

RAPPORT

CETE de LYON

Centre d'Études
Techniques
de LYON

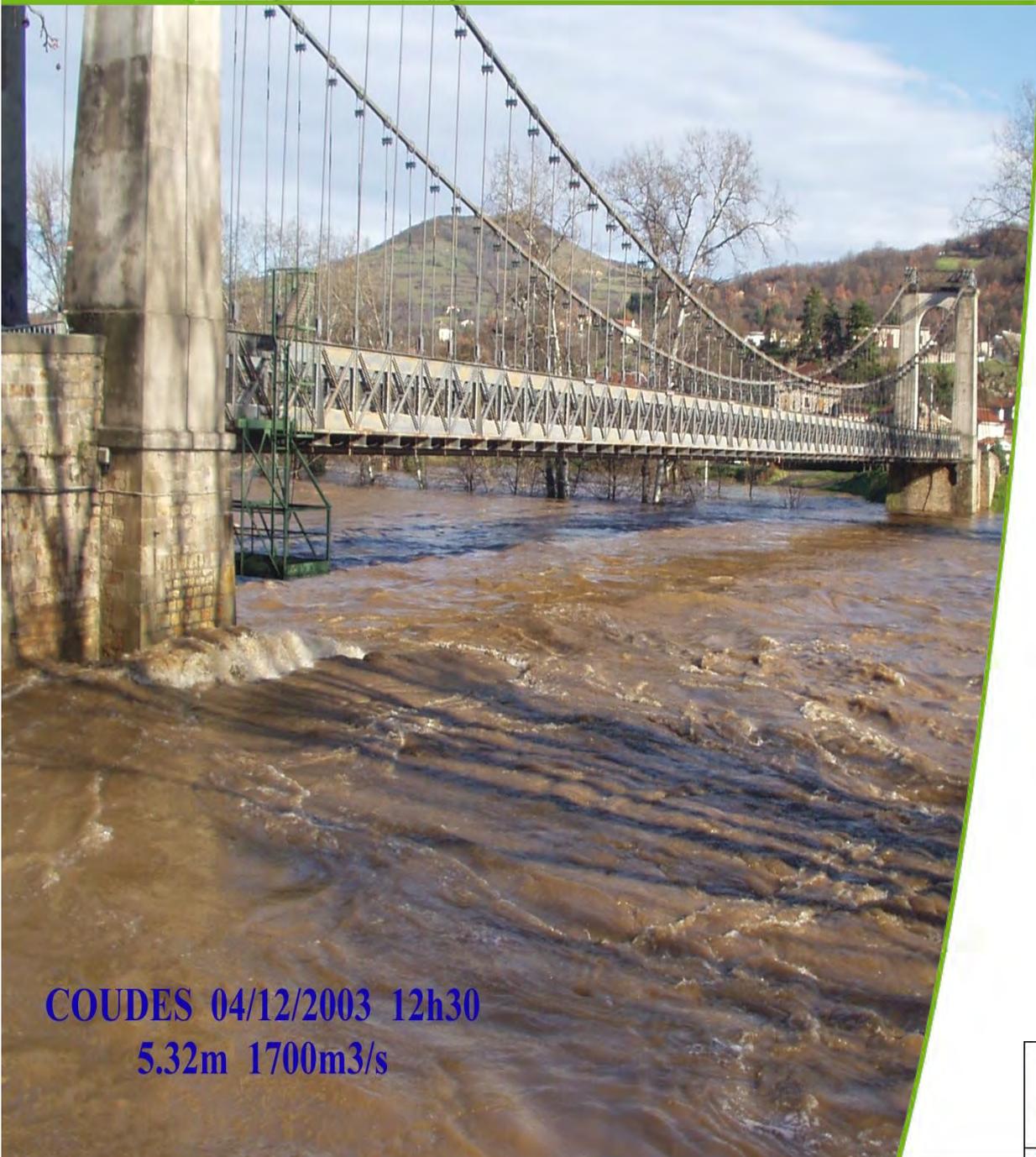
Département
Laboratoire de
Clermont-Ferrand

Affaire
63/07/19640

Mars 2013

Elaboration des Plans de Prévention des Risques naturels Prévisibles d'Inondation de la rivière Allier dans le Puy de Dôme

Etude hydrologique et hydraulique pour la cartographie de l'aléa inondation



COUDES 04/12/2003 12h30

5.32m 1700m³/s



Ministère de l'Écologie, du Développement Durable et de l'Énergie

DDT 63 SPAR
7 rue Léo Lagrange
63033 CLERMONT-FERRAND CEDEX

Elaboration des Plans de Prévention des Risques naturels Prévisibles d'Inondation de la rivière Allier dans le Puy de Dôme

Etude hydrologique et hydraulique
pour la cartographie de l'aléa
inondation

Rapport

Mars 2013

Date	Version	Commentaires
Décembre 2011	V01	Première version complète, pour avis DDT63
Mars 2013	Vf	Version définitive après dernières corrections de mise en forme et d'orthographe, le fond restant identique à la version V01 de décembre 2011.

CETE69_R2_DM_Rapport_Rev4



Département Laboratoire de Clermont-Ferrand
ZI du Brézet
8 à 10, rue Bernard-Palissy
63 017 CLERMONT-FERRAND CEDEX 2
Tél.: +33 (0)4 73 42 10 10 - Fax.: +33 (0)4 73 42 10 01
Courriel : dlcf.cete-lyon@developpement-durable.gouv.fr

Récapitulatif de l'affaire

Client : Lisa WILLIAMS
DDT 63 SPAR
7 rue Léo Lagrange
63033 CLERMONT-FERRAND CEDEX

Objet de l'étude : Elaboration des Plans de Prévention des Risques naturels Prévisibles d'Inondation de la rivière Allier dans le Puy de Dôme - Etude hydrologique et hydraulique pour la cartographie de l'aléa inondation

Résumé de la commande : Etude hydrologique et hydraulique pour la cartographie de l'aléa inondation de la rivière Allier dans le Puy de Dôme

Référence dossier : Affaire 63/07/19640

Offre : Devis N° 63 2007 D 505 et proposition technique et financière 63/07/19640-63 2007 D 505 envoyé le 10/10/2007

Accord client : Le 17/10/2007 par courrier

Diffusion/Archivage : Documentation CETE de Lyon

Chargé d'affaire : Jean-Nicolas AUDOUY –Département Laboratoire de Clermont-Ferrand –
Tél. +33 (0)4 73 42 10 10 / Fax +33 (0)4 73 42 10 01
Courriel : dlcf.cete-lyon@developpement-durable.gouv.fr

Constitution de l'équipe : Jean-Nicolas AUDOUY, Jean-Claude GUILLIN, Fanny POSTEL-GEFFROY

Mots Clés : Risques Naturels, Plan de Prévention des Risques Naturels Prévisibles d'Inondation, cartographie de l'aléa

ISRN :

Liste des destinataires

Contact	Adresse	Nombre - Type
Lisa WILLIAMS	DDT 63 SPAR 7 rue Léo Lagrange 63033 CLERMONT-FERRAND CEDEX	1ex papier

Conclusion – Résumé

Le présent rapport a pour objet l'étude hydrologique et hydraulique ayant permis de cartographier l'aléa inondation de l'Allier en vue de l'élaboration des trois Plans de Prévention des Risques Naturels Prévisibles d'Inondation (PPRNPI ou plus simplement « PPRI » ou « PPR » dans la suite du rapport) concernant l'ensemble du linéaire de la rivière Allier dans le Puy de Dôme (Allier Issoirien, Allier Clermontois et Allier des plaines) prescrits par arrêté préfectoral le 15/11/2010.

Pour la Directrice
du Département Laboratoire



Marienne CHAHINE

Clermont-Ferrand, le 26 mars 2013

Le Directeur du Département Laboratoire de Clermont-Ferrand

Mme Dominique DELOUIS
Directrice du Département Laboratoire de Clermont-Ferrand

Sommaire

1 - INTRODUCTION.....	9
2 - HYDROLOGIE : DÉTERMINATION DE LA CRUE DE RÉFÉRENCE POUR LE PPRI DE L'ALLIER DANS LE PUY DE DÔME.....	10
2.1 - Débits caractéristiques de crue de l'Allier dans le Puy de Dôme.....	10
2.1.1 - Partie aval du Haut-Allier.....	12
2.1.1.a - L'Allier à Vieille-Brioude.....	12
2.1.1.b - L'Allier à Pont d'Auzon.....	20
2.1.2 - Allier moyen (entre Alagnon et Dore).....	22
2.1.2.a - L'Allier au Saut du Loup (aval immédiat de la confluence avec l'Alagnon).....	23
2.1.2.b - L'Allier à Coudes/Vic le Comte.....	28
2.1.2.c - L'Allier à Limons.....	36
2.1.2.d - Synthèse des débits de crue de l'Allier moyen et principe de calcul des quantiles de débit en un point donné de l'Allier moyen.....	39
2.1.3 - L'Allier entre le Bec de Dore et la sortie du département du Puy de Dôme.....	40
2.1.3.a - L'Allier à Ris (8730 km ²): composition des régimes de crue de l'Allier à Limons et de la Dore à Dorat.....	40
2.1.3.b - Ajustements statistiques pour l'Allier à Saint-Yorre (8940 km ²).....	45
2.1.4 - Synthèse des quantiles de crue de l'Allier dans le Puy de Dôme.....	48
2.2 - Crues historiques et choix de la crue de référence.....	49
3 - HYDROLOGIE : PRÉPARATION DES HYDROGRAMMES D'ENTRÉES DE LA MODÉLISATION HYDRAULIQUE.....	53
3.1 - Points d'entrée de débit dans le modèle hydraulique.....	53
3.2 - Élaboration des hydrogrammes d'entrée.....	54
3.2.1 - Données utilisées.....	54
3.2.2 - Hydrogrammes d'entrée des crues de 2003 et 2008.....	55
3.2.3 - Hydrogrammes des crues de période de retour 10 ans et 30 ans.....	59
3.2.4 - Hydrogrammes de la crue de référence de septembre 1866.....	62
4 - CONSTRUCTION ET CALAGE DU MODÈLE HYDRAULIQUE EN RÉGIME TRANSITOIRE.....	64
4.1 - Données d'entrée.....	64
4.1.1 - Données topographiques.....	64
4.1.2 - Données hydrologiques.....	67
4.2 - Structure et exploitation du modèle.....	67
4.3 - Calage sur les crues récentes de 2003 et 2008.....	68

4.3.1 - Crue du 4 décembre 2003.....	68
4.3.2 - Crue du 2 novembre 2008.....	73
4.4 - Vérification de la cohérence avec les laisses connues de la crue de 1866.	76
4.5 - Synthèse sur le calage du modèle hydraulique.....	78

5 - EXPLOITATION DU MODÈLE HYDRAULIQUE ET CARTOGRAPHIE DE L'ALÉA INONDATION.....[79](#)

5.1 - Exploitation des données de sortie du modèle pour la cartographie: mode opératoire.....	79
5.2 - Cartographie des hauteurs d'eau.....	79
5.3 - Cartographie des vitesses.....	79
5.4 - Cartographie de l'aléa inondation.....	80

ANNEXES.....[82](#)

Annexe A- Étude des crues historiques à la station de Vieille-Brioude (1846-2009).....	83
Annexe B- Exemples de tables de valeurs des coefficients de Strickler issues de la littérature.....	97

Liste des tableaux

Tableau 1: Stations hydrométriques actuellement en service et utilisées dans l'étude...	11
Tableau 2: Synthèse des ajustements statistiques réalisés pour l'Allier à Vieille Brioude (2269 km ²), débits donnés en m ³ /s.....	17
Tableau 3: Quantiles de crue retenus pour l'Allier à Vieille Brioude.....	20
Tableau 4: 12 crues les plus importantes depuis l'ouverture de la station de Pont d'Auzon (classées par ordre croissant de débit à Pont d'Auzon).....	21
Tableau 5 : Quantiles de crue retenus pour l'Allier à Pont d'Auzon (entrée du Puy de Dôme).....	22
Tableau 6 : Débits instantanés des crues de l'Alagnon à Lempdes (43).....	26
Tableau 7 : Quantiles des crues de l'Allier au Saut-du-Loup.....	27
Tableau 8: Quantiles de crue retenus pour l'Allier au saut du Loup (4093 km ²).....	28
Tableau 9 : Caractéristiques des précipitations bassin versant de l'Allier à Coudes / Vic-le-Comte (d'après Météo-France).....	30
Tableau 10 : Ajustement statistiques des débits de crues supérieurs à 400 m ³ /s de l'Allier à Coudes / Vic-le-Comte.....	31
Tableau 11 : Ajustement statistiques des débits de crues supérieurs à 712 m ³ /s de l'Allier à Coudes / Vic-le-Comte.....	32
Tableau 12: Quantiles des crues des affluents entre le Saut-du-Loup et Coudes.....	34
Tableau 13 : Quantile des crues de l'Allier à la confluence de la Couze Chambon.....	35
Tableau 14: Quantiles de crue retenus pour l'Allier à Coudes/Vic le Comte (5343 km ²)	36

Tableau 15: Caractéristiques des précipitations bassin versant le l'Allier à Limons (d'après Météo-France).....	37
Tableau 16 : Quantile des crues de l'Allier à Limons.....	38
Tableau 17: Quantiles de crue retenus pour l'Allier à Limons (7010 km ²).....	39
Tableau 18 : Quantiles de crues retenus pour l'Allier entre l'Alagnon et la Dore.....	39
Tableau 19 : Caractéristiques des précipitations bassin versant de la Dore à Dorat (d'après données de Météo-France).....	42
Tableau 20 : Quantile de crues de la Dore à Dorat.....	43
Tableau 21: Quantiles de crue de l'Allier à Ris suivant les hypothèses d'indépendance des crues crues de la Dore et de l'Allier.....	44
Tableau 22: Quantiles de crue pour l'Allier à Ris (8730 km ²).....	44
Tableau 23 : Caractéristiques des précipitations bassin versant de l'Allier à Saint-Yorre.....	46
Tableau 24 : Quantiles de crue de l'Allier à Saint-Yorre.....	46
Tableau 25: Quantiles de crue retenus pour l'Allier entre le Bec de Dore (8730 km ²) et Saint-Yorre (8940 km ²).....	48
Tableau 26: Quantile de crue retenus pour l'Allier dans le Puy de Dôme en m ³ /s.....	48
Tableau 27: Crues historiques de l'Allier supérieures à la crue de décembre 2003 à au moins une des échelles historiques (en gras les crues supérieures ou égales à la crue de décembre 2003 pour l'échelle considérée, sur fond jaune la crue la plus forte connue à l'échelle considérée).....	51
Tableau 28: Synthèse des débits des crues retenues.....	52
Tableau 29: Synthèse du calcul des hydrogrammes d'entrée du modèle hydraulique...	56
Tableau 30: Débits enregistrés le jour du levé topographique sur l'Allier dans le Puy de Dôme.....	65
Tableau 31: Adéquation du modèle pour la crue de 1866.....	76
Tableau 32: Débits issus de la modélisation de la crue de 1866.....	77
Tableau 33: Grille de classification de l'intensité de l'aléa.....	80
Tableau 34: Barème de tarage de l'Allier à Vieille Brioude.....	91
Tableau 35: Crues connues > 3,00 m ou 422 m ³ /s de l'Allier à Vieille Brioude entre 1846 et 2009.....	93

Liste des figures

Illustration 1: Ajustement statistique et méthode du gradex sur les crues de la période récente (1962-2009) de l'Allier à Vieille Brioude.....	18
Illustration 2: Ajustement statistique sur les crues historiques 1846-2009 supérieures à 4 m ou 635 m ³ /s de l'Allier à Vieille Brioude.....	18
Illustration 3: Ajustement statistique sur les crues supérieures à 3 m ou 712 m ³ /s à Coudes/Vic le Comte.....	33
Illustration 4: Schéma synoptique des apports considérés dans la modélisation hydraulique.....	54
Illustration 5: Hydrogrammes de la crue de 2003 aux points d'entrée du modèle hydraulique.....	57
Illustration 6: Hydrogrammes de la crue de 2008 aux points d'entrée du modèle hydraulique.....	58

Illustration 7: Hydrogrammes de la crue de période de retour 10 ans aux points d'entrée du modèle hydraulique.....	60
Illustration 8: Hydrogrammes de la crue de période de retour 30 ans aux points d'entrée du modèle hydraulique.....	61
Illustration 9: Hydrogrammes de la crue de référence de 1866 aux points d'entrée du modèle hydraulique.....	63
Illustration 10: Exemple de correction du lit mineur sur un profil en travers.....	66
Illustration 11: Exemples de modulation des coefficients de Strickler en fonction de l'occupation du sol.....	70
Illustration 12: Crue de Décembre 2003 - Comparaison des hydrogrammes observés et modélisés.....	71
Illustration 13: Synthèse du calage du modèle avec la crue de 2003.....	72
Illustration 14 : Crue de Décembre 2008 - Comparaison des hydrogrammes observés et modélisés.....	74
Illustration 15: Synthèse du calage du modèle avec la crue de 2008.....	75
Illustration 16: Vue du site de la station de Vieille Brioude (source: www.vigicrues.gouv.fr).....	83
Illustration 17: Courbe de tarage pour l'Allier à Vieille Brioude.....	90
Illustration 18: Répartition du nombre de crues >3m à Vieille Brioude entre 1846 et 2009.....	94
Illustration 19: Répartition du nombre de crues >4m à Vieille Brioude entre 1846 et 2009.....	96

1 - Introduction

L'objet de la présente étude est la cartographie de l'aléa inondation de la rivière Allier dans le département du Puy de Dôme.

Ce travail a été réalisé à la demande de la Direction Départementale des Territoires du Puy de Dôme (DDT63) dans le cadre de l'élaboration des trois Plans de Prévention des Risques Naturels Prévisibles d'Inondation (PPRNPI ou plus simplement « PPRI » ou « PPR » dans la suite du rapport) concernant l'ensemble du linéaire de la rivière Allier dans le Puy de Dôme (Allier Issoirien, Allier Clermontois et Allier des plaines) prescrits par arrêté préfectoral le 15/11/2010.

