

Annexe 1 : Herault à Ganges

<i>Annexe 1 : Herault à Ganges</i>	1
<i>I. Recueil de données</i>	2
I.1. Topographie et reconstitution de l’évolution verticale du lit.....	2
I.2. Données hydrométriques	4
<i>II. Reconstitution des débits à Ganges</i>	10
II.1. Emplacement des profils en travers	10
II.2. Courbes de tarage existantes.....	12
II.3. Modélisation hydraulique : période récente	13
II.4. Modélisation hydraulique : période ancienne	20
II.5. Vérification et validation des résultats	24
<i>III. Analyse probabiliste des débits de crue à Ganges</i>	25
III.1. Série de débit utilisée et représentation des incertitudes	25
III.2. Distribution des valeurs maximales annuelles	28
$L(T)=137.73 - 198.04 [1-(1.94T)^{0.14}]$	31
$QIJ(T) = QIJ(T_g) + a_p \text{Ln}[(T+K_q)/(T_g+K_q)]$ avec $K_q=[a_p/a_q(T_g) - 1] T_g$	32
T_g : seuil d’extrapolation avec l’information pluviométrique.....	33

I. Recueil de données

I.1. Topographie et reconstitution de l’évolution verticale du lit

Sources utilisées

Le site de Ganges-Laroque comporte de nombreuses données topographiques récentes. On dispose d’un profil en long relevé sur 4000 m en 2000 par le bureau d’étude SIEE sur commande de la DDE34 dans la perspective du PPRi. Les levés topographiques de profil en long et en travers, commandités par différents organismes et bureau d’étude ont été collectés sur les tronçons de Laroque et Gignac. Sur le tronçon Laroque-Gorges de l’Hérault, on dispose des plans décrivant les principaux aménagements susceptibles d’influencer l’écoulement en crue depuis 1990. Sur le secteur de Gignac–seuil de Granoupiac, les plans décrivant les aménagements récents ont été récupérés. Par contre, la topographie des sections sur ce secteur a été fortement influencée par des extractions de matériaux. De ce fait, les sections d’écoulements sont variables d’une année sur l’autre et l’on ne dispose de profils en long que pour certaines années. La reconstitution des débits devra se faire à partir de plusieurs hypothèses sur le lit de l’Hérault.

Organisme	Secteur	Objectif / date des levés
BCEOM/DDE34	Gignac	PPRI (2004)
SIEE/DDE34	Ganges-St Bauzille de P.	PPRI (2000)
CG 34 / ISL	Canet – Agde	Etude rupture du Salagou (2004)
Cemagref/SIEE	Gignac - Belarga	Etude Géomorphologique de l’Hérault (1991)
CG 34 / DIREN	Gignac	Construction seuil de Granoupiac (1990 et 1996)
BCEOM	Laroque	Calibrage du lit de l’Hérault et aménagement pour la protection de Laroque contre les crues (1989)
BCEOM	Laroque	Etude d’impact hydraulique des terrasses à Laroque (1991)
SPIE INFRA	Gignac	Rapport d’incidence de l’A75 sur les crues de l’Hérault (1993)
C.N.A.B.R.L./DDAF34	Hérault	Etude des crues de l’Hérault (Moulin de Bertrand) 1980
Profil en long	Tout l’Hérault et Affluents	Etablis par les forces hydrauliques entre 1921-1930

Tableau 1. synthèse des données récentes topographiques sur l’Hérault

Pour les données topographiques anciennes, on dispose des profils des Grandes Forces Hydrauliques de 1921. En revanche, les données de la série S des archives départementales sont pour la plupart inexploitable car trop partielles, livrées en cotes relatives sans cote de référence. Les ouvrages qui pourraient permettre de recalibrer les cotes ont souvent disparus ou ont été modifiés sans qu’on ait la traçabilité complète de ces modifications. Des profils en larges sont exploitables dans les dossiers 2 S 903 et 7 S 36 au droit du pont de Ganges mais les lignes d’eau fournies sont sujettes à caution comme nous le verrons dans l’analyse des données hydrologiques anciennes.

En revanche, les données topographiques anciennes sur le site de Laroque n’ont pas permis de retracer l’historique du seuil. Ce seuil est ancien et figure sur quelques croquis du XIX^{ème} sans cotes d’altitude ni même hauteurs.

Synthèse des profils topographiques

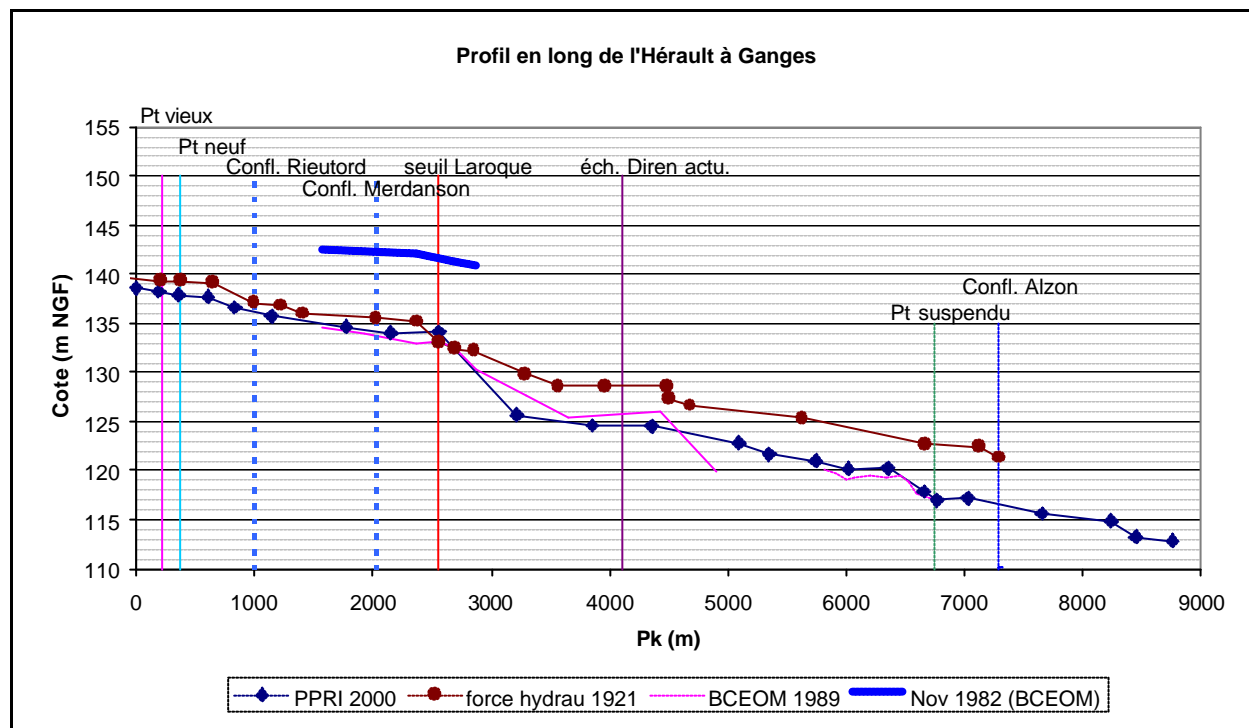


Figure 1: synthèse des profils en long entre Ganges et Laroque

Périodisation de l'évolution topographique du lit.

La **Figure 1** confirme la tendance régionale voire nationale à l’incision des lits fluviaux constatés sur cette période. Cette incision, de l’ordre de un à deux mètres à l’amont du seuil de Laroque atteint quatre à cinq mètres dans les gorges à l’aval de Laroque. La comparaison des profils de 1989 et de 2000 ne montre pas d’évolution significative. L’arrêt de l’incision peut s’expliquer par une pénurie sédimentaire en lit mineur, ce dernier reposant dans beaucoup d’endroits - notamment au droit de l’échelle Diren et à l’aval de celle-ci - sur la roche en place. Il faudra vérifier dans l’avenir si l’interdiction des prélèvements des matériaux alluviaux en lit mineur à partir de 1996 a un effet sur l’engraissement du lit.

Le profil en long de 1989 est proche de celui de 2000. Le modèle que nous qualifierons de récent sera construit avec la topographie datant de 2000. Un modèle supplémentaire, dit ancien, sera développé pour 1921.

I.2. Données hydrométriques

Les sources disponibles

La liste complète des sources est fournie en annexe dans l'Etat Général des Sources

→ Les données récentes

Nous avons vu, lors du choix des sites, l'état actuel de l'équipement hydrométrique sur l'Hérault. Il existe 10 stations Diren en fonctionnement sur l'Hérault et ses affluents. Il faut ajouter une station exploitée par BRL au barrage de Moulin Bertrand et 10 stations DDE gérées par le SPC de Carcassonne. La station Diren de Laroque dispose de données depuis 1969.

Des rapports de bureaux d'études récents ont traité de l'Hérault et de ses crues. La Compagnie d'Aménagement de la Région du Bas-Rhône et du Languedoc (BRL, 1980) a réalisé en 1980, une étude des crues dans le bassin de l'Hérault pour la Direction Départementale de l'Agriculture (DDAF 34). Cette étude consiste en un recueil et un traitement des données hydrométéorologiques du bassin versant. Les données issues de la station de Moulin de Bertrand y ont été traitées.

Le rapport BCEOM de 1999, Etudes des crues de l'Hérault, réalisé pour le compte de la Direction Départementale de l'Equipement de l'Hérault (DDE34) a pour objectif l'analyse de la genèse et de la typologie des crues, et la modélisation hydrologique du bassin. Le but est de mettre en place le logiciel AGYR à la DDE, pour la prévision des crues. Il est proposé une analyse exhaustive des crues de 1982 à 1997, à partir de courbes de tarage et de modèles pluie-débit.

Le Conseil Général de l'Hérault a également réalisé une étude en 1997, *Contribution à la connaissance hydrométrique du bassin de l'Hérault*, qui présente une critique des courbes de tarage, mais évoque peu les crues historiques de l'Hérault.

→ Les données anciennes

Parmi les sources anciennes concernant les crues de l'Hérault, il faut bien sûr mentionner l'ouvrage de M. Champion de 1862. Les données fournies ne sont pourtant qu'événementielles et ne donnent pas de données chiffrées exploitables. Les deux ouvrages anciens les plus exhaustifs sur les crues de l'Hérault sont le rapport émanant de l'Administration des Ponts et Chaussées de Montpellier de 1945, de l'ingénieur Silhol, *Etude sur les crues de l'Hérault et les mesures à prendre en vue de les atténuer*, qui référence les crues depuis 1868 et qui en explique les effets. L'article de J. Rougé (1959) *Hydrologie de l'Hérault, fleuve côtier Méditerranéen*, qui reprend au précédent son étude des crues en la réactualisant, et en y ajoutant une analyse des conditions du régime de l'Hérault, fait encore référence dans le bassin versant notamment pour les secteurs de Gignac et Agde. Le recensement des crues de l'Hérault effectué par l'association Agathe d'Agde (et menée par J.C. Sabatier) reprend une grande partie des cotes historiques connues sur une base excel que nous nous sommes procurée.

Il existe de nombreux repères de crues, notamment à Laroque. Ces repères de crues sont géoréférencés dans les fiches PHE de la DDE34. Pour Ganges, les fiches PHE donnent de nombreuses cotes de crues récentes sur le Rieutord et l'Hérault dont quelques-unes à l'amont du pont neuf. Pour Laroque et pour le seul fleuve Hérault, 13 fiches PHE fournissent 38 cotes dont onze concernant la crue de 1982 réparties le long de la rive gauche de l'Hérault. La crue de 1958 est également bien renseignée. L'Eglise de Laroque (figure 4.2) comporte 13 repères de crue au dessus de la route (139,29 NGF) dont la plus haute (1890) est cotée à 143,72. A

noter que la crue de 1812, considérée comme la plus importante du XIX^{ème} par Rougé n’est pas répertoriée à Laroque.

DIRECTION DÉPARTEMENTALE DE L'ÉQUIPEMENT DE L'HERAULT - SERVICE HYDRAULIQUE


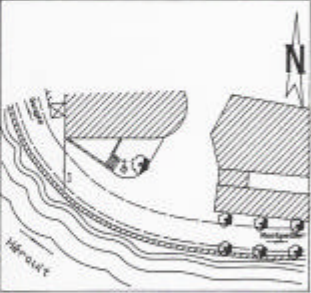
128
3

Fiche des Plus Hautes Eaux

Repères de Nivellement					Localisation de la P.H.E.	
Nature	Support	Altitude N.G.P.	Hauteur / T.N.		Commune :	Laroque
1 sol	choussée	139.29	0		Adresse :	Eglise C.D. 986
					Cadastre :	
					Cours d'eau :	Hérault
					Echelle plans de référence :	1/2000

Coordonnées LAMBERT : X : 711325
Y : 181215

Support : église

Resultats d'Enquête										
Date Crue	Hauteur /repere	Numero	Altitude N.G.P.	Altitude	Marque	Date Crue	Hauteur /repere	Numero	Altitude N.G.P.	Marque
1890	4.43	1	143.72	x	gravure	5. 11. 94	2.37	1	141.26	x
1958	4.32	1	143.61	x	---					
1795	4.24	1	143.53	x	---					
1868	3.92	1	143.21	x	---					
1760	3.22	1	142.51	x	---					
1847	3.08	1	142.37	x	---					
1733	2.57	1	141.86	x	---					
1875	2.50	1	141.79	x	---					
1900	2.44	1	141.73	x	---					
1780	2.13	1	141.42	x	---					
1871	1.75	1	141.04	x	---					
1752	1.65	1	140.94	x	---					

Figure 2: fiche PHE à l’église de Laroque

L’apport des données anciennes a été plus riche en hydrologie qu’en topographie même si comme expliqué plus haut on doit déplorer la perte des données de l’ancien SAC dont l’existence est pourtant attestée à partir de 1890.

La découverte par G. Ferry (2005) aux archives départementales de l’Hérault d’une liasse (3 S 200) comportant des documents recensant les crues sur l’Hérault et ses affluents pallie en partie la perte des données brutes de l’ancien SAC.

Dans cette liasse, on trouve un cahier pour chaque circonscription de l’Hérault avec les hauteurs maximales des crues de 1868 à 1910 de tous les cours d’eau importants du département. Chacun de ces cahiers a été commencé en 1876, après la crue des 12 et 13 septembre 1875, et pour la plupart des cours d’eau du département. La plus haute crue connue

de l’époque est reportée, généralement il s’agit de la crue du 13 octobre 1868 pour le haut bassin. Ces cotations systématiques des crues correspondent à une campagne de pose d’échelles de crues orchestrée par le Ministre de l’Intérieur par une lettre du 8 novembre 1875 (dont l’original figure dans la liasse), et demandant au préfet de l’Hérault « le suivi de conditions hydrauliques des cours d’eau du département ». Cette décision ministérielle n’est pas étonnante à la fin de l’année 1875, car la France a connu une grande crue de la Garonne avec l’inondation grave de Toulouse en juin, suivie des inondations dans le Languedoc en septembre qui firent quelques 100 victimes à Saint-Chinian. Les mesures hydrométriques ont donc commencées sur l’Hérault en 1875 alors que le Service d’Annonce des Crues (SAC) semble n’avoir été créé qu’en 1890.

