nous allons donc la considérer comme une variable aléatoire suivant une certaine distribution  $p(\gamma_i)$ . Cette distribution devra refléter la connaissance que l'on a de l'erreur potentielle. Dans notre cas particulier, cette distribution sera « calée » afin de refléter les résultats de l'étude de sensibilité effectuée lors de l'analyse hydraulique. L'estimation des paramètres d'intérêt  $(\mathbf{a}, \mathbf{b}, \mathbf{x})$  sera effectuée à l'aide de l'approche Bayésienne. Si l'on note  $\theta = (\mathbf{a}, \mathbf{b}, \mathbf{x})$ , la vraisemblance des observations  $\mathbf{X} = (X_i)_{i=1, \dots, n}$  notée  $p(\mathbf{X} | \theta)$  dépend du modèle d'erreur choisi, et sera explicitée au cas par cas dans la section suivante. La loi *a priori* des paramètres à estimer sera non informative (lois uniformes très larges) pour  $\mathbf{a}$  et  $\mathbf{b}$ . Pour le paramètre de forme  $\gamma$ , nous utiliserons une loi Gaussienne centrée en zéro et d'écart-type 0.3, ce qui signifie que l'intervalle  $[-0.6; 0.6]$  contient plus de 90% de la densité *a priori*. La loi *a priori* jointe des trois paramètres est finalement obtenue en supposant leur indépendance *a priori*, soit explicitement :

$$\begin{aligned} p(\theta) &= p(\mathbf{a}, \mathbf{b}, \mathbf{x}) \\ &= U(\mathbf{a}; 0, 10000) U(\mathbf{b}; -10000, 10000) N(\mathbf{x}; 0, 0.3^2) \end{aligned} \quad (\text{V.2.1})$$

La loi *a posteriori* peut alors être définie à une constante multiplicative près par :

$$p(\theta | \mathbf{X}) \propto p(\mathbf{X} | \theta) p(\theta) \quad (\text{V.2.2})$$

Des algorithmes MCMC seront finalement appliqués à cette fonction, ce qui permettra d'estimer la distribution *a posteriori* des paramètres et des quantités dérivées, dont les quantiles. Le détail des algorithmes utilisés est présenté par Renard et al. (2006).

Les publications de Kuczera (1992; 1996; 1999) offrent un excellent panorama des différentes façons de prendre en compte explicitement l'incertitude liée aux erreurs de mesure. Les thèses de Naulet (2002) et Payrastra (2005) fournissent également différents modèles utilisables. En nous appuyant sur ces publications, nous évaluerons les modèles décrits dans les sections ci-dessous.

### Modèle M0 : pas d'erreur de mesure

Il s'agit d'une estimation Bayésienne classique, et la vraisemblance des observations s'écrit simplement :

$$p(X | ?) = \prod_{i=1}^n GEV(x_i | ?) \quad (V.2.3)$$

### Modèle M1 : observations anciennes binomiales

Dans ce modèle, on considère que les données obtenues à partir des modèles hydrauliques « anciens » (configuration antérieure de la morphologie de la rivière) ne sont pas suffisamment fiables pour délivrer une estimation acceptable des débits de crue. En conséquence, on utilisera simplement le fait que l'on a observé  $h$  crues supérieures à un seuil de perception  $s$  sur l'ensemble de la période « ancienne » qui compte  $m$  années. La vraisemblance des observations est alors :

$$p(X | ?) = \left\{ F_{GEV}(s | ?) \right\}^{m-h} \left\{ 1 - F_{GEV}(s | ?) \right\}^h \prod_{i=1}^n GEV(x_i | ?) \quad (V.2.4)$$

Dans la pratique, nous conserverons uniquement les 10 plus fortes crues de la période ancienne, de sorte que  $h=10$ . Le seuil de perception sera pris égal à la onzième plus forte valeur. Notons que le désavantage de cette méthode est que le seuil de perception est en général sélectionné comme une des valeurs de l'échantillon de crues anciennes, ce qui signifie que le seuil est lui-même potentiellement entaché d'une erreur importante, qui n'est pas prise en compte dans ce modèle. Il est possible dans un second temps de préciser ce seuil de perception à partir d'une expertise sur la disponibilité des données historiques (exhaustivité des sources documentaires) et sur la qualité de la reconstitution des débits (relation hauteur-débit).

### Modèle M2 : erreurs additives indépendantes

En suivant la démarche adoptée par Kuczera (1992), la vraisemblance des observations peut être obtenue en intégrant la distribution des observations (conditionnellement aux erreurs commises) sur la distribution des erreurs. Autrement dit, pour une observation particulière  $x_i$  entachée d'une erreur que nous noterons  $e_i$  :

$$p(x_i | ?) = \int p(x_i | ?, e_i) p(e_i) de_i \quad (V.2.5)$$

Sous hypothèse que les erreurs sont indépendantes, on obtient alors la vraisemblance en effectuant le produit de l'expression ci-dessus pour l'ensemble des observations. On remarque

qu'il est nécessaire d'effectuer une intégration pour obtenir la densité de probabilité d'une observation. Dans la plupart des cas, cette intégration sera impossible analytiquement, il faudra donc utiliser une approximation numérique qui risque d'être assez coûteuse en terme de temps de calcul, surtout dans le cadre de simulations MCMC.

Une alternative qui permet de simplifier le calcul consiste à utiliser une erreur additive ( $X_i^* = X_i + e_i$ ) suivant une loi uniforme sur un intervalle  $[-a_i; b_i]$  (avec  $a_i$  et  $b_i$  positifs). Dans ce cas, il est possible de simplifier l'équation (V.2.5), de la manière suivante :

$$\begin{aligned}
 p(x_i | ?) &= \int p(x_i | ?, \mathbf{e}_i) p(\mathbf{e}_i) d\mathbf{e}_i & (V.2.6) \\
 &= \int p(x_i | \mathbf{a}, \mathbf{b} + \mathbf{e}_i, \mathbf{x}) p(\mathbf{e}_i) d\mathbf{e}_i \\
 &= \int_{-a_i}^{b_i} p(x_i | \mathbf{a}, \mathbf{b} + \mathbf{e}_i, \mathbf{x}) \frac{1}{b_i + a_i} d\mathbf{e}_i \\
 &= \int_{-a_i}^{b_i} p(x_i - \mathbf{e}_i | \mathbf{a}, \mathbf{b}, \mathbf{x}) \frac{1}{b_i + a_i} d\mathbf{e}_i \\
 &= \frac{1}{b_i + a_i} \left\{ F_{GEV}(x_i + b_i | \mathbf{a}, \mathbf{b}, \mathbf{x}) - F_{GEV}(x_i - a_i | \mathbf{a}, \mathbf{b}, \mathbf{x}) \right\}
 \end{aligned}$$

A la constante  $1/(b_i + a_i)$  près, qui ne changera rien aux résultats puisque la loi *a posteriori* n'est définie qu'à une constante multiplicative près, on retrouve donc la vraisemblance des débits contenus dans un intervalle proposée par Payrastra (2005). Nous adopterons pour le modèle M2 cette loi d'erreur additive uniforme, en spécifiant les bornes  $b_i$  et  $a_i$  d'après les courbes de tarage minimales et maximales issues de l'étude hydraulique. Les erreurs indépendantes pour chaque mesure sont utiles pour modéliser certains types d'erreur, comme par exemple des erreurs liées à la lecture des hauteurs. En effet, pour deux crues historiques distinctes, la hauteur maximale atteinte pourra être très bien connue pour l'une et très peu précisément pour l'autre (suivant la disponibilité des laisses de crues, par exemple). Suivant la sensibilité de la courbe de tarage aux erreurs sur les cotes, l'erreur résultante sur le débit sera plus ou moins importante, et pourra être considérée comme indépendante des autres erreurs.

### Modèle M3 : Erreurs de courbe de tarage

Le travail effectué par Pobanz (2006) concerne plutôt les erreurs de courbe de tarage, issues de la modélisation hydraulique. Dans ce cas, le risque lié à la modélisation est plutôt lié à une sous ou une sur-estimation systématique de la courbe de tarage, induite par exemple par un mauvais choix des coefficients de Strickler. On pourra donc s'attendre à ce que les débits soient entachés d'une erreur multiplicative identique pour tous les débits calculés avec la même courbe de tarage. En utilisant des erreurs indépendantes comme dans le cas du modèle M2 pour modéliser ce type d'incertitude, le risque est de très fortement sur-estimer l'impact de ce type d'erreur sur les estimations. Il semble donc préférable d'utiliser un modèle d'erreur qui s'écrit de la façon suivante :  $X_i^{(k)} = e_k X_i^{*(k)} = (1/g_k) X_i^{*(k)}$  pour les observations issues de

la  $k^e$  courbe de tarage ( $i=1, \dots, n_k$ ). La vraisemblance des observations peut donc s'écrire (si  $r$  désigne le nombre de courbes de tarage utilisées) :

$$p(\mathbf{X} | ?) = \prod_{k=1}^r \int p(x_1^{(k)}, \dots, x_{n_k}^{(k)} | ?, \mathbf{g}_k) p(\mathbf{g}_k) d\mathbf{g}_k \quad (\text{V.2.7})$$

On remarque encore une fois qu'une intégrale devra être estimée numériquement. Afin de contourner cet inconvénient, il est possible de considérer les erreurs  $?_k$  comme des paramètres supplémentaires que l'on souhaite estimer, et qui ont pour loi *a priori* les loi d'erreurs choisies  $p(?_k)$ . La loi jointe *a posteriori* de  $?$  et  $?=(?_1, \dots, ?_r)$  sera alors égale à :

$$\begin{aligned} p(?, ? | \mathbf{X}) &\propto p(\mathbf{X} | ?, ?) p(?, ?) \\ &= p(\mathbf{X} | ?, ?) p(?) p(?, ?), \end{aligned} \quad (\text{V.2.8})$$

avec :

$$\begin{aligned} p(\mathbf{X} | ?, ?) &= \prod_{k=1}^r p(x_1^{(k)}, \dots, x_{n_k}^{(k)} | ?, \mathbf{g}_k) \\ &= \prod_{k=1}^r \prod_{i=1}^{n_k} p(x_i^{(k)} | ?, \mathbf{g}_k) \\ &= \prod_{k=1}^r \prod_{i=1}^{n_k} GEV(x_i^{(k)} | \mathbf{a} / \mathbf{g}_k, \mathbf{b} / \mathbf{g}_k, \mathbf{x}) \end{aligned}$$

Le nombre de courbes de tarage utilisées étant restreint dans notre étude, le nombre de paramètres additionnels à estimer sera lui aussi limité, et ne devrait pas s'avérer problématique pour les méthodes MCMC. De plus, étant donné un échantillon simulé de la loi jointe  $p(?, ? | \mathbf{X})$  par une méthode MCMC, il sera possible d'estimer la loi marginale des paramètres des « vrais » débits  $p(? | \mathbf{X})$  en ne considérant que les échantillons marginaux correspondant à  $?$ . A partir de cette loi marginale, qui intègre l'incertitude liée aux erreurs de courbe de tarage, il sera finalement possible d'estimer la distribution des quantiles de crue.

Il reste donc à spécifier les lois d'erreurs *a priori*. Nous utiliserons pour cela trois distributions, représentées dans la Figure 30. La distribution triangulaire est calée de sorte que la base du triangle s'étende entre *min* et *max* (valeurs issues de l'étude de sensibilité hydraulique), et que la pointe se trouve à l'abscisse 1 (*i.e.* l'absence d'erreur a la densité maximale). Nous utiliserons également une loi lognormale, calée de telle sorte que les quantiles à 0.5% et 99.5% coïncident avec *min* et *max*. Un second calage consistera à considérer les quantiles à 5% et 95%. Les trois modèles résultants seront respectivement notés M3a, M3b et M3c.

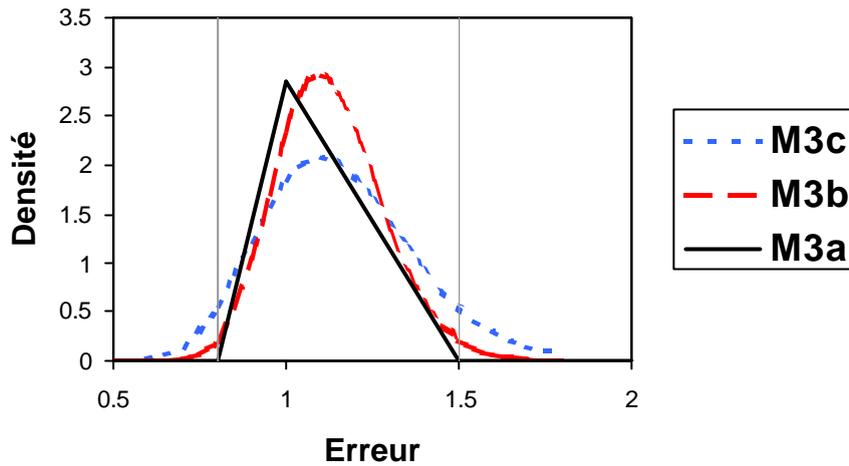


Figure 30 : Distributions des erreurs de courbe de tarage (modèle M3). Min et max sont représentés par les traits verticaux

#### Modèle M4 : Mélange d'erreurs

Le dernier modèle se veut le plus complet et le plus réaliste. Il consiste à réunir les modèles M2 et M3a, afin de prendre en compte à la fois les erreurs additives indépendantes (typiquement, liées à la connaissance des hauteurs) et les erreurs liées à la courbe de tarage. Le modèle d'erreur s'écrit donc  $X_i^{(k)} = (1/\mathbf{g}_k)X_i^{*(k)} + \mathbf{e}_i^{(k)}$ . Comme dans le cas du modèle M3, les erreurs  $\mathbf{g}_k$  seront considérées comme des paramètres supplémentaires à estimer. Par contre, nous ne souhaitons pas estimer les  $\mathbf{e}_i^{(k)}$  qui sont trop nombreux (autant que d'observations). Il faudra donc les intégrer dans la vraisemblance, comme cela a été fait pour le modèle M2 (voir Eq. (V.2.6)). Conditionnellement à toutes les erreurs, la vraisemblance des observations s'écrit :

$$p(X | \mathbf{?}, \mathbf{?}, \mathbf{e}) = \prod_{k=1}^r \prod_{i=1}^{n_k} GEV(x_i^{(k)} | \mathbf{a} / \mathbf{g}_k, (\mathbf{b} / \mathbf{g}_k) + \mathbf{e}_i^{(k)}, \mathbf{x}) \quad (\text{V.2.9})$$