Les principales phases détaillées dans ce rapport, qui nous ont permis de parvenir à la cartographie de l'aléa inondation de l'Allier dans le Puy de Dôme sont les suivantes :

- Étude hydrologique pour la détermination des quantiles de crue de l'Allier (notamment la crue centennale) et le choix de la crue de référence des PPRI ;
- Préparation des données d'entrées (hydrogrammes) de la modélisation hydraulique en régime transitoire de l'Allier ;
- Construction et calage du modèle hydraulique en régime transitoire ;
- Exploitation des résultats du modèle pour la cartographie de l'aléa inondation.

Les cartographies de l'aléa résultant de ce travail de modélisation hydraulique ont fait l'objet d'atlas cartographiques fournis séparément à la DDT63.

2 - Hydrologie : détermination de la crue de référence pour le PPRI de l'Allier dans le Puy de Dôme

Cette partie vise à définir le débit de la crue de référence pour la cartographie de l'aléa de la rivière Allier dans le département du Puy de Dôme.

Suivant la circulaire du 24 janvier 1994, la crue de référence se définit comme :

- La crue historique la plus forte connue ;
- À défaut la crue centennale si cette dernière est supérieure à toutes les crues historiques connues.

Dans ce contexte, notre travail s'attache donc successivement à :

- Déterminer les débits caractéristiques de crue de l'Allier dans le Puy de Dôme, notamment celui de la crue centennale ;
- Étudier les crues historiques afin de déterminer laquelle est la plus forte et de comparer son débit à celui de la crue centennale et de déterminer le débit de la crue de référence retenue pour la cartographie de l'aléa.

L'ensemble de ce travail s'appuie à la fois sur les données chiffrées issues des réseaux de mesures de pluie et débit sur le bassin de l'Allier et sur une approche bibliographique (études antérieures et/ou sur d'autres sections de l'Allier).

2.1 - Débits caractéristiques de crue de l'Allier dans le Puy de Dôme

L'Allier dans le Puy de Dôme peut être découpé en 3 tronçons qui présentent des caractéristiques hydrologiques homogènes :

- **La partie aval du Haut-Allier**, qui draine environ 3000 km² à l'entrée du département et 3069 km² juste avant la jonction avec l'Alagnon au Saut du Loup. Ce tronçon représente un linéaire d'environ 10 km, entre l'entrée dans le département du Puy de Dôme et le confluent de l'Alagnon (communes de Brassac les Mines et Jumeaux) ;
- **L'Allier moyen**, entre les confluents de l'Alagnon (environ 1024 km² de surface drainée) et la Dore (1720 km²): le tronçon le plus long puisqu'il représente l'essentiel du linéaire de l'Allier dans le Puy de Dôme. La rivière y reçoit plusieurs affluents de moindre importance que l'Alagnon et la Dore, qui n'altèrent que modérément son régime de crue (Couze d'Ardes au Breuil, Couze Pavin à Issoire, Eau mère à Parentignat, Couze Chambon à Coudes, Veyre aux Martres de Veyre, Joron à Beuregard l'Évêque et Morge à Maringues pour les principaux);

- **L'extrême amont de l'Allier aval**, (communes de Ris et Saint-Priest-Bramefand), sur 10 km environ après le confluent avec la Dore au pont de Ris, avec une surface drainée totale de 8940 km² à Saint-Yorre à l'entrée dans le département de l'Allier, en face de Saint-Priest-Bramefand.

Entre chacun de ces tronçons, le régime des crues est tour à tour modifié par les 2 plus importants affluents de l'Allier dans le département que sont l'Alagnon puis la Dore.

Ceci se traduit par une montée en puissance vers l'aval des phénomènes d'origine océanique ou mixte, tandis que les crues purement méditerranéennes (crues cévenoles pures), qui ne concernent que le Haut-Allier, tendent à perdre de leur puissance dans la traversée du département, du fait du peu de renfort des affluents et du laminage qu'elles subissent en se propageant.

Comme déjà mentionné, du fait de leur moindre importance, les autres affluents ont une influence beaucoup plus faible sur les crues de l'Allier que l'Alagnon et la Dore, d'autant que leur régime de crues est souvent assez proche de ceux de ces deux affluents.

Pour chaque tronçon, les stations actuellement en service et prises en compte dans cette partie sont données dans le tableau 1 ci-après :

Tronçon	Station hydrométrique sur l'Allier	Surface du bassin versant
Partie aval du Haut Allier avant l'Alagnon	Vieille Brioude (échelle historique)	2269 km ²
	Agnat [Pont d'Auzon]	2950 km ²
Allier moyen entre Alagnon et Dore	Coudes (échelle historique)	5317 km ²
	Vic le Comte	5370 km ²
	Limons	7010 km ²
Allier aval entre Dore et Sioule	Saint-Yorre	8940 km ²

Tableau 1: Stations hydrométriques actuellement en service et utilisées dans l'étude

Les stations de Coudes et Vic le Comte sont situées à environ 10 km l'une de l'autre et drainent quasiment la même surface de bassin à 1% près : elles seront donc considérées dans la suite comme une seule et même station appelée Coudes/Vic le Comte et les débits considérés pour les calculs seront, sauf mention expresse, la moyenne des valeurs, toujours très proches, enregistrées aux 2 stations. De même, la surface drainée sera assimilée à la moyenne des 2 stations soit 5343 km².

Parmi ces stations en service aujourd'hui (2010), celles de Coudes et de Vieille Brioude font partie des stations historiques de mesure des cotes de l'Allier sur la zone d'étude et dont nous parlerons plus loin (partie 2.2 -). On dispose ainsi à Coudes et Vieille Brioude de relevés réguliers de cotes de crues depuis le milieu du 19^{ème} siècle.

Enfin dans l'ensemble de la partie 2 - et sauf mention expresse de notre part, lorsque nous parlerons du débit d'une crue (quantile ou crue réelle), il s'agira toujours du débit maximum instantané de cette dernière.

2.1.1 - Partie aval du Haut-Allier

Sur ce tronçon, en amont de la confluence avec l'Alagnon le régime des crues de l'Allier est dominé par les crues méditerranéennes pures (cévenoles) ou extensives (également qualifiées de « mixtes »), avec des montées vives et des débits importants.

Les crues océaniques pures commencent en effet seulement à se former et ne présentent jamais de caractère de gravité sur ce tronçon.

La détermination des débits caractéristiques s'appuie sur les données des stations de Vieille-Brioude (2269 km²) et de Pont d'Auzon (2950 km²).

La station de Vieille-Brioude est un élément exceptionnel du patrimoine hydrométrique du bassin de l'Allier, voire de la France.

La mise en place de la première échelle, au niveau du pont de Vieille-Brioude qui permet à l'ex-RN102 de franchir la vallée encaissée de l'Allier, date en effet de 1857. Plusieurs échelles et limnigraphes se sont succédés à cet emplacement jusqu'à aujourd'hui puisque la station est encore en service et utilisée pour la prévision et l'annonce de crue par le Service de Prévision des Crues du bassin de l'Allier (SPC Allier).

L'ensemble des données accumulées permet donc un historique quasiment exhaustif des crues supérieures à 4 m à l'échelle depuis 1857, voire même depuis 1846 puisque les niveaux des crues de 1846 et 1856 ont été rattachés a posteriori à cette échelle (voir en annexe A page 83).

La station de Pont d'Auzon est plus récente (mise en service en 1993-1994) mais est intéressante, car elle se situe très près de l'entrée de l'Allier dans le Puy de Dôme et contrôle 2950 km², soit 96% du bassin de la rivière en amont de son confluent avec l'Alagnon (3069 km²).

2.1.1.a - L'Allier à Vieille-Brioude

Le propos qui suit présente les méthodes de calcul utilisées pour déterminer les quantiles de débit de crue, puis la synthèse des quantiles de débits retournés par ces méthodes de calcul et enfin les débits retenus pour les différentes périodes de retour.

Sur les méthodes de calcul, le propos est volontairement un peu plus détaillé pour cette station que pour les suivantes afin de bien expliciter ces méthodes qui seront utilisées à plusieurs reprises pour la détermination des quantiles de débit de crue.

Ajustement sur la période récente (1962-2009)

Sur la période récente (1962-2009), l'intégralité de la chronique des hauteurs et donc des maxima instantanés de crue est disponible, ce qui a permis d'effectuer un ajustement sur les crues supérieures à 259 m³/s (ou environ 2,12 m à l'échelle).

Sur cet échantillon, après avoir recalculé les débits des maxima de crue supérieurs à 3 m d'après les cotes (voir en Annexe A- page 83 l'étude des crues historiques 1846-2009), nous avons ainsi procédé en 2 temps :

1. Ajustement par la méthode dite du « renouvellement » d'une loi exponentielle, combinée à une loi de Poisson pour décrire la probabilité de la survenue d'un nombre donné de crues supérieures au seuil de 259 m³/s dans une année particulière.

Une démonstration mathématique que nous ne détaillerons pas ici permet de montrer que l'association des 2 lois permet une description statistique du phénomène équivalente à une loi de Gumbel de même pente (ou « gradex ») ajustée sur des maxima annuels, l'intérêt de la méthode d'ajustement sur les débits supérieurs à un seuil donné étant de ne considérer que de « vraies » crues : en effet, le maximum annuel d'une année sèche peut être faible et ne pas correspondre à une crue véritable alors qu'à contrario si plusieurs crues surviennent la même année, seule la plus forte sera retenue dans un échantillonnage des maxima annuels.

Après calcul, les paramètres déterminés sont les suivants :

- Loi exponentielle exprimant la probabilité pour une crue supérieure à 259 m³/s d'être supérieure à un seuil donné de débit :

S_0 (= seuil de débit choisi) = **259 m³/s**

a_q (= gradex des débits) = **240 m³/s**

- Loi de Poisson exprimant la probabilité de rencontrer un nombre donné de crues supérieures à 259 m³/s pour une année particulière :

μ (= nombre moyen de crues $>S_0$ par an sur la période considérée) = 46/48 ans = **0,96**

L'association de ces 2 lois est équivalente à une loi de Gumbel qui aurait été déterminée à partir d'un échantillon de valeurs maximales annuelles et dont les paramètres sont les suivants :

X_0 = **249 m³/s**

a_q = **240 m³/s**

T étant la période de retour de la crue (en années et au sens usuel, c'est à dire au sens d'un échantillonnage par valeurs maximales annuelles), on obtient alors le quantile Q(T) de débit (instantané) de période de retour T de la manière suivante:

$$Q(T) = X_0 + a_q * (-\ln(-\ln(1-1/T)))$$

2. Utilisation de la méthode du gradex pour la détermination de débits de période de retour >10 ans

Afin de préciser les valeurs des quantiles de période de retour élevée (T >10 ans), l'ajustement sur la période récente a été complété par une deuxième approche utilisant la pluviométrie.

Cette approche utilise la méthode dite du « gradex » (Guillot P. & Duband D., 1967).

La méthode du gradex suppose qu'à partir d'un seuil donné (pris usuellement au niveau de la crue décennale), le bassin versant étant saturé, toute précipitation supplémentaire s'écoule intégralement.

Par voie de conséquence et pour les fortes périodes de retour, la pente de la distribution statistique des débits (ou gradex, a_q) tend à rejoindre celle des pluies (ou gradex des pluies, a_p) sous réserve qu'elles soient exprimées dans les mêmes unités.

Pour les crues supérieures au seuil considéré, donc usuellement pour les périodes de retour T supérieures à 10 ans, on peut estimer les quantiles Q(T) comme suit:

$$Q(T) = Q(10 \text{ ans}) + a_p * [\ln(T) - \ln(10)]$$

ou encore:

$$Q(T) = Q(10 \text{ ans}) + a_p * \ln(T/10)$$

Cette variante, souvent appelée « Gradex brutal », pour laquelle la pente de la distribution des crues change brutalement, apparaît souvent comme assez peu physique et est de ce fait remplacée par une variante, dite « Gradex esthétique » développée ultérieurement par le Cemagref de Lyon et pour laquelle la pente de la distribution varie de manière progressive.

a_q étant le gradex des débits déterminé précédemment (et plus généralement par un ajustement statistique sur un échantillon de débits de crue), le quantile Q(T), avec T > 10 ans, suivant le Gradex esthétique s'exprime de la manière suivante :

$$Q(T) = Q(10 \text{ ans}) + a_p * \ln[1 + (a_q / a_p) * (T - 10) / 10]$$

Dans les deux variantes de la méthode du gradex que nous venons de présenter, le gradex des pluies a_p est bien entendu une valeur ramenée à un équivalent de débit instantané et s'exprime donc comme a_q en m³/s .

Pour une taille de bassin comparable à celle de l'Allier à Vieille Brioude, la méthode la plus courante pour parvenir à cette valeur a_p est la suivante :

- Détermination du gradex des pluies journalières (A_{pj}) sur le bassin, exprimé en mm à partir des informations pluviométriques disponibles sur le bassin.

Pour le bassin du Haut-Allier, nous avons considéré 4 zones, pondérées par la suite par la part approximative de la surface du bassin versant qu'elles représentent (pourcentage entre parenthèses):

- Allier Cévenol (amont du Nouveau Monde, 25%)
- Margeride (rive gauche, 50%);
- Velay Sud - Devès (rive droite Sud, 15%);
- Livradois – Velay Nord (rive droite Nord, 10%)

Pour chacune de ces zones, nous avons déterminé les pluies journalières décennales (PJ10), centennale (PJ100) et le gradex des pluies journalières à partir des données pluviométriques dont nous disposons (données Météo-France issues de nos propres archives + nos propres ajustements à partir des données de pluies journalières du réseau CRISTAL du bassin de la Loire fournies par le SPC Allier).

Ainsi, nous avons par zone :

- Allier Cévenol :

Poste pluviométrique	Durée ou période de mesures	Origine donnée	PJ10 (mm)	PJ100 (mm)	Gradex (mm)
Langogne	1986-2008	Archives CRISTAL du SPC Allier	115,1	173,1	24,7
Lanarce	1975-2008		182,4	271,7	38,0
Rogleton	1985-2008		150,1	228,6	33,4
Moyenne Allier Cévenol			149,2	224,5	32,0

- Margeride (rive gauche) :

Poste pluviométrique	Durée ou période de mesures	Origine donnée	PJ10 (mm)	PJ100 (mm)	Gradex (mm)
Saugues	1978-2008	Archives CRISTAL du SPC Allier	58,5	78,9	8,7
L'Habitarelle	1974-2008		74,9	111,4	15,5
Moyenne Margeride			66,7	95,2	12,1

- Velay Sud-Devès :

Poste pluviométrique	Durée ou période de mesures	Origine donnée	PJ10 (mm)	PJ100 (mm)	Gradex (mm)
Goudet	1984-2008	Archives CRISTAL du SPC Allier	104,3	162,7	24,9
Cayres	1973-2008		80,2	115,3	14,9
Moyenne Velay Sud-Devès			92,3	139,0	19,9

- Livradois-Velay Nord :

Poste pluviométrique	Durée ou période de mesures	Origine donnée	PJ10 (mm)	PJ100 (mm)	Gradex (mm)
Fix	1983-2008	Archives CRISTAL du SPC Allier	71,7	103,2	13,4
Chaise Dieu	1974-1995		57,9	78,0	8,5
Moyenne Livradois-Velay Nord			64,8	90,6	11,0

Ceci donne, pour le bassin du Haut-Allier, au niveau de Vieille Brioude :

- **PJ10 = 91,0 mm**
 - **PJ100 = 133,6 mm**
 - **Gradex des pluies journalières : 18,2 mm.**
- Conversion de A_{pj} en débit : $a_{pj} = A_{pj} \cdot S / 86.4$, S étant la surface du bassin versant en km^2 .
Pour Vieille Brioude, avec $S = 2269 \text{ km}^2$, on obtient donc **$a_{pj} = 477 \text{ m}^3/\text{s}$** .
 - Détermination de a_p par multiplication de a_{pj} par le rapport moyen du débit instantané de crue au débit journalier, déterminé à partir de l'échantillon de crues considéré (pour Vieille Brioude, ce rapport, noté **RXJ**, vaut **1,48**).
Pour le bassin de l'Allier à Vieille Brioude, cela donne donc **$a_{qj} = 706 \text{ m}^3/\text{s}$** à comparer au gradex des débits pour les faibles périodes de retour (**$240 \text{ m}^3/\text{s}$**). Pour visualiser l'ajustement on se reportera au graphe de l'illustration 1 page 18.

Ajustement sur les crues historiques 1846-2009 supérieures à 4 m ou 635 m³/s

Étant donné l'ancienneté de la station et la mention de nombreuses cotes de crues historiques depuis le milieu du 19^{ème} siècle, nous avons également considéré cette information historique.

Du fait que le relevé des cotes n'était pas systématique avant 1962, nous avons dû déterminer un seuil de hauteur au-dessus duquel nous pouvions considérer que nous connaissions toutes les crues depuis 1846 (seuil dit « d'exhaustivité »). Une analyse de la répartition temporelle des crues historiques de la période 1846-2009 (voir en annexe) nous a conduit à considérer comme seuil d'exhaustivité un seuil de 4 m à l'échelle ou environ 635 m³/s.

Ce seuil correspond à des crues suffisamment importantes pour avoir été toutes répertoriées depuis 1846.

Sur l'échantillon ainsi constitué de 1846 à 2009, nous avons conduit un ajustement statistique (toujours une association loi exponentielle/loi de Poisson) par la méthode du renouvellement tel que celui présenté plus haut (association loi exponentielle/loi de Poisson).

Les paramètres trouvés sont les suivants :

- Loi exponentielle

S_0 (= seuil de débit choisi) = 635 m³/s

a_q (= gradex des débits) = 460 m³/s

- Loi de Poisson

$$\mu = 29 \text{ crues}/164 \text{ ans} = \mathbf{0,18}$$

Ceci signifie que de telles crues supérieures à 4 m se reproduisent en moyenne environ une fois tous les 5 à 6 ans, donc qu'a posteriori, il ne faudra pas considérer l'ajustement pour les périodes de retour inférieures à 5 ans.