Type de document	Contenu	source
Rougé J., Hydrologie de l’Hérault, fleuve côtier méditerranéen	Hauteurs d’eau à Gignac et à Agde de 1890 à 1958. Quelques cotes pour les autres stations	Bull. de la Soc. Lang. De Géo. 1/1959 pp. 3-193
Fiche PHE	Nivellement des repères de crue historiques et des laisses de crues récentes à Ganges + église de Laroque	DDE34
Documents statistiques sur le régime des eaux et les hauteurs des crues 1869-1914	-relevé des hauteurs de crues de 1875 dans le département - observations pluviométriques de 1891 à 1914 - cahier avec hauteurs d’eau de 1868 à 1910	AD 34 3 S 200
Administration des chemins vicinaux Construction d’un nouveau pont à Ganges, 1864	Ligne d’eau en travers et en long des crues de 1812, 1847, 1861 et 1890	AD 34 liasse 2 S 903

Tableau 2. : récapitulatif des principales sources de données hydrométriques sur le secteur Ganges-Laroque

Sur nos sites d’étude, il existe dans les cahiers de Montpellier et Lodève, des relevés plus ou moins exhaustifs des hauteurs maximales des crues de 1868 à 1910 : aux stations de Ganges, Laroque, Saint-Bauzille-de-Putois, Brissac, Moulin de Bertrand, Saint-Jean-de-Fos et Gignac pour l’Hérault, et Gornies pour la Vis, Saint-Jean-de-Buèges et Saint-André-de-Buèges pour la Buèges, et la station du Mas de Londres pour le Lamalou. Si les relevés des stations de la circonscription de Montpellier semblent complets, ce n’est pas le cas pour ceux des stations de la circonscription de Lodève. Des mesures existent aux stations de Gignac, Pouzols, Le Pouget/Canet ou Lodève, mais elles ne sont jamais aussi bien renseignées que dans le secteur de Montpellier ; à Gignac, seules quatre crues sont recensées, contre une cinquantaine à Ganges. D’ailleurs, ce manque d’information fiable dans la circonscription de Lodève avait provoqué la colère de L’Agent-Voyer en chef du département. Plusieurs lettres de remontrances à l’intention de l’agent de Lodève figurent dans la liasse. Les relevés compilés dans cette liasse s’interrompent en 1910 sans doute relayés par les seules archives du SAC (disparues). Après cette date, on dispose des relevés sur les stations de Ganges et Gignac notamment par la bibliographie de seconde main en particulier des feuillets (non originaux) récupérés à la subdivision DDE de Ganges qui recensent les crues supérieures à 5 m à Ganges. Il s’agit sans doute d’une liste extraite des archives du SAC. A partir de 1928, des mesures sont effectuées au Moulin Bertrand dans les Gorges et permettent de valider un tant

soit peu les valeurs sur les autres stations (Gignac). Ainsi, peut-on estimer que les crues sont bien identifiées depuis 1875.

Pour les crues précédentes, les renseignements sont plus épars et incertains. Les documents de la série S fournissent ponctuellement des lignes d’eau transversales notamment dans les dossiers relatifs à la construction ou à la réfection des ponts. Les dossiers 2 S 903 et 2 S 905 des archives départementales de l’Hérault (1864) relatifs à la construction du nouveau pont de Ganges à 170 m à l’aval du vieux pont de Cazilhac, fournissent un profil en large des ponts de Ganges avec ligne d’eau des crues de 1812, 1847, 1861 et 1890. Si l’on exclut la crue de 1861 qui fut la crue la plus récente avant la confection de la coupe en 1864 et qui est une crue moyenne, on dispose avec 1847 et surtout 1890 et 1812 des crues majeures du siècle. A noter que la crue de 1890 a été rajoutée sur le document *a posteriori*. Cependant, l’exploitation de ces hauteurs est soumise aux incertitudes liées au manque de connaissance sur l’évolution de l’altitude de la cote de référence (zéro de l’échelle).

Rattachement des échelles d’annonce des crues au nivellement général

L’évolution de la cote du zéro de l’échelle au pont de Cazilhac est complexe et incertaine.

D’après le bureau d’étude BCEOM et la DDE 34, l’échelle de la station automatique actuelle a un Z0 à 138,3 m NGF. Elle succéderait à l’ancienne échelle observateur dont l’altitude du zéro serait Z0=139,3 m NGF utilisé dans le rapport BCEOM pour les crues de 1982 à 1997. Cette dernière information est contredite par le rapport du Conseil Général de l’Hérault sur "*la contribution à la connaissance hydrométrique du Bassin de l’Hérault*" (1997), situant l’ancienne échelle observateur à 138,8 m NGF soit 50 centimètres plus haut que l’échelle DDE actuelle pour suivre l’évolution du lit.

Pour la période ancienne, un doute subsiste car aucun document, pas même le cahier 3 S 200 ne mentionne l’altitude du Z0 de l’ancien SAC. Par ailleurs, le document d’archive de 1864 tiré de la liasse 2 S 903 (archives départementales de l’Hérault) émanant de l’administration des chemins vicinaux et relatif à la construction du nouveau pont de Ganges (170 m) en aval du pont vieux (figure 4.3), reporte les crues de 1812, 1847, 1861 et 1890 (reporté *a posteriori*). Est mentionnée au crayon à papier une cote à l’étiage de 140,41 m sans aucune autre indication de l’origine de cette cote. Si l’on se focalise sur les deux crues majeures (1812 et 1890 qui constituent les références du XIX^{ème} siècle sur l’Hérault), ce document donne une hauteur de 7,72 m pour 1812 et (par déduction) 8,65 ou 8,66 m pour 1890. Ce document infirme les dires de J. Rougé et celles du SAC qui placent 1890 42 cm au dessous de 1812. En revanche, ce document expliquerait la cote (corrigée) de 8,65 m de la liasse 3 S 200 pour la crue de 1890.

Au final, les incertitudes pèsent plus sur l’évolution des Z0 de références que sur les hauteurs. La synthèse des hauteurs d’eau fournie sous forme numérique mentionne ces incertitudes qui pèsent en particulier sur les crues de 1812 à 1890 incluses.

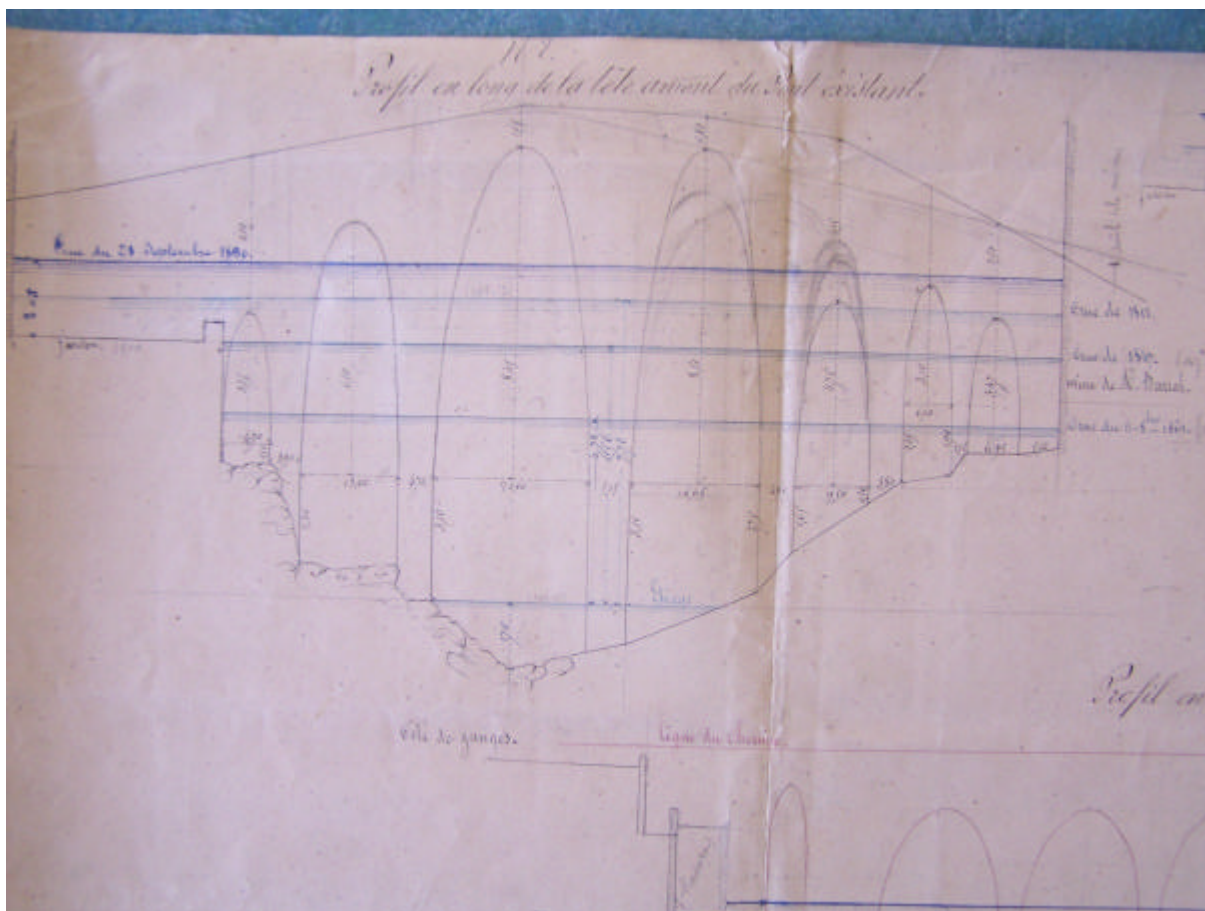


Figure 3: profil amont du pont de Cazilhac (vieux pont de Ganges) extrait du dossier 2 S 903 AD 34

Période	altitude NGF du Z0
Depuis 1982	138,3 m
]1890 -1982]	138,8 /139,3 m

Tableau 3. périodisation de l'évolution du Z0 de l'échelle de crue à Ganges

Au final, on dispose de peu d'informations sur les changements de zéro de l'échelle. Les informations sont même contradictoires parfois. Aussi est-il raisonnable de prendre plusieurs hypothèses.

- conversion des cotes en IGN69

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).

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) soit pour Ganges, feuille 2742 et Gignac, feuille 2643

conversion des altitudes Bourdalouë en altitudes Lallemand : soustraction de 0,15 m aux altitudes Bourdalouë à Ganges et 0,1 m à Gignac

conversion des altitudes Lallemand en altitudes IGN69 : ajout de 0,08 m aux altitudes Lallemand à Ganges et 0,02 m à Gignac
soit une soustraction de 0,07 m à Ganges et 0,08 m à Gignac pour passer des altitudes Bourdalouë aux altitudes IGN69.

- Graphique chronologique des crues répertoriées dans la station de Ganges

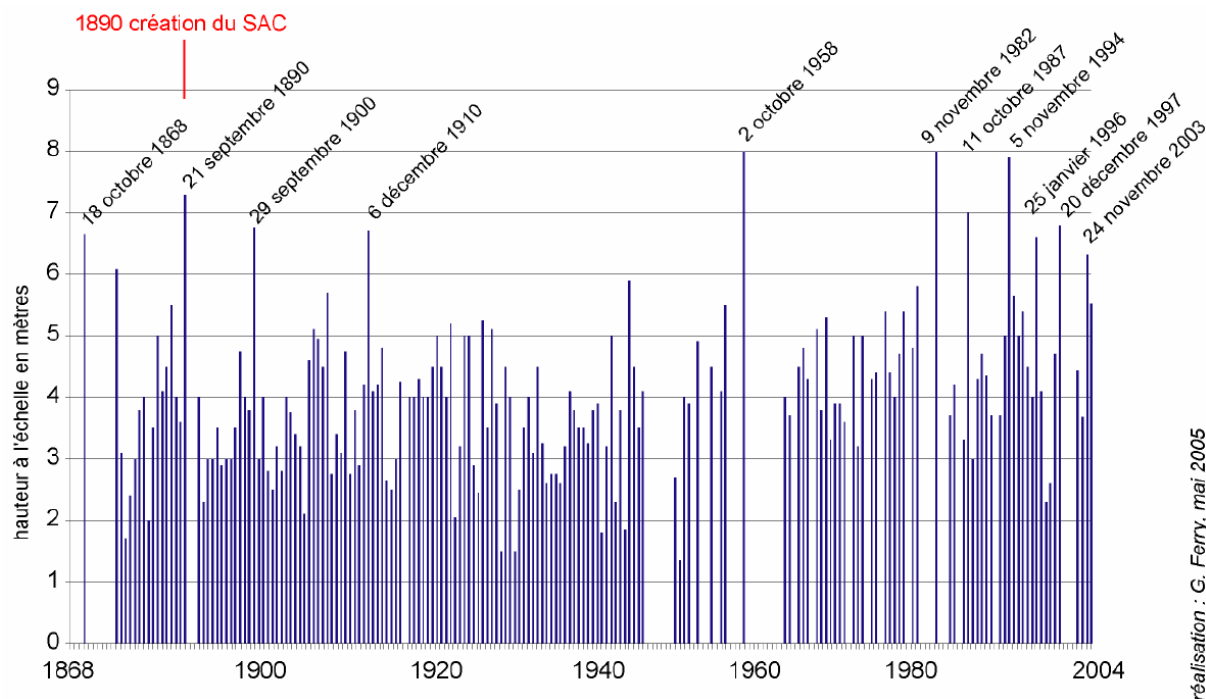


Figure 4: Chronique des hauteurs de crue à Ganges

Nonobstant les incertitudes sur les variations du Z0 de l’échelle, la chronique des hauteurs de crue à Ganges (**Figure 4**) fait apparaître une relative homogénéité. On ne décèle pas *a priori* de rupture qui serait due à l’enfoncement du lit (comme c’est le cas sur de nombreux cours d’eau). Les crues de la fin du XIX^{ème} et du début du siècle dernier (18 octobre 1868, 21 septembre 1890, 29 septembre 1900 et 6 décembre 1910), qui ont toutes dépassé 6,50 mètres à l’échelle du Pont de Cazilhac ont elles-mêmes été surpassées par les crues du 2 octobre 1958 et du 9 novembre 1982. Ce sont les deux plus hautes crues connues à Ganges. Elles ont atteint 8 mètres à l’échelle, alors que la plus haute crue connue avant 1958 était celle du 5 octobre 1812 avec 7,72 mètres.

La base de données numériques présente les 183 hauteurs de crues collectées sur l’Hérault à Ganges. Les cotes en mNGF1969 ont été reconstituées et le tableau suivant synthétise les 10 plus fortes en se basant sur ces cotes de l’hypothèse basse et non les débits :

Dates	Cotes mNGF 1969 hypothèse basse	Dates	Cotes mNGF 1969 hypothèse haute
02 octobre 1958	146.88	21 septembre 1890	148.99
5 octobre 1812	146.45	5 octobre 1812	148.02
9 novembre 1982	146.30	2 octobre 1958	147.38
5 novembre 1994	146.20	1847	146.9
21 septembre 1890	146.03	12 septembre 1875	146.9
29 septembre 1900	145.93	18 octobre 1868	146.85

6 décembre 1910	145,38	29 septembre 1900	146.43
11 octobre 1987	145.30	9 novembre 1982	146.3
20 décembre 1997	145.29	5 novembre 1994	146.2
18 octobre 1868	145.24	6 décembre 1910	146.08

II. Reconstitution des débits à Ganges

Les résultats des études du Cemagref (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. Pobanz K., 2006. *Reconstitution par modélisation hydraulique des débits de crues historiques de l’Hérault et du Gard.* Travail de fin d’étude ingénieur, Cemagref) ont été complétés pour la reconstitution des courbes de tarage au droit de l’échelle d’annonce des crues (Vieux pont de Ganges), de l’église de Laroque (marques sur la facade) et à la station Diren plus en aval. L’échelle d’annonce de crue (EAC) de la DDE se situe au pied du Pont Vieux de Ganges (pont de Cazilhac) et la station hydrométrique DIREN de Laroque, en aval de Ganges, se situe environ 1 km en aval du seuil de Laroque, à côté de l’Eglise du même nom. Le tronçon étudié débute 200 mètres en amont du Pont Vieux de Ganges et s’étend sur 4 km jusqu’à la station DIREN. A ce niveau, l’Hérault draine un bassin versant de 756 km².

II.1. Emplacement des profils en travers

Nous disposons de relevés topographiques levés en 2000 par le bureau d’études SIEE dans le cadre d’un Plan de Prévention des Risques d’Inondations demandé par la Direction Départementale de l’Équipement de l’Hérault. Nous disposons également de quelques relevés topographiques au voisinage du seuil de Laroque, récoltés dans le rapport intitulé «Etude de l’impact hydraulique de l’aménagement d’une terrasse en rive gauche de l’Hérault à Laroque» effectuée par le bureau d’étude BCEOM la même année. Les sections sont assez espacées, de l’ordre de 300 m; néanmoins, dans les sections levées, le lit mineur et le lit majeur bénéficient d’un relevé précis. Toutefois, pour certaines sections, le lit majeur n’est pas suffisant et aura nécessité d’un complément à l’aide de cartes IGN. Deux ponts existent sur ce tronçon : le Pont Neuf et le Pont Vieux, qu’il faudra modéliser. Un seuil est également présent : le seuil de Laroque, en aval de l’EAC (**Figure 5**). La confluence entre le Rieutord et l’Hérault se situe environ 1 kilomètre en aval de l’EAC de Ganges.



Figure 5. De gauche à droite : Pont Vieux de Ganges, Pont Neuf de Ganges et Seuil de Laroque

De ces données est construit le modèle numérique du bief envisagé. Les vues suivantes présentent la topographie récoltée. A noter que les cotes sont exprimées en mètres NGF. La **Figure 6** présente une vue en plan des profils en travers utilisés pour l’étude.