Afin d'éliminer la dépendance à  $\mathbf{e}$ , il faut intégrer par rapport à la loi de ces erreurs indépendantes, ce qui donne, si l'on adopte encore une fois une loi uniforme sur  $[-a_i^{(k)}; b_i^{(k)}]$  pour ces erreurs :

$$\begin{aligned}
p(X | ?, ?) &= \int p(X | ?, ?, e) p(e) de & (V.2.10) \\
&= \prod_{k=1}^r \prod_{i=1}^{n_k} \int GEV(x_i^{(k)} | \mathbf{a} / \mathbf{g}_k, (\mathbf{b} / \mathbf{g}_k) + \mathbf{e}_i^{(k)}, \mathbf{x}) p(\mathbf{e}_i^{(k)}) d\mathbf{e}_i^{(k)} \\
&= \prod_{k=1}^r \prod_{i=1}^{n_k} \frac{1}{b_i^{(k)} + a_i^{(k)}} \int_{-a_i^{(k)}}^{b_i^{(k)}} GEV(x_i^{(k)} | \mathbf{a} / \mathbf{g}_k, (\mathbf{b} / \mathbf{g}_k) + \mathbf{e}_i^{(k)}, \mathbf{x}) d\mathbf{e}_i^{(k)} \\
&= \prod_{k=1}^r \prod_{i=1}^{n_k} \frac{1}{b_i^{(k)} + a_i^{(k)}} \int_{-a_i^{(k)}}^{b_i^{(k)}} GEV(x_i^{(k)} - \mathbf{e}_i^{(k)} | \mathbf{a} / \mathbf{g}_k, \mathbf{b} / \mathbf{g}_k, \mathbf{x}) d\mathbf{e}_i^{(k)} \\
&= \prod_{k=1}^r \prod_{i=1}^{n_k} \frac{1}{b_i^{(k)} + a_i^{(k)}} \left[ F_{GEV}(x_i^{(k)} + b_i^{(k)} | \mathbf{a} / \mathbf{g}_k, \mathbf{b} / \mathbf{g}_k, \mathbf{x}) - F_{GEV}(x_i^{(k)} - a_i^{(k)} | \mathbf{a} / \mathbf{g}_k, \mathbf{b} / \mathbf{g}_k, \mathbf{x}) \right]
\end{aligned}$$

La loi *a posteriori* s'écrit alors :

$$p(?, ? | X) \propto p(X | ?, ?) p(?) p(?) \quad (V.2.11)$$

Nous utiliserons la loi *a priori* triangulaire pour modéliser les erreurs de courbe de tarage  $?$ , calée d'après les résultats de l'étude de sensibilité hydraulique. La loi des erreurs additives indépendantes doit être spécifiée indépendamment pour chacune des crues étudiées. L'intérêt est notamment, dans le cas où une valeur historique serait particulièrement douteuse, de lui affecter un intervalle d'incertitude très large. Imaginons par exemple deux crues historiques, dont la hauteur maximale est connue précisément dans un cas, et très peu précisément dans l'autre. L'erreur additive sera alors spécifiée en transformant cette incertitude en hauteur en une incertitude en débit *via* la courbe de tarage utilisée (Figure 31). C'est donc un travail assez long et qui nécessite une connaissance approfondie de chacune des crues sélectionnées. Ce modèle a été uniquement analysé sur des données simulées.

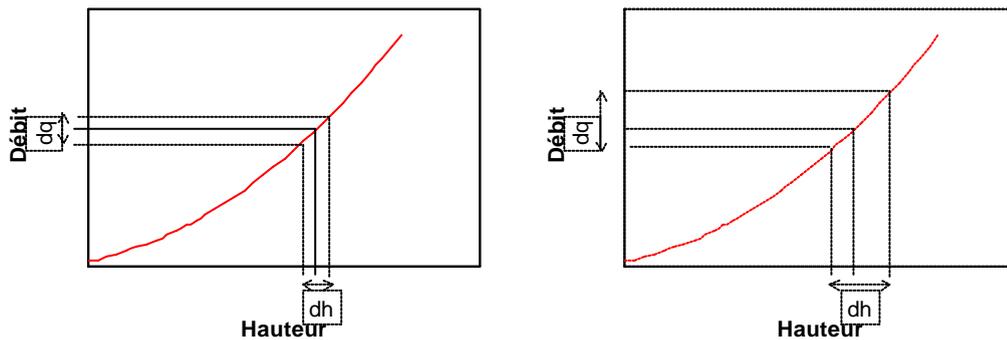


Figure 31 : Exemples de transformation d'une incertitude en hauteur en incertitude en débit

### V.2.2. Etude sur des données simulées

Dans un premier temps, nous allons évaluer le comportement des différents modèles à partir de données simulées dont nous connaissons exactement les caractéristiques probabilistes, ce qui permettra d'en apprécier les principaux points forts et points faibles. La combinatoire du nombre de jeu de données à simuler devient très vite insurmontable si l'on souhaite simuler « tous » les cas de figure qui peuvent se rencontrer dans les cas réels (« vraie » distribution des données, tailles relatives des périodes anciennes et historiques, nombre de courbes de tarages, erreurs systématiques, erreur indépendantes, etc.). Nous allons donc simplement simuler un jeu de données, afin d'illustrer le comportement des différents modèles.

#### Données

200 valeurs ont été simulées à partir d'une loi généralisée des valeurs extrêmes (GEV), de paramètres  $\mathbf{a} = 100$ ,  $\mathbf{b} = 300$ ,  $\mathbf{x} = -0.2$  (échelle, position et forme). Ces premières données D1 non perturbées doivent être interprétées comme les « vrais » débits écoulés à la section de mesure. Nous considérons ensuite les 150 premières données comme des données « anciennes », et les 50 dernières comme des données récentes, qui seront donc supposées exemptes de toute erreur de mesure. Afin de simuler une erreur systématique liée à la courbe de tarage, les 150 valeurs anciennes seront multipliées par 1.3, ce qui correspond à une sur-estimation de la « vraie » courbe de tarage de 30%. Cette série sera notée D2. Enfin, à partir de la série D2, nous allons simuler une erreur de reconstitution des plus fortes crues historiques, liée à des erreurs sur les hauteurs historiques estimées. Pour cela, les trois plus fortes crues historiques seront multipliées par 1.5, ce qui signifie que ces événements ont été très fortement sur-estimés par rapport au débit ayant réellement transité par la section de mesure. Ce dernier jeu de données sera noté D3.

La Figure 32 représente les séries simulées. Dans le cadre de gauche, on observe qu'une valeur particulièrement forte a naturellement été simulée. Dans le cadre central, les 150 premières valeurs ont été rehaussées de 30%, on peut d'ailleurs observer la cassure au niveau de la 150<sup>e</sup> valeur. Enfin, les données du graphique de droite sont identiques à celles du graphique central, à l'exception des trois plus fortes valeurs, qui ont été multipliées par 1.5. La valeur record apparaît alors être exceptionnelle par rapport au reste de l'échantillon. Cependant, les deux autres valeurs, bien qu'importantes, restent inférieures à la valeur record qui avait été naturellement simulée dans le jeu de données D1.

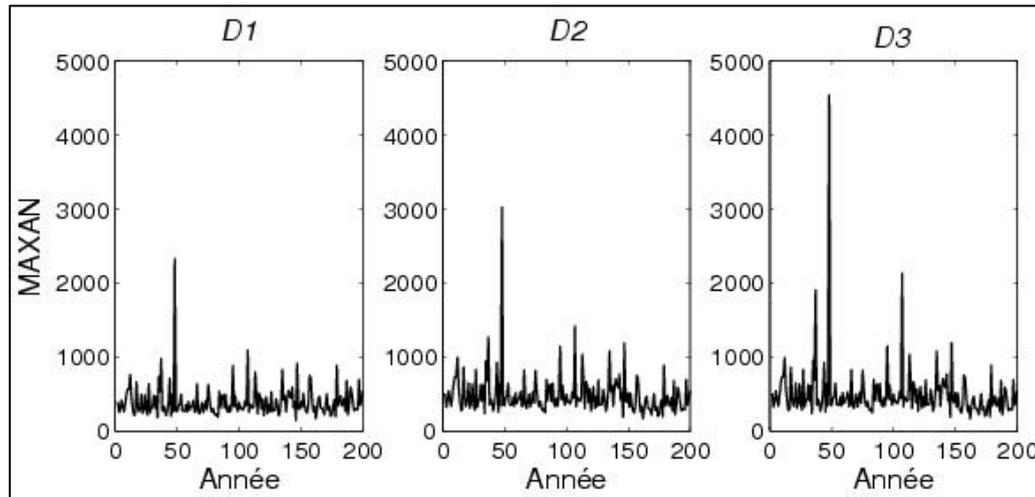


Figure 32. Tracés chronologiques des trois séries simulées.

Les modèles M0 à M4 présentés précédemment vont être appliqués à chacun de ces jeux de données. Pour les deux premiers modèles, il n'y a pas de modèle d'erreur à spécifier. Pour les autres modèles, toutes les erreurs seront supposées inexistantes sur les données récentes (*i.e.* le modèle est un dirac en zéro pour les erreurs additives et en un pour les erreurs multiplicatives). Les modèles d'erreur porteront donc uniquement sur les données anciennes. Pour le modèle M2, les bornes des lois uniformes des erreurs additives seront égales à  $a_i=b_i=0.5x_i$ . Pour les modèles M3 et M4, les modèles d'erreurs multiplicatives seront calés sur des valeurs  $min=0.5$  et  $max=1.5$ . Enfin, dans le cas du modèle M4, les erreurs additives seront supposées nulles sur toutes les valeurs anciennes, à l'exception des trois plus fortes, pour lesquelles nous prendrons  $a_i=b_i=1500 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$  pour la crue record et  $a_i=b_i=1000 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$  pour les deux suivantes.

## Résultats

Les résultats de ces analyses sont présentés en Figure 33 et Figure 34. Les boîtes s'étendent du premier au troisième quartile, tandis que les moustaches s'étendent entre les quantiles à 5% et 95%. Le trait horizontal dans chaque boîte représente la médiane des estimateurs. Enfin, le trait horizontal pointillé représente la vraie valeur que l'on cherche à estimer. Le modèle M0\* désigne le modèle M0 appliqué uniquement aux cinquante données récentes, tandis que M0 est appliqué à toutes les données. Dans le premier cas, on observe que les estimateurs sont généralement non biaisés (*i.e.* la vraie valeur appartient aux intervalles de crédibilité à 90% *a posteriori*). Ceci est cohérent avec le fait que les données récentes ne sont entachées d'aucune erreur. Par contre, la variabilité de ces estimateurs est généralement très forte. Inversement, dans le second cas, on réduit très nettement les intervalles d'incertitude, mais les estimateurs s'avèrent très fortement biaisés dès lors qu'une erreur affecte les données (cf. les lignes correspondant à D2 et D3).

Le modèle M1 prend en compte une information censurée binomiale. Au vu des résultats, les performances de ce modèle semblent médiocres : tout d'abord, la réduction d'incertitude par rapport au modèle M0\* est mineure. De plus, les estimateurs ont tendance à être biaisés sur des données présentant des erreurs. Ceci peut s'expliquer par le fait que le seuil de perception est lui-même entaché d'une erreur qui n'est pas prise en compte par le modèle.

Le modèle M2 utilise des erreurs additives indépendantes (débits contenus dans un intervalle). Là encore, les performances sont médiocres. Étonnamment, les estimateurs semblent biaisés, y compris avec le jeu de données D1 qui ne comporte pourtant aucune erreur (voir par exemple les paramètres  $a$  et  $q_{0.9}$ ).

Le modèle M3 présente quant à lui des performances acceptables. Tout d'abord, ce modèle parvient à identifier l'erreur systématique qui a été introduite dans les données D2 et D3 (paramètre  $\gamma$ ). La variance des estimateurs est de plus réduite par rapport au modèle M0\*, et le biais reste toujours acceptable, malgré une tendance à sur-estimer les quantiles dans le cas des données D3. Il est intéressant de noter que la différence entre les sous-modèles M3a, b et c est infime. Ceci est rassurant car en pratique, il n'y a pas réellement d'argument fort pour privilégier un des trois modèles d'erreurs multiplicatives (lois triangulaire ou lognormales).

Enfin, le modèle M4 présente des performances globalement similaires à celles du modèle M3. Le fait d'avoir permis des erreurs additives indépendantes sur les trois plus fortes valeurs permet de modérer l'influence de ces valeurs, ce qui résulte en des quantiles moins forts dans le cas des données D3.

Ces résultats montrent que l'incorporation de données historiques est bénéfique puisqu'elle permet de diminuer les intervalles d'incertitude. Cependant, cette diminution reste modérée dans le cas des données que nous avons simulées (cf. lignes D2 et D3 pour les quantiles, Figure 34). De plus, il apparaît que la prise en compte des erreurs potentielles sur les données reconstituées est indispensable, puisque les résultats du modèle M0, qui considère les données historiques comme parfaitement connues, sont très médiocres si une erreur est introduite dans les données.

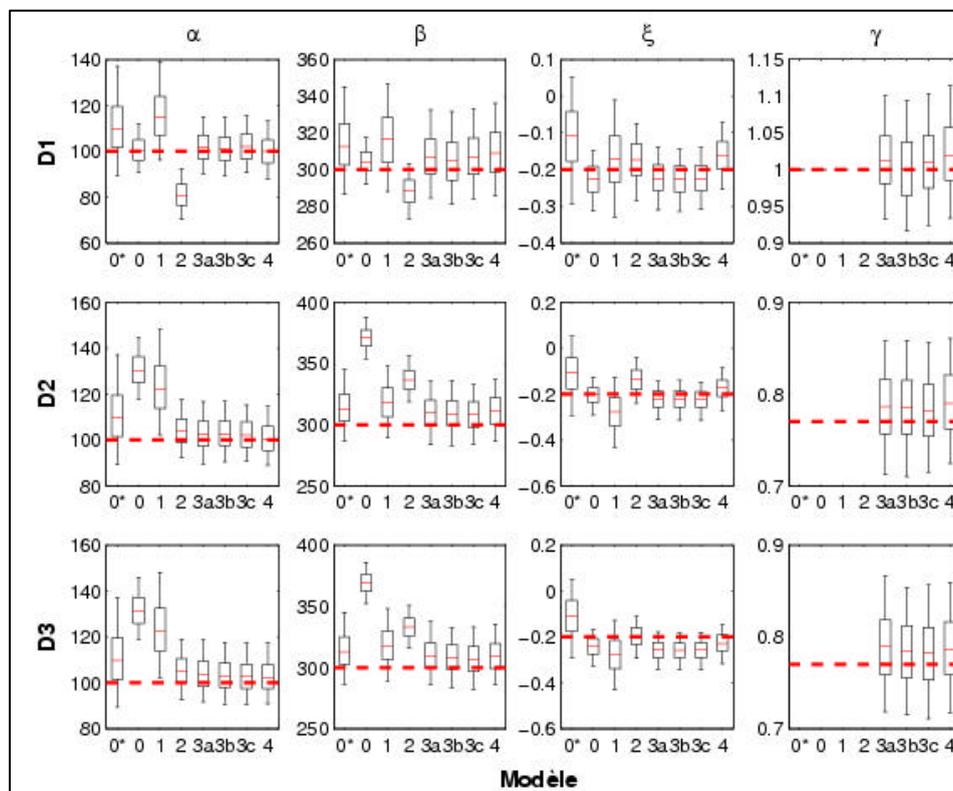


Figure 33 : Estimateurs des paramètres pour les trois jeux de données simulées, suivant les différents modèles considérés.