Comme pour la période 1962-2009, l'association de ces 2 lois est équivalente à une loi de Gumbel qui aurait été déterminée à partir d'un échantillon de valeurs maximales annuelles et dont les paramètres sont les suivants :

$$X_0 = -162 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$a_q = 460 \text{ m}^3/\text{s}.$$

Le graphe de l'ajustement ainsi réalisé est donné par l'illustration 2 page 18.

Synthèse des résultats et quantiles de crue retenus

Les débits issus de l'ensemble des calculs précédents sont donnés dans le Tableau 2 ci-après et illustrés, comme déjà dit, par les graphes des figures 1 et 2 en page 18.

Période de retour (T)	Ajustement statistique 1962-2008 seul sur les crues > 259 m ³ /s	Ajustement statistique 1962-2008 complété par la méthode du gradex progressif pour T > 10 ans	Ajustement statistique 1962-2008 complété par la méthode du gradex classique pour T > 10 ans	Ajustement statistique 1846-2008 sur les crues > 4m ou 635 m ³ /s
2 ans		337		ND
5 ans		609		528
10 ans		789		873
20 ans	962	995	1297	1204
30 ans	1061	1155	1589	1394
50 ans	1181	1395	1954	1632
100 ans	1353	1778	2447	1953

Tableau 2: Synthèse des ajustements statistiques réalisés pour l'Allier à Vieille Brioude (2269 km²), débits donnés en m³/s

Ajustement statistique des crues de l'Allier à Vieille Brioude (2269 km²) entre 1962 et 2009

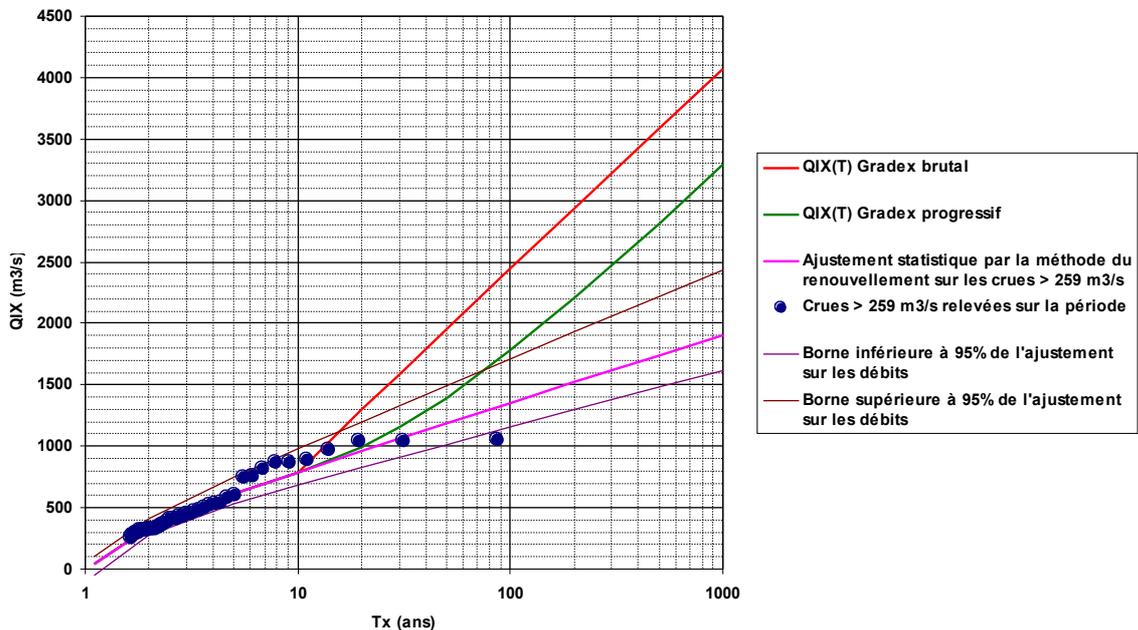


Illustration 1: Ajustement statistique et méthode du gradex sur les crues de la période récente (1962-2009) de l'Allier à Vieille Brioude

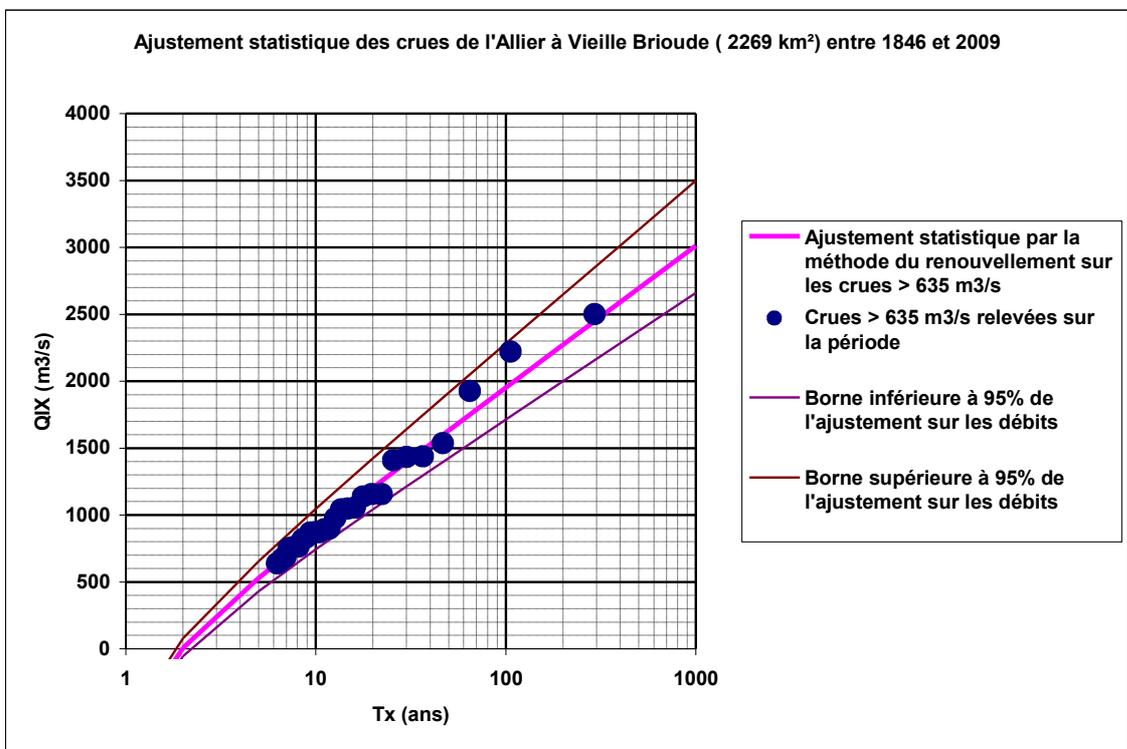


Illustration 2: Ajustement statistique sur les crues historiques 1846-2009 supérieures à 4 m ou 635 m³/s de l'Allier à Vieille Brioude

À la lumière de ces chiffres, on peut voir que les estimations diffèrent sensiblement d'un ajustement à l'autre.

Pour les périodes de retour supérieures à 10 ans tout d'abord, on peut s'apercevoir que l'ajustement sur les crues historiques donne des valeurs intermédiaires par rapport à celles retournées par les deux variantes de la méthode du gradex. À l'inverse, ces 2 variantes se placent sensiblement au niveau des bornes de l'intervalle de confiance à 95% de l'ajustement sur les crues historiques¹ supérieures à 4 m (cf. Illustration 2 en page 18).

En revanche, l'ajustement statistique directement sur les débits de la période récente donne les débits les plus faibles pour les périodes de retour supérieures ou égales à 10 ans.

Ceci est en partie dû à une certaine inhomogénéité de l'échantillon de crues à l'échelle de la période 1846-2009, puisque toutes les crues supérieures à 5,51 m ou 1055 m³/s recensées appartiennent à la période 1846-1961 tandis que l'on n'en a observé aucune depuis 1962.

Nous ne considérerons donc pas cet ajustement pour les périodes de retour supérieures à 10 ans.

Par contre, cet ajustement sur les crues récentes supérieures à 259 m³/s est plus pertinent que celui sur les crues historiques pour les crues de faible période de retour (inférieure ou égale à 10 ans) en raison du seuil choisi.

Nous retiendrons donc pour ces dernières des valeurs arrondies proches des valeurs données par l'ajustement sur la seule période récente soit:

- Q(2 ans) = 330 m³/s;
- Q(5 ans) = 610 m³/s;
- Q(10 ans) = 800 m³/s.

Pour les crues de période de retour supérieure et comme nous l'avons vu, les 2 variantes de la méthode du gradex donnent une fourchette à l'intérieur de laquelle s'insère l'ajustement sur les crues historiques. Ce dernier, malgré ses incertitudes quant à l'estimation des forts débits de crue (aucun jaugeage recensé pour des crues supérieures à 5,50 m), est basé sur des observations effectives de cotes et s'affranchit des incertitudes liées à l'introduction de l'information pluviométrique dont pâtit la méthode du gradex.

Cet ajustement constitue d'ailleurs un ordre de grandeur d'autant plus plausible que, s'agissant de la seule crue centennale, la valeur qu'il retourne (1953 m³/s) est proche de la moyenne des 2 variantes de la méthode du gradex: 2113 m³/s.

Nous retiendrons donc pour la crue centennale une valeur intermédiaire d'environ 2050 m³/s (non sans garder en mémoire quelles incertitudes entourent cette valeur²).

1 Intervalle de confiance à 95% pour la crue centennale suivant l'ajustement sur les crues historiques 1846-2009 : 1710 à 2280 m³/s

2 A minima environ de 1710 à 2280 m³/s si on retient l'intervalle de confiance à 95% de l'ajustement sur les crues historiques 1846-2009

Pour les crues de période de retour 20, 30 et 50 ans, nous interpolons ensuite entre les débits de période de retour 10 ans (800 m³/s) et 100 ans (2050 m³/s) retenus suivant une loi de Gumbel.

Au final, les valeurs retenues pour les quantiles de crues de l'Allier à Vieille Brioude sont donc les suivantes:

Période de retour (T)	Quantile en m ³ /s
2 ans	330
5 ans	610
10 ans	800
20 ans	1180
30 ans	1400
50 ans	1680
100 ans	2050

Tableau 3: Quantiles de crue retenus pour l'Allier à Vieille Brioude

Notons que le fait d'avoir eu deux crues supérieures ou égales à la crue centennale en 163 ans, entre 1846 et 2008 (2220 m³/s en 1846 et 2500 m³/s en 1866) est parfaitement compatible avec ces estimations.

Si on compare maintenant ces valeurs (Tableau 3) et les valeurs retenues dans le cadre du PPR du Haut-Allier (département de la Haute-Loire) en 1997, on s'aperçoit que les débits retenus à l'époque sont systématiquement supérieurs d'environ 250 m³/s :

- T=10 ans: 1040 m³/s contre 800 m³/s ;
- T=30 ans: 1670 m³/s contre 1400 m³/s ;
- T=100 ans: 2300 m³/s contre 2050 m³/s.

Cependant, les débits retenus en 1997 se situent, comme précédemment ceux issus de notre calcul à l'aide de la variante brutale de la méthode du gradex, près de la limite haute de l'intervalle de confiance à 95% de l'ajustement sur les crues supérieures à 4 m de la période 1846-2008.

Ceci montre qu'étant données ces incertitudes, il y a donc malgré tout cohérence entre nos valeurs et celles du PPR du Haut-Allier de 1997. Nous garderons donc nos valeurs dans la mesure où elles s'appuient sur une série de données de débits présentant 12 années supplémentaires par rapport à l'étude de 1997.

2.1.1.b - L'Allier à Pont d'Auzon

Comme nous l'avons déjà évoqué, la station de Pont d'Auzon est récente et ne permet pas encore d'avoir un recul suffisant sur les crues de l'Allier à cet endroit.

Nous avons donc préféré comparer directement les crues les plus fortes observées au niveau de la station de Pont d'Auzon avec celles constatées à Vieille Brioude.

À ce sujet, nous faisons une remarque intéressante :

Les 12 crues les plus fortes aux deux stations entre 1993 et 2008 sont exactement les mêmes, mais avec un ordre légèrement différent aux 2 stations (cf. Tableau 4 en page 21).

Ceci tient à la compétition que se livrent d'une part le laminage dans la plaine de Brioude, qui tend à abaisser le niveau de la pointe de crue, et d'autre part les apports du bassin intermédiaire (en grande partie la Senouire), qui tendent à accroître le débit malgré, en général, une concomitance médiocre des maxima.

Plus précisément, si on considère le type de crue, on remarque que les crues cévenoles pures, par ailleurs déjà quasiment formées depuis Langogne, ne trouvent qu'un renfort misérable de la part de la Senouire, de la Vendage et des autres affluents entre Vieille-Brioude et Pont d'Auzon, le plus souvent impassibles en pareille situation, et subissent de plein fouet les effets du laminage synonyme de perte de puissance, avec un ratio inférieur à 1 entre les maxima de Pont d'Auzon et de Vieille-Brioude pour trois des quatre crues concernées.

Date de la crue	Qmax Vieille Brioude (m ³ /s)	Qmax Pont d'Auzon (m ³ /s)	Ratio Pont d'Auzon/Vieille Brioude	Type de la crue
21 octobre 2001	450	320	0,710	Cévenole pure
25 novembre 2002	317	385	1,214	Mixte
30 septembre 2000	411	392	0,954	Cévenole pure
21 octobre 1994	365	421	1,153	Mixte
18 mai 1999	469	485	1,034	Cévenole pure
24 janvier 1996	429	486	1,133	Mixte
25 novembre 2003	501	496	0,990	Cévenole pure
13 novembre 1996	529	613	1,159	Mixte
24 septembre 1994	750	815	1,087	Mixte
5 novembre 1994	892	983	1,102	Mixte
4 décembre 2003	975	1040	1,064	Mixte
2 novembre 2008	1048	1070	1,021	Mixte peu marquée sur les affluents de rive gauche

Tableau 4: 12 crues les plus importantes depuis l'ouverture de la station de Pont d'Auzon (classées par ordre croissant de débit à Pont d'Auzon)

Au contraire, les crues mixtes sont renforcées par le bassin intermédiaire et leur débit progresse malgré les débordements en lit majeur et le laminage qu'elles subissent (le cas de la crue de novembre 2008, renforcée de manière médiocre par la Senouire, illustre bien la compétition des 2 influences antagonistes, avec un maximum qui progresse à peine à Pont d'Auzon).

Il faut en outre noter qu'à l'une comme à l'autre des 2 stations, les 5 crues les plus fortes depuis 1993 sont des crues mixtes, avec une hiérarchie strictement identique des événements. Ceci n'est pas surprenant et serait sans doute encore vrai si l'on considérait les plus fortes crues historiques en particulier la crue de septembre 1866, crue mixte (ou méditerranéenne extensive) avérée du fait de la forte réaction concomitante de tous les affluents de l'Allier.

En effet, malgré leur puissance en certaines occasions comme en septembre 1980, les crues cévenoles pures ne peuvent atteindre, contrairement aux crues mixtes, les niveaux les plus catastrophiques dont l'Allier est capable étant donnée la faible surface du bassin amont qui les génère.

Par conséquent, nous considérerons, pour transposer les débits de crue retenus pour Vieille-Brioude à Pont d'Auzon, la moyenne des ratios des maxima des 8 crues mixtes les plus fortes constatées depuis 1993, soit 1.12.

À noter que cette valeur de 1.12 est très proche du rapport des surfaces drainées à la puissance 0.50, qui vaut 1.14 ici et est souvent utilisé pour effectuer des transpositions de débits de crue par similitude hydrologique (formule de Myer) entre des bassins de tailles assez importantes (quelques milliers de km²) tels que celui de l'Allier dans le secteur étudié.

Au final, les débits de crue retenus pour l'Allier à Pont d'Auzon, donc en entrée du département du Puy de Dôme sont les suivants (cf. Tableau 5 en page 22) :

Période de retour (T)	Quantile en m ³ /s
2 ans	370
5 ans	685
10 ans	895
20 ans	1320
30 ans	1570
50 ans	1880
100 ans	2300

Tableau 5 : Quantiles de crue retenus pour l'Allier à Pont d'Auzon (entrée du Puy de Dôme)

2.1.2 - Allier moyen (entre Alagnon et Dore)

Sur ce tronçon, entre Auzat la Combelle et Limons, l'Allier subit l'influence de plusieurs affluents descendus des massifs du Cantal (Alagnon), du Livradois (Eau Mère), du Cé-zallier, du Sancy et de la Chaîne des Puys (Couzes d'Ardes, Pavin et Chambon, Veyre, Morge) .

Par ailleurs, ses crues subissent un laminage, d'abord modeste et souvent bien compensé par les apports des affluents (crues océaniques et mixtes) dans la plaine d'Issoire, plus important et moins bien compensé dans la Grande Limagne, entre Vic le Comte et Limons.

Par conséquent, et mis à part quelques poussées océaniques qui progressent tout en étant toujours peu graves, les autres crues voient leur débit stagner (crues mixtes intenses et bien renforcées comme en 1866) voire diminuer (événement cévenol strict avec un aplatissement déjà bien entamé à Jumeaux). Il en résulte que la plupart des crues atteignent leur maximum de puissance au niveau de Coudes ou Vic le Comte, juste après la Couze Chambon, avant de s'étaler et de décroître plus ou moins sensiblement et provisoirement jusqu'à la Dore.

Aussi le débit maximum constaté à Limons est-il très souvent inférieur à celui de Coudes ou Vic le Comte.

Pour ce qui est de la prédétermination des débits de crue, nous avons considéré l'Allier à 3 endroits:

- à l'aval immédiat de sa confluence avec l'Alagnon, au Saut du Loup, pour une surface drainée d'environ 4093 km² en considérant la composition des régimes de crue de l'Allier à Pont d'Auzon (paragraphes précédents) et de l'Alagnon à Lempdes;
- au niveau de Coudes/Vic le Comte, à l'entrée de la Grande Limagne, après que la rivière ait reçu les trois Couzes et l'Eau Mère, pour une surface drainée d'environ 5343 km² (moyenne des surfaces drainées à Coudes (5317 km²) et Vic le Comte (5370 km²));
- à Limons, juste avant la Dore, pour une surface drainée de 7010 km².