Figure 6. Vue en plan des profils en travers utilisés pour l’étude (EAC : échelle d’annonce de crue DDE)

La vue de la **Figure 7** est obtenue avec le logiciel de simulation. 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. Comme il l’a déjà été mentionné précédemment, l’échelle d’annonce de crue se situe au pied du Pont Vieux de Ganges (Pont de Cazilhac), sur sa face amont. L’altitude du zéro de l’échelle est 138,3 m NGF. Une échelle est également située au niveau de l’église de Laroque, sur la chaussée. L’altitude du zéro de cette échelle est de 139,29 m NGF.

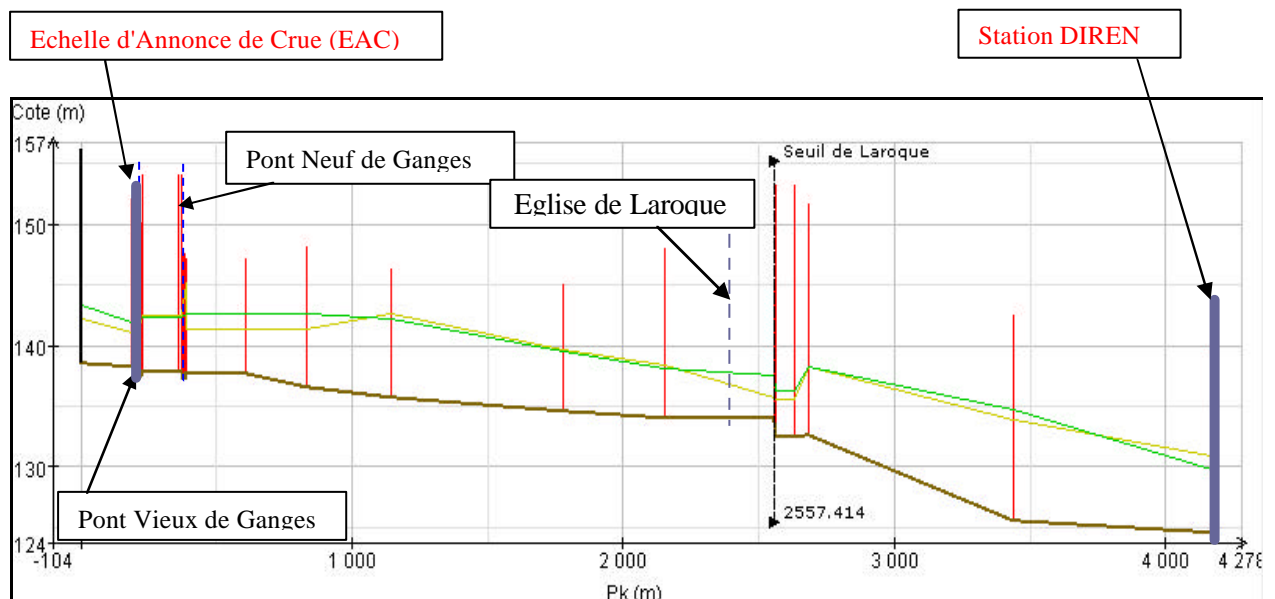


Figure 7. Profil en long du tronçon modélisé et localisation de l’échelle

II.2. Courbes de tarage existantes

Nous disposons d’une courbe de tarage au niveau de l’EAC de Ganges établie par le bureau d’étude BCEOM pour le compte de la Direction Départementale de l’Équipement de l’Hérault lors d’une étude des Crues de l’Hérault (décembre 1999). Elle est représentée sur la **Figure 8** : elle a été établie par corrélation avec la station de Laroque DIREN.

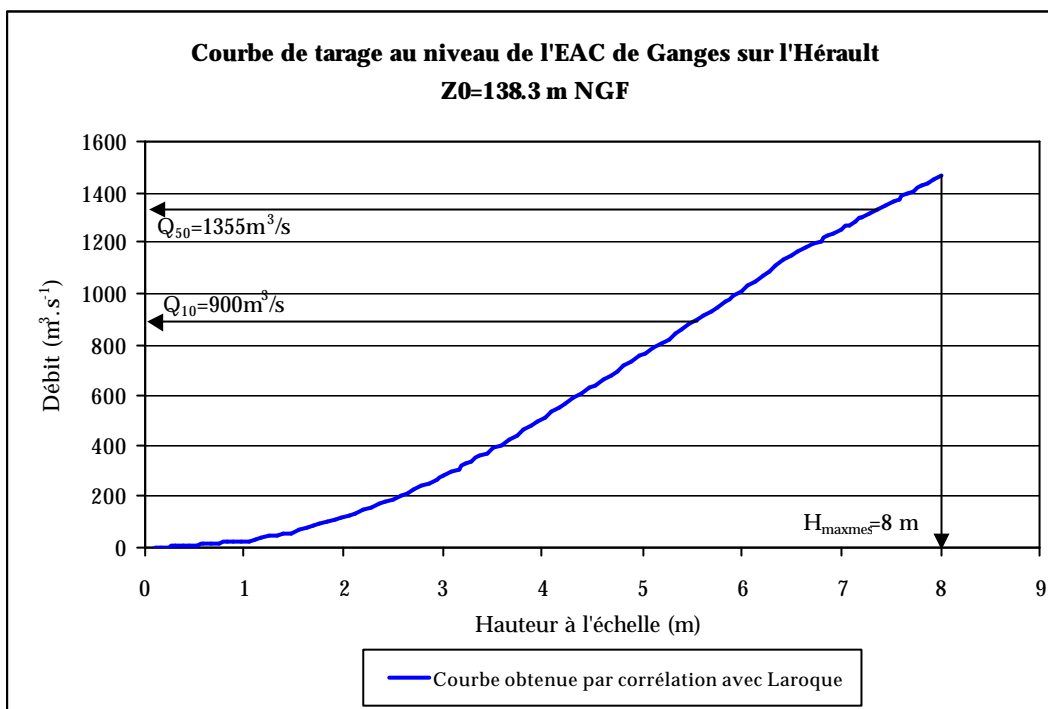


Figure 8. Courbe de tarage au niveau de l'échelle d'annonce de crue DDE - source SIEE

Nous disposons également de la courbe de tarage DIREN au niveau de la station hydrométrique de Laroque (**Figure 9**). Le débit de crue de période de retour 2 ans et la hauteur maximale mesurée ont été reportés sur la courbe.

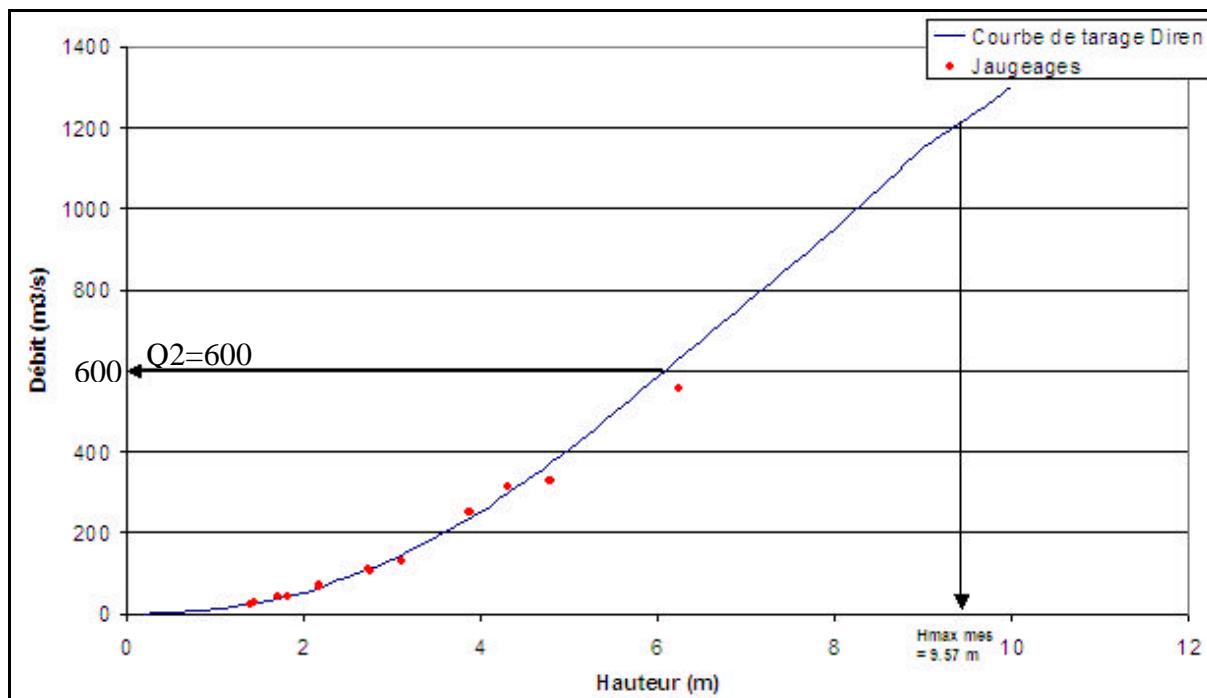


Figure 9. Courbe de tarage de l’Hérault à Laroque - station DIREN

Cette courbe est basée sur des jaugeages mais aussi sur les résultats d’une étude hydraulique s’appuyant sur la corrélation avec d’autres stations sur l’Hérault : la courbe est ainsi rehaussée et passe au-dessus des deux derniers jaugeages.

Débits et hauteurs de référence

Le **Tableau 4** donne les débits de période de retour 10, 20, 50 et 100 ans pour la station de Ganges. Ces résultats ont été obtenus par le BCEOM lors d’une étude sur l’analyse statistique des débits de crue à partir de courbes de tarage. Ces débits sont cohérents avec ceux déjà calculés lors d’études antérieures.

Station	Débits en m3/s			
	Q10	Q20	Q50	Q100
Ganges	900	1080	1355	1590

Tableau 4. Débits de référence calculés à l’échelle d’annonce de crue de Ganges

D’après l’étude sur les crues de l’Hérault effectuée par le BCEOM (1999), la hauteur maximale instantanée relevée à l’échelle d’annonce de crue de Ganges est de 8.00 mètres lors de la crue de 1982.

II.3. Modélisation hydraulique : période récente

Le bief étudié est long de près de 4.2 km et sa pente moyenne est égale à 0.0033m/m. Tant que le seuil de Laroque reste en régime dénoyé, la condition aval n’a aucune influence sur l’écoulement au droit de l’échelle. Lorsque ce seuil est noyé, c’est la condition aval qui contrôle l’écoulement. Cependant, après une étude de sensibilité sur cette condition aval pour un débit suffisamment élevé de $1500 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, il s’est avéré qu’elle n’avait aucune influence sur

la ligne d'eau au droit de l'échelle. Le tronçon étudié est donc suffisamment long et l'ajout d'un bief fictif ne sera pas nécessaire (**Figure 10**).

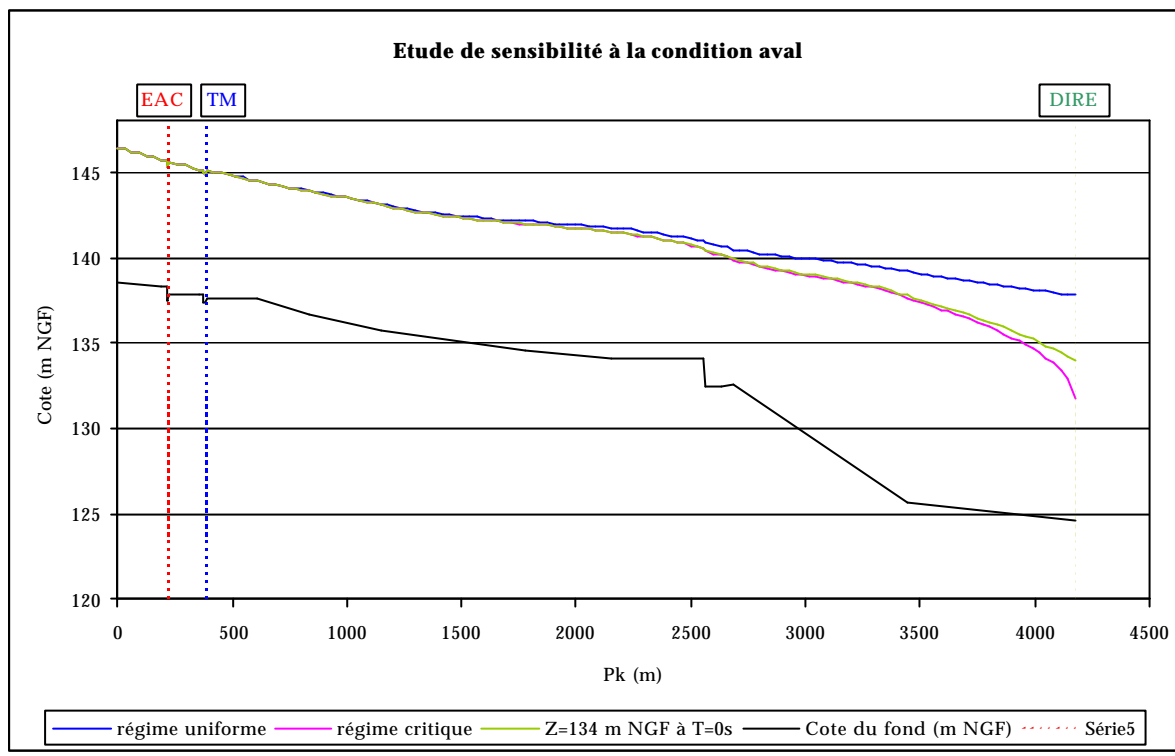


Figure 10. Etude de sensibilité à la condition aval

Modélisation des ouvrages

En raison des arches qui forment chaque pont, les sections sont constituées d'un nombre de points supérieur à ce que peut accepter le logiciel de simulation RUBARBE (où rappelons le, chaque transect topographié ne doit pas contenir plus de 24 points précisément). Une des solutions est d'intégrer des sections équivalentes en largeur-cote ; il s'agit de faire correspondre une largeur mouillée à chaque cote considérée.

Le seuil de Laroque est modélisé par une loi d'ouvrage dont les paramètres principaux sont sa largeur déversante et le coefficient de débit. Le seuil accompagnant bien l'écoulement, le coefficient de débit est fixé à 0,385. Il convient cependant d'étudier l'influence de la largeur déversante du seuil sur la cote à l'échelle (**Figure 11**). Nous ne disposons pas de la topographie du seuil. D'après les cartes IGN, sa largeur déversante (L_d) est comprise entre 150 et 160 mètres. Cependant, en raison de sa géométrie particulière (**Figure 5**), on considère que sa largeur déversante, en crue, tend vers la largeur de la rivière à cet endroit, soit 90 mètres. Nous testerons donc L_d compris entre 90 et 160 mètres pour un débit de $1500 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. Il s'avère que quelle que soit la valeur de la largeur déversante, l'influence sur la cote à l'échelle est négligeable (de l'ordre du centimètre).