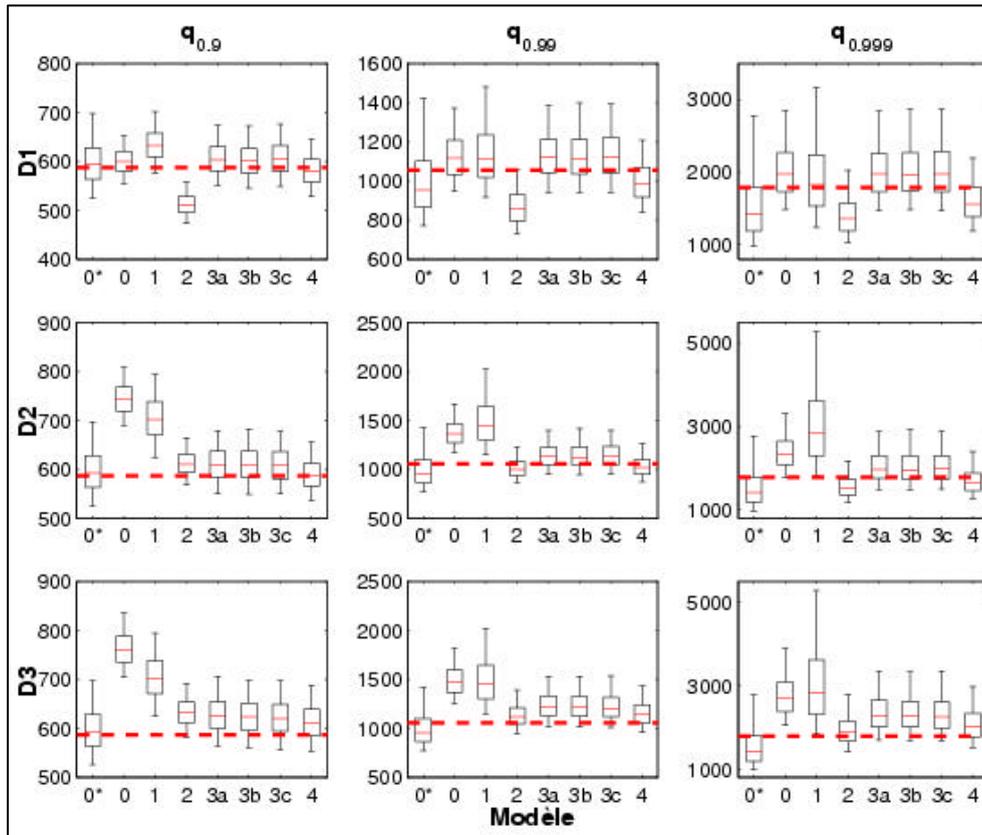


Figure 34 : Estimateurs des quantiles pour les trois jeux de données simulées, suivant les différents modèles considérés.

Dans le suite de ce document, les modèles M0\*, M0, M1, M2, M3a et M4 seront utilisés pour étudier les débits reconstitués par un modèle hydraulique.

### V.2.3. Le Gardon d'Anduze à Anduze

La série traitée (Figure 35) va résulter de deux sources de hauteurs :

- Echelle d'annonce des crues à Anduze (1892-2005). CT avant et après 1985
- Recueil d'informations antérieures issues de l'enquête des historiens (§ IV et Annexes): 1741-1891.

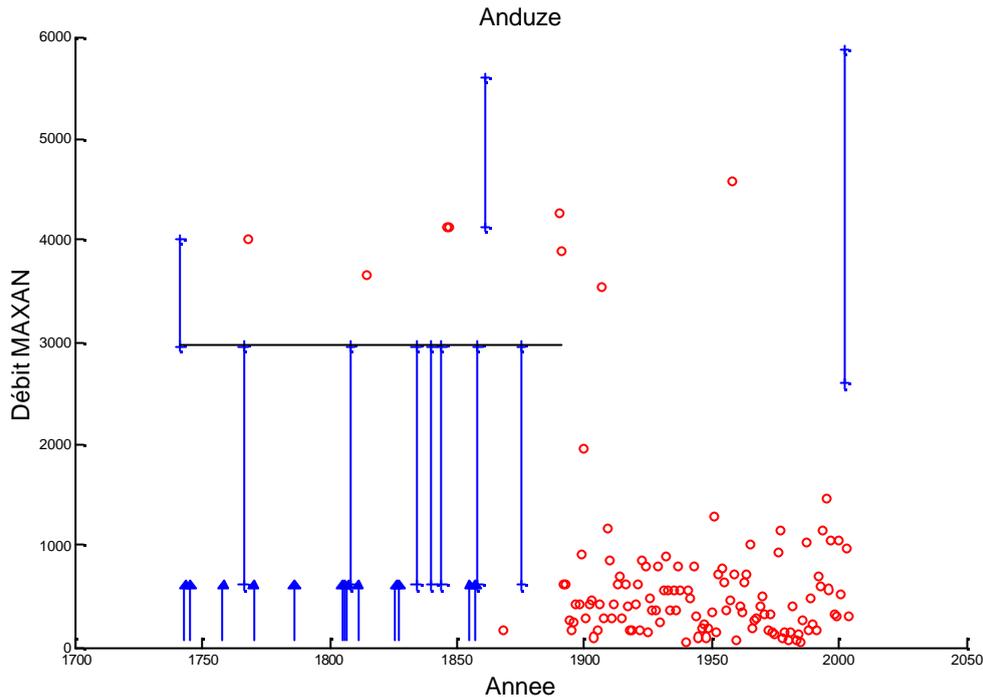


Figure 35 : Série de débit de pointe à Anduze (1741-2005)

### Correction d'incohérences

Deux incohérences ont été notées entre la base de données HistoCrues de la DDE du Gard et les relevés de crue issus de cette enquête historique. Il apparaît que les cotes de 5.5m relevées le 17/11/1892 et le 20/09/1893 sont douteuses, et valent plus vraisemblablement respectivement autour de 2.4 et 3m.

Rappelons que la valeur du débit de la crue de 2002 résulte d'une correction sur la hauteur de la crue, celle-ci étant vraisemblablement 5,60 m au lieu de 7,60 m (cf. compatibilité avec d'autres laisses de crue). Le débit correspondant à la cote de 7,60 m ( $6180 \text{ m}^3/\text{s}$ ) a été remplacé par celui de la cote de 5,60 m ( $3500 \text{ m}^3/\text{s}$ ).

### Seuil de perceptions

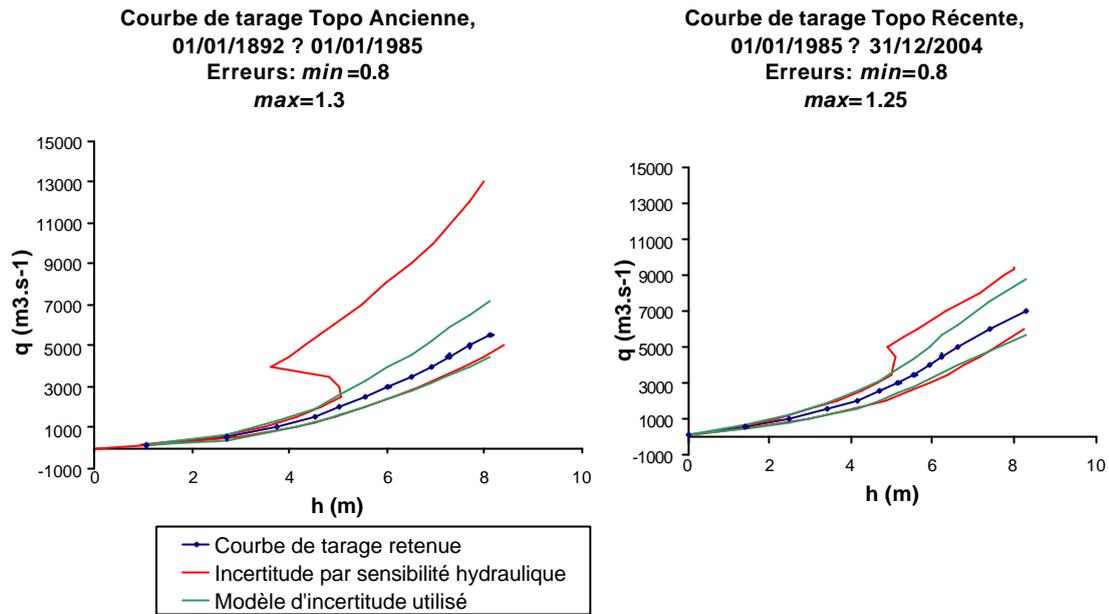
Sur la période 1741-1891, il a été pris à  $2961 \text{ m}^3/\text{s}$ , qui correspond à la cote d'alerte de la station à sa création en 1892.

### Erreurs de courbes de tarage

Deux erreurs vont être modélisées :

- Pour les données avant le 01/01/1985, erreur multiplicative [0.8 ; 1.3]
- A partir du 01/01/1985, on prendra [0.8 ; 1.25]

Nous n'avons finalement pas retenu le point de rebroussement sur les courbes de tarage, qui s'expliquerait par la présence d'un ressaut hydraulique à partir d'un certain débit. Les intervalles d'incertitude nous semblent suffisamment larges en prolongeant la courbe de tarage (borne supérieure) telle quelle (Figure 36).



**Figure 36 : Courbes de tarages ancienne et récente. Les traits rouges indiquent les courbes minimales et maximales obtenues en faisant varier les coefficients de Strickler. Les courbes vertes représentent le modèle d'erreur utilisé.**

Ainsi, dans le cadre du modèle à erreurs indépendantes, chaque valeur  $x_i$  est considérée comme comprise dans un intervalle  $[0.8x_i; 1.3x_i]$  (courbe de tarage ancienne) et  $[0.8x_i; 1.25x_i]$  (courbe de tarage récente). Le modèle M3 considèrera une erreur multiplicative unique et identique pour chaque courbe de tarage, avec le modèle *a priori* triangulaire compris entre 0.8 et 1.3 (courbe ancienne) et 0.8 et 1.25 (courbe récente).

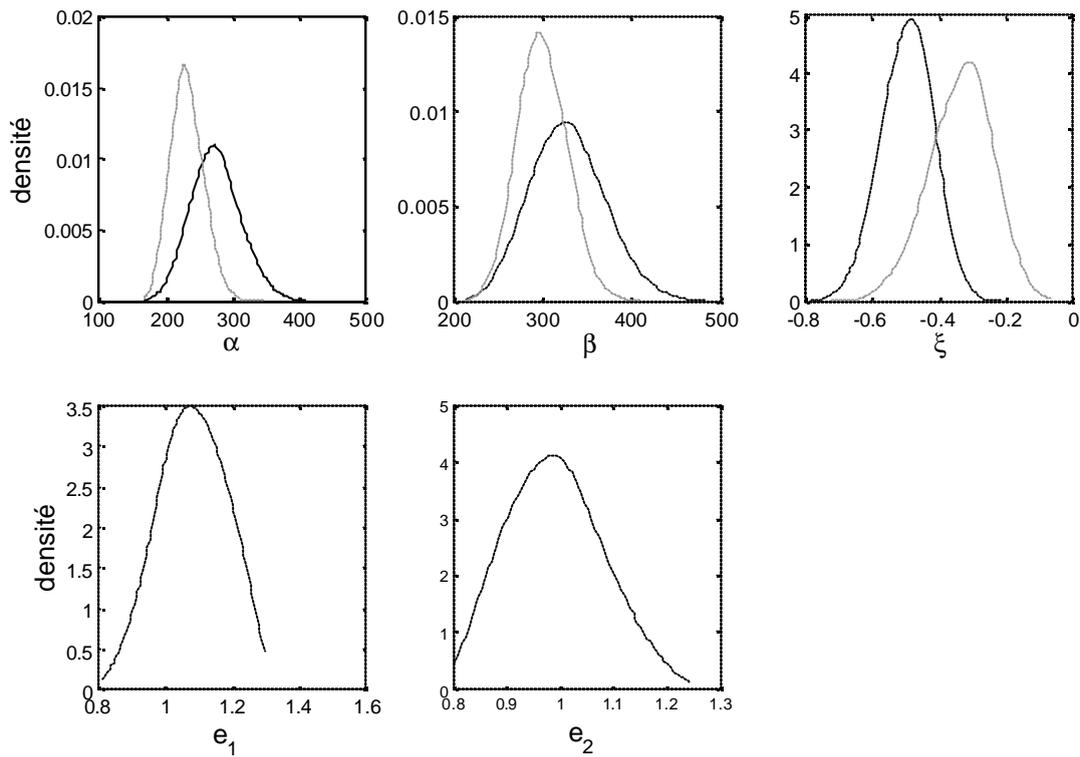


Figure 37 : Distribution des paramètres de la loi GEV, et des erreurs sur la courbe de tarage

Sur la Figure 37 les traits noirs représentent les résultats en prenant en compte toutes les données et les erreurs de CT, les traits clairs représentent les résultats en prenant les données 1892-2005, sans erreur de courbe de tarage. La densité des erreurs multiplicatives  $e_1$  et  $e_2$  sur les courbes de tarages contiennent la valeur 1: le modèle probabiliste n'identifie pas d'erreur systématique de CT. La prise en compte des informations antérieures à 1892 modifie sensiblement la distribution des paramètres, ce qui peut s'expliquer par la présence de nombreux événements aux alentours de 4000m<sup>3</sup>/s. Un paramètre de forme particulièrement fort (environ  $-0.5$  en valeur moyenne) est estimé, ce qui conduit à des quantiles plus élevés (Figure 38 ; traits forts pour l'ensemble des données, traits faibles avec les données 1892-2005). L'ajustement aux fréquences empiriques est assez mauvais, mais étant donné la forme suggérée par ces fréquences empiriques, on peut penser qu'aucune courbe ajustée ne passera au milieu de ces points de manière convaincante.