2.1.2.a - L'Allier au Saut du Loup (aval immédiat de la confluence avec l'Alagnon)

Le régime des crues de l'Allier au Saut du Loup, à l'aval immédiat de la confluence avec l'Alagnon peut être approché connaissant les débits de l'Allier au Pont d'Auzon et de l'Alagnon à Lempdes.

Ces deux stations réunies contrôlent en effet 2950 (Auzon) + 984 (Lempdes) = 3934 km², c'est à dire 96% des 4093 km² du bassin de l'Allier à cet endroit.

Par conséquent, du fait des incertitudes que l'on aura sur les débits de crue, il est tout à fait légitime de négliger les apports du bassin intermédiaire et de considérer les débits de l'Allier au Saut du Loup comme l'exacte somme de ceux de la même rivière à Pont d'Auzon et de l'Alagnon à Lempdes.

Ayant déjà déterminé les quantiles de crue de l'Allier à Pont d'Auzon, il ne nous reste plus qu'à déterminer les débits caractéristiques de l'Alagnon à Lempdes.

Quantiles de crue de l'Alagnon à Lempdes

Du fait à la fois d'une période de mesures disponibles assez courte (1967-2009) et du comportement moins tranché que l'Allier amont (pas d'influence cévenole), nous avons privilégié sur ce bassin une approche combinant un ajustement statistique par la méthode du renouvellement jusqu'à la période de retour 10 ans et une extrapolation par la méthode du gradex progressif pour la détermination de la crue centennale.

Pour l'ajustement par la méthode du renouvellement, nous avons considéré les crues supérieures à 100 m³/s de la période 1967-2009, soit 43 ans en théorie mais 38 ans en pratique compte tenu des lacunes dans la série de débits.

Les paramètres trouvés sont les suivants :

- Loi exponentielle

S₀ (= seuil de débit choisi) = **100 m³/s**

a_q (= gradex des débits) = **65,5 m³/s**

- Loi de Poisson

μ = 39 crues/38 ans = **1,03**

Ceci signifie que de telles crues supérieures à 100 m³/s se reproduisent en moyenne environ une fois par an.

L'association de ces 2 lois conduit à une loi de Gumbel équivalente dont les paramètres sont les suivants:

X_0 = **101,7 m³/s**

a_q = **65,5 m³/s**

Les quantiles de périodes de retour 2 ans, 5ans et 10 ans sont alors les suivants:

- **Q(2 ans) = 126 m³/s;**
- **Q(5 ans) = 200 m³/s;**
- **Q(10 ans) = 249 m³/s**

Pour la méthode du Gradex progressif, nous avons utilisé les données de pluies suivantes, issues de nos archives de données extraites de la Climathèque de Météo France:

Poste pluviométrique	Durée ou période de mesures	Origine donnée	PJ10 (mm)	PJ100 (mm)	Gradex (mm)
Massiac	1954-2004	Météo France	62,4	88,6	11,1
Ségur lès Villas	1954-2004		71,4	100,9	12,6
Talizat	1954-2004		67,5	94,9	11,7
Murat	34 ans		75,8	108,9	14,1
Dienne	38 ans		91,8	133,0	17,5
Montgreleix	36 ans		74,3	107,4	14,1
Marcenat	36 ans		72,3	103,2	13,1
Saint-Jacques des Blats	39 ans		125,1	176,6	21,9
La Godivelle	29 ans		77,2	105,4	12,0
Moyenne Alagnon à Lempdes			79,8	113,2	14,2

On peut noter le gradient existant entre le massif du Cantal, secteur le plus arrosé, près des sources de l'Alagnon (Saint-Jacques des Blats, représentatif du massif et proche des sources de l'Alagnon bien que localisé dans le bassin voisin de la Cère) et l'aval du bassin (Massiac, Talizat), la moyenne arithmétique calculée apparaissant re-

présentative du reste du bassin, notamment des hauteurs du Cézallier et du Nord du massif du Cantal (Ségur lès Villas, Dienne, Montgreleix) ou encore de la vallée supérieure de l'Alagnon (Murat).

Compte tenu du rapport des débits instantanés aux débits journaliers de crue ($RXJ = 1,39$) et de la surface du bassin versant (984 km^2), le gradex des pluies journalières converti en gradex équivalent pour les débits instantanés vaut $225 \text{ m}^3/\text{s}$.

La méthode du Gradex progressif donne un débit centennal de **$539 \text{ m}^3/\text{s}$** .

Nous pouvons alors faire quelques commentaires sur les quantiles retenus.

Pour la période de retour 10 ans, tout d'abord, une approche par la formule empirique de Crupedix³ (utilisant les données de pluie présentées juste avant), avec un rapport régional de 1,00, donne un débit de pointe de crue décennale égal à $247 \text{ m}^3/\text{s}$, identique à seulement $2 \text{ m}^3/\text{s}$ près, à la valeur de $249 \text{ m}^3/\text{s}$ issue de l'ajustement, ce qui conforte dernier pour les périodes de retour inférieures à 10 ans.

Pour le débit centennal, la valeur trouvée de $539 \text{ m}^3/\text{s}$ est cohérente avec les $210 \text{ m}^3/\text{s}$ déterminés en 2004 pour la station amont de Joursac (310 km^2) par le LRPC de Clermont-Ferrand dans le cadre du PPRI du Haut-Alagnon. Une similitude hydrologique utilisant le rapport des surfaces à la puissance 0,8 (valeur usuelle pour les tailles de bassins considérées) donnerait en effet une valeur presque identique de $529 \text{ m}^3/\text{s}$ pour 984 km^2 à Lempdes.

Un débit de $539 \text{ m}^3/\text{s}$ pour la crue centennale affecte par ailleurs à la crue du 5 novembre 1994 ($495 \text{ m}^3/\text{s}$) une période de retour un peu inférieure à 100 ans, ce qui est là encore conforme aux conclusions de l'étude hydrologique du PPRI de l'Alagnon aval (Geopal, 2002).

Pour simplifier nos calculs ultérieurs et comme nous l'avons fait pour l'Allier, nous avons ensuite calculé les débits de périodes de retour intermédiaires entre 10 et 100 ans en interpolant suivant une loi de Gumbel.

3 Formule de Crupedix : $Q(10 \text{ ans}) = R \cdot S^{0,8} \cdot [PJ(10 \text{ ans})/80]^2$ avec $Q(10 \text{ ans})$ et $PJ(10 \text{ ans})$ débit instantané et pluie journalière de période de retour 10 ans respectivement en m^3/s et en mm, S la surface du bassin versant en km^2 et R , coefficient régional (1,00 dans la partie de l'Auvergne considérée ici). Le domaine de validité de cette formule en terme de taille de bassin va de 10 km^2 à 2000 km^2 .

Les débits de crue retenus pour l'Alagnon à Lempdes sont donc les suivants (cf. Tableau 6 ci-après) :

Période de retour (T)	Quantile en m ³ /s
2 ans	126
5 ans	200
10 ans	249
20 ans	341
30 ans	391
50 ans	454
100 ans	539

Tableau 6 : Débits instantanés des crues de l'Alagnon à Lempdes (43)

Composition des régimes de crue de l'Allier et de l'Alagnon au Saut du Loup

Le régime des crues à l'aval immédiat d'une confluence est conditionné par les deux branches amont, dont les régimes de crues sont généralement en partie corrélés.

Une première approche du régime des crues à l'aval du confluent peut être obtenue en considérant les 2 hypothèses extrêmes quant à la corrélation des crues des 2 affluents:

- **Hypothèse 1**, liaison parfaite: les crues des 2 branches affluentes sont parfaitement corrélées, c'est à dire que pour toute crue de la première branche (par exemple ici l'Allier amont), la deuxième branche (ici l'Alagnon) présente une crue concomitante et de même période de retour que celle de la première branche. Dans les calculs, ceci se traduit donc par le fait que le débit de la crue de période de retour T donnée à l'aval du confluent est obtenue par somme des débits de période de retour T de chacune des rivières affluentes: $Q_{\text{aval}}(T) = Q_{\text{amont1}}(T) + Q_{\text{amont2}}(T)$. C'est, pour les fortes périodes de retour tout du moins, l'hypothèse du pire à l'aval du confluent;

- **Hypothèse 2**, aucune liaison ou indépendance totale des crues: il n'existe aucune corrélation entre les crues des deux rivières affluentes, c'est à dire que lorsque la rivière 1 connaît une crue de période de retour T_1 , la rivière 2 peut connaître indifféremment une crue de n'importe quelle période de retour T_2 .

Bien évidemment, et au moins pour les fortes périodes de retour, ce cas est le moins favorable à la formation de gros maxima à l'aval immédiat du confluent, puisqu'une grosse crue d'une des 2 branches n'est pas forcément accompagnée par une crue de même importance sur l'autre branche.

Par ailleurs, cette indépendance des crues ne se traduit pas, en terme de calculs statistiques de manière aussi simple que l'hypothèse précédente et fait notamment appel à un calcul d'intégrales qui peut néanmoins être effectué de manière approchée à l'aide d'Excel.

La réalité des faits étant généralement intermédiaire, les 2 hypothèses précédentes permettent de constituer une fourchette qui encadre les « vraies » valeurs des quantiles de crue à l'aval du confluent.

Ainsi, pour l'Allier au Saut du Loup, on trouve les valeurs suivantes :

Période de retour (T)	Quantiles de crue de l'Allier au Saut du Loup (4093 km ²) en m ³ /s		
	Hypothèse 1: liaison parfaite	Hypothèse 2: indépendance totale	Moyenne
2 ans	496	516	506
5 ans	885	846	865
10 ans	1144	1089	1117
20 ans	1661	1495	1578
30 ans	1961	1759	1860
50 ans	2334	2019	2177
100 ans	2839	2352	2596

Tableau 7 : Quantiles des crues de l'Allier au Saut-du-Loup

Nous pouvons voir que les deux hypothèses extrêmes donnent des débits finalement relativement proches, pas plus éloignés que les bornes des intervalles de confiance que l'on a pu constater en traitant les stations de Vieille Brioude et Auzon et que l'on obtiendra plus loin en traitant les stations de Coudes/Vic ou Limons.

Ceci s'explique parfaitement par l'importance relative pour le moins écrasante des débits de crue de l'Allier amont par rapport à ceux de l'Alagnon, ce qui donne à ce dernier un rôle secondaire (mais pas pour autant négligeable) dans les crues de l'Allier à l'aval de la confluence.

Il en sera de même vis à vis de toutes les confluences jusqu'à la Dore : aucune crue forte de l'Allier dans le Puy de Dôme ne peut se concevoir sans une participation sensible du Haut-Allier.

Dans ce contexte et compte tenu à la fois des incertitudes et de la corrélation partielle (en cas de crue mixte notamment) entre les débits de crue de l'Allier amont et de l'Alagnon, il nous apparaît suffisant de retenir pour les quantiles de crue de l'Allier au Saut du Loup la moyenne des 2 hypothèses extrêmes. Nous retiendrons donc à ce stade les valeurs suivantes (arrondies à la dizaine de m³/s la plus proche) du Tableau 8 en page 28 :

Période de retour (T)	Quantile en m ³ /s
2 ans	510
5 ans	870
10 ans	1120
20 ans	1580
30 ans	1860
50 ans	2180
100 ans	2600

Tableau 8: Quantiles de crue retenus pour l'Allier au saut du Loup (4093 km²)

2.1.2.b - L'Allier à Coudes/Vic le Comte

Comme pour l'Allier à Vieille Brioude, la station de Coudes, située au niveau du pont suspendu, est ancienne. Les premières indications de cotes remontent à 1835 sur cette station. En complétant et recoupant les informations à cette station et à celle de Vic-le-Comte, très proche et en service depuis 1933, on dispose d'un relevé systématique et exhaustif des cotes et débits de crue depuis 1962. Pour ces crues depuis 1962, mis à part quelques épisodes où les débits de la station de Coudes étaient visiblement erronés (année 1996), nous avons considéré la moyenne des maxima par ailleurs quasiment identiques à Coudes et Vic-le-Comte.

Pour ce qui est des crues historiques nous avons complété l'information disponible aux deux stations précédentes par celle disponible à l'échelle de crue de Parentignat (voir plus loin au paragraphe 2.2 -) via une correspondance entre les deux échelles établie à partir des cotes maxima connues simultanément à Coudes et Parentignat. De la sorte, nous avons un relevé que l'on peut considérer comme exhaustif des crues supérieures à 3 m (ou 712 m³/s) à l'échelle de Coudes depuis 1835.

Pour les crues antérieures à 1962, donc sans indication formelle du débit de pointe, étant donné les caractéristiques de la section au droit de l'échelle (fond rocheux assez stable) nous avons alors calculé le débit d'après la cote en utilisant la courbe de tarage actuelle, extrapolée pour les cotes les plus importantes en admettant pour la crue de 1866 (8,90 m) la valeur médiane de 3150 m³/s issue de la fourchette de débits trouvée dans la littérature pour cette crue (2800 à 3500 m³/s).

Nous avons ensuite mené successivement plusieurs approches :

- Ajustement statistique sur les crues de la période récente 1962-2009 supérieures à 400 m³/s + méthode du gradex dans ses variantes progressive et brutale ;
- Ajustement sur les crues historiques connues depuis 1835 ;
- Combinaison des probabilités de crues aux confluences principales (Couze d'Ardes, Eau Mère, Couze Pavin et Couze Chambon)

Ajustement statistique et méthode du gradex sur la période 1962-2009

Nous avons encore une fois utilisé la méthode du renouvellement, pour effectuer un ajustement les crues supérieures à 400 m³/s de la période 1962-2009, soit 48 ans .

Les paramètres trouvés sont les suivants :

- Loi exponentielle

S₀ (= seuil de débit choisi) = **400 m³/s**

a_q (= gradex des débits) = **248,5 m³/s**

- Loi de Poisson

μ = 53 crues/48 ans = **1,10**

L'association de ces 2 lois conduit à une loi de Gumbel équivalente dont les paramètres sont les suivants :

X₀ = **424,6 m³/s**

a_q = **248,5 m³/s**

Pour la méthode du Gradex, nous avons utilisé les données de pluies suivantes, issues de nos archives de données extraites de la Climathèque de Météo France (Tableau 9 page 30) :

Sous-bassins	Surface (km ²)	Origine donnée	PJ10 (mm)	PJ100 (mm)	Gradex (mm)
Haut Allier à Vieille Brioude	2269	Moyenne déjà calculée pour Vieille Brioude	91,0	133,6	18,1
Alagnon à Lempdes	984	Moyenne déjà calculée pour Lempdes	79,8	113,2	14,2
Rive gauche (Couzes, Massifs sancy, Cezaillier, Lembron)	Env. 1045	Moyenne des valeurs Météo France pour Besse, Chambon sur Lac, Meilhaud)	80,8	122,3	17,7
Rive droite (Eau Mère, Livradois)	Env. 1045	Moyenne des valeurs pour Chaise Dieu CRISTAL et Météo France pour Cunlhat, Fournols et Sauxillanges	69,8	100,2	12,9
Moyenne pondérée par la surface des sous-bassins			82,8	121,1	16,3

Tableau 9 : Caractéristiques des précipitations bassin versant de l'Allier à Coudes / Vic-le-Comte (d'après Météo-France)

On peut noter l'arrosage comparable que subissent le secteur des Couzes d'Ardes, Pavin et Chambon et le bassin de l'Alagnon, fruits d'un faciès climatique et d'une gamme d'altitude comparables. Le Livradois est quant à lui moins copieusement arrosé.

Au final, les valeurs constatées sont de l'ordre de 10% plus faibles que pour le Haut Allier, ce qui est logique car on s'éloigne du château d'eau cévenol et de ses abats d'eau pléthoriques.

Le gradex des pluies journalières de 16,3 mm vaut 1221 m³/s, une fois converti en débit instantané grâce à la surface du bassin et un rapport RXJ=1,21.

Il s'agit d'une valeur significativement plus élevée que le gradex des débits déduit des crues récentes.

Les résultats alors donnés par l'ajustement statistique sur les débits et les extrapolations par les 2 variantes de la méthode du gradex sont les suivants :

Période de retour (T)	Ajustement statistique 1962-2009 seul sur les crues >400 m ³ /s	Ajustement statistique 1962-2009 complété par la méthode du gradex progressif pour T>10 ans	Ajustement statistique 1962-2009 complété par la méthode du gradex classique pour T>10 ans
2 ans		516	
5 ans		797	
10 ans		984	
20 ans	1163	1210	1863
30 ans	1266	1401	2369
50 ans	1394	1711	3001
100 ans	1568	2255	3854

Tableau 10 : Ajustement statistiques des débits de crues supérieurs à 400 m³/s de l'Allier à Coudes / Vic-le-Comte

Les valeurs sont très disparates.

Comme à Vieille Brioude, du fait de l'absence de crue très importante entre 1962 et 2009, l'ajustement sur les seuls débits de cette période retourne des valeurs qui sont sûrement trop faibles au minimum pour les périodes de retour supérieures à 10 ans.

Quant aux deux variantes de la méthode du gradex, la fourchette qu'elles donnent est très grande puisqu'elle atteint 1600 m³/s pour la crue centennale. Dans ces conditions, nous ne pouvons pas pour l'instant trancher définitivement quant aux quantiles de crue de l'Allier à Coudes/Vic le Comte, sauf à remarquer, si l'on veut être cohérent sur l'ensemble du linéaire de la rivière, que compte tenu du renforcement des débits par les Couzes, l'Eau Mère et divers autres affluents en partie compensé par du laminage dans la plaine d'Issoire, les quantiles de crue à retenir sont au moins égaux à ceux retenus au Saut du Loup.

L'ajustement sur les crues historiques et la combinaison des régimes de crue aux confluences avec les 4 principaux affluents (Couze d'Ardes, Eau Mère, Couze Pavin et Couze Chambon) sont donc indispensables pour affiner les valeurs des quantiles de crue.