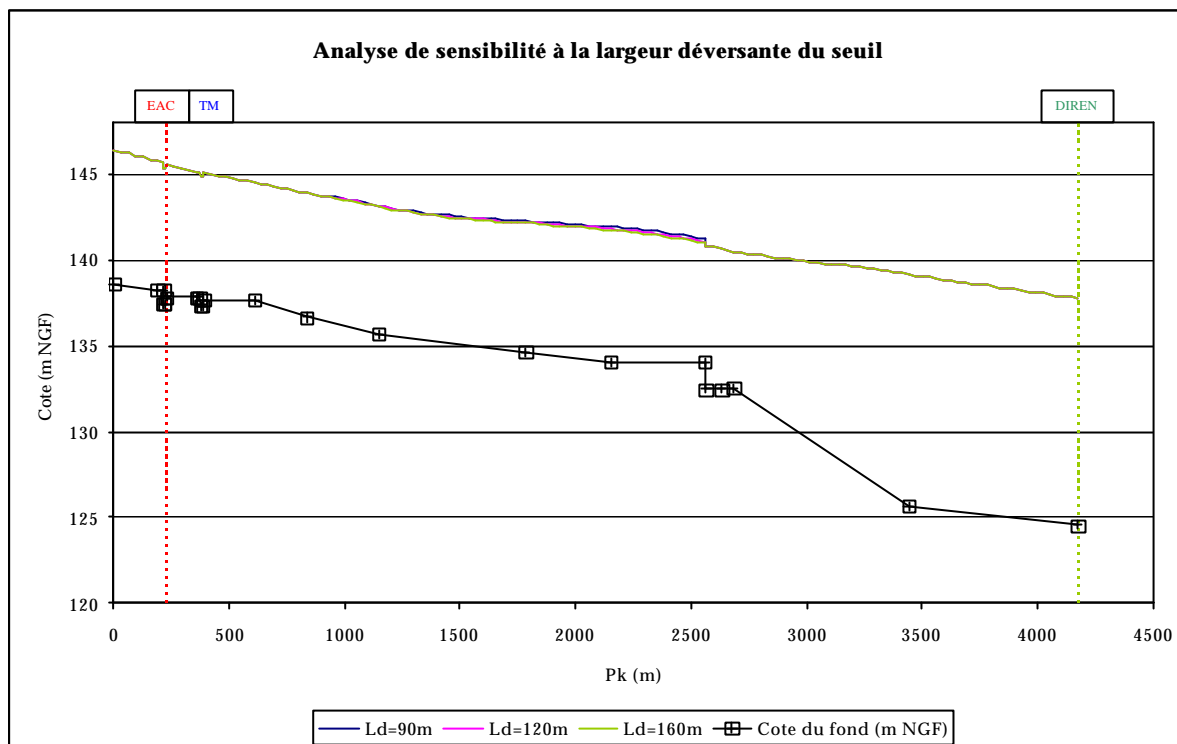


Figure 11. Etude de sensibilité à la largeur déversante du seuil de Laroque

Modélisation des apports

Les apports sont principalement ceux du Rieutord (surface du bassin versant : 57 km²), affluent de rive gauche de l’Hérault. Le Rieutord draine un bassin versant de nature karstique dans sa partie aval où l’on observe des pertes importantes, si bien que le lit de surface ne fonctionne que pendant les crues. On négligera l’influence de l’Aubanel et du Merdanson, petits affluents de rive gauche également. Les crues connues pour lesquelles les apports du Rieutord sont notables sont les crues de janvier 1996 (2^{ème} pointe), octobre 1995 (2^{ème} crue), octobre 1994, novembre 1993 et décembre 1984 (Source : *Etude des crues de l’Hérault, BCEOM, 1999*). Nous étudierons l’influence du Rieutord au niveau de l’échelle :

- nous supposons que l’Hérault et le Rieutord se comportent de façon homogène en utilisant la relation empirique $Q = aS^{0.8}$ pour déterminer le débit du Rieutord à simuler (Tableau 5)
- nous testerons différents débits du Rieutord pour différents débits de l’Hérault.

	Hérault (756km ²)		Rieutord (57km ²)
	Q (m3/s)	a	Q (m3/s)
Q10	900	4.48	114
Q20	1100	5.48	139
Q50	1350	6.72	171
Q100	1600	7.97	202

Tableau 5. Débits de référence du Rieutord

Nous reprenons les coefficients de Strickler pour les lits mineur et majeur déterminés par Renouf *et al.* (2005). Nous simulerons donc les cas suivants :

- Cas maximal : $K_{\min} = 13 \text{ m}^{1/3} \cdot \text{s}^{-1}$ / $K_{\text{maj}} = 5 \text{ m}^{1/3} \cdot \text{s}^{-1}$
- Cas moyen : $K_{\min} = 20 \text{ m}^{1/3} \cdot \text{s}^{-1}$ / $K_{\text{maj}} = 10 \text{ m}^{1/3} \cdot \text{s}^{-1}$
- Cas minimal : $K_{\min} = 33 \text{ m}^{1/3} \cdot \text{s}^{-1}$ / $K_{\text{maj}} = 15 \text{ m}^{1/3} \cdot \text{s}^{-1}$

Construction de la courbe de tarage

Malgré un temps de calcul plus long que pour Mage, nous choisissons d’utiliser RUBARBE pour cette étude en raison du passage en torrentiel de l’écoulement sur certaines parties du tronçon d’étude. La hauteur maximale relevé au pont Vieux de Ganges est de 8 m (le 09/11/1982). Le débit maximal à simuler devra correspondre à cette hauteur. Dans un premier temps, nous déterminons la courbe de tarage de l’Hérault au niveau de l’échelle d’annonce de crue DDE de Ganges en considérant que les apports du Rieutord sont nuls. Nous commençons par déterminer la courbe de tarage correspondant au cas moyen, c’est-à-dire pour un couple de Strickler $K_{\min} = 20 \text{ m}^{1/3} \cdot \text{s}^{-1}$ / $K_{\text{maj}} = 10 \text{ m}^{1/3} \cdot \text{s}^{-1}$ (**Figure 12**). La courbe de tarage moyenne proposée est encadrée par deux courbes extrêmes :

- le cas donnant les hauteurs les plus élevées est obtenu pour un Strickler dans le lit majeur de $5 \text{ m}^{1/3} \cdot \text{s}^{-1}$ et un Strickler dans le lit mineur égal à $13 \text{ m}^{1/3} \cdot \text{s}^{-1}$ (cas maximal).
- le cas donnant les hauteurs les plus faibles est obtenu pour un Strickler dans le lit majeur de $15 \text{ m}^{1/3} \cdot \text{s}^{-1}$ et de $33 \text{ m}^{1/3} \cdot \text{s}^{-1}$ dans le lit mineur (cas minimal).

La **Figure 12** présente les courbes obtenues au niveau de la nouvelle échelle d’annonce de crue DDE.

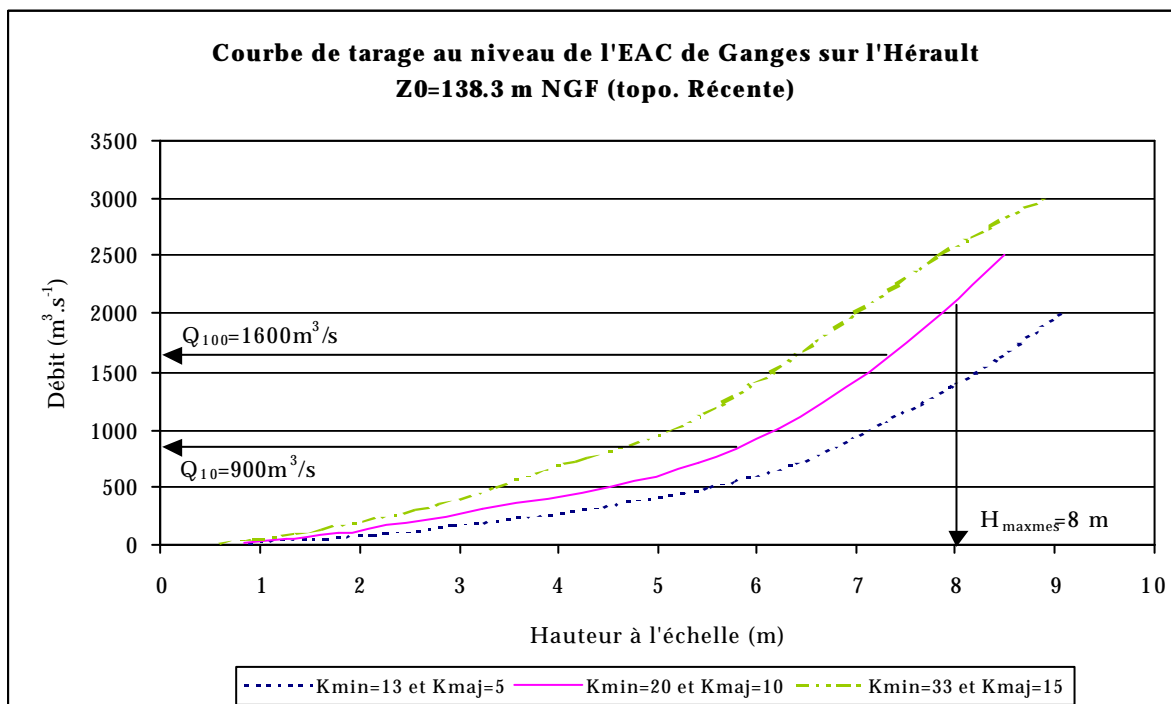


Figure 12. Courbe de tarage au niveau de l’échelle d’annonce de crue DDE (apports du Rieutord nuls) - topographie récente

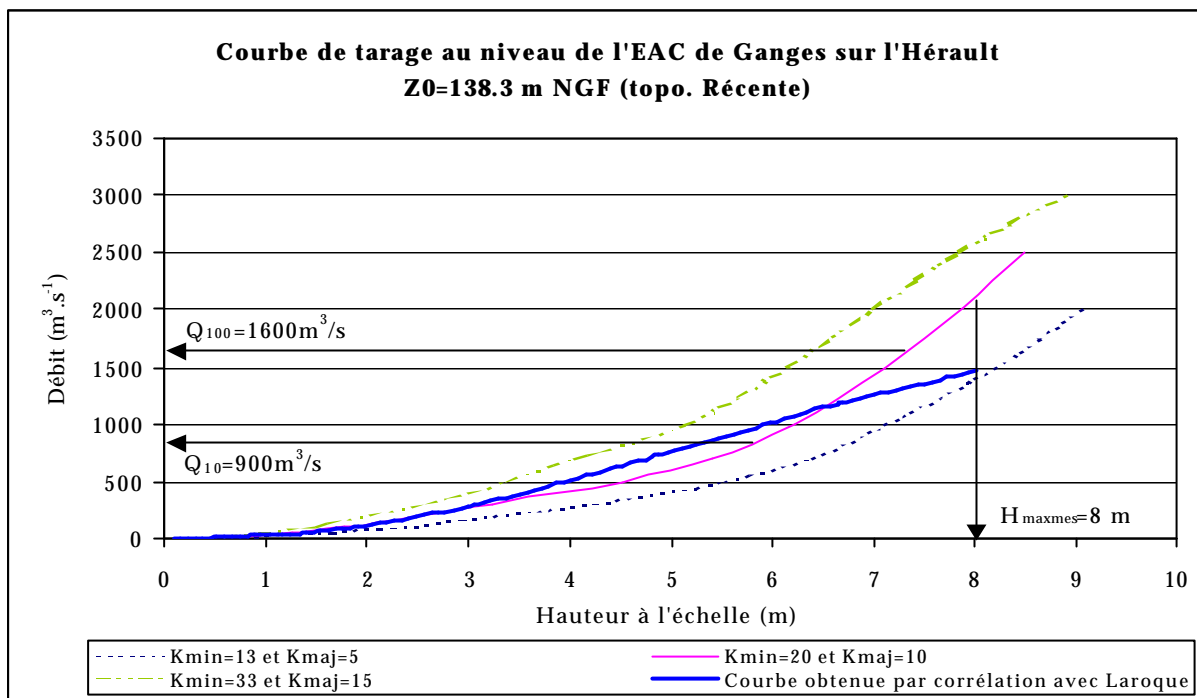


Figure 13. Comparaison avec la courbe obtenue par corrélation avec Laroque

La courbe représentée en gras sur la **Figure 13** a été déterminée par corrélation avec Laroque lors d’une étude du BCEOM (avec un coefficient de Strickler valant $15 \text{ m}^{1/3} \cdot \text{s}^{-1}$ dans le lit mineur). Pour de petits débits (jusqu’à $250 \text{ m}^3/\text{s}$ environ), cette courbe et la courbe moyenne que nous avons obtenu par modélisation sont cohérentes. Pour des débits supérieurs à $250 \text{ m}^3/\text{s}$, l’allure de cette courbe est différente de celle que l’on obtient lors de la modélisation hydraulique. Elle est cependant comprise dans notre intervalle d’incertitude.

Nous étudions ensuite l’influence du Rieutord au niveau de l’échelle DDE de Ganges.

1	$Q_h=20 \text{ m}^3/\text{s}$	$Q_r=0 \text{ m}^3/\text{s}$, $Q_r=115 \text{ m}^3/\text{s}$ (Q10) et $Q_r=200 \text{ m}^3/\text{s}$ (Q100)
2	$Q_h=100 \text{ m}^3/\text{s}$	$Q_r=0 \text{ m}^3/\text{s}$, $Q_r=115 \text{ m}^3/\text{s}$ (Q10) et $Q_r=200 \text{ m}^3/\text{s}$ (Q100)
3	$Q_h=500 \text{ m}^3/\text{s}$	$Q_r=0 \text{ m}^3/\text{s}$, $Q_r=115 \text{ m}^3/\text{s}$ (Q10) et $Q_r=200 \text{ m}^3/\text{s}$ (Q100)
4	$Q_h=900 \text{ m}^3/\text{s}$ (Q5)	$Q_r=0 \text{ m}^3/\text{s}$, $Q_r=115 \text{ m}^3/\text{s}$ (Q10) et $Q_r=200 \text{ m}^3/\text{s}$ (Q100)
5	$Q_h=1350 \text{ m}^3/\text{s}$ (Q20)	$Q_r=0 \text{ m}^3/\text{s}$, $Q_r=115 \text{ m}^3/\text{s}$ (Q10) et $Q_r=200 \text{ m}^3/\text{s}$ (Q100)
6	$Q_h=1600 \text{ m}^3/\text{s}$ (Q50)	$Q_r=0 \text{ m}^3/\text{s}$, $Q_r=115 \text{ m}^3/\text{s}$ (Q10) et $Q_r=200 \text{ m}^3/\text{s}$ (Q100)

Tableau 6. Cas simulés pour l’analyse de sensibilité du Rieutord au niveau de l’échelle de Ganges

Notons Q_h le débit de l’Hérault et Q_r le débit du Rieutord. Les différents cas testés sont énumérés dans le **Tableau 6**. Pour chaque cas, le débit de l’Hérault est fixé (de $20 \text{ m}^3/\text{s}$: débit moyen de l’Hérault, banque HYDRO- à $1600 \text{ m}^3/\text{s}$: période de retour 50 ans) et nous faisons varier le débit du Rieutord (débits correspondant à des périodes de retour de 10 et 100 ans). Deux courbes de tarage « moyennes » supplémentaires sont alors obtenues (**Figure 14**) : une première en considérant un débit du Rieutord de période de retour 10 ans, une autre en considérant un débit du Rieutord de période de retour 100 ans. Nous constatons que lorsque seul le Rieutord est en crue, l’influence des apports au niveau de l’échelle DDE de Ganges est de l’ordre de 50 cm à 1 mètre, ce qui n’est pas négligeable. Cependant, l’influence du Rieutord diminue jusqu’à devenir négligeable pour de forts débits de l’Hérault.

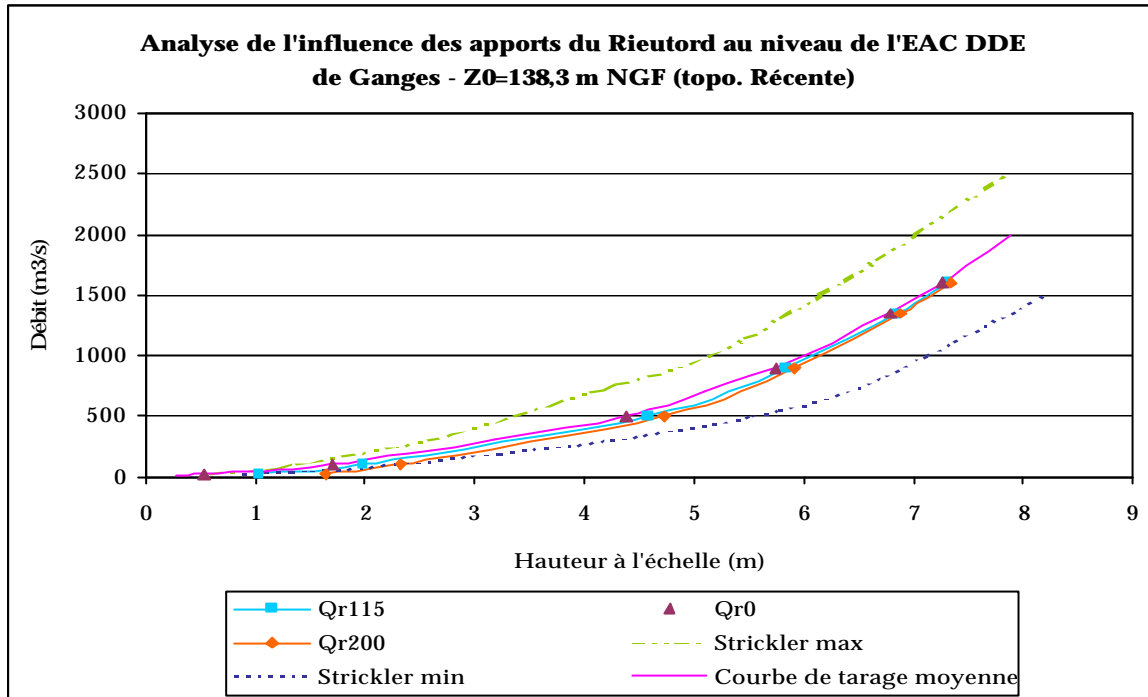


Figure 14. Analyse de l'influence des apports du Rieutord au niveau de l'échelle DDE de Ganges – topographie récente

Courbe de tarage au niveau de l'église de Laroque

La modélisation hydraulique nous a également permis de déterminer la courbe de tarage au niveau de l'église de Laroque en considérant les apports du Rieutord nuls – puisque nous n'avons aucune information sur les débits du Rieutord (Figure 15). A ce niveau, une échelle a été placée sur la chaussée. L'altitude du zéro de l'échelle est de 139,29 m NGF.