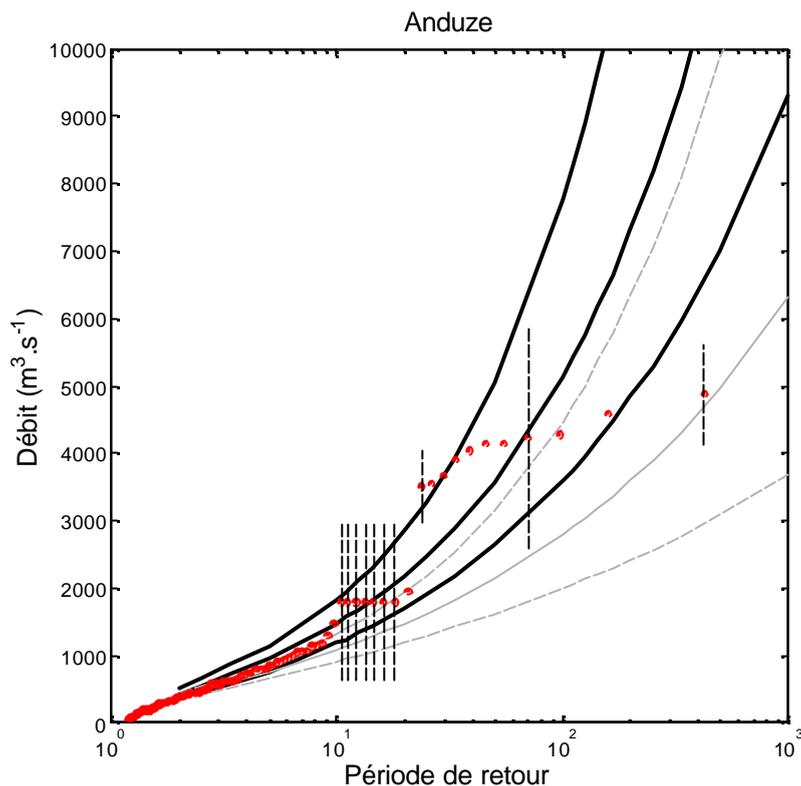


Figure 38 : Loi GEV sur les valeurs maximales annuelles à Anduze

### V.3. Conclusions sur l'analyse fréquentielle des débits

Le détail sur l'analyse fréquentielle des débits des six séries étudiées figure en annexe de ce rapport, avec pour chaque fiche-station, un premier paragraphe sur le recueil des données topographiques et hydrométriques, un second paragraphe sur la reconstitution des débits, et un troisième sur l'analyse probabiliste. Le Tableau 13 récapitule les principaux paramètres pour chaque station :

		Période		A priori sur les erreurs de courbe de tarage	Bilan ajustement avec info historique
		Systématique	Historique		
Gardons	Alès	1893-1980	1604-1740 : 1 1741-1891 : 6 + 18 crues	[0.85 ; 1.15]	Bon ajustement Quantiles ↑ Incertitude peu modifiée
	Anduze	1892-2005	1741-1891 : 8 + 20 crues	Avant 1985 : [0.8 ; 1.3] Après 1985 : [0.8 ; 1.25]	Saut dans distribution empirique Quantiles ↑ Incertitude ↑
	Mialet	1892-2005	1741-1891 : 3 + 3 crues	Avant 1959 : [0.75 ; 1.3] Après 1959 : [0.7 ; 1.4]	Bon ajustement (mais doute cohérence données) Quantiles peu modifiés Incertitude un peu réduite
	St Jean	1892-2005	1741-1891 : 3 + 7 crues	Avant 1958 : [0.7 ; 1.3] Après 1958 : [0.8 ; 1.2]	Bon ajustement Quantiles ↑ Incertitude ↑
Hérault	Ganges	1970-2005	1795-1874 : 1 + 5 crues 1875-1969 : 95	Avant 1959 : [0.6 ; 1.7] 1959-1969 : [0.7 ; 1.4] Après 1969 : [0.8 ; 1.15]	Ajustement sous distribution empirique Quantiles ↑ Incertitude ↑ un peu
	Gignac	1989-2005	1812-1888 : 2 + 1 crue 1889-1988 : 100	Avant 1922 : [0.85 ; 1.2] 1922-1967 : [0.8 ; 1.2] 1968-1988 : [0.5 ; 1.7] Après 1988 : [0.85 ; 1.2]	Distribution empirique courbée vers le bas Quantiles peu modifiés Incertitude ↓ fortement

**Tableau 13 : Synthèse sur les principaux paramètres et résultats de l'analyse probabiliste**

La prise en compte de l'information historique collectée durant ce projet sur le Gard, avant la création du service d'annonce des crues en 1892, modifie nettement les distributions des débits maximum de crues établies à partir de la période systématique, sur tous les secteurs, sauf à la station de Mialet. On peut probablement l'expliquer par le peu de crues anciennes répertoriées avant 1892. Sur l'Hérault, les archives du service d'annonce des crues ayant probablement été détruites, le fait de passer de quelques dizaines d'années d'observations à deux siècles de données modifie notablement la distribution des crues à Ganges et peu à Gignac.

Le Tableau 14 récapitule les différentes estimations de la crue décennale et centennale, avec ou sans information non systématique, avec entre parenthèses l'intervalle de confiance à 90%. Le fait de raisonner sur une période plus large conduit généralement à des quantiles plus forts que ceux issus de la seule période systématique. En général les distributions sont à caractère sur-exponentiel c'est-à-dire que les quantiles augmentent plus rapidement que le logarithme des périodes de retour. On rappelle que dans le cas d'une distribution Gumbélienne, les quantiles sont proportionnels au logarithme des périodes de retour. Seul le secteur de

l'Hérault à Gignac présente une distribution sous exponentielle, même en prenant en compte les crues historiques. Les pistes évoquées pour expliquer cette observation sont :

- i) la superficie des bassins : en effet, Gignac est le plus grand bassin 1300 km<sup>2</sup> ;
- ii) la cohérence des courbes de tarages : sur ce secteur on a le plus d'incertitudes sur le nombre de courbes de tarages à prendre en compte et sur la période correspondant à chacune d'elle.

Une comparaison des distributions des débits entre des bassins de taille comparable montre :

- i) des distributions assez similaires sur les Gardons de Mialet et de St Jean du Gard, ce qui semble cohérent compte tenu que ces bassins ont des morphologies et une occupation du sol très proche
- ii) par contre la distribution des débits spécifiques sur le Gardons d'Anduze a un comportement hyper exponentiel beaucoup plus marqué que celle du Gardon d'Alès, alors que les caractéristiques morphologiques et l'occupation du sol sont comparables. Ceci est lié aux nombreuses crues dépassant 4000 m<sup>3</sup>/s à Anduze. Une explication possible est liée au ressaut hydraulique, qui est peut-être à l'origine d'une sur-estimation de ces débits.

		Systématique			Historique		
		Période	Q10	Q100	Période	Q10	Q100
Gardons	Alès	1893-1980	693 [611 ; 1063]	1334 [806 ; 1888]	1604-1891	766 [647 ; 895]	1650 [1312 ; 2132]
	Anduze	1892-2005	1074 [907 ; 1312]	2784 [1981 ; 4464]	1741-1891	1459 [1168 ; 1817]	5127 [3586 ; 7773]
	Mialet	1892-2005	247 [189 ; 337]	1165 [703 ; 2273]	1741-1891	272 [215 ; 348]	1248 [836 ; 2020]
	St Jean	1892-2005	297 [242 ; 377]	915 [613 ; 1596]	1841-1891	363 [294 ; 459]	1482 [1000 ; 2386]
Hérault	Ganges	1970-2005	1808 [1428 ; 2675]	2836 [2015 ; 6347]	1795-1969	1894 [1637 ; 2181]	3188 [2744 ; 3968]
	Gignac	1989-2005	1054 [922 ; 1275]	1483 [1233 ; 2214]	1812-1988	1008 [887 ; 1147]	1882 [1577 ; 2380]

**Tableau 14 : Synthèse sur l'estimation des quantiles Q10 et Q100 (avec intervalle de confiance à 90%)**

La prise en compte des crues historiques n'entraîne pas systématiquement une réduction des intervalles de confiances. Sur les Gardons, comme la période systématique couvre déjà un siècle, l'apport des crues plus anciennes dépend du nombre de fortes crues recensées et des incertitudes de reconstitution des débits. Sur l'Hérault, les incertitudes augmentent légèrement pour les quantiles à Ganges (fortes incertitudes sur les débits) alors qu'elles baissent fortement à Gignac.

Le fait de prendre en compte des erreurs indépendantes sur les débits liées à la courbe de tarage semble à l'origine d'une sous-estimation des quantiles par rapport à des erreurs systématiques (cf. cas de Ganges). De plus, dans le cas d'erreurs indépendantes, la distribution ajustée s'éloigne des fréquences empiriques.

## **VI. Analyse régionale des pluies et débits**

### **VI.1. Analyse fréquentielle des pluies**

L'analyse fréquentielle régionale des pluies se limite à l'exploitation des mesures pluviométriques de la banque pluvio de Météo-France. En effet, les données pluviométriques issues des archives se sont avérées très disparates. En général lorsqu'une crue remarquable est mentionnée on dispose d'un relevé pluviométrique à une station, plus rarement plusieurs stations. La faible densité spatiale des mesures pour les événements avant 1940 ne permet pas d'avoir de façon systématique un bon aperçu des champs de pluies associés au plus fortes crues. La cartographie des champs de pluie correspondant aux événements majeurs de l'Hérault a été réalisée à partir des mesures disponibles, essentiellement issues de la base de données de Météo-France. Pour l'analyse fréquentielle des pluies il a été décidé de procéder à l'analyse des pluies fortes en exploitant les données disponibles de Météo-France. La période d'observation retenue est 1950-2003 et le secteur d'observation est celui de l'Observatoire HydroMétéorologique Cévennes-Vivarais (Delrieux, 2003), une fenêtre de 250x250 km<sup>2</sup> centrée sur le massif Cévennois.

#### **VI.1.1. Objectif.**

L'objectif est d'étudier la distribution statistique des lames d'eau maximales précipitées durant les épisodes pluvieux méditerranéens remarquables, et d'analyser l'évolution de ces distributions avec la surface de calcul de la lame d'eau. Les résultats doivent permettre de caractériser l'aléa pluvieux dans l'espace Intensité-Fréquence-Surface touchée. La durée des pluies est fixée au pas de temps journalier pour garantir une densité de postes suffisante permettant la cartographie des champs de pluie pour tous les événements sélectionnés entre 1950 et 2003.

#### **VI.1.2. Démarche.**

La démarche consiste, pour chaque événement pluvieux, à rechercher la lame d'eau maximale observée sur une surface S. Les surfaces considérées varient de 1 km<sup>2</sup> à 3500 km<sup>2</sup> et sont supposées rectangulaires. Un événement est défini par l'observation d'un cumul minimum de 190 mm/j en au moins un poste du secteur d'étude. Lorsque ce critère est observé à une date donnée, toutes les mesures pluviométriques à cette date sont extraites de la base de données de Météo-France. 186 événements pluvieux sont ainsi sélectionnés en 54 ans, soit en moyenne 3.3 événements par an. Suivent ensuite une étape de cartographie et d'échantillonnage des lames d'eau.

#### **Cartographie des champs de pluie.**

Une technique de krigeage climatologique (Bastin et al., 1984) est mise en œuvre pour cartographier les 186 champs de pluie. La variogramme retenu est un modèle exponentiel sans pépite. Le champ de pluie est interpolé aux nœuds d'une grille régulière de maille 1x1 km<sup>2</sup> sur le domaine d'observation. La sensibilité des lames d'eau au modèle d'interpolation a été testée. On a considéré un krigeage avec un variogramme exponentiel événementiel (v1), un

variogramme climatologique exponentiel anisotrope avec une portée de 65 km suivant un axe 45°N et de 43 km suivant un axe perpendiculaire (v2) et enfin le variogramme climatologique exponentiel isotrope (v3). Pour chaque événement et pour chaque modèle de variogramme, on détermine la lame d'eau maximale sur une surface de 100 et 1000 km<sup>2</sup>. L'écart relatif sur les lames d'eau entre ces différents modèles d'interpolation pris deux à deux est dans 90% des cas inférieurs à 7% et l'écart relatif maximum n'excède pas 20%. La distribution des lames d'eau semble donc peu sensible à aux différents modèles de structure spatiale que l'on a testé et par la suite le modèle climatologique exponentiel anisotrope est retenu.

### Echantillonnage des lames d'eau.

Pour chaque champs journalier j, on échantillonne  $l_j(s)$  la lame d'eau maximale précipitée sur un surface rectangulaire d'aire s. Soit NPOS le nombre de positions possibles d'un rectangle d'aire s sur le domaine d'observation, le rectangle étant entièrement contenu dans le domaine. Soit  $l_{j,i}(s)$  la lame d'eau calculée sur le rectangle d'aire s à la position i

$$l_j(s) = \max[l_{j,i}(s)] \quad i=1 \text{ à } NPOS \quad (VI.1)$$

On note également  $x_j(s)$  et  $y_j(s)$  les coordonnées du centre du rectangle où la lame maximale a été observée.

On considère 19 aires différentes de 1 à 3481 km<sup>2</sup>, soient des rectangles de 1 à 59 km de coté. La figure XX présente une illustration de cette procédure d'échantillonnage pour un événement. La fonction  $l_j(s)$  décrivant l'évolution de la lame d'eau maximale de l'événement j en fonction de la surface s, représente le coefficient d'abattement épicyclotique de l'événement j.

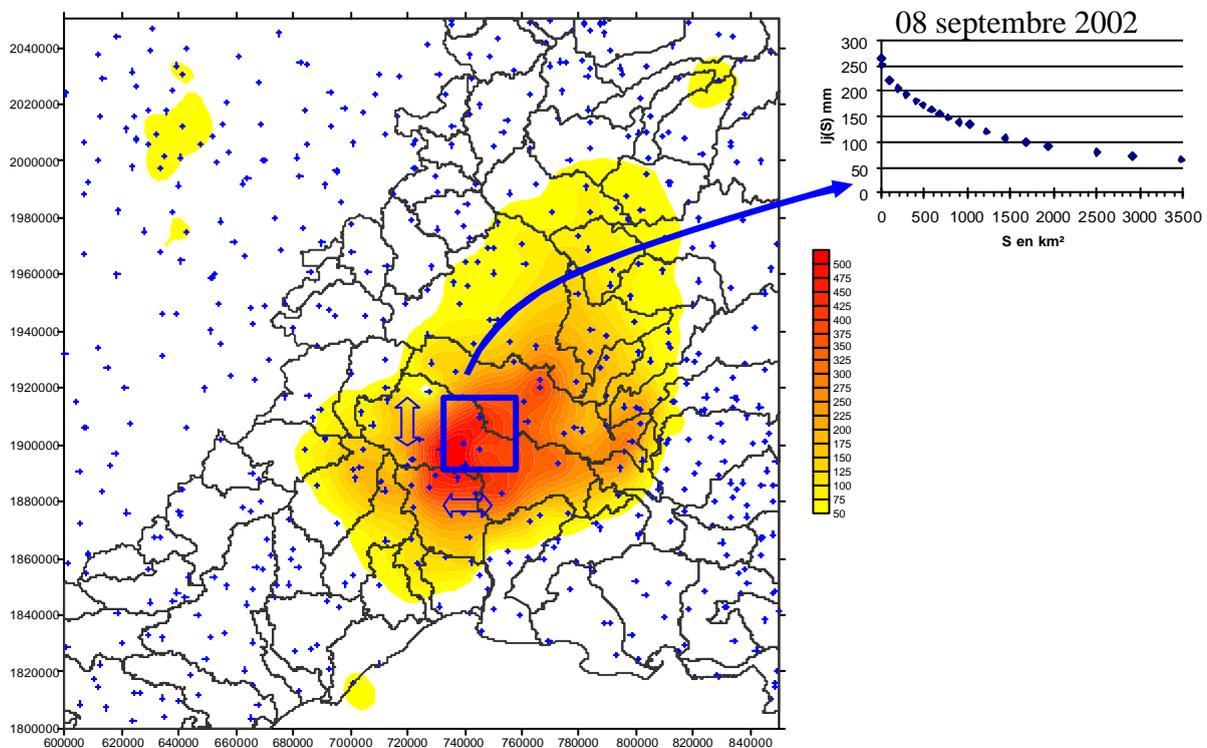


Figure 39 : illustration de l'échantillonnage des lames d'eau journalières maximum par événements sur différentes surfaces de calcul , cas du 08 septembre 2002. Echelle des pluies journalières en mm.