Ajustement sur les crues historiques >3 m ou 712 m³/s de la période 1835-2009

Nous avons encore une fois utilisé la méthode du renouvellement, pour effectuer un ajustement les crues supérieures à 712 m³/s de la période 1835-2009, soit 175 années.

Les paramètres trouvés sont les suivants :

- Loi exponentielle

$$S_0 (= \text{seuil de débit choisi}) = 712 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$a_q (= \text{gradex des débits}) = 627 \text{ m}^3/\text{s}$$

- Loi de Poisson

$$\mu = 37 \text{ crues}/175 \text{ ans} = 0,21$$

Comme pour Vieille-Brioude, le seuil de perception choisi correspond donc à des crues qui se produisent de manière empirique en moyenne tous les 4 à 5 ans et par conséquent, nous ne chercherons pas examiner l'ajustement pour des périodes de retour inférieures (voir le graphe de l'illustration 3 page 33).

L'association de ces deux lois conduit à une loi de Gumbel équivalente dont les paramètres sont les suivants:

$$X_0 = -263 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$a_q = 627 \text{ m}^3/\text{s}$$

Les quantiles de crue correspondants sont alors les suivants :

Période de retour (T)	Quantile en m ³ /s
2 ans	ND
5 ans	678
10 ans	1149
20 ans	1601
30 ans	1860
50 ans	2180
100 ans	2623

Tableau 11 : Ajustement statistiques des débits de crues supérieurs à 712 m³/s de l'Allier à Coudes / Vic-le-Conte

L'ajustement statistique réalisé (Illustration 3 page 33) s'ajuste graphiquement plutôt bien à l'échantillon considéré.

On peut en outre remarquer que les quantiles de débit sont quasiment identiques à ceux retenus au Saut du Loup, mis à part pour la période de retour de 5 ans qui se situe d'ailleurs en limite de la plage de validité de l'ajustement compte tenu du seuil de débit considéré.

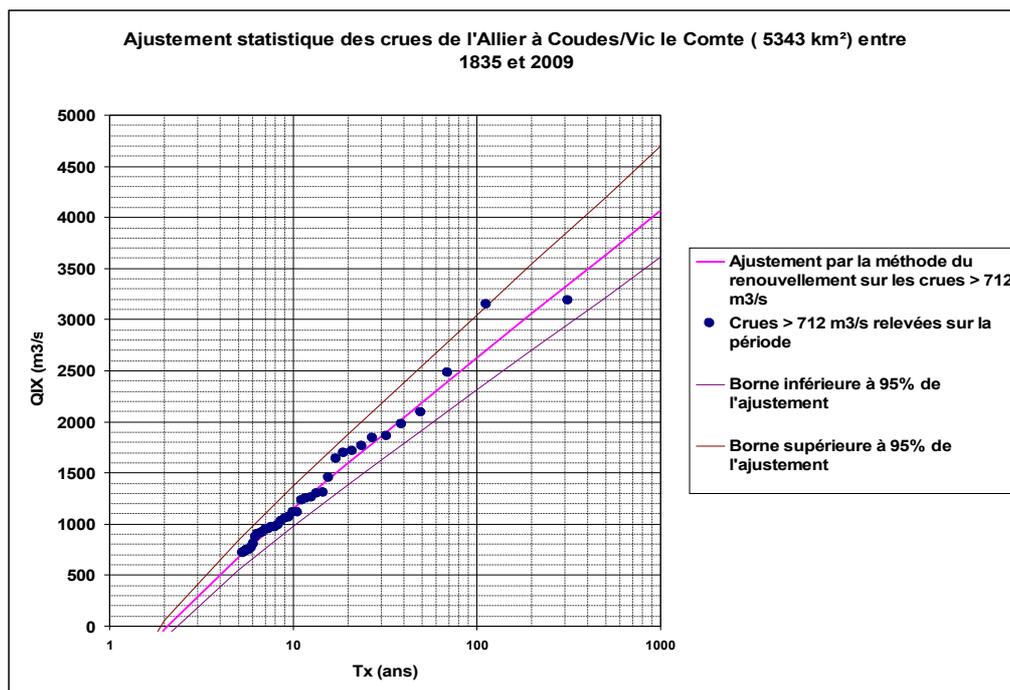


Illustration 3: Ajustement statistique sur les crues supérieures à 3 m ou 712 m³/s à Coudes/Vic le Comte

Composition des régimes de crue aux confluences principales

Pour compléter les ajustements précédents, nous avons conduit le même calcul théorique aux 4 confluences les plus importantes entre le Saut du loup et Coudes, soit de l'amont vers l'aval :

- Confluence de la Couze d'Ardes (117 km²) en rive gauche ;
- Confluence de l'Eau Mère (332 km²) en rive gauche ;
- Confluence de la Couze Pavin (216 km²) en rive gauche ;
- Confluence de la Couze Chambon (159 km²) en rive gauche ;

Ces 4 affluents totalisent (pour les surfaces contrôlées à la confluence pour l'Eau mère et la Couze d'Ardes et aux stations de Saint Floret et Champeix pour les Couzes Pavin et Chambon) une surface drainée de 824 km² sur les 1250 km² de bassin intermédiaire entre le Saut du Loup et Coudes/Vic le Comte.

Nous avons par contre, dans notre calcul, négligé les 426 km² restants de bassin dans la mesure où nous avons fait l'hypothèse qu'il s'agit des secteurs les moins arrosés entre le Saut du Loup et Coudes et que les apports de ce bassin de 426 km² doivent compenser en moyenne l'aplatissement des crues dans la plaine d'Issoire.

Les quantiles des 4 affluents ont été déterminés comme suit :

- Ajustement par la méthode du renouvellement complété par la méthode du gradex progressif pour la période de retour 100 ans sur la Couze Pavin à Saint-Floret et la Couze Chambon à Champeix
- Pour la Couze d'Ardes, vu la faible durée de mesures de la station de Madriat (2000-2009), nous n'avons pas fait d'ajustement. En revanche, après avoir constaté que les débits de crue de même période de retour de l'Alagnon, de la Couze Pavin et de la Couze Chambon ramenés à la surface du bassin à la puissance 0,8 étaient quasiment les mêmes, attestant d'une homogénéité des régimes de crue sur la façade Est des Monts d'Auvergne, nous avons déduit les quantiles de crue de la rivière connaissant la surface de son bassin (117 km²) et les quantiles de crue des 3 cours d'eau précédents ;
- Pour l'Eau Mère nous avons utilisé la même loi de similitude (multiplication par le rapport des surfaces à la puissance 0,8) connaissant les quantiles de crue de la Dore à Dorat qui draine elle-aussi le Livradois (voir plus loin pour les débits de crue de la Dore).

Les quantiles de crue retenus pour les 4 rivières sont les suivants :

Période de retour (T)	Quantile en m ³ /s			
	Couze d'Ardes (117 km ²)	Eau Mère (332 km ²)	Couze Pavin (216 km ²)	Couze Chambon (159 km ²)
2 ans	22	49	38	29
5 ans	34	70	58	48
10 ans	42	84	72	60
20 ans	58	114	100	83
30 ans	67	130	115	95
50 ans	78	150	134	110
100 ans	93	177	160	131

Tableau 12: Quantiles des crues des affluents entre le Saut-du-Loup et Coudes

Nous avons ensuite mené nos calculs par itération de l'amont vers l'aval. À chaque fois, nous avons constaté à chaque confluence, du fait de la prépondérance écrasante des débits de l'Allier sur ceux de ses affluents, une quasi identité des débits issus des deux hypothèses extrêmes de liaison parfaite ou d'indépendance totale. Nous avons donc considéré la moyenne de ces deux approches, que nous avons utilisée ensuite pour mener le calcul à la confluence suivante.

Au terme de ce calcul, au niveau de la confluence avec la Couze Chambon, donc à Coudes, nous avons obtenu les débits suivants :

Période de retour (T)	Quantile en m ³ /s
2 ans	656
5 ans	1066
10 ans	1343
20 ans	1840
30 ans	2154
50 ans	2520
100 ans	2913

Tableau 13 : Quantile des crues de l'Allier à la confluence de la Couze Chambon

Bien que plus élevés de l'ordre de 300 m³/s, les débits obtenus sont d'un ordre de grandeur cohérent avec ceux issus de l'ajustement sur les crues historiques.

Synthèse des débits de crue retenus à Coudes/Vic le Comte

Des calculs précédents nous pouvons tirer les conclusions générales suivantes :

- Pertinence limitée et/ou incertitudes importantes quant aux débits de période de retour supérieure à 10 ans des ajustements réalisés sur la période récente 1962-2009, que ce soit sur les débits seuls ou par utilisation de la méthode du gradex ;
- Ordres de grandeurs proches et par ailleurs cohérents avec les débits retenus au Saut du Loup pour les quantiles issus de l'ajustement statistique sur les crues historiques et par composition des probabilités de crue aux confluences.

Il ne nous reste plus qu'à affiner ces conclusions pour parvenir aux débits finaux retenus pour l'Allier à Coudes.

Pour les périodes de retour inférieures à 10 ans tout d'abord, les seules indications que nous avons proviennent de la composition des régimes de crue et des valeurs issues de la composition des régimes de crue et des statistiques réalisées sur la période récente pour l'ensemble de la gamme. Ces deux approches peuvent être complétées par l'ajustement sur les crues historiques pour la période de retour 10 ans.

Concernant la période de retour 2 ans, la composition des régimes de crue donne un débit trop élevé à notre sens, la concomitance des crues étant moins effective pour les faibles événements entre l'Allier et ses affluents et l'aplatissement du profil de la crue étant mal compensé par les apports intermédiaires pour un certain nombre de crues à profil aigu d'origine cévenole. La valeur issue de l'ajustement sur les débits de la période récente serait plus juste mais apparaît un peu faible si on le compare avec le débit retenu au Saut du Loup. Dans un souci de cohérence avec ce dernier, nous retiendrons donc une valeur de **550 m³/s** pour la période de retour 2 ans.

Pour la période de retour 10 ans, la valeur donnée par l'ajustement sur la période récente apparaît trop basse, par rapport à celle du Saut du Loup. Celle issue de l'ajustement sur les crues historiques, bien qu'encore faible à notre sens et entachée d'incertitude compte tenu de la précision très relative des débits des crues historiques, est plus cohérente, tandis que la composition des crues donne un résultat théorique qui nous

semble élevé. Nous retiendrons une moyenne entre les deux dernières approches, soit une valeur de **1250 m³/s** par ailleurs parfaitement en accord avec les 1120 m³/s du Saut du Loup.

Dans ce contexte, le débit de période de retour 5 ans est obtenu en interpolant une loi de Gumbel entre les périodes de retour 2ans et 10 ans.

Pour le débit centennal, enfin, les commentaires faits tout au long de nos calculs nous amènent à privilégier, comme pour la période de retour 10 ans et pour les mêmes raisons, une moyenne des valeurs obtenues par l'ajustement sur les crues historiques et par composition des probabilités aux confluences, soit en arrondissant, un débit de période de retour 100 ans de **2800 m³/s**.

Cette dernière valeur, cohérente encore une fois avec celle retenue au Saut du Loup, est par ailleurs comprise dans l'intervalle de confiance à 95% de l'ajustement sur les crues historiques⁴ et se situe entre les deux estimations par la méthode du gradex.

Enfin, les débits de période de retour 20 ans, 30 ans et 50 ans ont été déterminés par interpolation suivant une loi de Gumbel entre les valeurs retenues pour les périodes de retour 10 ans et 100 ans.

Au final, les débits de crue retenus pour l'Allier à Coudes/Vic le Comte sont les suivants :

Période de retour (T)	Quantile en m ³ /s
2 ans	550
5 ans	970
10 ans	1250
20 ans	1720
30 ans	2000
50 ans	2340
100 ans	2800

Tableau 14: Quantiles de crue retenus pour l'Allier à Coudes/Vic le Comte (5343 km²)

2.1.2.c - L'Allier à Limons

Pour l'Allier à Limons, les débits ne sont disponibles que depuis 1974.

Ajustement statistique et méthode du gradex sur la période 1974-2009

Nous avons encore une fois utilisé la méthode du renouvellement, pour effectuer un ajustement les crues supérieures à 430 m³/s de la période 1974-2009, soit 36 ans.

4 Intervalle de confiance à 95% pour la crue centennale suivant l'ajustement sur les crues historiques 1835-2009 : 2312 à 3047 m³/s

Les paramètres trouvés sont les suivants :

- Loi exponentielle

S_0 (= seuil de débit choisi) = **430 m³/s**

a_q (= gradex des débits) = **238,7 m³/s**

- Loi de Poisson

μ = 38 crues/36 ans = **1,06**

L'association de ces 2 lois conduit à une loi de Gumbel équivalente dont les paramètres sont les suivants :

X_0 = **442,9 m³/s**

a_q = **238,7 m³/s**

On peut remarquer que les paramètres de la loi de Gumbel équivalente sont quasiment identiques à ceux de la même loi déterminée sur la période 1962-2009 à Coudes/Vic le Comte, aux incertitudes près liées notamment à la non coïncidence des périodes considérées. Nous verrons bientôt qu'il en est de même des quantiles de crue.

Comme pour les stations de Coudes et Vieille Brioude, nous avons complété l'approche en utilisant la méthode du gradex pour les périodes de retour supérieures à 10 ans.

Nous avons alors utilisé les données de pluie suivantes :

Sous-bassins	Surface (km ²)	Origine donnée	PJ10 (mm)	PJ100 (mm)	Gradex (mm)
Allier à Coudes/Vic	5343	Moyenne déjà calculée précédemment	82,8	121,1	16,3
Limagne – Bas Livradois – Chaîne des Puys	1667	Moyenne des postes Météo France (Clermont-Ferrand, Volvic, Cunlhat, Riom)	64,3	91,8	11,7
Moyenne pondérée par la surface des sous-bassins			78,4	114,1	15,2

Tableau 15: Caractéristiques des précipitations bassin versant le l'Allier à Limons (d'après Météo-France)

Le gradex des pluies journalières de 15,2 mm vaut 1234 m³/s , une fois converti en débit instantané grâce à la surface du bassin et un rapport RXJ=1,19 (soit dit en passant également quasiment identique à celui de Coudes).

Les résultats alors donnés par l'ajustement statistique sur les débits et les extrapolations par les 2 variantes de la méthode du gradex sont les suivants :

Période de retour (T)	Ajustement statistique 1974-2009 seul sur les crues > 400 m ³ /s	Ajustement statistique 1974-2009 complété par la méthode du gradex progressif pour T > 10 ans	Ajustement statistique 1974-2009 complété par la méthode du gradex classique pour T > 10 ans
2 ans		530	
5 ans		801	
10 ans		980	
20 ans	1152	1201	2037
30 ans	1251	1393	2645
50 ans	1374	1716	3404
100 ans	1541	2304	4429

Tableau 16 : Quantile des crues de l'Allier à Limons

Les valeurs sont très disparates, comme pour Coudes.

La méthode du gradex brutal donne des valeurs plus élevées de l'ordre de 10% qu'à Coudes et par ailleurs incohérentes avec ce que l'on a déjà retenu en amont car bien trop fortes.

Par contre, on peut noter que les valeurs données tant par l'ajustement statistique sur les seuls débits que la méthode du gradex progressif, sont à 10 m³/s près au maximum, les mêmes que celles que l'on avait constatées à Coudes.

Cette stabilité des débits entre Coudes et Limons malgré une augmentation de 30% de la taille du bassin n'est pas aussi aberrante qu'on pourrait le croire au premier abord et elle s'explique même parfaitement par un équilibre global entre, d'une part l'aplatissement/laminage des crues du fait de leur propagation et des débordements éventuels et d'autre part les apports intermédiaires. Ces derniers sont d'ailleurs certainement plus faibles qu'entre le Saut du Loup et Coudes du fait d'un contexte moins favorable à la concentration de gros écoulements vers l'Allier (pluviométrie plus faible, relief moins accidenté avec un secteur de plaine étendu en Limagne et sans doute influence de la surface couvertes par les formations volcaniques de la chaîne des Puys (bassins de Volvic, de l'Auzon, de la Veyre, de la Tiretaine...), lesquelles sont connues pour leur fort pouvoir de régularisation des écoulements.

D'ailleurs, suivant les crues et les configurations, la stabilité d'ensemble n'est qu'apparente, les débits tendant à progresser, parfois même de manière significative, en cas d'événement océanique du fait de la participation importante en proportion du bassin intermédiaire (janvier 1982 par exemple avec environ 765 m³/s à Coudes/Vic et 1170 m³/s à Limons) ou au contraire à régresser (au mieux à se maintenir) en cas d'événement cévenol ou mixte (crues de novembre 2008 : 1310 m³/s à Coudes/Vic et

1240 m³/s à Limons, ou de décembre 2003 : 1700 m³/s à Coudes⁵ et 1400 m³/s à Limons par exemple) du fait de l'absence de réaction ou du décalage temporel des apports du bassin intermédiaire (avance généralement importante sur la crue de l'Allier) et du laminage de l'onde de crue venue de l'amont.

Dans la mesure où les crues cévenoles ou mixtes sont quasiment les seules à pouvoir atteindre un niveau très significatif sur l'Allier en amont de la Dore, l'hypothèse d'une stagnation des débits de crue dans tout le tronçon compris entre Coudes et le Bec de Dore est donc tout à fait pertinente compte tenu, par ailleurs, des incertitudes de nos calculs.

Nous retiendrons par conséquent les mêmes quantiles de crue que ceux déterminés pour Coudes/Vic le Comte et que nous rappelons ci après.