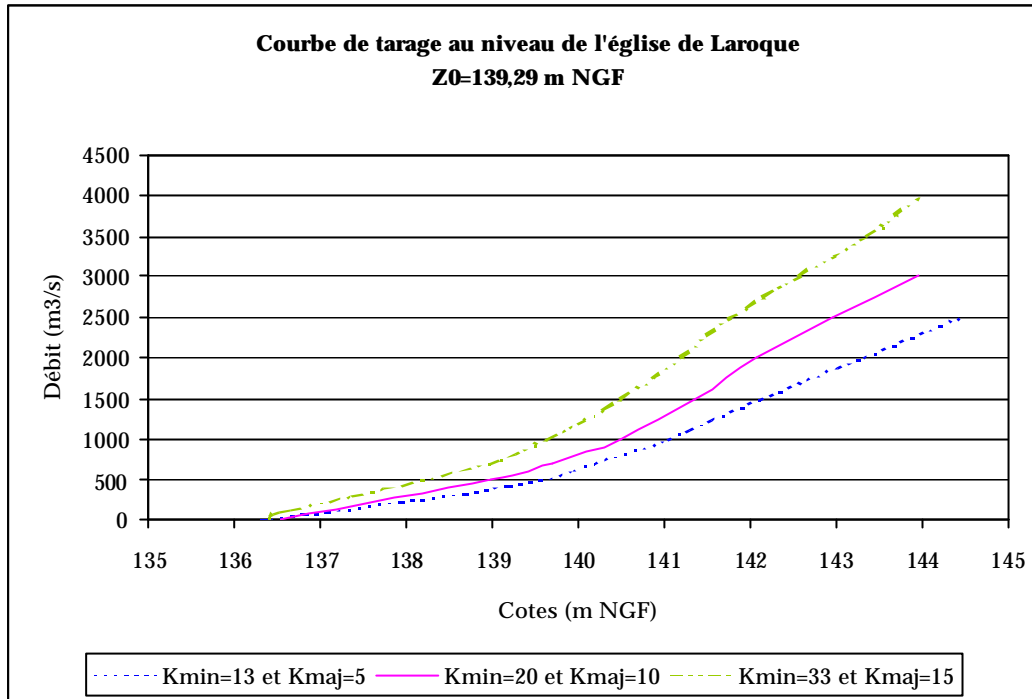


Figure 15. Courbe de tarage au niveau de l'église de Laroque (apports du Rieutord nuls) - topo récente

Il est intéressant d'étudier quelle est l'influence des apports du Rieutord au niveau de l'église de Laroque. Pour cela, nous procédons de la même manière que précédemment : les mêmes débits sont simulés. Les courbes obtenues sont représentées **Figure 16**.

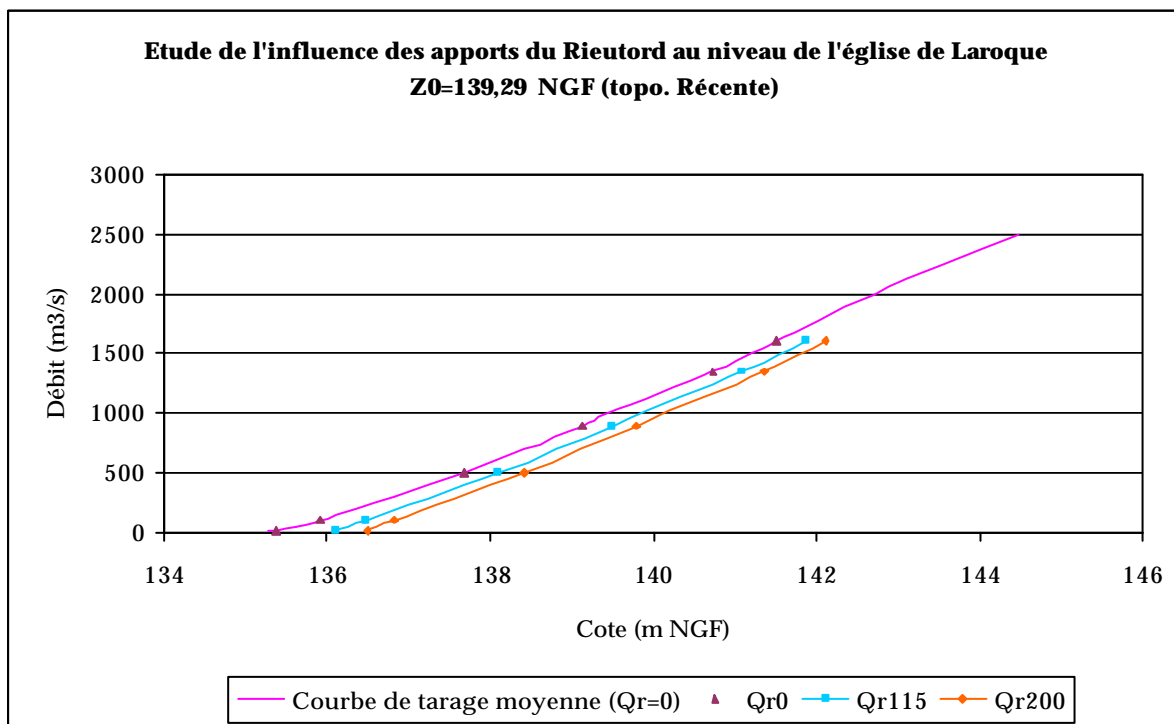


Figure 16. Etude de l'influence du Rieutord au niveau de l'église de Laroque - topographie récente (débit Q avant la confluence avec le Rieutord)

Nous constatons que l’influence du Rieutord au niveau de l’église de Laroque diminue lorsque le débit de l’Hérault augmente. Cependant, l’influence de ses apports reste non négligeable (environ 50 cm), même pour des débits élevés de l’Hérault (1600 m³/s).

II.4. Modélisation hydraulique : période ancienne

La construction du modèle ancien découle des interprétations faites des données morphologiques et hydrométriques anciennes disponibles. Comme nous l’avons expliqué dans le paragraphe I.1, un modèle supplémentaire est développé en rehaussant la topographie récente de 1 à 5 m suivant les sections. Aucune modification n’est effectuée sur les ouvrages. Ce nouveau modèle permettra de reconstituer les débits des crues avant 1921.

D’après les données anciennes, la hauteur maximale atteinte à l’échelle durant la période « ancienne » est de 8 m le 02/10/1958, l’altitude du zéro de l’échelle d’annonce de crue DDE étant, à cette date, de 139,3 m NGF d’après la DDE ou de 138,8 m NGF d’après le BCEOM et les documents de J.-C. Sabatier. L’incertitude n’ayant toujours pas été levée à ce jour, nous considérerons les deux possibilités. Le débit maximal à simuler devra donc correspondre à cette hauteur.

Dans un premier temps, nous déterminons la courbe de tarage de l’Hérault au niveau de l’échelle d’annonce de crue DDE de Ganges en considérant que les apports du Rieutord sont nuls. Les coefficients de Strickler restent inchangés. Les nouvelles courbes de tarage obtenues sont présentées **Figures 17 et 18**.

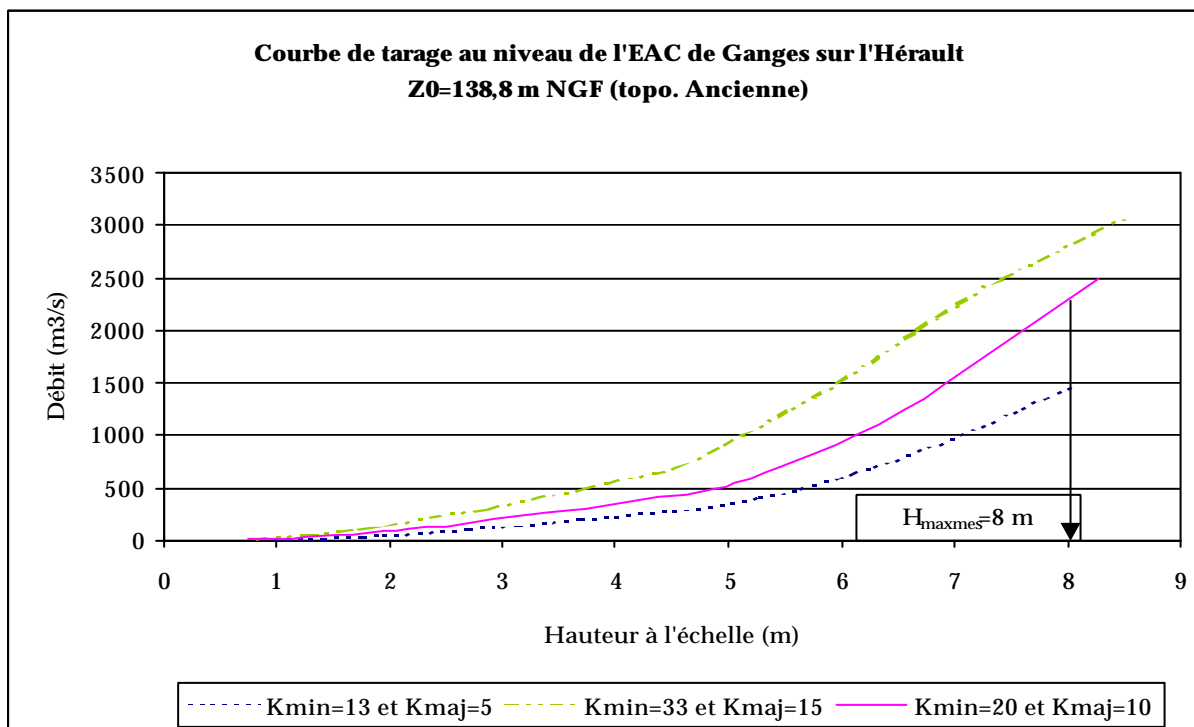


Figure 17. Courbe de tarage au niveau de l’échelle d’annonce de crue DDE pour Z0=138,8m NGF (apports Rieutord nuls) - topographie ancienne

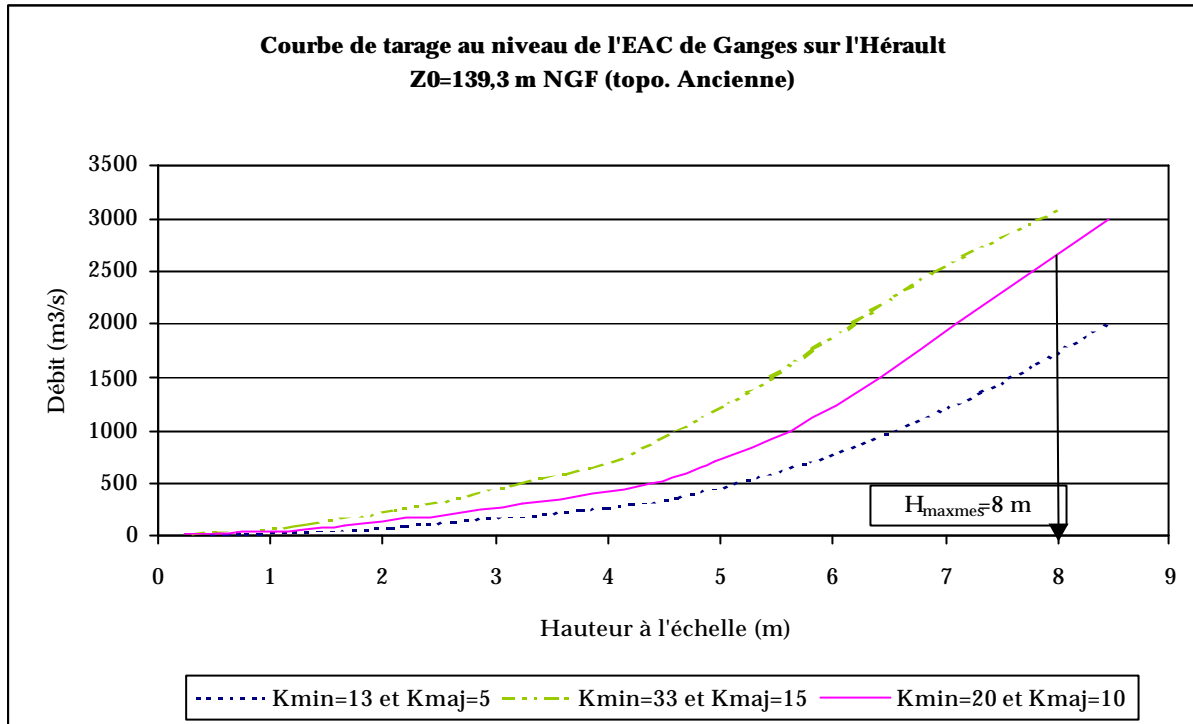


Figure 18. Courbe de tarage au niveau de l'échelle d'annonce de crue DDE pour Z0=139,3m NGF (apports Rieutord nuls) - topographie ancienne

Nous étudions ensuite l’influence du Rieutord au niveau de l’échelle DDE de Ganges. Nous procédons de la même manière que pour le modèle récent : les même cas de simulation sont testés. Les courbes obtenues sont représentées **Figures 19 et 20**. Pour de forts débits de l’Hérault, l’influence des apports du Rieutord est négligeable au niveau de l’échelle DDE de Ganges.