### VI.1.3. Distribution des lames d'eau.

#### Distribution théorique

Les échantillons  $L(S)$  sont de type sup/seuil. Pour une surface donnée, si le seuil est suffisamment grand, la distribution des dépassement de seuil peut être modélisée par une loi de Pareto Généralisées (GPD) (Pickands, 1975 ; Beirlant et al., 2005). Si  $X$  est une variable aléatoire GPD, sa fonction de répartition s'exprime par :

$$F(x) = \begin{cases} 1 - [1 - \frac{k}{a}(x-u)]^{1/k}, & \text{si } k \neq 0 \\ 1 - \exp[-(x-u)/a], & \text{si } k = 0 \end{cases} \quad (VI.2)$$

$F(x)$  désigne la probabilité de non dépassement,  $u$  le seuil,  $\alpha$  le paramètre d'échelle et  $k$  e paramètre de forme.

Le choix du seuil « suffisamment important » est effectué en faisant varier le critère de sélection des événements et en recherchant à partir de quelle valeur supérieure ou égale à 190 mm/j , le nombre de dépassements de seuil annuel était distribué suivant une loi de Poisson. Le seuil ainsi retenu est de 220 mm, on observe alors en moyenne  $\lambda=1.94$  événements par an.

Les distributions empiriques correspondant semblent indiquer une relation d'échelle entre les différentes distributions  $L(S)$ , analogue à la relation d'échelle existant dans le temps lorsqu'on s'intéresse aux courbes intensités durées fréquence (IDF) d'une station.

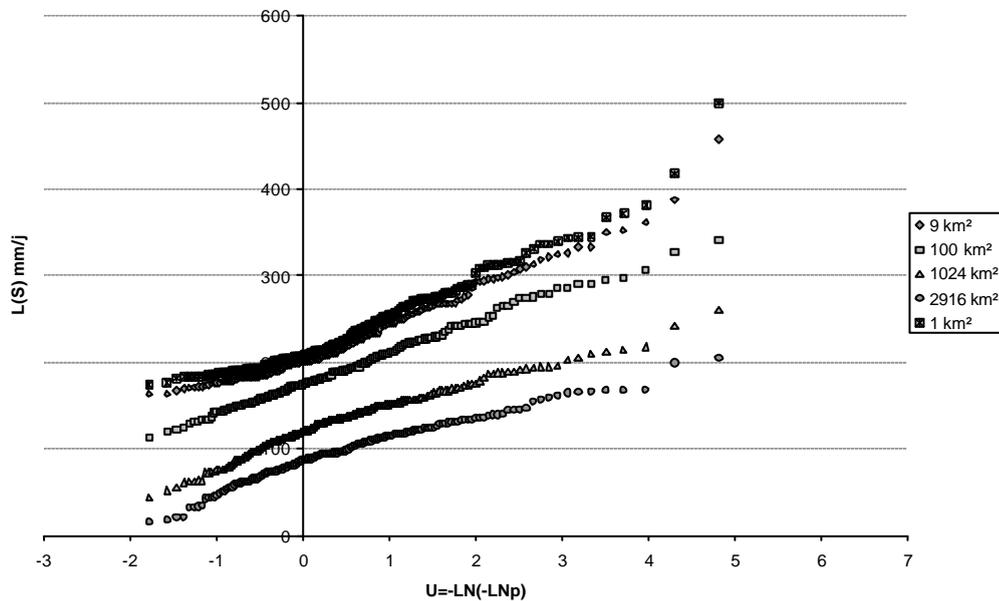


Figure 40 : distribution empirique des lames d'eau maximales pour différentes surfaces de calcul.

#### Modèle lame-Surface-Période de retour (LST)

L'observation précédente est utilisée pour construire un modèle d'évolution des Lames d'eau journalières en fonction de la Surface et de la période de retour (LST). Le modèle repose sur l'extension de la méthodologie générale de construction des courbes IDF proposée par Koutsoyannis (1998). La relation d'échelle des lames dans l'espace est représentée de la même manière que la relation d'échelle des intensités dans le temps. Ainsi la lame d'eau journalière sur une surface S, de période de retour T, est donnée par :

$$L(S,T) = \frac{u + \frac{\alpha}{k}(1-(IT)^{-k})}{(S+\eta)^h} \quad (\text{VI.3})$$

L'expression du numérateur dépend de la loi de distribution des lames d'eau. Dans notre cas il s'agit d'une GPD de paramètres u,  $\alpha$  et k. L'expression au dénominateur décrit la relation d'échelle avec deux paramètres  $\theta$  et  $\eta$ .  $\lambda$  représente le nombre moyen d'événements par an.

### Estimation des paramètres du modèle LST

Soient  $\hat{L}(S_i)_j$  la lame d'eau sur la surface  $S_i$ , de rang j observée dans l'échantillon et  $L(S_i)_j$  le quantile de rang j théorique obtenu avec l'équation (VI.2). Les 5 paramètres sont déterminés en minimisant la fonction critère  $e(\alpha, u, k, \theta, \eta)$  :

$$e = \frac{1}{n \cdot ns} \sum_{i=1}^{ns} \sum_{s=1}^n \left[ LN \frac{\hat{L}(S_i)_j}{L(S_i)_j} \right]^2 \quad (\text{VI.4})$$

où n est l'effectif des lames d'eau pour chaque surface considérée et ns le nombre de surfaces différentes considérées. Les surfaces considérées varient entre 9 et environ 3500 km<sup>2</sup>.

Les résultats fournissent le jeu de paramètres suivant :  $\alpha = 153.2$ ,  $u = 761$ ,  $\theta = 151.09$ ,  $\eta = 0.251$  et  $k = -0.14$ . La figure XX montre ces ajustements pour quelques surfaces. L'hypothèse d'une distribution unique, indépendante de la surface de calcul, semble acceptable. On remarque également le paramètre de forme des distributions de Pareto,  $k = -0.14$  : il est négatif et traduit un comportement hyper exponentiel des distributions  $L(S)$  qui appartiennent au domaine de Fréchet.

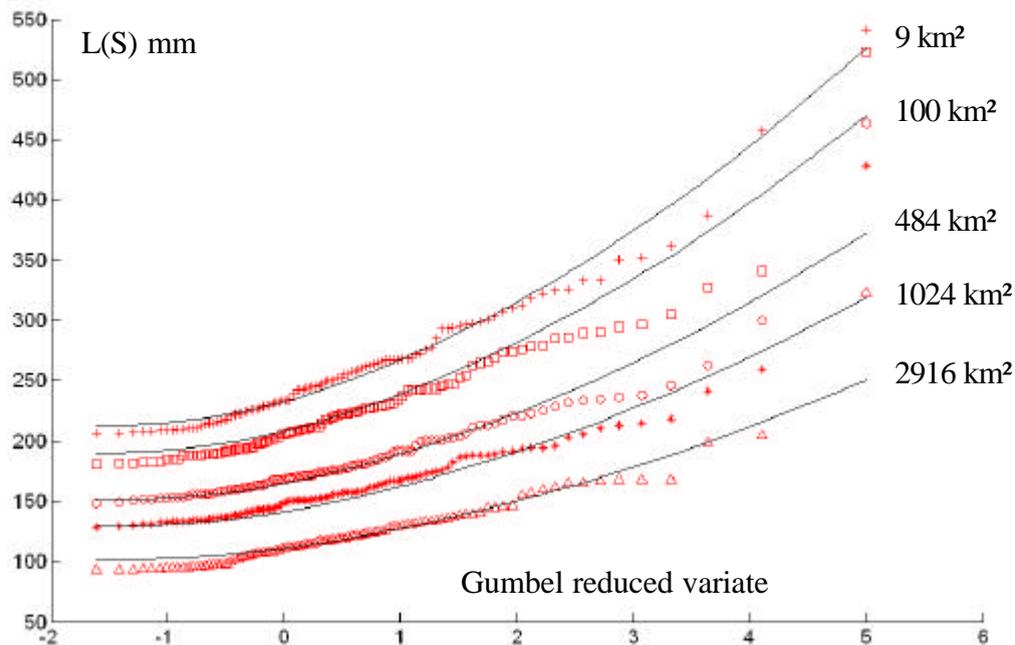


Figure 41 : Calage du modèle LST sur les distributions empiriques des lames d'eau

### Discussion.

Le comportement hyper exponentiel des distributions de lame d'eau est cohérent avec la distribution régionale des pluies journalières maximales annuelles en un point (Dominguez et al., 2005, Neppel et al., 2006). La loi régionale des maxima annuels ponctuels est une GEV dont le paramètre de forme a été estimé à  $-0.13$ . Dans l'expression VI.2, lorsque  $S$  tend vers zéro, on obtient la distribution régionale des pluies « ponctuelles » supérieures au seuil de 220 mm/j. Or un résultat général de la théorie des valeurs extrêmes est que si les pluies sup/seuil suivent une loi de Pareto, alors la distribution des pluies maximales annuelles suit une GEV de même paramètre de forme. On retrouve bien un paramètre de forme très proche entre la GEV des max annuels ponctuels et de la GPD des sup/seuil ponctuel déduite du modèle LST.

Une hypothèse parfois avancée pour expliquer le caractère non Gumbélien des pluies est l'hétérogénéité de l'échantillon (Garçon et al., 2006), cependant une étude sur les pluies journalières maximales annuelles et saisonnières de la longue série de Marseille semble montrer qu'au contraire l'hétérogénéité de l'échantillon masque une distribution de Fréchet des pluies fortes (Bacro et al., 2006). L'échantillon étant constitué de lame d'eau annuelle, on peut s'attendre à une certaine hétérogénéité des situations météorologiques à l'origine des événements retenus. Afin de vérifier si le comportement asymptotique des lames d'eau est lié à cette hétérogénéité, la méthodologie présentée pour l'ajustement des lames d'eau annuelles est appliquée sur les lames d'eau saisonnières (Flecher, 2006). La saison à plus forte probabilité d'occurrence des événements est constituée des mois de septembre à décembre. Elle regroupe 75% des événements dépassant 190 mm/j. Les paramètres que l'on obtient, correspondant à la saison automne sont  $u=480.6$ ,  $\alpha=88.5$ ,  $\theta=116.3$ ,  $\eta=0.203$  et  $k=-0.15$ . On constate que le comportement hyper exponentiel subsiste malgré le découpage saisonnier.

On note que les courbes LST présentées ici ne sont pas spécifiques à un bassin. Compte tenu de la démarche utilisée, on peut les considérer comme des courbes enveloppes régionales sur le secteur étudié. Ainsi tout bassin inclus dans cette zone aura une distribution des lames d'eau inférieure ou égale à celle fournie par les courbes LST. Elle ne représenterait la distribution des lames d'eau d'un bassin que si l'on suppose que la distribution spatiale des lames d'eau maximales par événement est uniforme sur le secteur d'observation.

#### VI.1.4. Localisation des plus forts volumes précipités.

L'objectif est d'analyser la répartition spatiale des plus forts cumuls journaliers observés durant les 182 événements sélectionnés. Lors de la démarche d'échantillonnage des lames d'eau maximales sur une surface  $s$  pour un épisode  $i$ , nous avons collecté les coordonnées  $x_i(s)$  et  $y_i(s)$  du centre du carré où était observé la lame maxi.

Pour décrire la densité  $f(x,y)$  de cette distribution, on utilise les méthodes non paramétriques des fonctions à noyaux. On expose ici brièvement son principe. Soit un échantillon de  $n$  points  $u_i=(x_i,y_i)_{i=1 \text{ à } n}$ , observés sur un domaine fixé. L'estimation de la densité  $f(x,y)$  en point  $u=(x,y)$  du domaine est réalisée par :

$$f(x,y) = \frac{1}{n} \frac{1}{h_x} \frac{1}{h_y} \sum_{i=1}^n K\left(\frac{x-x_i}{h_x}\right) K\left(\frac{y-y_i}{h_y}\right) \quad (\text{VI.5})$$

La fonction  $K(u_i)$  est la fonction noyau, elle caractérise l'influence d'une observation en  $u_i$  sur la fonction densité estimée en  $(x,y)$ . L'influence de  $u_i$  sur la densité  $f(x,y)$  est nulle au-delà d'une fenêtre  $(h_x,h_y)$  centrée sur  $u_i$ . Dans le cas d'un histogramme de densité classique la fonction  $K$  est une constante sur une fenêtre correspondant à l'amplitude de chaque classe considérée. Avec les fonctions noyaux on considère que la contribution d'une observation  $u_i$  à la densité  $f(x,y)$  est d'autant plus importante que  $(x,y)$  est proche de  $u_i$ . Dans notre cas, on suppose que l'influence du point  $u_i$  sur la fonction de densité décroît exponentiellement lorsqu'on s'éloigne de  $u_i$ , ce qui traduit par le choix d'un noyau gaussien :

$$K(u)=(2\pi)^{-0.5} \exp(-0.5u^2) \quad (\text{VI.6})$$

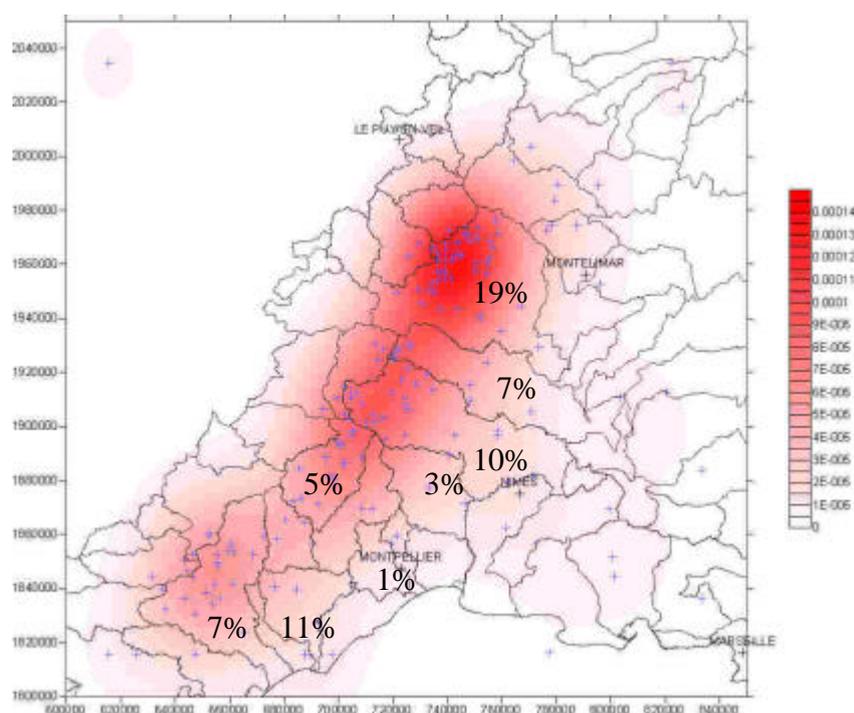
La fenêtre d'observation  $(h_x,h_y)$  est déterminée en optimisant la fonction de vraisemblance. Il existe d'autres fonctions noyaux et techniques d'estimation de la fenêtre, on trouvera un descriptif général détaillé par exemple dans Silvermann (1986).