Période de retour (T)	Quantile en m ³ /s
2 ans	550
5 ans	970
10 ans	1250
20 ans	1720
30 ans	2000
50 ans	2340
100 ans	2800

Tableau 17: Quantiles de crue retenus pour l'Allier à Limons (7010 km²)

2.1.2.d - Synthèse des débits de crue de l'Allier moyen et principe de calcul des quantiles de débit en un point donné de l'Allier moyen

Période de retour (T)	Quantile de crue retenus pour l'Allier entre Alagnon et Dore en m ³ /s		
	Saut du Loup (4093 km ²)	Coudes/Vic le Comte (5343 km ²)	Limons (7010 km ²)
2 ans	510	550	550
5 ans	870	970	970
10 ans	1120	1250	1250
20 ans	1580	1720	1720
30 ans	1860	2000	2000
50 ans	2180	2340	2340
100 ans	2600	2800	2800

Tableau 18 : Quantiles de crues retenus pour l'Allier entre l'Alagnon et la Dore

5 Le débit de 1700 m³/s à Coudes est sans doute surestimé : vu les débits constatés sur l'Allier amont, l'Alagnon, les Couzes et les apports probables du bassin non jaugé, 1500 m³/s à 1550 m³/s nous semblent plus justes.

Nous pouvons constater que nous avons alors un ratio de l'ordre de 1,10 entre Coudes et le Saut du Loup, ce qui correspond globalement au rapport des surfaces des bassins à la puissance 0,36, proche de l'exposant 0,5 souvent retenu pour transposer les crues d'un site à l'autre pour des tailles de bassin de cet ordre.

Dans le cadre d'une loi de similitude hydrologique adaptée au cas de l'Allier, nous utiliserons donc le rapport des surfaces à la puissance 0,36 pour déterminer les quantiles de crue en tout point de l'Allier entre le Saut du Loup et Coudes, partant des valeurs retenues en ces 2 endroits.

Entre Coudes et le Bec de Dore, en vertu de l'équivalence des débits retenus à Coude/Vic le Comte et à Limons et des remarques faites précédemment, pour une période de retour donnée, le débit sera pris identique en tout point de ce tronçon de l'Allier.

2.1.3 - L'Allier entre le Bec de Dore et la sortie du département du Puy de Dôme

Pour ce tronçon de l'Allier, qui représente les 10 derniers kilomètres de la rivière dans le département du Puy de Dôme, le régime des crues subit une modification importante du fait de l'arrivée de la Dore : cette dernière connaissant ses crues les plus importantes lors des événements océaniques ou mixtes, il s'ensuit que c'est à partir de ce point du cours de l'Allier que les crues océaniques deviennent réellement capables de rivaliser avec leurs concurrentes cévenoles et mixtes.

Pour ce qui est des débits, compte tenu des données disponibles, nous avons pu mener deux approches:

- Composition du régime des crues de l'Allier à Limons et de la Dore à Dorat pour reconstituer les quantiles au niveau de Ris (Bec de Dore);
- Ajustement statistique des crues à la station de Saint-Yorre, située à la sortie du département du Puy de Dôme, à la limite avec celui de l'Allier.

2.1.3.a - *L'Allier à Ris (8730 km²): composition des régimes de crue de l'Allier à Limons et de la Dore à Dorat*

Au pont de Ris, juste après sa jonction avec la Dore, l'Allier draine une surface de 8730 km² dont 7010 + 1523 = 8533 km² ou 98% contrôlés par les stations de Dorat (Dore) et Limons (Allier).

Comme pour le Saut du Loup, vu la modicité de la proportion en surface du bassin intermédiaire non jaugé, nous avons choisi en première approche de le négliger.

Ce faisant, nous avons employé la même méthode de traitement que celle présentée pour l'Allier au Saut du Loup, à l'aval immédiat de sa confluence avec l'Alagnon.

Nous avons donc d'abord déterminé les quantiles de crue de la Dore à Dorat puis procédé à la composition des régimes de crue.

Quantiles de crue de la Dore à Dorat

Comme pour l'Alagnon et pour les mêmes raisons, nous avons privilégié sur ce bassin une approche combinant un ajustement statistique par la méthode du renouvellement jusqu'à la période de retour 10 ans et une extrapolation par la méthode du gradex progressif pour la détermination de la crue centennale.

Pour l'ajustement par la méthode du renouvellement, nous avons considéré les crues supérieures à 130 m³/s de la période 1991-2009, soit 19 ans de données, ce qui est relativement court mais a priori suffisant jusqu'à la période de retour 10 ans.

Les paramètres trouvés sont les suivants :

- Loi exponentielle

S₀ (= seuil de débit choisi) = **130 m³/s**

a_q (= gradex des débits) = **63,0 m³/s**

- Loi de Poisson

μ = 21 crues/19 ans = **1,11**

Ceci signifie que de telles crues supérieures à 130 m³/s se reproduisent en moyenne environ une fois par an.

L'association de ces 2 lois conduit à une loi de Gumbel équivalente dont les paramètres sont les suivants :

X₀ = **136,3 m³/s**

a_q = **63,0 m³/s**

Les quantiles de périodes de retour 2 ans, 5ans et 10 ans sont alors les suivants :

- **Q(2 ans) = 159 m³/s;**
- **Q(5 ans) = 231 m³/s;**
- **Q(10 ans) = 278 m³/s**

Pour la méthode du Gradex progressif, nous avons utilisé les données de pluies suivantes, issues de nos archives de données extraites de la Climathèque de Météo France (cf. Tableau 19 ci après) :

Poste pluviométrique	Durée ou période de mesures	Origine donnée	PJ10 (mm)	PJ100 (mm)	Gradex (mm)
Noirétable	61 ans	Météo France	70,3	99,2	12,3
Ambert	57 ans		73,3	109,4	15,4
Chabreloche	37 ans		72,7	103,1	12,9
Cunlhat	1955-2004		70,3	99,2	12,3
Fournols	34 ans		82,4	122,8	17,2
Marsac en Livradois	56 ans		69,4	99,5	12,8
Saint Alyre d'Arlanc	1953-2004		82,8	118,6	15,2
Saint-Remy sur Durolle	55 ans		76,1	110,3	14,6
Valcivières	47 ans		75,0	104,4	12,5
Viverols	58 ans		71,3	99,6	12,5
Moyenne Dore à Dorat			74,4	106,6	13,7

Tableau 19 : Caractéristiques des précipitations bassin versant de la Dore à Dorat (d'après données de Météo-France)

On peut noter l'homogénéité d'ensemble des quantiles sur tous les postes considérés, sur et à proximité immédiate du bassin, même si les bastions les plus élevés du Livradois (Saint Alyre d'Arlanc, Fournols, chacun situés à plus de 1000 m d'altitude) sont un peu plus copieusement arrosés.

Compte tenu du rapport des débits instantanés aux débits journaliers de crue (RXJ = 1,19) et de la surface du bassin versant (1523 km²), le gradex des pluies journalières de 13,7 mm, une fois converti en gradient équivalent pour les débits instantanés, vaut 288 m³/s.

La méthode du Gradex progressif donne alors un débit centennal de **591 m³/s**. Nous pouvons alors faire quelques commentaires sur les quantiles retenus.

Pour la période de retour 10 ans, tout d'abord, une approche par la formule empirique de Crupedix⁶, avec un rapport régional de 1,00, donne un débit de pointe de crue décennale égal à 304 m³/s. Ensuite, une similitude hydrologique utilisant le rapport des surfaces à la puissance 0,8 à partir du débit décennal retenu dans l'étude du Plan de Prévention du Risque Inondation (PPRI) de Courpière (LRPC Clermont-ferrand, 1998),

6 Formule de Crupedix : $Q(10 \text{ ans}) = R \cdot S^{0,8} \cdot [PJ(10 \text{ ans})/80]^2$ avec $Q(10 \text{ ans})$ et $PJ(10 \text{ ans})$ débit instantané et pluie journalière de période de retour 10 ans respectivement en m³/s et en mm, S la surface du bassin versant en km² et R , coefficient régional (1,00 dans la partie de l'Auvergne considérée ici). Le domaine de validité de cette formule en terme de taille de bassin va de 10 km² à 2000 km².

soit 182 m³/s pour 1190 km², donne 222 m³/s à Dorat. On note que les 2 valeurs trouvées encadrent la valeur de 278 m³/s issue de l'ajustement statistique, ce qui conforte dernier pour les périodes de retour inférieures à 10 ans.

Pour le débit centennal, la valeur trouvée de 591 m³/s est encore relativement cohérente avec les 426 m³/s déterminés en 1998 à Courpière (1190 km²) par le LRPC de Clermont-Ferrand. Une similitude hydrologique utilisant le rapport des surfaces à la puissance 0,8 (valeur usuelle pour les tailles de bassins considérées) donnerait en effet une valeur de 519 m³/s pour 1523 km² à Dorat.

Nous avons donc retenu les valeurs données par l'ajustement statistique pour les périodes de retour inférieures ou égales 10 ans et le débit centennal issu de la variante progressive de la méthode du gradex.

Pour simplifier nos calculs ultérieurs et comme nous l'avons fait plusieurs fois précédemment, nous avons ensuite calculé les débits de périodes de retour intermédiaires entre 10 et 100 ans en interpolant suivant une loi de Gumbel.

Au final, les débits de crue considérés dans la suite des calculs pour la Dore à Dorat sont les suivants (cf. Tableau 20 page 43) :

Période de retour (T)	Quantile en m ³ /s
2 ans	159
5 ans	231
10 ans	278
20 ans	377
30 ans	433
50 ans	499
100 ans	591

Tableau 20 : Quantile de crues de la Dore à Dorat

Composition des régimes de crue de l'Allier à Limons et de la Dore à Dorat

Comme pour le cas de la confluence avec l'Alagnon, nous avons considéré les deux hypothèses extrêmes suivantes

- **Hypothèse 1**, liaison parfaite des régimes de crue ;
- **Hypothèse 2**, aucune liaison ou indépendance totale des crues.

Rappelons que ces deux hypothèses permettent de constituer une fourchette qui encadre les « vraies » valeurs des quantiles de crue à l'aval du confluent.

Ainsi, pour l'Allier à Ris et après calcul, on trouve les valeurs suivantes :

Période de retour (T)	Quantiles de crue de l'Allier à Ris (8730 km ²) en m ³ /s		
	Hypothèse 1: liaison parfaite	Hypothèse 2: indépendance totale	Moyenne
2 ans	709	729	719
5 ans	1201	1162	1181
10 ans	1528	1461	1500
20 ans	2119	1926	2023
30 ans	2449	2204	2326
50 ans	2846	2560	2703
100 ans	3391	2953	3172

Tableau 21: Quantiles de crue de l'Allier à Ris suivant les hypothèses d'indépendance des crues crues de la Dore et de l'Allier

Nous pouvons voir que les deux hypothèses extrêmes donnent des débits très proches, différant au maximum de 10%.

Ceci s'explique encore une fois parfaitement par l'importance relative pour le moins écrasante des débits de crue de l'Allier à Limons par rapport à ceux de la Dore, ce qui donne à cette dernière un rôle secondaire (mais pas pour autant négligeable) dans les crues de l'Allier à l'aval de la confluence.

On retrouve alors ce que l'on sait déjà empiriquement: aucune crue forte de l'Allier vers Saint-Yorre ou Vichy, plus généralement entre Dore et Sioule, ne peut être due à la seule Dore mais implique au contraire forcément une participation importante, sinon prépondérante, de l'Allier avant la confluence.

Dans ce contexte et compte tenu à la fois des incertitudes et de la corrélation partielle (en cas de crue mixte notamment) entre les débits de crue de l'Allier amont et de la Dore, il nous apparaît suffisant de retenir à ce stade pour les quantiles de crue de l'Allier à Ris la moyenne des 2 hypothèses extrêmes. Nous retiendrons donc à ce stade les valeurs suivantes (arrondies à la dizaine de m³/s la plus proche) :

Période de retour (T)	Quantile en m ³ /s
2 ans	720
5 ans	1180
10 ans	1500
20 ans	2020
30 ans	2330
50 ans	2700
100 ans	3170

Tableau 22: Quantiles de crue pour l'Allier à Ris (8730 km²)

2.1.3.b - Ajustements statistiques pour l'Allier à Saint-Yorre (8940 km²)

Pour l'Allier à Saint-Yorre, les débits sont disponibles que depuis 1967.

Ajustement statistique et méthode du gradex sur la période 1967-2009

Nous avons encore une fois utilisé la méthode du renouvellement, pour effectuer un ajustement les crues supérieures à 500 m³/s de la période 1967-2009, soit 43 ans .

Les paramètres trouvés sont les suivants :

- Loi exponentielle

S₀ (= seuil de débit choisi) = **500 m³/s**

a_q (= gradex des débits) = **239,8 m³/s**

- Loi de Poisson

μ = 46 crues/43 ans = **1,07**

L'association de ces deux lois conduit à une loi de Gumbel équivalente dont les paramètres sont les suivants :

X₀ = **516,2 m³/s**

a_q = **239,8 m³/s**

On peut remarquer que le gradex des débits est quasiment identiques à celui de la même loi déterminée sur la période 1967-2009 à Coudes/Vic le Comte ou Limons, aux incertitudes près liées notamment à la non coïncidence des périodes considérées.

Comme pour les stations de Coudes et Vieille Brioude, nous n'avons complété l'approche en utilisant la méthode du gradex pour les périodes de retour supérieures à 10 ans.

Nous avons alors utilisé les données de pluie suivantes :

Sous-bassins	Surface (km ²)	Origine donnée	PJ10 (mm)	PJ100 (mm)	Gradex (mm)
Allier à Limons	7010	Moyenne déjà calculée précédemment	78,4	114,1	15,2
Dore à Dorat	1523	Moyenne déjà calculée précédemment	74,4	106,6	13,7
BVI non jaugé (Limagne...)	407	Reprise de la moyenne calculée pour le BVI non jaugé de Limons	64,3	91,8	11,7
Moyenne pondérée par la surface des sous-bassins			77,1	111,8	14,8

Tableau 23 : Caractéristiques des précipitations bassin versant de l'Allier à Saint-Yorre

Le gradex des pluies journalières de 14,8 mm vaut 1666 m³/s , une fois converti en débit instantané grâce à la surface du bassin et un rapport RXJ=1,09.

Les résultats alors donnés par l'ajustement statistique sur les débits et les extrapolations par les 2 variantes de la méthode du gradex sont les suivants :

Période de retour (T)	Ajustement statistique 1967-2009 seul sur les crues >400 m ³ /s	Ajustement statistique 1967-2009 complété par la méthode du gradex progressif pour T >10 ans	Ajustement statistique 1967-2009 complété par la méthode du gradex classique pour T >10 ans
2 ans		604	
5 ans		876	
10 ans		1056	
20 ans	1228	1280	2255
30 ans	1328	1477	2945
50 ans	1452	1813	3807
100 ans	1619	2440	4971

Tableau 24 : Quantiles de crue de l'Allier à Saint-Yorre

Commentaires sur les résultats des calculs à Ris et Saint-Yorre et synthèse des débits retenus à l'aval de la Dore

Ce paragraphe confronte les résultats par composition des régimes de crue de l'Allier et de la Dore à Ris et par ajustement statistique à Saint-Yorre afin de définir les débits à retenir entre le bec de Dore et Saint-Yorre.

Pour les périodes de retour 2, 5 et 10 ans, l'ajustement sur les débits à Saint-Yorre donne des valeurs plus faibles que la méthode de composition à Ris. Si les valeurs de cet ajustement nous semblent trop faibles et en tout cas incohérentes avec celles déjà retenues plus à l'amont, celles données par la composition des régimes de crue sont par contre un peu fortes ou impliquent à notre sens un apport par trop important de la Dore.

Compte tenu des incertitudes qui entourent toutes ces valeurs, le plus pertinent et le plus cohérent avec l'amont nous semble alors de retenir la moyenne des 2 approches pour le débit de l'Allier à Ris et Saint-Yorre de période de retour 2 ans, 5 ans et 10ans.

Ceci donne donc respectivement:

- **Q(2 ans) = 660 m³/s ;**
- **Q(5 ans) = 1030 m³/s ;**
- **Q(10 ans) = 1300 m³/s.**

Pour les périodes de retour supérieures à 10 ans, les valeurs sont très disparates, comme pour Coudes et Limons.

La méthode du gradex brutal donne des valeurs toujours très élevées et la prolongation de l'ajustement sur les débits au delà de la période de retour 10 ans des débits au contraire visiblement trop faibles.

Comme pour les autres stations, la méthode du gradex progressif donne des résultats qui sont sans doute plus proches de la réalité tout en étant inférieurs à ceux déjà retenus à l'amont.

Si on remarque cependant que cette méthode du gradex progressif a donné des débits centennaux presque identiques à Coudes et Limons et que le ratio de ces derniers au débit finalement retenu est de l'ordre de 1,20 à 1,25 pour les 2 stations, on aurait de la sorte un débit centennal à Saint Yorre de l'ordre de 3000 m³/s, valeur proche des 3170 m³/s obtenus à Ris. Nous retiendrons donc environ la moyenne des deux valeurs soit **3100 m³/s pour la crue centennale entre Ris et Saint-Yorre.**

En procédant par interpolation suivant une loi de Gumbel entre les périodes de retour 10 et 100 ans, nous retenons finalement les valeurs suivantes:

Période de retour (T)	Quantile en m ³ /s
2 ans	660
5 ans	1030
10 ans	1300
20 ans	1850
30 ans	2170
50 ans	2560
100 ans	3100

Tableau 25: Quantiles de crue retenus pour l'Allier entre le Bec de Dore (8730 km²) et Saint-Yorre (8940 km²)

2.1.4 - Synthèse des quantiles de crue de l'Allier dans le Puy de Dôme

Le tableau suivant dresse une synthèse des débits retenus pour l'Allier dans le Puy de Dôme.

Période de retour (T)	Quantile de crue retenus pour l'Allier dans le Puy de Dôme en m ³ /s				
	Pont d'Auzon (entrée du département, 2950 km ²)	Confluence Alagnon au Saut du Loup (4093 km ²)	Coudes/Vic le Comte (5343 km ²)	Limons (7010 km ²)	Ris (Bec de Dore) et Saint-Yorre (sortie du département, 8940 km ²)
2 ans	370	510	550	550	660
5 ans	685	870	970	970	1030
10 ans	895	1120	1250	1250	1300
20 ans	1320	1580	1720	1720	1850
30 ans	1570	1860	2000	2000	2170
50 ans	1880	2180	2340	2340	2560
100 ans	2300	2600	2800	2800	3100

Tableau 26: Quantile de crue retenus pour l'Allier dans le Puy de Dôme en m³/s

Suivant cette synthèse, la crue de décembre 2003 (1040 m³/s à Auzon, environ 1700 m³/s à Coudes/Vic, 1400 m³/s à Limons et 1660 m³/s à Saint-Yorre) est donc une crue de période de retour comprise entre 10 et 20 ans sur l'ensemble du linéaire de l'Allier dans le Puy de Dôme. Cette homogénéité de période de retour dans tout le département cadre bien avec le caractère mixte et généralisé de cette crue.