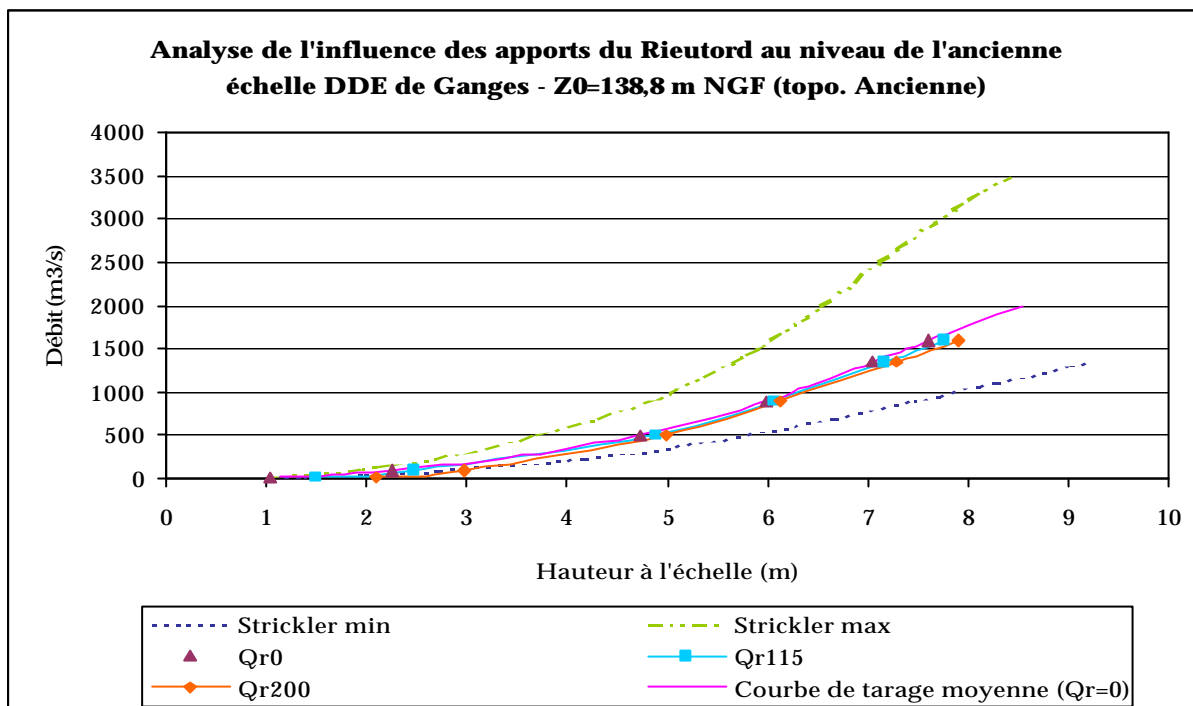


Figure 19. Analyse de l'influence des apports du Rieutord au niveau de l'échelle d'annonce de crue de Ganges - topographie ancienne

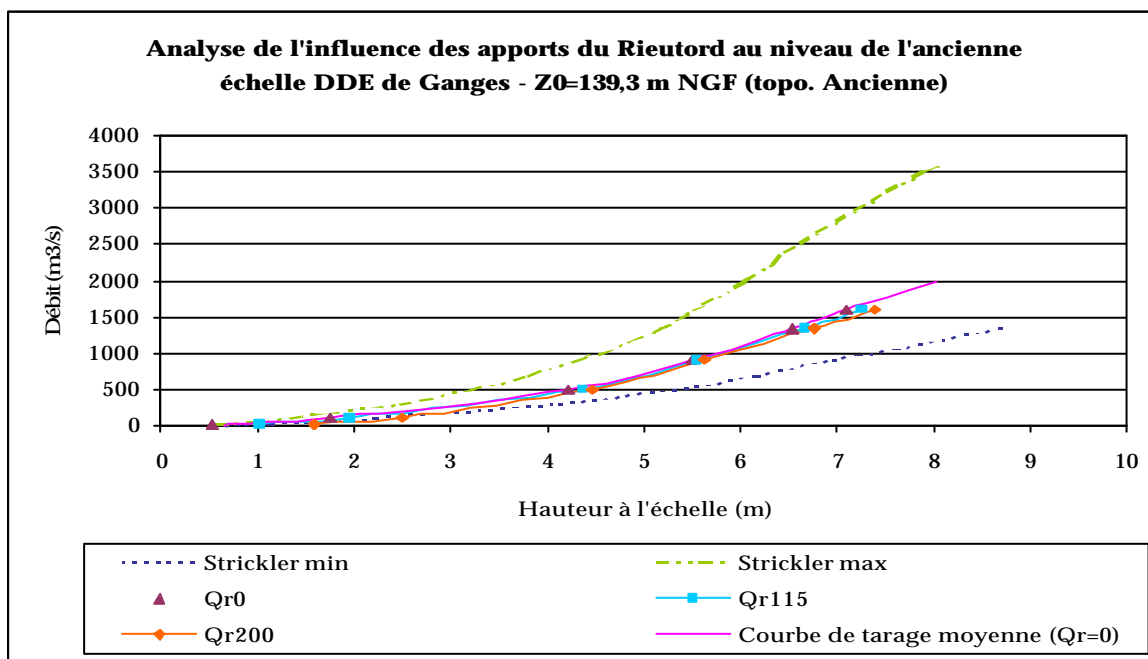


Figure 20. Analyse de l'influence des apports du Rieutord au niveau de l'échelle d'annonce de crue de Ganges - topographie ancienne

Courbe de tarage au niveau de l’église de Laroque

Les courbes de tarage obtenues au niveau de l’église de Laroque sont représentées Figure 21. La hauteur maximale relevée à ce niveau est de 4,43 m (soit une cote de 143,72 m NGF) pour la crue de 1890.

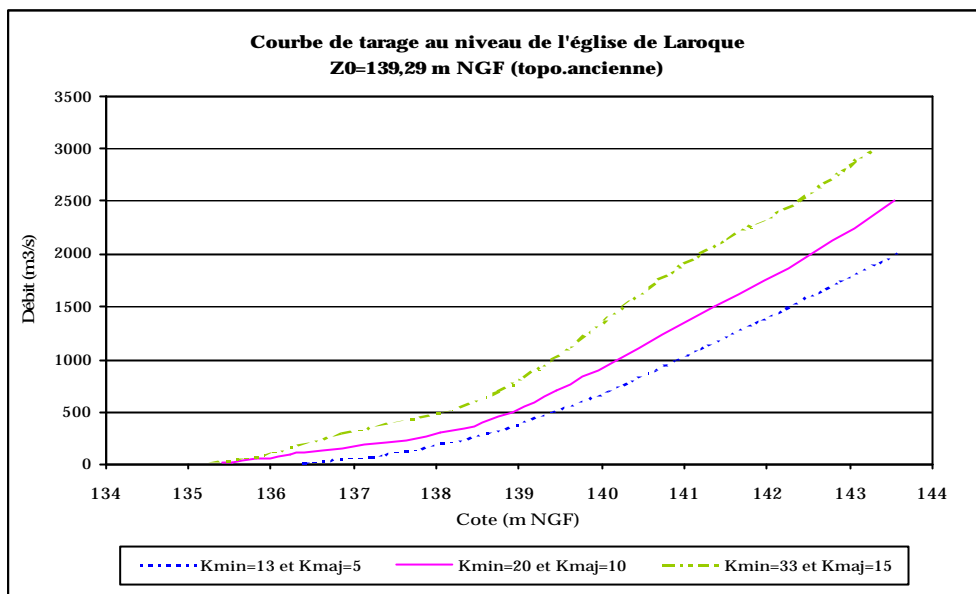


Figure 21. Courbe de tarage au niveau de l'église de Laroque (apports Rieutord nuls) - topographie ancienne

Il est intéressant d'étudier quelle est l'influence des apports du Rieutord au niveau de l'église de Laroque. Pour cela, nous procédons de la même manière que précédemment : les mêmes débits sont simulés. Les courbes obtenues sont représentées **Figure 22**. Les mêmes remarques que l'étude avec le modèle récent peuvent être faites : l'influence du Rieutord au niveau de l'église de Laroque diminue lorsque le débit de l'Hérault augmente. Cependant, l'influence de ses apports reste non négligeable (environ 50 cm), même pour des débits élevés de l'Hérault (1600 m³/s).

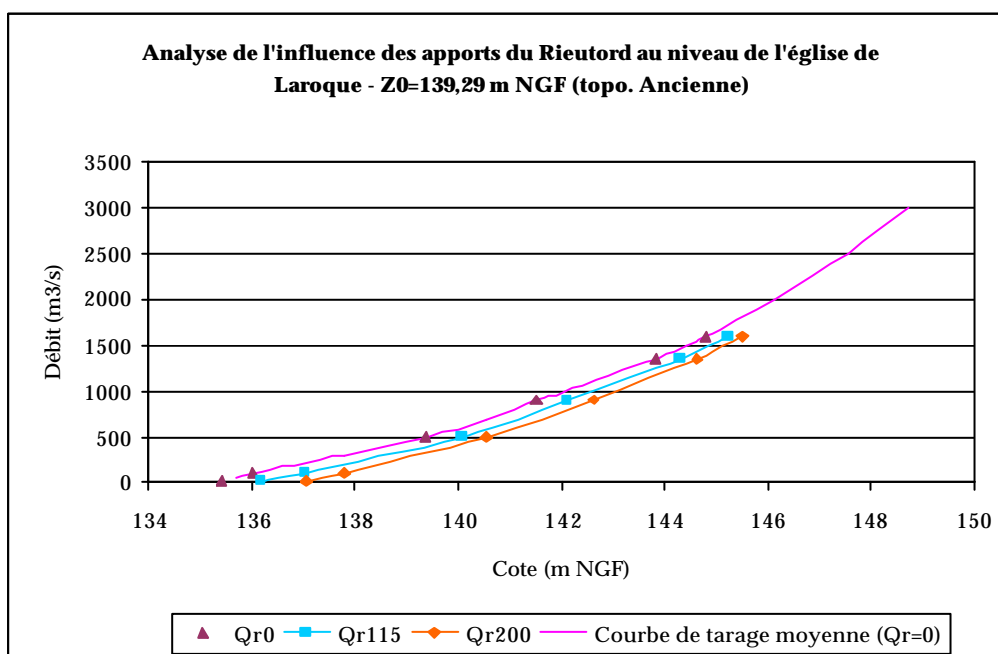


Figure 22. Etude de l'influence du Rieutord au niveau de l'église de Laroque - topographie ancienne

II.5. Vérification et validation des résultats

Nous disposons de fiches de repères de crue pour l'événement de novembre 1982. Nous pouvons ainsi voir si la ligne d'eau calculée correspondant au débit reconstitué pour la crue de 1982 coïncide avec ces repères. D'après la courbe de tarage déterminée avec le modèle récent, le débit moyen correspondant à la hauteur maximale mesurée lors de la crue de novembre 1982 (à savoir 8 mètres) est de $2074 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. La ligne d'eau calculée avec ce débit et un couple de coefficients de Strickler moyens ($K_{\min} = 20 \text{ m}^{1/3} \cdot \text{s}^{-1}$ et $K_{\text{maj}} = 10 \text{ m}^{1/3} \cdot \text{s}^{-1}$) est représentée **Figure 23**. La ligne d'eau minimale est obtenue pour un débit de $1394 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ et pour un couple de Strickler maximal ($K_{\min} = 33 \text{ m}^{1/3} \cdot \text{s}^{-1}$ et $K_{\text{maj}} = 15 \text{ m}^{1/3} \cdot \text{s}^{-1}$). De même, la ligne d'eau maximale est obtenue pour un débit de $2584 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ et pour un couple de Strickler minimal ($K_{\min} = 13 \text{ m}^{1/3} \cdot \text{s}^{-1}$ et $K_{\text{maj}} = 5 \text{ m}^{1/3} \cdot \text{s}^{-1}$).

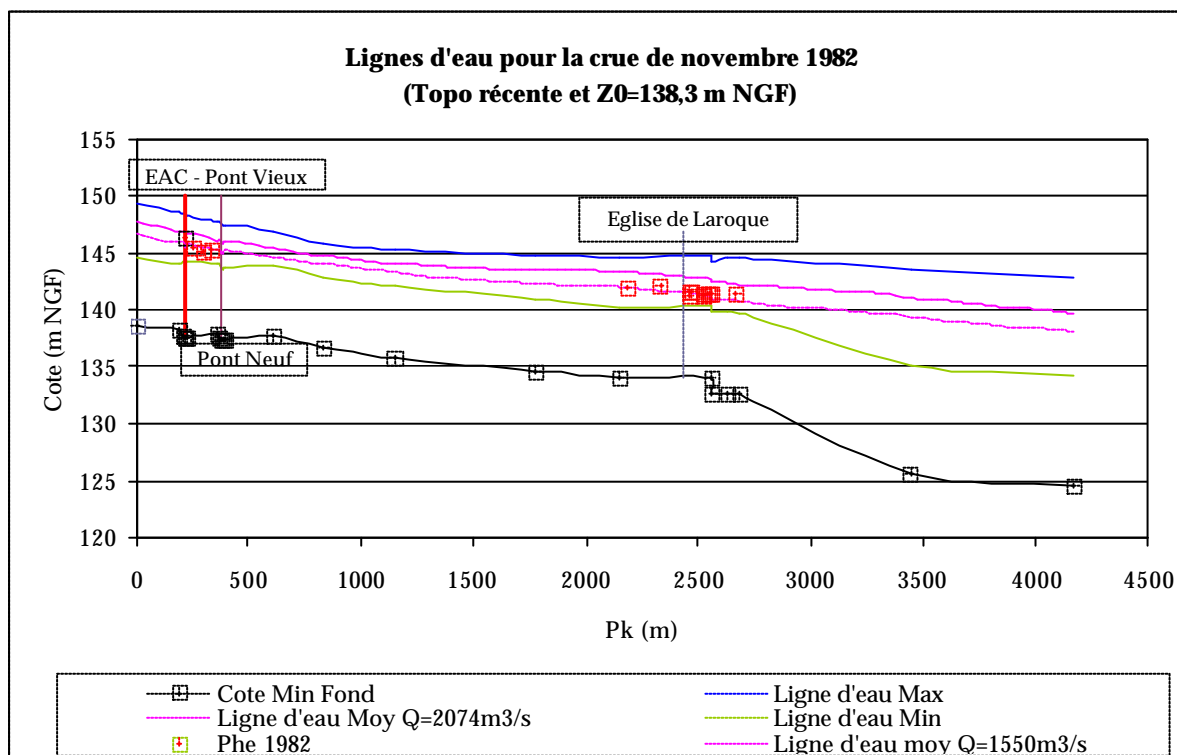


Figure 23. Lignes d'eau telles que la hauteur à l'échelle d'annonce de crue de Ganges soit de 8 m

Nous constatons que la ligne d'eau moyenne calculée pour la crue de novembre 1982 est légèrement au dessus de l'ensemble des NPHE. Elle est cependant comprise dans l'intervalle d'incertitude. Il est alors intéressant d'estimer la hauteur maximale atteinte à l'échelle d'annonce de crue de Ganges à l'aide de notre modèle « récent » et des NPHE. Le principe est de simuler plusieurs débits et de déterminer quel est celui pour lequel l'écart entre la ligne d'eau moyenne calculée et les NPHE est minimale. Par itération, nous estimons que pour la crue de novembre 1982, la hauteur maximale atteinte à l'échelle d'annonce de crue de Saint-Jean du Gard est de 7,17 mètres, pour un débit de $1550 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ (représentée en pointillés sur la **Figure 23**). Pour la suite de l'analyse nous retiendrons les estimations de débit comprises dans l'intervalle d'incertitude obtenu par analyse de sensibilité sur le calage des Strickler.

III. Analyse probabiliste des débits de crue à Ganges

III.1. Série de débit utilisée et représentation des incertitudes

La série traitée va résulter de trois sources de hauteurs :

- Station DIREN à Laroque (1970-2005). Courbe de tarage (CT) issue du rapport de Renouf *et al.* (2005)
- Echelle d’annonce des crues à Ganges. CT modèle «1921 » jusqu’à 1958, modèle récent à partir de 1959. Comme nous n’avons pas de données sur la date de changement d’échelle, la date du changement de modèle est choisie en fonction d’une cassure qui apparaît dans les données vers 1958. De plus, le Z0 ancien est également incertain : deux valeurs sont citées, 139.3 et 138.8. La première valeur est utilisée.
- Marques de crue à l’église de Laroque. Toutes les données datant d’avant 1921, c’est la CT «1921 » qui sera utilisée.

Sur la période récente 1970-2005, nous utilisons les données de la station DIREN, qui possède une courbe de tarage fiable grâce à un nombre suffisant de jaugeages et une configuration hydraulique propice à une mesure de qualité. D’ailleurs, la Figure 24 montre une bonne corrélation amont/aval entre les courbes DIREN de Ganges et Gignac, pour quelques événements récents :

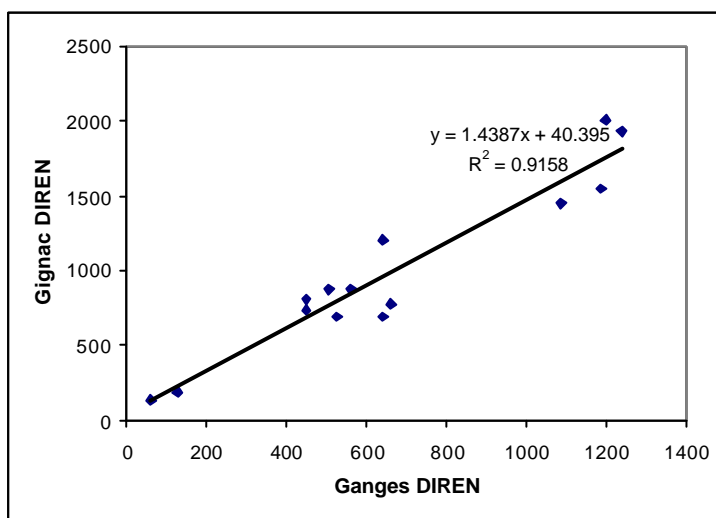


Figure 24. Corrélation entre les stations Diren de Ganges et Gignac

Pour les données antérieures à 1970, deux sources de données sont disponibles, mais situées en amont et en aval de la confluence du Rieutord (respectivement l’échelle d’annonce des crues à Ganges et l’église de Laroque). Or cet affluent présente la particularité d’être à sec la plupart du temps avec un écoulement souterrain qui rejoint plus en aval le cours de l’Hérault. Il peut devenir actif à l’occasion de précipitations importantes sur son bassin versant, sans que la concomitance avec l’Hérault ne soit une règle systématique. La Figure 25 donne la relation entre les débits reconstitués aux deux sites, pour les événements où cette information était disponible. Les écarts de débits semblent trop importants pour provenir du seul rôle du Rieutord. La valeur moyenne de 600 m³/s est bien trop forte pour le bassin du Rieutord (57 km²). Il y a manifestement une incohérence entre les deux courbes de tarage qui résulte peut-

être d’une géométrie du lit mineur variable au cours du temps ou d’un problème dans la modélisation hydraulique non répertorié à ce jour.