L'estimation de la densité  $f(x,y)$  des points  $(x_i(s),y_i(s))_{i=1 \text{ à } 182}$  est présentée pour les lames d'eau maximales calculées sur la surface  $S=1023 \text{ km}^2$ . La localisation des zones de forts cumuls variant peu suivant la surface de calcul, les densités  $f_s$  sont peu influencées par  $S$ .

A l'échelle annuelle, le tracé de la densité  $f_s(x,y)$  montre que la localisation des plus forts volumes journaliers précipités n'est pas uniforme sur la région. Les modes de la densité apparaissent clairement influencés par les reliefs : la zone à forte densité s'organise suivant une ellipse allongée suivant l'orientation des massifs montagneux des Cévennes et, plus à l'ouest, des monts de l'Espinouse et du Caroux. Cela confirme l'influence du relief sur le volume journalier précipité.

Si l'on intègre la densité  $fs(x,y)$  sur un domaine, par exemple la surface d'un bassin, on obtient la probabilité que les plus forts cumuls journaliers affecte ce bassin, sachant qu'un événement de plus 190 mm/j touche le secteur d'observation. Ainsi, la probabilité d'observer les plus forts cumuls journaliers d'un événement est d'environ 60% sur le domaine formé des bassins de l'Ardèche, de la Cèze, du Gard, du Vidourle, de l'Hérault et de l'Orb. Le bassin versant de l'Ardèche a une forte probabilité (19%) d'être affecté par les cumuls journaliers les plus importants d'un événement, contre 11% pour l'Hérault, 10% pour le Gard, 7% pour l'Orb, 7% pour la Cèze et 3% pour le Vidourle. Sur chaque bassin on a gradient de densité important d'amont en aval, traduisant le rôle du relief sur la localisation des plus forts cumuls. Enfin la probabilité d'observer les plus forts cumuls journaliers sur les bassins de plaines est très faible, un peu plus d'1% pour les bassins Lez-Mosson, mais elle n'est pas nulle.

Globalement à l'échelle saisonnière, on retrouve l'organisation spatiale des plus forts cumuls journaliers décrits à l'échelle annuelle, mis à part pour les mois de juin à août où la densité paraît plus uniforme sur la région. On peut y voir le rôle moins marqué du relief dans la localisation spatiale des plus forts cumuls journaliers, ceux-ci étant plus souvent liés à des orages durant ces mois. Durant les trois mois d'automne, on note aussi une tendance plus marquée à observer les plus forts cumuls dans les zones de plaines, sur la partie aval des bassins.



**Figure 42 : densité de l'occurrence des plus forts cumuls journaliers sur 1023 km<sup>2</sup>, année entière. Les croix sont les localisations des plus forts cumuls journaliers observés, les chiffres indiquent la probabilité que les plus forts cumuls soient localisés sur le bassin considéré**

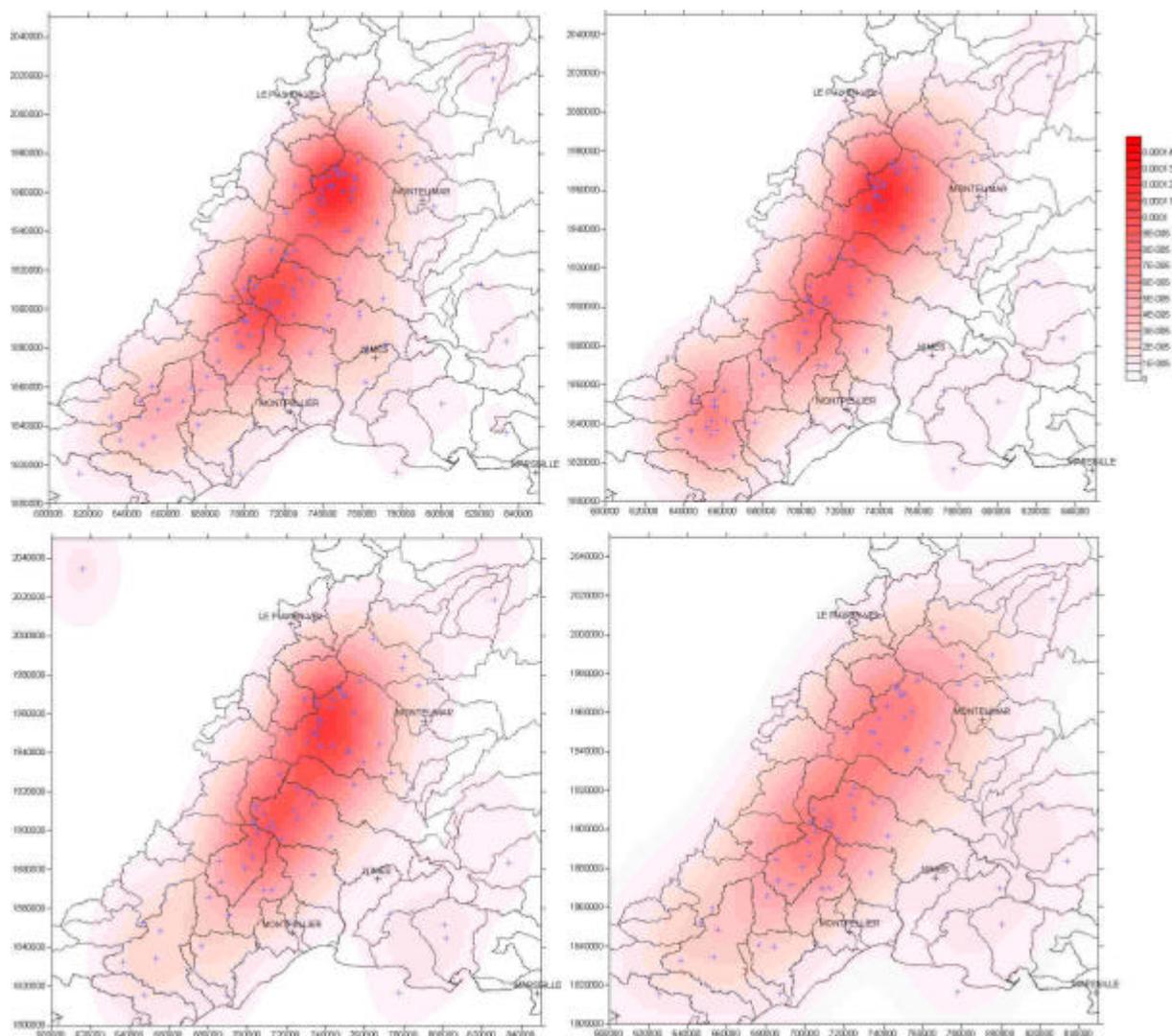


Figure 43 : Densité de l'occurrence des plus forts cumuls journaliers sur 1023 km<sup>2</sup> respectivement de gauche à droite et de haut en bas : saison automne (septembre-novembre), hiver (décembre-février), printemps (mars-mai), été (juin-août)

### VI.1.5. Conclusions

La méthode développée permet de caractériser l'aléa pluvieux au moyen de courbe lame journalière – surface - fréquence à l'échelle régionale. Par construction, elles constituent une borne supérieure des distributions de lame d'eau sur un bassin quelconque du domaine d'observation. La distribution des lames d'eau journalière maximale présente un caractère hyper exponentiel, en accord avec des approches régionales de pluie ponctuelle. Ce comportement ne semble pas lié à une hétérogénéité de l'échantillon en terme de situation météorologique.

On met également en évidence une organisation spatiale des plus forts cumuls journaliers durant les épisodes pluvieux extrêmes, fortement conditionnée par le relief cévenol. Le lien entre distribution région des lames et celle d'un BV via la distribution spatiale des plus forts cumuls reste à établir. Une étude similaire à des pas de temps infra journalier reste à réaliser.

## VI.2. Méthode du Gradex et distribution des débits de crues historiques

L'objectif est de comparer une méthode de prédétermination des débits de pointe largement employé en ingénierie avec la distribution des débits de crues utilisant les crues historiques. Celle-ci peut servir de référence pour juger de l'efficacité du Gradex. Dans le cadre de ce travail le site de Ganges a été retenu, ainsi que les quatre petits bassins versants de l'Aude.

### VI.2.1. Application du gradex sur le bassin de l'Hérault à Ganges.

a) Détermination du Gradex des pluies.

Nous ne disposons que de données pluviométriques et non de chroniques pluviographiques permettant une estimation du gradex. Le gradex correspond à celui des pluies journalières, deux méthodes d'estimation sont proposées. On note que la durée de cumul des pluies est peu adaptée au temps caractéristique du bassin, plutôt de l'ordre de 6h, mais c'est les seules données dont on dispose.

Méthode 1 : hypothèse haute

On utilise la distribution régionale des lames d'eau journalière maximales par événement présentée au paragraphe VI.1. Elle représente la distribution enveloppe des lames d'eau sur le secteur d'étude, pour toutes surfaces comprises entre 1 et 3000 km<sup>2</sup>. Son expression générale est :

$$L(S,T) = \frac{u + \frac{\alpha}{k}(1 - (IT)^{-k})}{(S + q)^h} \quad (\text{VI.7})$$

Avec  $u=761$  ;  $\alpha=153.2$  ;  $\theta=151.09$  ;  $\eta=0.251$  ;  $\lambda=1.94$ .

Pour la surface de l'Hérault à Ganges (756 km<sup>2</sup>), la distribution enveloppe des lames d'eau journalières sur cette surface s'écrit :

$$L(T) = 137.72 - 198.04(1 - (1.94T)^{0.14}) \quad (\text{VI.8})$$

Cette loi ne présente pas de caractère asymptotiquement exponentiel. La pente de la distribution  $a_p(T)$  augmente toujours avec la période de retour :

$$a_p(T) = dL(T)/dLn(T) = T dL(T)/d(T) = 30.42 T^{0.14} \quad (\text{VI.9})$$

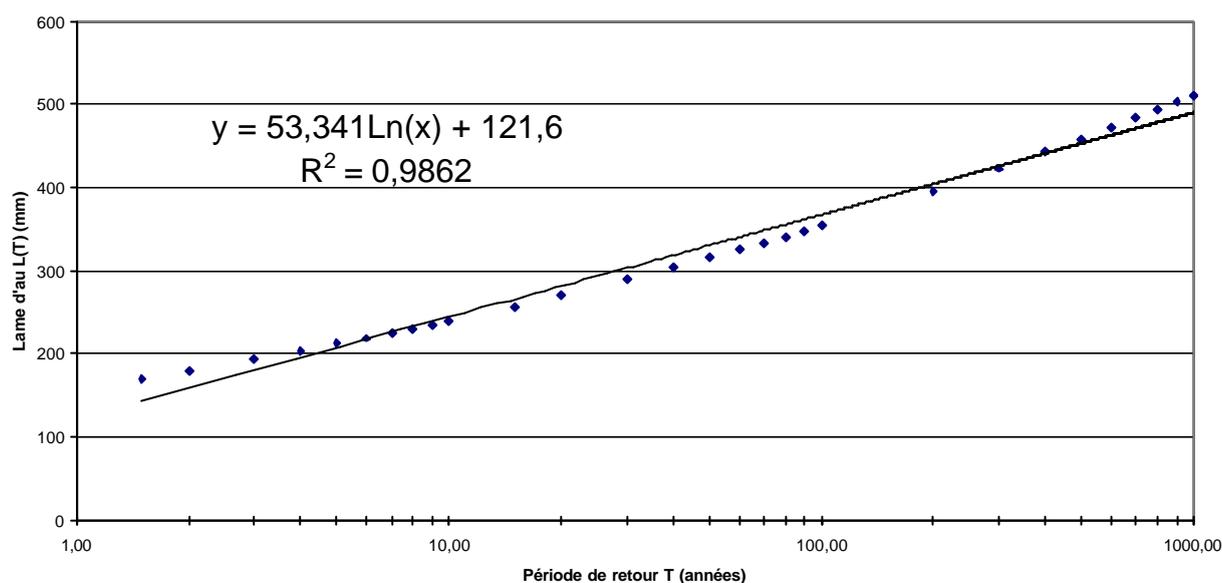
Elle conduit à des valeurs de gradex nettement plus fortes que celles issues d'une analyse locale, de 4 à 10 fois plus fortes pour les périodes de retour comprises entre 10 et 10 000 ans :

T (en années)	10	50	100	1000	10 000
$a_p(T)$ (en mm)	42	52.6	58	80	110

Nous retiendrons ici, pour l'application de la méthode du Gradex, une valeur de gradex obtenue en ajustant une droite sur les valeurs  $a_p(T)$  pour des périodes de retour comprises entre 10 et 1 000 ans :

**gradex 2 = 53 mm.**

### Lame d'eau journalière à Ganges (courbe enveloppe régionale)

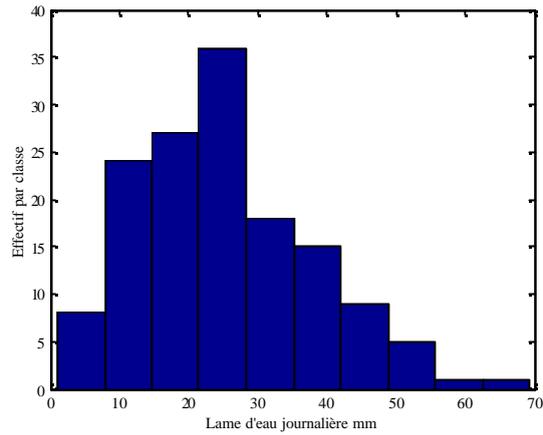


**Figure 44 : Valeur du gradex retenue à partir de la courbe enveloppe régionale des précipitations**

Compte tenu de la méthode de construction des courbes LST, il s'agit là d'une hypothèse « haute » pour l'estimation du gradex des pluies de bassin.