Quant à la crue de novembre 2008 (1070 m³/s à Auzon, environ 1290 m³/s à Coudes/Vic, 1240 m³/s à Limons et 1130 m³/s à Saint-Yorre), événement plus typiquement cévenol seulement étendu vers la Dore et de manière plus faible vers l'Alagnon, sa période de retour, comparable à celle de 2003 (de l'ordre de 15 ans) à Auzon, passe

à environ 10 ans vers Coudes ou Limons du fait de la participation modeste de l'Alagnon et inexistante des Couzes pour se situer entre 5 et 10 ans à Saint-Yorre. Cela dit, le débit à Saint-Yorre et/ou à Limons a certainement été mal estimé car il semble peu probable qu'on ait eu un laminage capable de faire perdre 250 m³/s en seulement 20 km, tel que cela apparaît si on compare le débit de Saint-Yorre à la somme du pic de crue de Limons et des apports concomitants de l'ordre de 150 m³/s sur la Dore alors en décrue.

2.2 - Crues historiques et choix de la crue de référence

L'étude des crues historiques a pour but de vérifier s'il n'en existe pas une qui serait supérieure à la crue centennale définie précédemment et dont les débits/cotes voire zone inondable seraient suffisamment bien connus pour en faire *de facto* la crue de référence au sens de la circulaire du 24 janvier 1994.

Ce faisant, nous savons déjà, d'après les sources en notre possession, que la crue de septembre 1866, par son débit et en considérant les valeurs extrêmes trouvées dans la littérature (2800 à 3500 m³/s pour une valeur médiane que nous avons retenue comme la plus vraisemblable de 3150 m³/s) est donc supérieure à une crue centennale.

Il est donc d'ores et déjà acquis que le débit de la crue de référence sera supérieur à celui d'une crue centennale.

Nous avons donc conduit un recensement plus approfondi des crues historiques les plus fortes connues.

Outre les stations hydrométriques précédemment étudiées et correspondant pour certaines d'entre elles à des échelles historiques (Vieille Brioude et Coudes), nous avons pu disposer d'indications de cotes aux échelles suivantes:

- Parentignat (au niveau du pont suspendu) ;
- Cournon ;
- Pont du Château ;
- Ris.

On peut alors dresser le tableau 27 pages suivantes des crues de l'Allier supérieures à la crue de décembre 2003 (la plus forte constatée depuis la mise en place des mesures systématiques dans les années 1960) pour au moins une des échelles considérées.

Crue	Crues historiques de l'Allier entre Vieille Brioude et Ris m ³ /s							
	Vieille Brioude		Parentignat	Coudes		Cournon	Pont du Château	Ris
	Cote (m)	Q estimé (m ³ /s)	Cote (m)	Cote (m)	Q estimé (m ³ /s)	Cote (m)	Cote (m)	Cote (m)
1790							5,90	
Mai 1835				5,97	1977		3,95	
18 octobre 1846	8,50	2220	5,20	7,20	2482		4,80	
30-31 mai 1856	6,48	1409	4,90	5,68 (reconstituée)	1845		4,90	
19 octobre 1857	6,54	1432	4,60	5,23 (reconstituée)	1642		4,20	
24-25 septembre 1866	9,21	2500	7,38	8,90	3150	4,95	5,00	4,25
18 octobre 1868	4,75	829	4,60	5,72	1863		4,50	
18 octobre 1872	6,55	1436	4,20	4,80	1453		3,75	
13 septembre 1875	7,75	1925	7,24	9,00	3189		5,00	
31 décembre 1888	5,80	1155	4,16	4,35	1259		4,15	
9 octobre 1907	5,80	1155	4,00	4,33	1251			
16 octobre 1907	6,80	1537	4,70	5,40	1718		3,70	
3 juin 1913	4,50	763	4,40	5,50	1763		4,10	
25 octobre 1943	5,75	1138	5,20	6,22	2093		5,00	
24 décembre 1973	5,51	1055	4,40	4,30	1060		4,70	
21 septembre 1980	5,47	1041	2,90	2,87	700			

Crue	Crues historiques de l'Allier entre Vieille Brioude et Ris m ³ /s							
	Vieille Brioude		Parentignat	Coudes		Cournon	Pont du Château	Ris
	Cote (m)	Q estimé (m ³ /s)	Cote (m)	Cote (m)	Q estimé (m ³ /s)	Cote (m)	Cote (m)	Cote (m)
3-4 décembre 2003	5,27	975	4,50	5,39	1700		4,12	
2-3 novembre 2008	5,49	1048		4,46	1300			

Tableau 27: Crues historiques de l'Allier supérieures à la crue de décembre 2003 à au moins une des échelles historiques (en gras les crues supérieures ou égales à la crue de décembre 2003 pour l'échelle considérée, sur fond jaune la crue la plus forte connue à l'échelle considérée)

D'après la liste précédente et si on se réfère à la station de Pont du Château, comme au Règlement de transmission de l'Information sur les Crues (RIC) du Service de Prévision des Crues (SPC) du bassin de l'Allier, qui cite également 7,15 m à Langeac et 6,60 m à Moulins, la crue de 1790 est bien la crue la plus importante connue à ces trois stations et donc très vraisemblablement sur l'ensemble du cours de l'Allier de Langeac au Bec d'Allier.

Cependant, mis à part ces 3 cotes, on ne dispose quasiment d'aucun autre renseignement quantitatif précis, ce qui rend très difficile l'appréciation du débit de cette crue, en particulier pour l'Allier moyen, car la loi hauteur-débit à Pont du Château n'est pas stable. **N'étant pas suffisamment bien connue et bien que certainement la plus forte connue de mémoire d'homme, cette crue de 1790 ne peut pas être utilisée comme crue de référence ici.**

Si on se tourne vers les crues suivantes au classement, on trouve les événements de septembre 1875, septembre 1866.

La crue de 1875 serait en toute rigueur supérieure de 10 cm à celle de 1866 à Coudes mais vu le niveau atteint et sans doute les incertitudes quant à la lecture de la cote compte tenu des remous qui doivent agiter l'Allier à un pareil niveau, la différence ne nous apparaît pas significative.

Si on se réfère aux autres stations et en faisant les mêmes remarques quant aux différences de cotes constatées, cette crue est d'un niveau comparable à celle de 1866 sur l'Allier à l'aval de l'Alagnon.

Par contre, à l'amont de l'Alagnon, elle n'arrive qu'en troisième position derrière celles de 1846 et 1866 d'après les relevés de Vieille-Brioude.

Ainsi, si la crue de 1866 est équivalente à celle de 1875 sur l'Allier moyen entre l'Alagnon et la Dore, son caractère exceptionnel généralisé à l'ensemble du linéaire de l'Allier et de ses affluents, en fait, contrairement à sa rivale moins forte sur le Haut-Allier,

la crue la plus forte connue de Prades/Langeac jusqu'au Bec d'Allier après la crue de 1790, également sur certains affluents comme la Sioule. La crue de 1866 est ainsi la crue de référence pour le PPRI du Haut-Allier en Haute Loire, sauf à l'amont de Monistrol où la crue du 21 septembre 1980 également bien connue lui est supérieure.

Par ailleurs, parmi les crues historiques, le niveau de la crue de 1866 est l'un des mieux connus, tant en cotes aux échelles (nombreuses informations tout le long de l'Allier) qu'en terme d'enveloppe de la zone inondable, prise en compte pour l'élaboration de l'Atlas des Zones Inondables.

Nous retiendrons donc la crue des 24 et 25 septembre 1866 comme crue de référence, avec une cote de 7,38 m à Parentignat, 8,90 m à Coudes et un débit à cet endroit de 3150 m³/s (+/- 350 m³/s) pour une période de retour de l'ordre de 150 à 200 ans.

Le Tableau 28 ci-après fait une synthèse de l'étude hydrologique développée dans les paragraphes précédents.

Période de retour (T) ou date	Quantile de crue retenus pour l'Allier dans le Puy de Dôme en m ³ /s				
	Pont d'Auzon (entrée du département, 2950 km ²)	Confluence Alagnon au Saut du Loup (4093 km ²)	Coudes/Vic le Comte (5343 km ²)	Limons (7010 km ²)	Ris (Bec de Dore) et Saint-Yorre (sortie du département, 8940 km ²)
2 ans	370	510	550	550	660
5 ans	685	870	970	970	1030
10 ans	895	1120	1250	1250	1300
Nov. 2008	1050		1300		1200
Déc. 2003	1040		1700		1660
20 ans	1320	1580	1720	1720	1850
30 ans	1570	1860	2000	2000	2170
50 ans	1880	2180	2340	2340	2560
100 ans	2300	2600	2800	2800	3100
Sept. 1866	3000		3150		3500

Tableau 28: Synthèse des débits des crues retenues

3 - Hydrologie : préparation des hydrogrammes d'entrées de la modélisation hydraulique

Après avoir déterminé les quantiles de crue et le débit de la crue de référence, cette partie présente le travail nécessaire à la préparation des données hydrologiques propres à alimenter la modélisation hydraulique en régime transitoire de l'Allier dans le Puy de Dôme.

3.1 - Points d'entrée de débit dans le modèle hydraulique

Un modèle hydraulique tel que celui décrit et calé dans la partie 4 de ce rapport nécessite, parmi ces conditions aux limites, d'être « alimenté » en débit en un certain nombre de points qui correspondent physiquement aux apports de la rivière en amont du modèle et à ceux de ses affluents au fur et à mesure de la progression de cette dernière dans la partie de son cours qui est modélisée.

Pour l'Allier, nous avons distingué :

- L'apport ponctuel venant de l'Allier amont en entrée du modèle;
- Les apports ponctuels correspondant aux débits des principaux affluents de la rivière dans le département, avec, dans l'ordre des confluences :
 - L'Alagnon ;
 - La Couze d'Ardes ;
 - L'Eau Mère ;
 - La Couze Pavin ;
 - La Couze Chambon ;
 - Le Joron ;
 - La Morge ;
 - La Dore.
- Les apports diffus provenant des affluents secondaires, supposés uniformément répartis le long de la rivière et divisés en 2 secteurs reflétant des comportements hydrologiques différents et relativement homogènes :
 - Apports diffus amont de Vic le Comte;
 - Apports diffus aval de Vic le Comte

Tous ces apports sont résumés par le schéma synoptique des apports de la page 54 (Illustration 4).

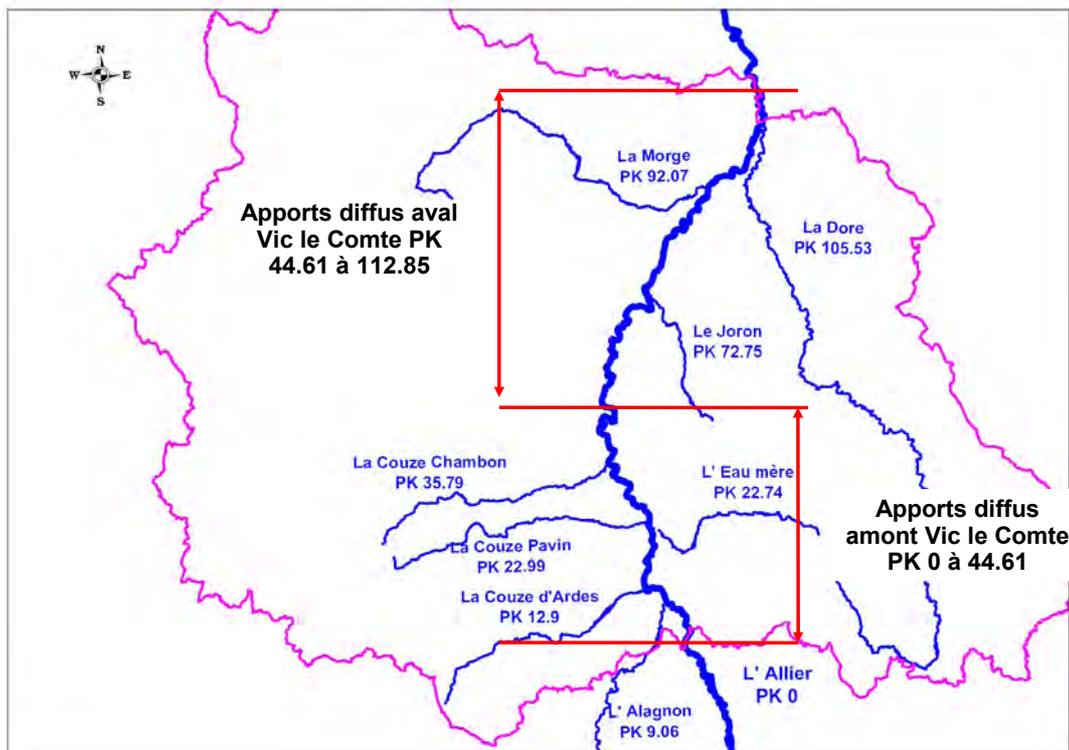


Illustration 4: Schéma synoptique des apports considérés dans la modélisation hydraulique

3.2 - Élaboration des hydrogrammes d'entrée

3.2.1 - Données utilisées

L'élaboration des hydrogrammes des apports que nous venons de lister s'appuie sur les données hydrométriques (débits) disponibles.

Ces dernières ont été extraites de la Banque HYDRO du Ministère de l'Ecologie au pas de temps horaire pour ce qui concerne les crues récentes de 2003 et 2008.

Pour la crue de 1866, nous avons eu recours aux données plus disparates de cotes relevées à l'époque à des échelles souvent différentes des sites de mesure actuels et fournies par le Service de Prévision des Crues du bassin de l'Allier (SPC Allier). Nous avons converti ces cotes en débit avec les informations dont nous disposons quant à l'estimation du débit de pointe du cours d'eau.

3.2.2 - Hydrogrammes d'entrée des crues de 2003 et 2008

L'Allier et tous ses affluents à l'exception de l'Eau Mère disposaient d'au moins une station située suivant les cas à proximité immédiate de l'amont du modèle ou de la confluence avec l'Allier.

Les hydrogrammes injectés dans le modèle sont donc ceux de la Banque HYDRO, décalés du temps de propagation estimé entre la station et l'amont du modèle ou la confluence avec l'Allier et éventuellement multipliés par un coefficient afin de tenir compte des apports intermédiaires entre la station et la confluence.

Pour l'Eau Mère, les débits ont été estimés en reprenant ceux de la Senouire à Salzuit (210 km²), dont le bassin plus méridional s'étend dans la même zone géographique (Livradois, plaine de l'Allier) et présente la même orientation. Ces débits ont été multipliés par le rapport des surfaces des bassins versants soit par $(332/210) = 1,58$.

Les apports non jaugés amont et aval de Vic-le-Comte, étant donné leur origine (rive droite principalement en amont de Vic, chaîne des Puys et Limagne en aval) ont quant à eux été estimés comme suit :

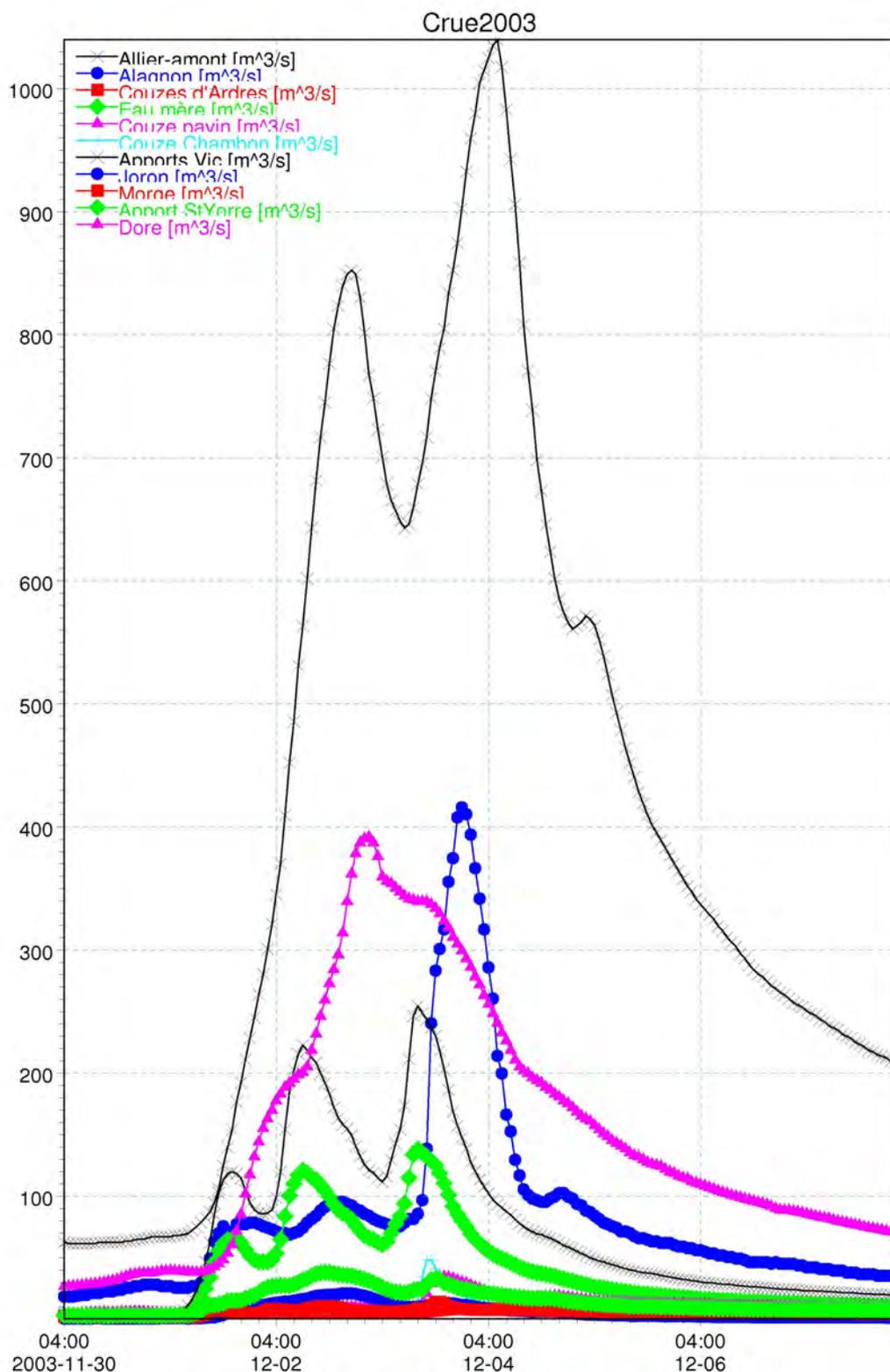
- Apports diffus non jaugés en amont de Vic le Comte (612 km²): multiplication des débits de la Senouire à Salzuit par le rapport des surfaces de bassin, soit: $2,91 * Q(\text{Salzuit})$;
- Apports diffus non jaugés en aval de Vic le Comte (1038 km²): multiplication de la somme des débits de la Morge à Maringues (713 km²) et du Joron à Beauregard l'Évêque (119 km²) par le rapport des surfaces de bassin, soit: $1,25 * (Q(\text{Salzuit}) + Q(\text{Beauregard l'Évêque}))$.