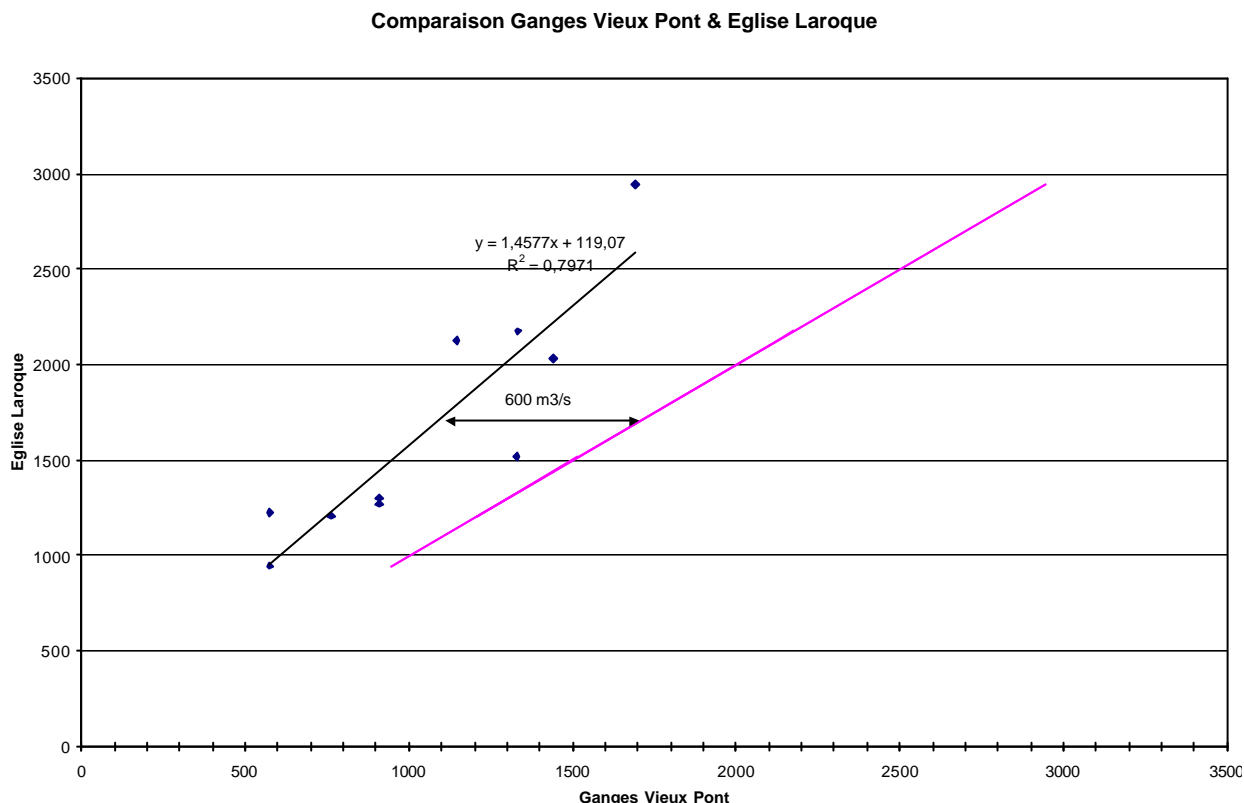


Figure 25. Corrélation entre les débits de Ganges et l’église de Laroque

Nous ajoutons aux données de la période récente 1970-2005 les relevés historiques à l’EAC de Ganges pour la période 1859-1969 et les marques de crue à l’église de Laroque. Durant la période 1959-1969, c’est la courbe de tarage « récente » qui est utilisée à l’EAC, et la corrélation Ganges-DIREN (Figure 26) montre que les débits inférieurs à 1000 m³/s semblent acceptables. Tous les débits relevés à l’EAC pendant cette période sont inférieurs à 700 m³/s.

Pour la période ancienne, c’est la courbe de tarage « ancienne » qui va être utilisée. Comme la corrélation EAC Ganges-Eglise de Laroque est mauvaise, les débits ne sont guère cohérents, sans que l’on puisse dire laquelle des deux courbes de tarage pose problème. Nous allons donc intégrer cette incertitude dans les données de débit. Pour la période 1795-1958, si une crue a été relevée à la fois à l’EAC et à l’église, la crue sera supposée contenue dans l’intervalle [débit à l’EAC ;débit à l’église] ; Si la crue n’est relevée qu’à l’EAC, on utilisera l’intervalle [débit à l’EAC ;débit à l’EAC +600] au vu de la corrélation présentée en Figure 25. Inversement, l’intervalle [débit à l’église-600 ;débit à l’église] sera utilisé si la crue n’est relevée qu’à l’église.

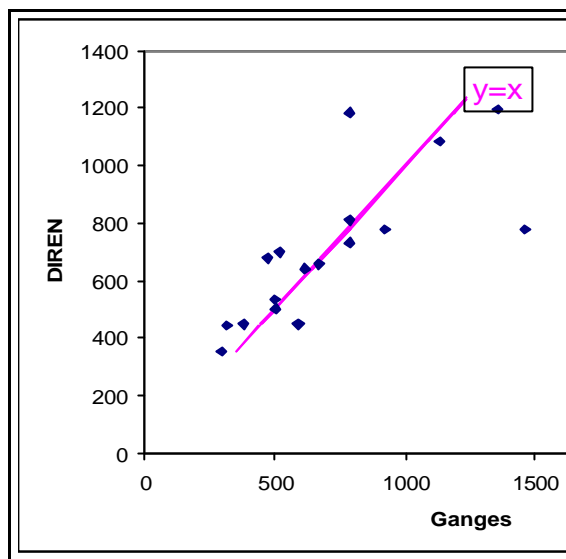


Figure 26. Corrélation entre les débits de Ganges et de la station DIREN (Laroque) pour les faibles débits de crue

Les données de débit finalement utilisées sont représentées en Figure 27.

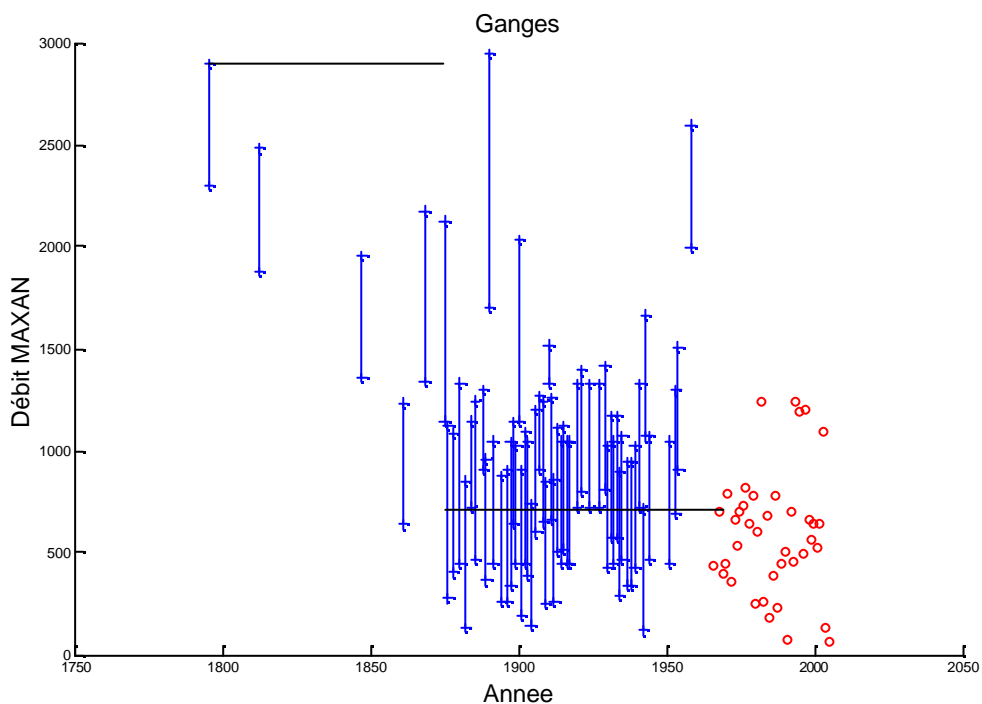


Figure 27. Série de débit de pointe à Ganges (1795-2005)

Seuils de perceptions

Les relevés de crue peuvent être considérés comme exhaustifs à partir de 1875. Ceci correspond aux données en notre possession, puisque très peu d’années sont manquantes à partir de cette date. On peut donc considérer que pour ces années, il n’y a pas eu de crues notables, et nous prendrons donc pour la période 1875-1969 un seuil de perception

correspondant à la plus petite des hauteurs relevées pendant cette période. Cependant, étant donné que tous ces débits sont très incertains à cause de la mauvaise concordance entre les débits à l’EAC et à l’église, nous choisirons par sécurité un seuil de perception égal à la borne haute de l’intervalle correspondant à la plus petite hauteur relevée durant la période 1875-1969, soit 715.6 m³/s. L’exhaustivité de la période pré-1875 est beaucoup plus difficile à établir. En particulier, le fait que la crue de 1812, considérée comme la plus importante du XIXe siècle, ne soit pas répertoriée à l’église de Laroque, montre qu’il est nécessaire de choisir un seuil très haut, et donc peu informatif. Nous choisissons donc comme seuil de perception pour la période 1795-1874 la borne supérieure du plus haut débit répertorié, à savoir 2900 m³/s en 1795 à Laroque.

Erreurs de courbes de tarage

Trois erreurs vont être modélisées :

- Pour les données anciennes pré-1959, les données prennent la forme d’un intervalle de débit, où les bornes de ces intervalles sont des débits calculés *via* les CT de l’église de Laroque et de l’EAC de Ganges modèle «1921 ». Les incertitudes sont de la forme [0.65 ;1.5] dans le premier cas, et [0.6 ;1.7] dans le second cas. Par sécurité, nous adoptons pour la période 1795-1958 une erreur systématique liée à la courbe de tarage de la forme [0.6 ;1.7]
- Pour la période 1959-1969, on prendra [0.65 ;1.5]
- Pour les données DIREN récentes, pas d’erreur pour les débits inférieurs à 600m³/s, et [0.8 ;1.15] au delà.

III.2. Distribution des valeurs maximales annuelles

Calcul en considérant des erreurs indépendantes sur la reconstitution des débits

Afin de prendre en compte les incohérences entre les estimations de débit à Ganges et à l’église de Laroque, nous avons ici considérés que tous les débits anciens étaient compris dans un intervalle, dont la largeur atteint environ 600 m³/s. De cette façon, les erreurs sur ces débits reconstitués sont supposées indépendantes

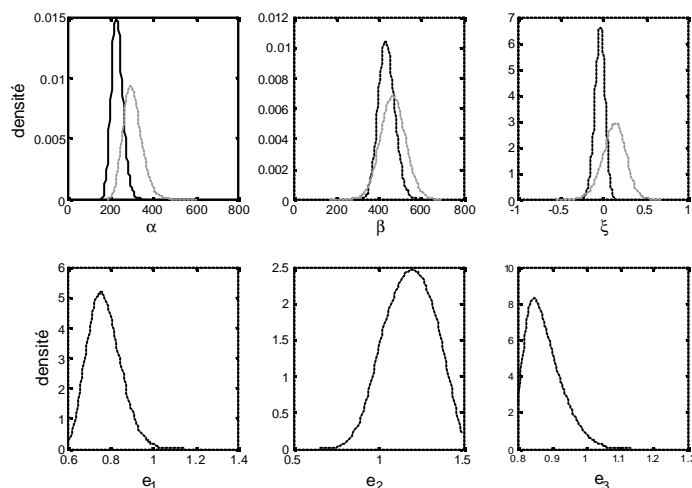


Figure 28. Distribution des paramètres de la loi GEV, et des erreurs sur la courbe de tarage (erreurs indépendantes sur la courbe de tarage)

Sur la Figure 28 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 seulement en compte les données DIREN 1970-2005, sans erreur de courbe de tarage. Les densités des erreurs multiplicatives e_1 , e_2 et e_3 sur les courbes de tarage (avant 1959 ; 1959-1969, après 1969) ne contiennent que marginalement la valeur 1 : des erreurs de CT sont donc identifiées par le modèle probabiliste. La prise en compte des informations historiques conduit à des quantiles un peu plus élevés (Figure 29). On peut remarquer que l’Hérault ne semble pas présenter de comportement fortement sur-exponentiel comme on peut l’observer sur les Gardons, puisque la valeur moyenne du paramètre de forme est quasi-nulle. L’ajustement aux fréquences empiriques est médiocre, mais il faut noter que la plupart des débits sont entachés d’une très forte incertitude.

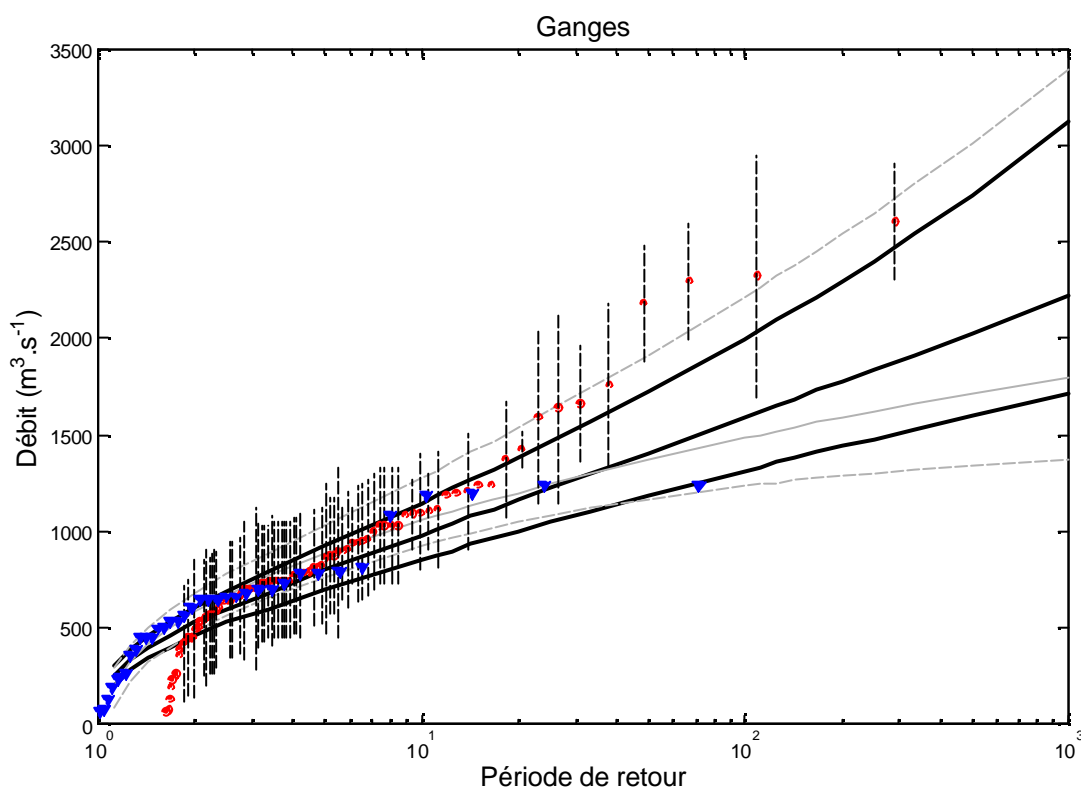


Figure 29. Loi GEV sur les valeurs maximales annuelles à Ganges (erreurs indépendantes sur la courbe de tarage)

Calcul en considérant des erreurs indépendantes sur la reconstitution des débits

Il est plus réaliste de modéliser des erreurs systématiques pour les débits reconstitués, puisque l’on peut considérer que la « vraie » courbe de tarage se situe quelque part entre celles de Ganges et de Laroque, et donc que les débits reconstitués seront tous entachés d’une même erreur. Dans cette optique, nous avons supposé que tous les débits de la période 1795-1958 étaient entachés d’une erreur additive commune de distribution uniforme. Les bornes de la distribution uniforme ont été déterminées de la manière suivante : en partant d’un intervalle d’erreur symétrique $[-300 ; 300]$, nous avons ajouté l’erreur liée à la courbe de tarage de Laroque pour la borne haute (sur-estimation de 50% au maximum) et celle de la CT de Gange pour la borne basse (sous-estimation de 40% maximum), ce qui donne finalement une loi uniforme sur $[-420 ; 450]$ pour l’erreur additive commune de cette période. Précisons que cette

manière de faire est empirique mais pas très rigoureuse. Il faudrait en fait considérer une distribution composée, résultant de l’intégration des erreurs triangulaires de CT sur la distribution uniforme sur $[-300 ; 300]$. Ce dernier modèle pourra être testé dans une étude ultérieure.