Méthode 2 : hypothèse basse.

Elle consiste en un ajustement direct d'une distribution aux lames d'eau journalières produites par des événements dépassant 190 mm/j sur le bassin de l'Hérault à Ganges. A partir des 186 événements journaliers dépassant 190 mm/j sur le secteur OHMCV, on retient les 144 événements ayant généré plus 190 mm/j sur le bassin de l'Hérault à Ganges (Figure 45). On calcule la lame d'eau produite sur ce bassin.



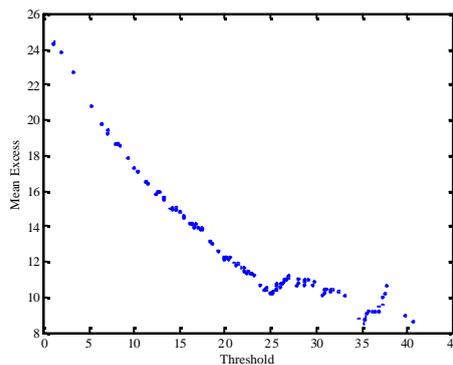
**Figure 45 : Histogramme des lames d'eau journalières sur l'Hérault à Ganges, sachant que l'événement a généré au moins 190 mm en un point.**

L'échantillonnage est de type sup-seuil, à priori une loi GPD peut être utilisée pour représenter la distribution des lames. La fonction de répartition des dépassements du seuil s'exprime par :

$$F(x) = \begin{cases} 1 - \left(1 + \frac{x}{\beta}\right)^{-\xi}, & \text{si } x \neq 0 \\ 1 - \exp(-x/\beta), & \text{si } x = 0 \end{cases} \quad (\text{VI.10})$$

avec  $\beta$ , paramètre de forme,  $\xi$  paramètre d'échelle (avec cette expression,  $\xi > 0$  correspond au domaine de Fréchet,  $\xi < 0$  à des valeurs extrêmes bornées)

L'allure de la Mean Excess Function (MEF, Figure 46) permet d'avoir une idée du seuil au delà duquel les dépassements de seuil peuvent être modélisés par une GPD.



**Figure 46 : MEF pour les lames d'eau journalières sur l'Hérault à Ganges**

L'allure de la MEF est linéaire décroissante ce qui laisse supposer un coefficient de forme négatif correspondant à une loi bornée vers les fréquences rares. On choisit le seuil de 25 mm pour déterminer les paramètres de la GPD. Ils sont estimés par la méthode du maximum de vraisemblance (Figure 47):  $\beta=11.407$  et  $\xi=-0.12$  avec les écarts types d'estimation  $\sigma_{\xi}=0.1273$  et  $\sigma_{\beta}=1.978$ .

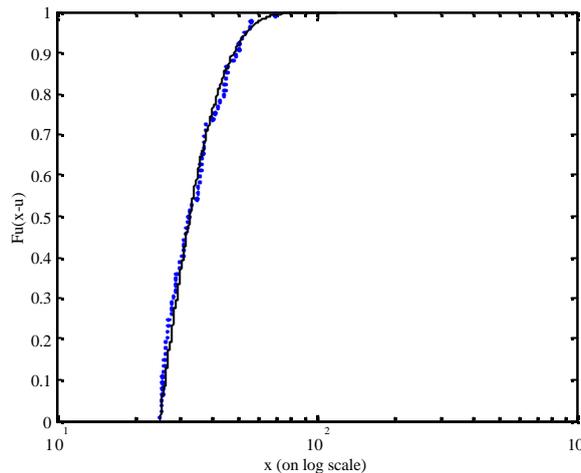


Figure 47 : ajustement d'une GPD sur les lames dépassant 25 mm, bassin de l'Hérault à Ganges

On constate :

$\xi < 0$ , ce qui laisse supposer une distribution bornée pour les fréquences rares ;

Un écart type d'estimation de  $\xi$  du même ordre de grandeur que  $\xi$ . Si en 1<sup>er</sup> approximation on suppose une distribution d'échantillonnage normale de  $\xi$ , celui-ci n'est pas significativement différent de zéro. Ainsi la distribution des lames d'eau ne serait pas significativement différente d'une distribution exponentielle.

La distribution exponentielle des lames sur le bassin de l'Hérault peut constituer une hypothèse « basse » pour l'estimation du gradex des pluies de bassin.

b) Extrapolation des débits de crues par le gradex.

L'application de la méthode Agréee (Margoum, 1992 ; Margoum *et al.*, 1994) dans le cas d'une loi exponentielle pour les pluies donne la formule suivante pour l'extrapolation de la distribution du débit journalier maximum annuel partir du gradex des pluies journalières :

$$QIJ(T) = QIJ(T_g) + a_p \text{Ln}[(T+K_q)/(T_g+K_q)] \text{ avec } K_q = [a_p/a_q(T_g) - 1] T_g \quad (\text{VI.11})$$

où :

$T_g$  : seuil d'extrapolation avec l'information pluviométrique

$a_p$  : gradex des pluies (en  $\text{m}^3/\text{s}$ )

$a_q(T_g)$  : pente de la distribution des débits pour  $T = T_g$  (en  $\text{m}^3/\text{s}$ )

Le passage au quantile de débit de pointe  $Q_p(T)$  s'effectue en retenant la valeur moyenne du rapport de pointe de crue  $RIJ = Q_p(T)/QIJ(T) = 1.47$ . L'hypothèse d'une invariance de forme semble acceptable, comme le montre la Figure 48, obtenue en utilisant 35 événements de crue issus de la chronique 1970-2005 de la station Diren.

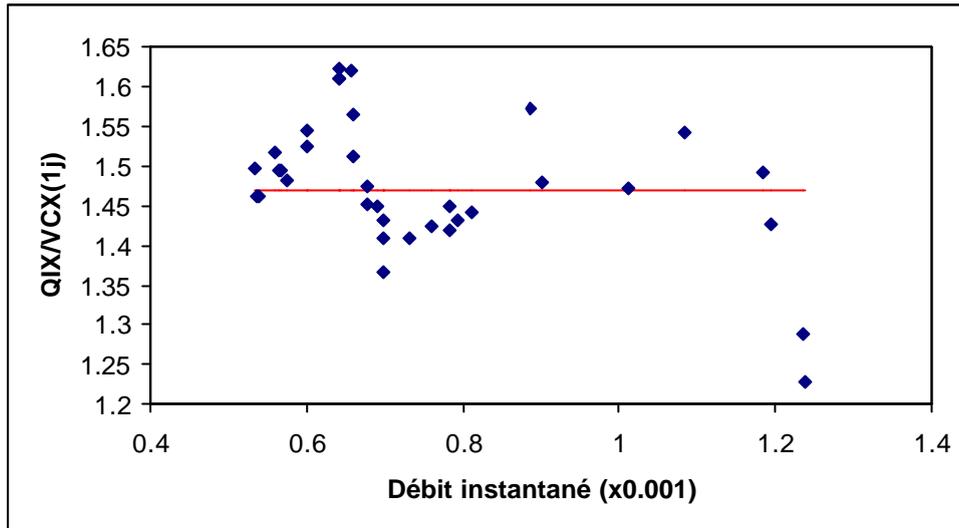


Figure 48 Valeur du rapport de forme en fonction du débit de pointe (station Diren, Ganges, 1970-2005)

L'application numérique avec les valeurs suivantes :

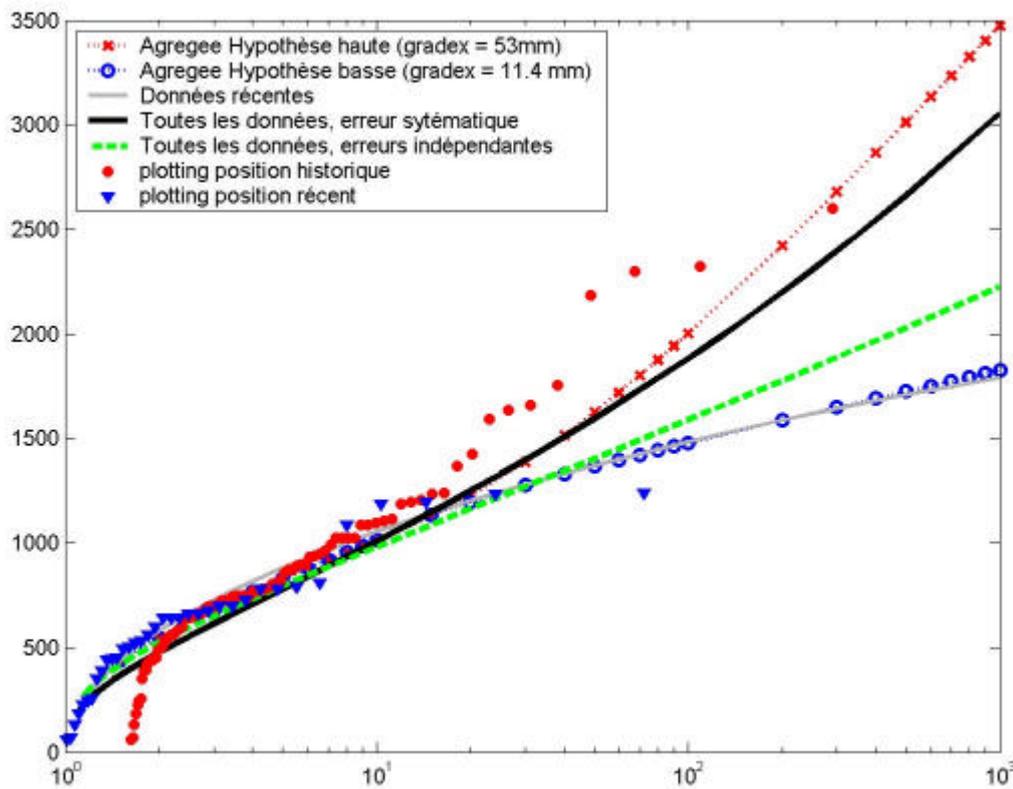
- ✓  $T_g = 10$  ans ;  $Q_p(T_g) = 1014 \text{ m}^3/\text{s}$
- ✓  $a_q(T_g) = 247 \text{ m}^3/\text{s}$  pour le débit de pointe  
soit  $a_q(T_g) = 247/1.47 = 168 \text{ m}^3/\text{s}$  pour le débit journalier
- ✓  $a_p(\text{m}^3/\text{s}) = a_p(\text{mm}) S (\text{km}^2) / (3.6 \text{ d}(\text{h}))$

$a_p$ (en mm)	11.4	53
$a_p$ (en $\text{m}^3/\text{s}$ )	99.75	463.75
$K_q$	-4.06	17.6

donne les deux expressions :

- Hypothèse basse sur le gradex de bassin (11.4 mm)  
 $Q_p(T) = 1014 + 146.6 \text{ Ln}[(T + 4.06) / 5.94]$  (VI.12)
- Hypothèse haute sur le gradex de bassin (57 mm)  
 $Q_p(T) = 1014 + 681.7 \text{ Ln}[(T + 17.6) / 27.6]$  (VI.13)

Les résultats sont présentés Figure 49. Ils montrent d'une part la forte différence entre la distribution empirique des crues, sur la période récente 1970-2005 et sur la période complète 1795-2005, en rajoutant les crues historiques. L'ajustement d'une loi GEV sur l'ensemble de la période, en considérant des erreurs indépendantes entre tous les débits, n'est pas satisfaisant et ne parvient pas à suivre la distribution empirique des crues. Au contraire, l'utilisation d'une erreur systématique pour la période ancienne conduit à une loi GEV plus en accord avec la distribution empirique.



**Figure 49. Comparaison des distributions empiriques (période récente, et période historique) avec une loi GEV ajustée sur la période complète (erreurs de reconstitution des débits supposées indépendantes ou liées à la courbe de tarage), et avec une extrapolation avec le gradex des pluies (loi régionale-hypothèse haute ; loi locale : hypothèse basse)**

Dans le cas où l'on extrapole la distribution des crues avec un gradex journalier de bassin de 11.4 mm, on obtient une distribution courbée vers le bas, du fait d'un gradex des pluies inférieur à la pente de la distribution des pluies. Ceci est surprenant, d'autant que ce comportement n'est pas rencontré sur les bassins voisins du Gard et de l'Aude. On constate que cette extrapolation semble en accord avec la distribution empirique des crues sur la période récente 1970-2005, ce qui la aussi est surprenant car la méthode du Gradex conduit généralement à une extrapolation plus forte que celle obtenue avec une série courte de débits.

Quand on compare maintenant ces deux distributions avec les données collectées sur la période 1795-2005, on s'aperçoit que le comportement sous-exponentiel sur la période récente n'est pas justifié et résulte vraisemblablement des incertitudes d'échantillonnage. L'extrapolation au-delà du quantile décennal avec un gradex journalier de bassin de 57 mm issu d'une analyse régionale est cohérente avec la distribution empirique de la période 1795-2005.

Ce résultat montre d'une part que la prise en compte des événements historiques avec une modélisation adéquate des erreurs permet de retrouver un comportement asymptotique suggéré par les pluies. Il montre d'autre part qu'une estimation locale de la distribution des pluies sur le secteur Cévennes-Vivarais sous-estime certainement le risque d'événements

pluviométriques forts. Le manque de concordance relevé entre les débits reconstitués à Ganges (échelle d'annonce des crues, église de Laroque, station Diren), a été pris en compte dans le cas présent avec un intervalle d'incertitude plus fort sur les débits.

Il est difficile de tirer des conclusions définitives sur ce seul cas d'étude. Il reste à poursuivre la comparaison entre la distribution empirique des crues reconstituées sur deux siècles sur les autres bassins, avec des extrapolations basées sur les pluies sur un pas de temps compatible avec la dynamique des crues. Dans le cas de l'Hérault à Ganges, le choix d'un pas de temps journalier est acceptable. Sur des bassins de taille plus réduite, il sera nécessaire d'étudier la distribution des pluies extrêmes à partir de données pluviographiques.

## VI.2.2. Application du Gradex sur les bassins versant de l'Aude

### a) Détermination du gradex des pluies

On dispose pour ces bassins des pluies journalières ayant dépassé 90 mm/j pour tous les postes. Les événements pluvieux les plus forts sont retenus pour évaluer les gradex. Ceux de la Montagne noire (BV de l'Orbiel et de la Clamoux) ne diffèrent pas significativement de ceux des Corbières (BV de la Saltz et du Lauquet), respectivement 38.7 mm et 35.6 mm.

### b) Extrapolation des débits de crues par le gradex

Le rapport de forme est estimé en moyenne entre 1.92 et 4.07 suivant les bassins. De façon générale, les extrapolations par le gradex des pluies des distributions basées sur les données systématiques sont cohérentes avec les distributions historiques au moins dans la gamme des périodes de retour de 100 à 200 ans (Figure 50). Ce résultat est observé sur les quatre bassins testés, la variabilité des débits observée d'un bassin à l'autre est reproduite correctement grâce au rapport de forme très différent pour chaque bassin.

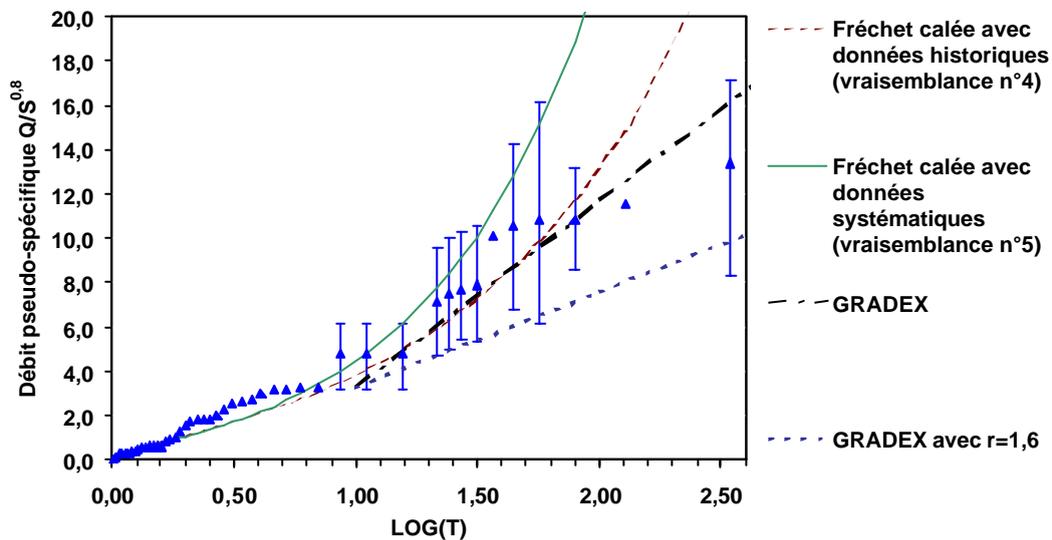


Figure 50 : Application de méthode du gradex sur le bassin versant du Lauquet.

### **VI.2.3. Conclusion**

La méthode du Gradex appliquée à la période systématique est relativement concordante avec les distributions des débits incluant les crues historiques, au moins jusqu'à des périodes de retour de l'ordre de 200 ans, si le facteur de forme est correctement évalué. Cette comparaison reste cependant à affiner en particulier car le pas de temps des pluies est supérieur au temps de base des bassins.

## **VII. Conclusion générale**

Sur le plan scientifique, un des objectifs du projet était de tester et valider la collecte des données historiques sur les crues. Des informations valorisables ont pu être collectées sur les différents secteurs étudiés jusqu'à la fin du XIXe. Avant le XIXe les informations sont plus rarement exploitables par estimer les débits des crues, mais un classement qualitatif des crues a néanmoins été proposé.

Ce travail a également permis d'identifier les sources documentaires à explorer en priorité car elles contiennent la majeure partie des informations exploitables. Ceci devrait permettre un gain de temps dans les collectes des informations historiques pour les études ultérieures. On notera que la source la plus riche d'informations reste les archives des services d'annonce de crues, au moins du XXe à la fin du XIXe siècle. Cependant, nous avons constaté que cette source documentaire est extrêmement fragile. La conservation de ces archives dépend des services d'annonce de crues, et dans certains cas elles ont disparu.

Concernant la critique et la validation des informations collectées, pour les crues du XXe et de la fin du XIXe siècle, la principale incertitude provient de l'historique des échelles limnimétriques (position de l'échelle, cote du zéro) qu'il est très souvent difficile de reconstituer, même dans les dernières années. Ceci traduit par une incertitude sur les cotes des crues. La seconde source d'incertitude dans l'estimation des débits de crues provient des courbes de tarages liées à des descriptions souvent partielles des sections d'écoulement pour les périodes anciennes. Cette incertitude est amplifiée dans les secteurs caractérisés par une forte instabilité des sections où des hypothèses lourdes ont dû être faites sur le nombre de courbes de tarage à considérer et les caractéristiques géométriques des sections associées à chacune d'elle.

Ces différentes incertitudes ont été prises en compte pour estimer les distributions des débits de crues à chaque secteur. Une approche Bayésienne est mise en œuvre pour estimer les paramètres des lois GEV. Elle constitue un cadre théorique permettant la prise en compte des crues historiques et des différentes sources d'incertitudes. Les distributions des débits de crues obtenues appartiennent toutes du domaine de Frechet, c'est-à-dire qu'elles présentent un comportement sur exponentiel. Seul le bassin de l'Hérault à Gignac fait exception. Il s'agit du bassin le plus étendu parmi ceux étudiés, plus de 1300 km<sup>2</sup>, et aussi celui pour lequel les incertitudes sur les courbes de tarages sont les plus grandes. Dans la plupart des cas les distributions utilisant la période systématique seule tendent à sous estimer les quantiles par rapport à la distribution exploitant aussi la période historique.

La réduction des intervalles de confiance n'est pas toujours observée en prenant en compte les crues historiques, en particulier sur les bassins du Gard. Ceci provient d'une part du fait que l'on a considéré que la période systématique commence dès 1892 et d'autre part du fait que les crues antérieures à cette date sont entachées d'une large incertitude.

Les distributions des débits de crues exploitant l'information historique peuvent servir de référence pour comparer des méthodes de prédétermination de crues. La méthode du gradex a été testée sur des bassins versant de 42 à 756 km<sup>2</sup>. Les extrapolations des distributions 'systématiques' des débits de crues avec les gradex des pluies sont cohérentes avec les distributions historiques, au moins pour des périodes de retour de l'ordre de 100 à 200 ans. La méthode du gradex apparaît ainsi comme une méthode intéressante pour la prédétermination

des crues rares, au moins dans la gamme des périodes de retour citées, car elle ne nécessite pas le recours aux crues historiques, seulement la distribution des crues de la période récente et du comportement de la distribution des pluies.

Sur le plan opérationnel, l'intégration des crues historiques, même estimées avec de larges incertitudes, permet de préciser les quantiles de crues de références. Ceux-ci apparaissent fortement sous-estimés si l'on s'appuie uniquement sur la période systématique. Une hiérarchisation des crues anciennes apparaît cependant délicate, en particulier les intervalles d'erreur des débits estimés sont larges et ne permettent pas un classement significatif.

Enfin cette étude a permis d'obtenir des distributions de débits de crues qui peuvent servir de référence pour évaluer différentes méthodes de prédétermination de crues. Ce point n'a été que partiellement abordé dans le cadre de ce travail, seule la méthode du gradex a été utilisée, sur quelques bassins. En perspective nous proposons une comparaison plus systématique d'autre méthode de prédétermination sur les différents bassins de références.

### **VIII. Bibliographie citée dans le texte:**

Bacro, J.N., Chaouche, A. (2006) Incertitude d'estimation des pluies extrêmes du pourtour méditerranéen : illustration par les données de Marseille. *Hydrol. Sci. J.*, in Press..

Bastin G., Lorent, C., Duqué, C., and Gevers, M. (1984) Optimal estimation of the average areal rainfall and optimal selection of rain gauge locations. *Water Resour. Res.*, 20, 463-470.

Beirlant, J., Goegebeur, Y., Segers, J. and Teugels, J. (2005) *Statistics of Extremes, theory and applications*. Wiley Ltd, 490 p.

Benoit, J. (2006) *Utilité des données historiques dans la connaissance du risque inondation, exemple de l'étude des crues du gardon à Alès*. Mémoire de Master 1 Gestion des catastrophes et risques naturels, sous la direction de F. Vinet, Université Paul Valéry Montpellier III, 104 p.

Bianciotto, L. (2005) *Les crues du Gardon sur la commune d'Anduze : approche historique et enjeux*. Mémoire de Master 1 Gestion des catastrophes et risques naturels, sous la direction de F. Vinet, Université Paul Valéry Montpellier III, 88 p.

Cœur, D., Lang, M., (2000) L'information historique des inondations : l'histoire ne donne-t-elle que des leçons ? *La Houille Blanche*, 2, 79-84.

Cœur, D., Lang, M., Paquier, A. (2002) L'historien, l'hydraulicien et l'hydrologue et la connaissance des inondations. *La Houille Blanche*, 4/5, 61-66.

Crouzet, F. (2005) *Les inondations historiques en Gardonnenque et dans les gorges du Gardon : approche de la vulnérabilité des riverains du gardon de Ners à Collias de 1852 à 1937*. Mémoire de Master 1 Gestion des catastrophes et risques naturels, sous la direction de F. Vinet, Université Paul Valéry Montpellier III, 145 p. + annexes

Delrieu, G. (2003) L'Observatoire Hydrométéorologique Méditerranéen Cévennes Vivarais. *La Houille Blanche*, 6, 83-88.

Dominguez, R., Bouvier, C., Neppel, L., Niel, H. (2005) Approche régionale pour l'estimation des distributions ponctuelles des pluies journalières dans le Languedoc-Roussillon (France). *Hydrol. Sci. J.*, 50 (1), 17-29.

Ferry, G. (2005) *Les crues historiques de l'Hérault de Ganges à Canet. Mémoire de Master 1 Gestion des catastrophes et risques naturels*. Mémoire de Master 1 Gestion des catastrophes et risques naturels, sous la direction de F. Vinet, Université Paul Valéry Montpellier III, 104 p.

Flecher, C., (2006) *Distribution des lames d'eau maximales pour les pluies extrêmes méditerranéennes*. Rapport Master 2 Recherche en Biostatistique, sous la direction de L. Neppel et J.N. Bacro, Université Montpellier II, 45 p. + annexes.

Koutsoyannis, D., Kozonis, D., Manetas, A. (1998) A mathematical framework for studying rainfall intensity-duration-frequency relationships. *J. of Hyd.*, 206, 118-135.

Kuczera, G. (1992) Uncorrelated measurement error in flood frequency inference. *Water Resources Research*, 28, 183-188.

Kuczera, G. (1996) Correlated rating curve error in flood frequency inference. *Water Resources Research*, 32, 2119-2127.

Kuczera, G. (1999) Comprehensive at-site flood frequency analysis using Monte Carlo Bayesian inference. *Water Resources Research*, 35, 1551-1557.

Lang, M., Cœur, D., Lallement, C., Naulet, R., Boudou, G. (1998) *Historique-Guiers : utilisation de l'information historique pour une meilleure définition du risque d'inondation*. Pôle Grenoblois Risques Naturels, Cemagref Lyon, UPMF Grenoble, EDF/DTG Grenoble, Juin, 151 p.

Lang, M., Naulet, R., Recking, A., Cœur, D., 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*, 6/7, 131-138.

Naulet, R. (2002) *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*. Université Joseph Fourier Grenoble, Université du Québec, INRS, Cemagref Lyon, 322 p.

Neppel, L. (1997) *Etude du risque pluvial en région Languedoc-Roussillon : caractérisation de l'aléa climatique*. Thèse de doctorat de l'Université Montpellier II, 272 p.

Neppel, L. (2003) *Analyse de l'épisode pluvieux du 8 et 9 septembre 2002 dans le Gard*. Rapport MEDD, DPPR/DRM, février 2003.

Neppel, L., Bouvier, C., Niel, H. (2006) Quelques illustrations des sources d'incertitudes dans l'analyse de l'aléa pluvieux. *La Houille Blanche*, 6, 22-26.

Paquet, E., Gailhard, J., Garçon, R. (2006) Evolution de la méthode du Gradex : approche par type de temps et modélisation hydrologique. *La Houille Blanche*, 5, 80-90.

Payrastré, O. (2005) Faisabilité et utilité du recueil de données historiques pour l'étude des crues extrêmes de petits cours d'eau. Etude du cas de quatre bassins versants affluents de l'Aude. Thèse de doctorat de l'ENPC. 392 p.

Payrastré, O., Gaume, E. and Andrieu, H. (2005) Use of historical data to assess the occurrence of floods in small watersheds in the french mediterranean area. *Advances in Geosciences*, 2: 313-320.

Payrastré, O., Gaume, E., Andrieu, H., (2006) Apport du recueil de données historiques pour l'étude des crues extrêmes de petits cours d'eau ; Etude du cas de quatre bassins versants affluents de l'Aude. *La Houille Blanche*, 6, 79-86.

Pobanz, K. (2006) *Reconstitution par modélisation hydraulique des débits de crues historiques de l'Hérault et du Gard*. Stage de fin d'études sous la direction de M. Lang ISITV, Cemagref Lyon. 42 p. + Annexes (107 p.).

Renard, B., Garreta, V. and Lang, M. (2006) An application of Bayesian analysis and MCMC methods to the estimation of a regional trend in annual maxima. *Water Resources Research*. under press.

Renouf, E., Lang, M., Sauquet, E., Paquier, A. (2005) *Contrôle de la qualité des courbes de tarage de la banque HYDRO pour les débits de crue*. Rapport Cemagref pour le MEDD, 53 p. + annexes (112 p).

Silverman, B.W. (1986) *Density estimation for statistics and data analysis*. Ed. Chapman et Hall, London, 175 p.

## **IX. Publications scientifiques parues**

Dominguez R., Bouvier C., Neppel L., Niel H., (2005) Approche régionale pour l'estimation des distributions ponctuelles des pluies journalières dans le Languedoc-Roussillon (France). *Hydrol. Sci. J.*, 50 (1), 17-29.

Neppel L., Bouvier C., Niel H., (2006) Quelques illustrations des sources d'incertitudes dans l'analyse de l'aléa pluvieux. *La Houille Blanche*, 6, 22-26.

Lang M., Perret C., Renouf E., Sauquet E., Paquier A., 2006. Incertitudes sur les débits de crue. *La Houille Blanche*, n°6, 33-41

Payrastre, O., Gaume, E. and Andrieu, H. (2005) Use of historical data to assess the occurrence of floods in small watersheds in the French Mediterranean Area, *Advances in Geosciences*, 2: 313-320.

Payrastre, O., Gaume, E., Andrieu, H., (2006) Apport du recueil de données historiques pour l'étude des crues extrêmes de petits cours d'eau ; Etude du cas de quatre bassins versants affluents de l'Aude. *La Houille Blanche*, 6, 79-86.