Les résultats suivants concernent donc le modèle avec une erreur additive systématique sur la période 1795-1958, et de distribution uniforme sur $[-420 ; 450]$.

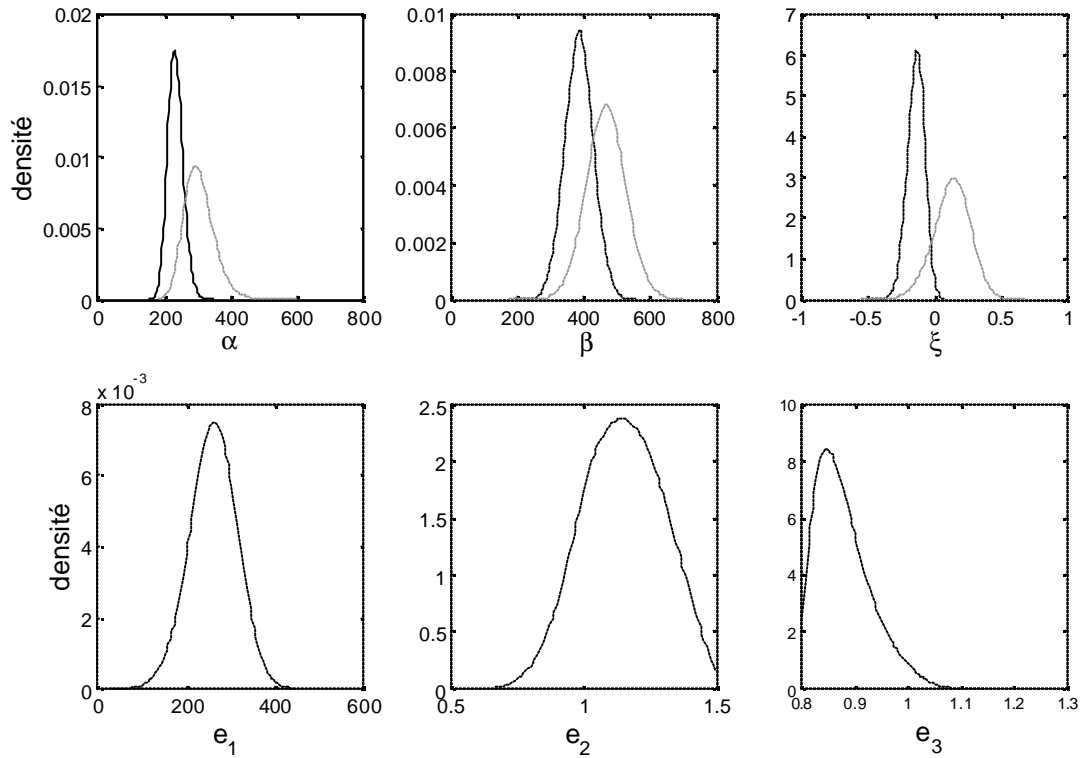


Figure 30. Distribution des paramètres de la loi GEV, et des erreurs sur la courbe de tarage (erreur additive sur la courbe de tarage)

La prise en compte d’une erreur systématique plutôt que de plusieurs erreurs indépendantes permet à la courbe des quantiles de se rapprocher des fréquences empiriques pour les plus grandes périodes de retour (Figure 31), grâce à un paramètre de forme plus négatif que précédemment (Figure 30).

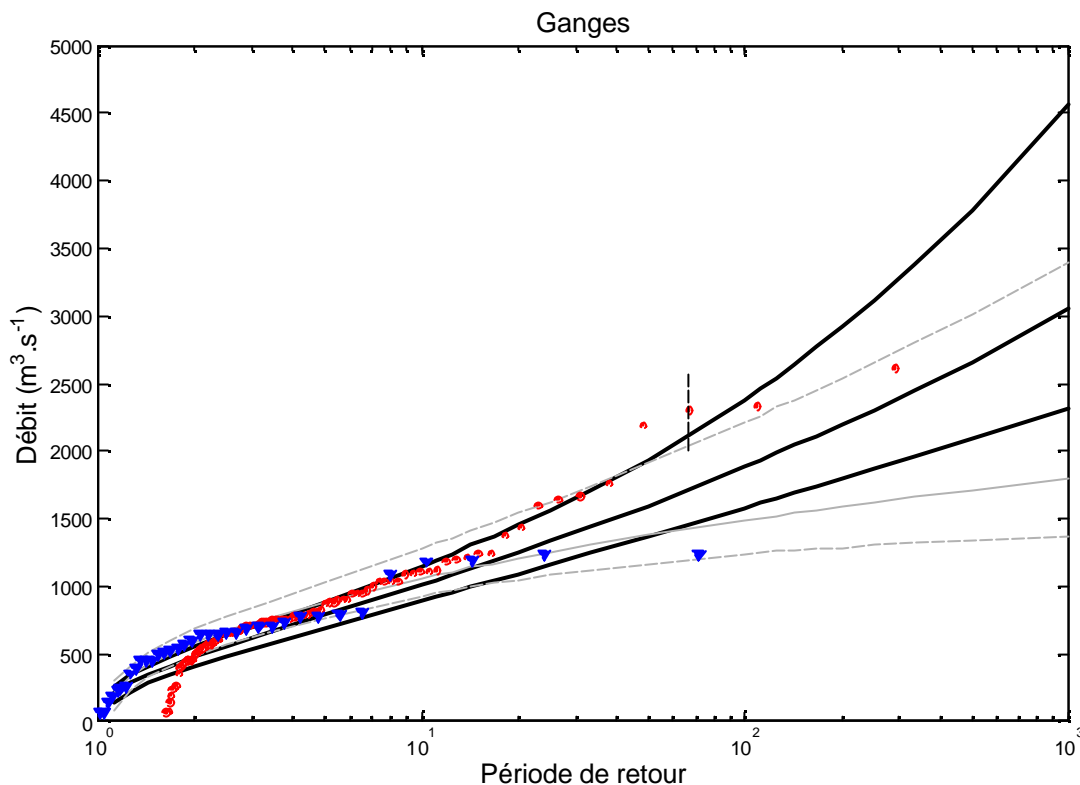


Figure 31. Loi GEV sur les valeurs maximales annuelles à Ganges (erreurs additives sur la courbe de tarage)

Comparaison de la distribution empirique des crues historiques avec l’extrapolation par la méthode du Gradex

Pour finir, ces courbes de quantiles sont comparées aux courbes extrapolées avec la méthode du Gradex esthétique. Nous utilisons les valeurs de gradex des pluies journalières pour un bassin versant de 756 km², obtenues par une analyse régionale (cf. partie VI.1 du rapport principal) :

- Hypothèse basse : ajustement sur les lames journalières de bassin de l’Hérault à Ganges (valeurs supérieures à 190 mm/jour). Gradex = 11.4 mm
- Hypothèse haute : distribution enveloppe des lames journalières maximales sur le secteur Cévennes-Vivarais (250x250 km²). Gradex = 53 mm

L’hypothèse base résulte d’un ajustement d’une loi Pareto généralisée sur les lames journalières du bassin de l’Hérault à Ganges, supérieures à 190 mm/jour. Le paramètre de forme n’étant pas significativement différent de zéro, on retient une loi exponentielle de paramètre d’échelle :

gradex 1 = 11.4 mm.

L’hypothèse haute résulte d’une loi régionale sur la lame d’eau journalière sur le secteur Cévennes-Vivarais, appliquée à la superficie du bassin de l’Hérault à Ganges (S = 756 km²) :

$$L(T)=137.73 - 198.04 [1-(1.94T)^{0.14}]$$

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

$$a_p(T) = dL(T)/dLn(T) = T dL(T)/d(T) = 30.42 T^{0.14}$$

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)

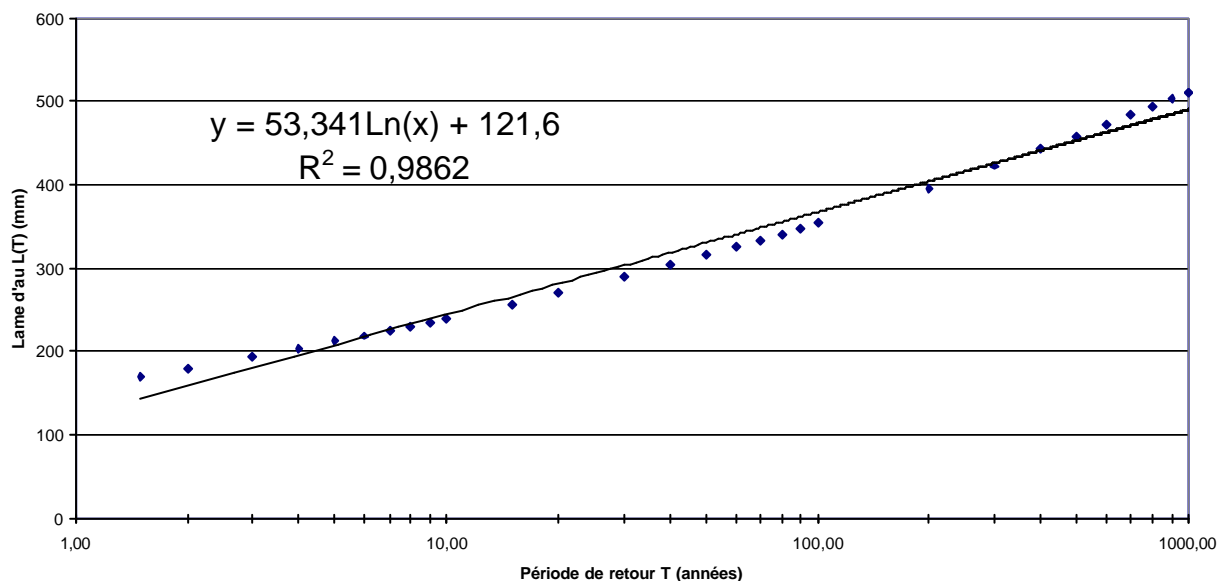


Figure 32. Valeur du gradex retenue à partir de la courbe enveloppe régionale des précipitations

L’application de la méthode Agregée (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 :

$$Q1J(T) = Q1J(T_g) + a_p \text{Ln}[(T+K_q)/(T_g+K_q)] \text{ avec } K_q = [a_p/a_q(T_g) - 1] T_g$$

où :

T_g : seuil d’extrapolation avec l’information pluviométrique

a_p : gradex des pluies (en m^3/s)

$a_q(T_g)$: pente de la distribution des débits pour $T = T_g$ (en m^3/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 33, obtenue en utilisant 35 événements de crue issus de la chronique 1970-2005 de la station Diren.

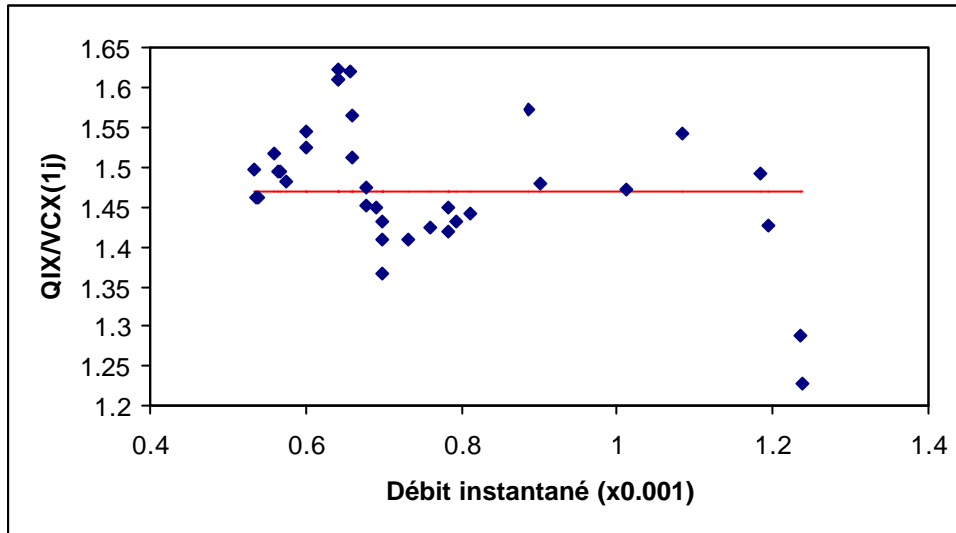


Figure 33. Valeur du rapport de pointe de crue en fonction du débit de pointe (station Diren, Ganges, 1970-2005)

L’application numérique avec les valeurs suivantes :

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

a_p (en mm)	11.4	53
a_p (en m^3/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)
 $Q_p(T) = 1014 + 146.6 \ln[(T + 4.06) / 5.94]$
- Hypothèse haute sur le gradex de bassin (57 mm)
 $Q_p(T) = 1014 + 681.7 \ln[(T + 17.6) / 27.6]$

Les résultats sont présentés Figure 34. 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.

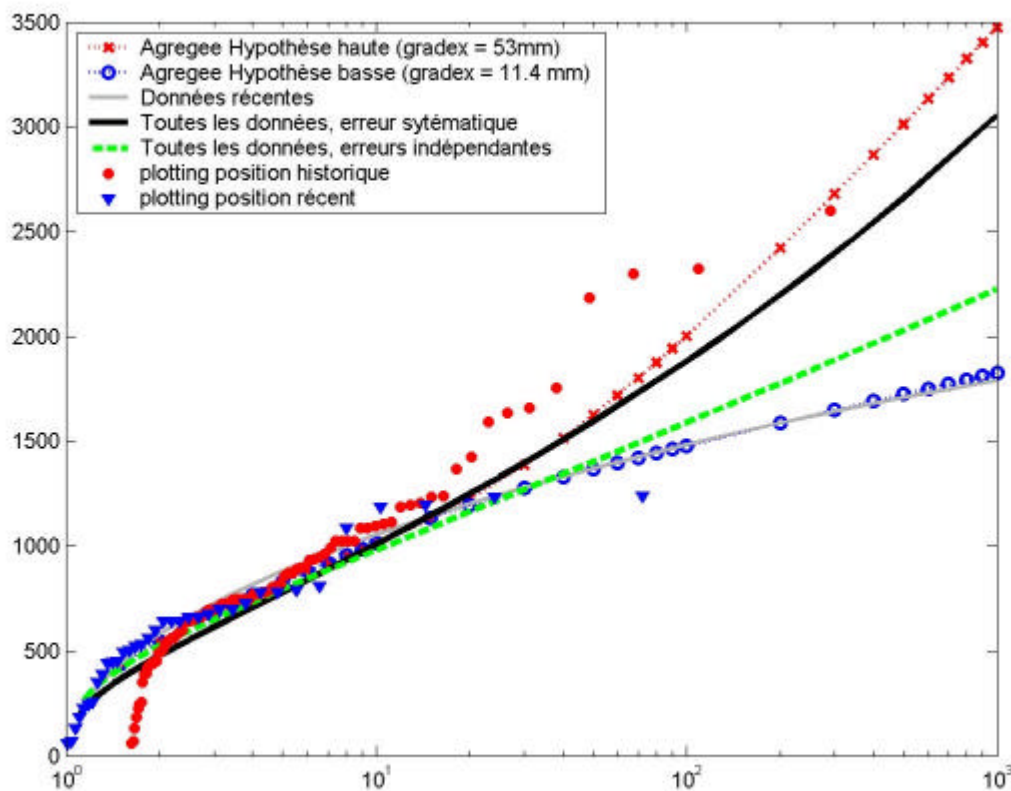


Figure 34. Comparaison des distributions empiriques (période récente, et période historique) avec une loi GEV ajustée sur la période complète (erreurs de reconstitution des débits supposées indépendantes ou liées à la courbe de tarage), et avec une extrapolation avec le gradex des pluies (loi régionale-hypothèse 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.