Le tableau 29 ci-après synthétise les modalités de calcul des débits aux points d'entrée du modèle.

Nom de l'apport	Surface drainée (km ²)	Station hydrométrique utilisée	Coefficient multiplicateur	Décalage temporel pour tenir compte de la propagation
Allier amont	2950	L'Allier à Pont d'Auzon (2950 km ²)	1,00	Aucun (0h)
Alagnon	984	L'Alagnon à Lempdes (984 km ²)	1,00	2h
Couze d'Ardes	117	La Couze d'Ardes à Madriat (117 km ²)	1,00	1h
Eau Mère	332	La Senouire à Salzuit (210 km ²)	1,58	0h
Couze Pavin	216	La Couze Pavin à Saint-Floret (216 km ²)	1,00	3h
Couze Chambon	159	La Couze Chambon à Champeix (159 km ²)	1,00	2h
Apports diffus non jaugés amont Vic	612	La Senouire à Salzuit (210 km ²)	2,91	0h
Joron	119	Le Joron à Beauregard l'Évêque (119 km ²)	1,00	0h
Morge	713	La Morge à Maringues (713 km ²)	1,00	1h
Dore	1700	La Dore à Dorat (1525 km ²)	1,11	4h
Apports diffus non jaugés aval Vic	1038	Le Joron à Beauregard l'Évêque (119 km ²) +La Morge à Maringues (713 km ²)	1,25	0h

Tableau 29: Synthèse du calcul des hydrogrammes d'entrée du modèle hydraulique

Les hydrogrammes des crues de 2003 et 2008 injectés dans le modèle sont donnés par les graphes des illustrations 5 et 6 pages 57 et 58.



22/06/2010 09:26:30 C:\Documents and Settings\lrcmike\Mes documents\MIKE Zero Projects\allier_1d\Crue2003.dfs0 Page 1/1
 Illustration 5: Hydrogrammes de la crue de 2003 aux points d'entrée du modèle hydraulique

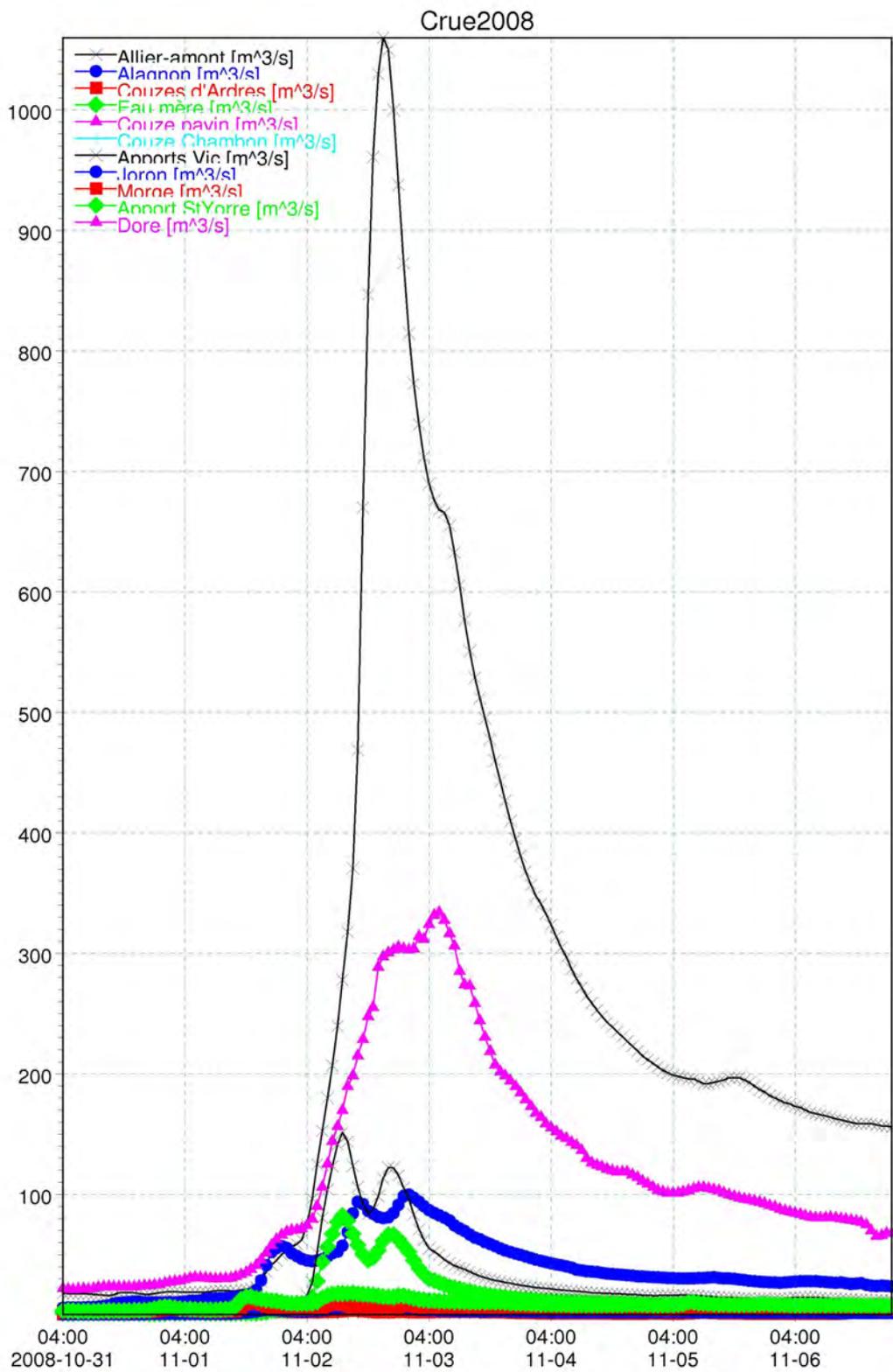


Illustration 6: Hydrogrammes de la crue de 2008 aux points d'entrée du modèle hydraulique

3.2.3 - Hydrogrammes des crues de période de retour 10 ans et 30 ans

Nous avons pu constater que la crue de décembre 2003 présentait une période de retour homogène tout le long du cours de l'Allier dans le Puy de Dôme. Nous avons repris par conséquent l'ensemble des hydrogrammes d'entrée de cette crue en les multipliant par le un ratio permettant de retrouver en tout point de l'Allier le débit de pointe de la période de retour visée:

- T=10 ans: 0,83*crue de 2003 ;
- T=30 ans: 1.4*crue de 2003 ;

Les hydrogrammes de ces crues sont donnés aux figures 7 et 8 des pages 60 et 61.

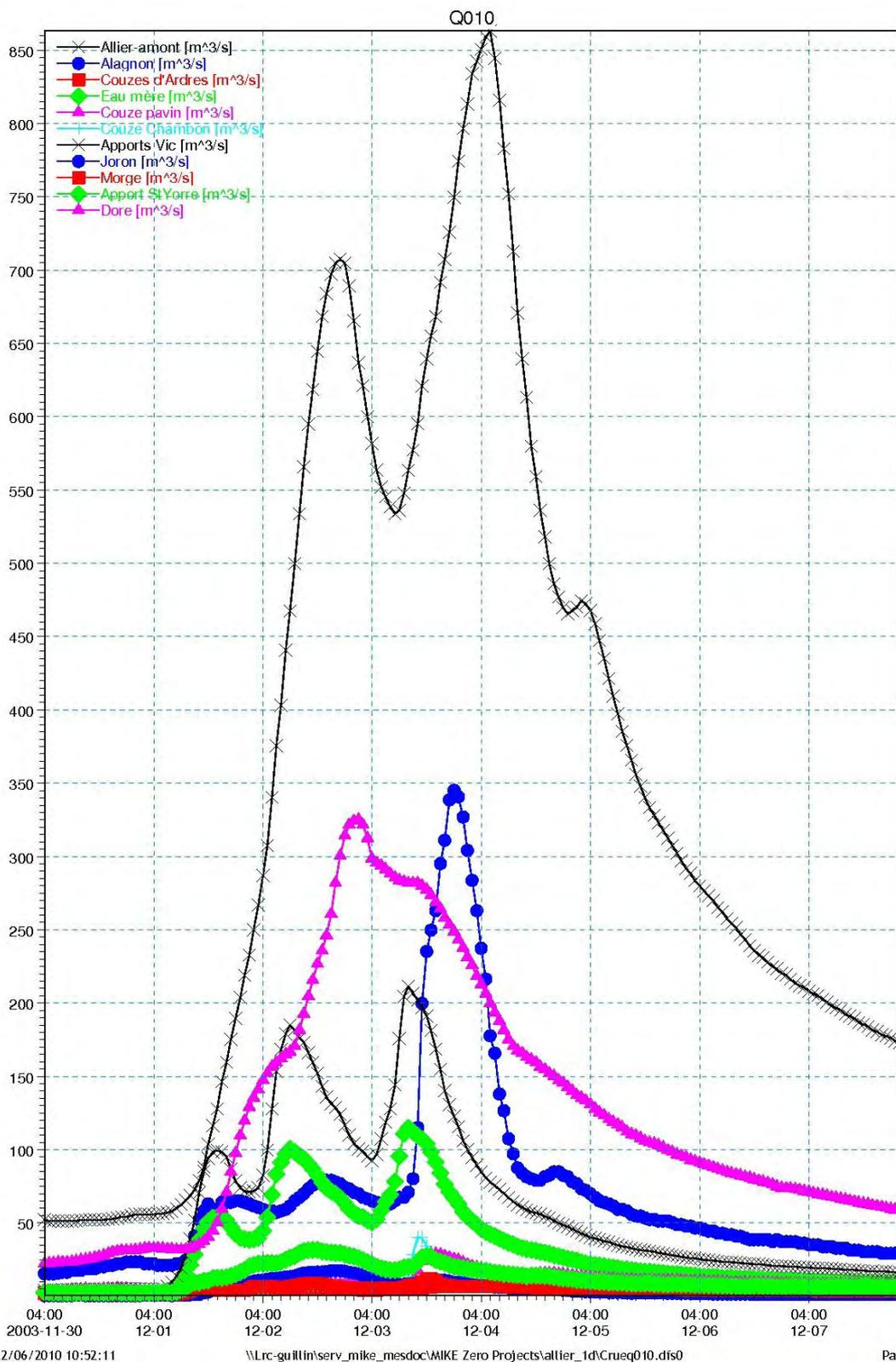


Illustration 7: Hydrogrammes de la crue de période de retour 10 ans aux points d'entrée du modèle hydraulique

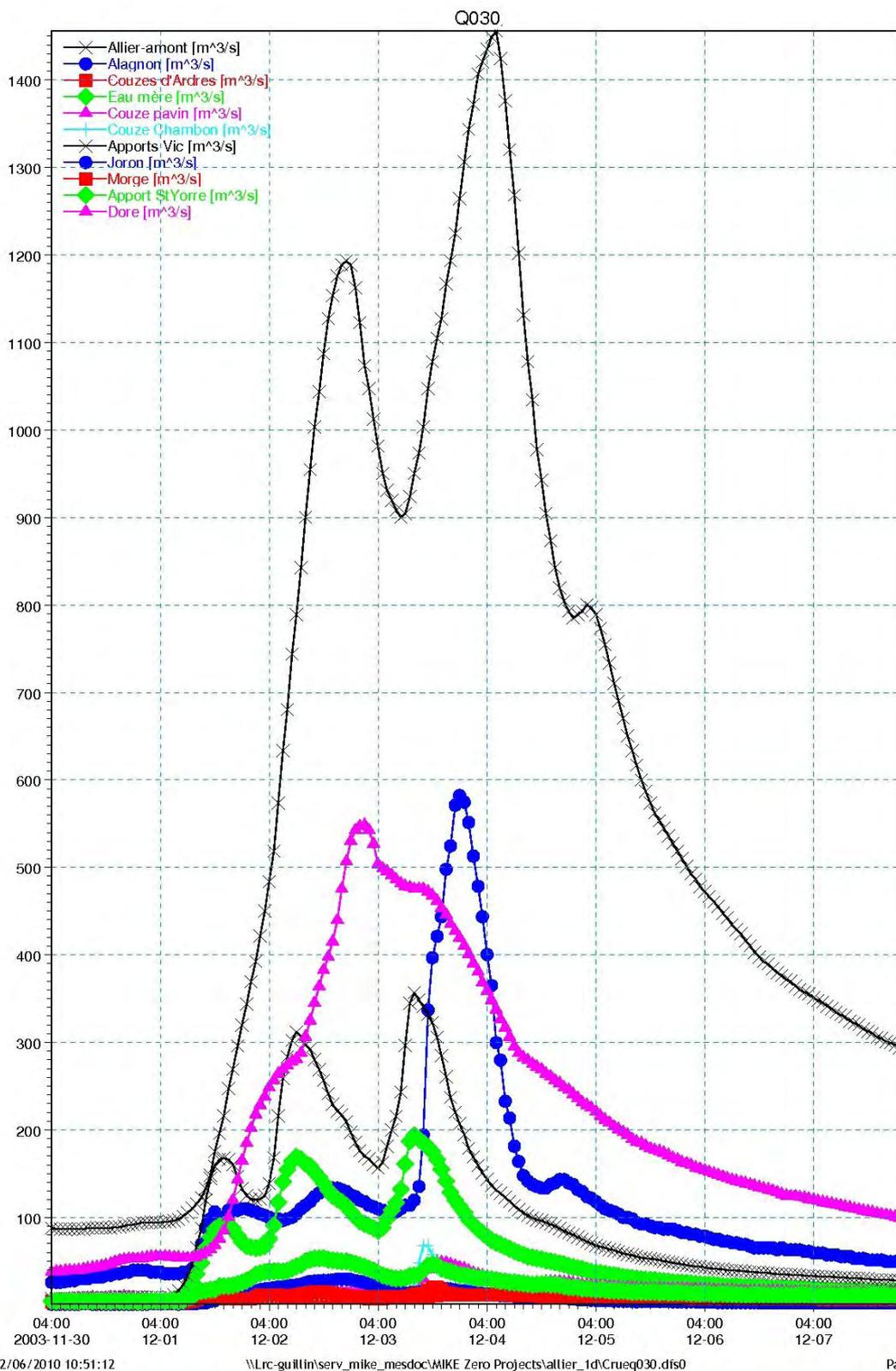


Illustration 8: Hydrogrammes de la crue de période de retour 30 ans aux points d'entrée du modèle hydraulique

3.2.4 - Hydrogrammes de la crue de référence de septembre 1866

La crue de 1866 est connue partiellement à des anciennes échelles d'annonce de crue sur l'Allier et certains de ses affluents.

Pour l'Allier, les limnigrammes disponibles sont ceux de :

- Pont de Vieille-Brioude : site identique à l'échelle actuelle, ce qui permet une conversion aisée en débit du fait de la stabilité de la section implantée sur substratum rocheux (voir annexe A page 83) ;
- Pont de Lamothe, près de Brioude, non convertible en débit ;
- Pont suspendu de Parentignat, délicat à convertir en débit en raison de très probables modifications importantes des sections d'écoulement entre 1866 et aujourd'hui ;
- Pont suspendu de Coudes : site identique à l'échelle actuelle, ce qui permet une conversion aisée en débit du fait de la stabilité de la section implantée sur substratum rocheux ;
- Pont de Cournon, non convertible en débit en raison de très probables modifications importantes des sections d'écoulement entre 1866 et aujourd'hui ;
- Pont de Pont du Château, non convertible en débit en raison de très probables modifications importantes des sections d'écoulement entre 1866 et aujourd'hui ;
- Pont de Ris, non convertible en débit en raison de très probables modifications importantes des sections d'écoulement entre 1866 et aujourd'hui.

Pour les affluents, nous disposons des limnigrammes de :

- l'Alagnon au Baborry de Blesle ;
- La Couze d'Ardes au Breuil sur Couze incomplet (station emportée) ;
- L'Eau Mère à Sauxillanges, très en amont de la confluence ;
- La Couze Pavin à Issoire ;
- La Couze Chambon à Coudes mais avec des cotes visiblement influencées par le remous de l'Allier ;
- La Morge à Maringues ;
- La Dore à Ambert, donc très en amont du point de confluence.

D'autres informations nous ont permis d'estimer les débits de pointe de l'Alagnon et de la Dore à l'échelle et au point de confluence. Partant de ces valeurs, nous avons extrapolé par similitude les débits de pointe des autres affluents.

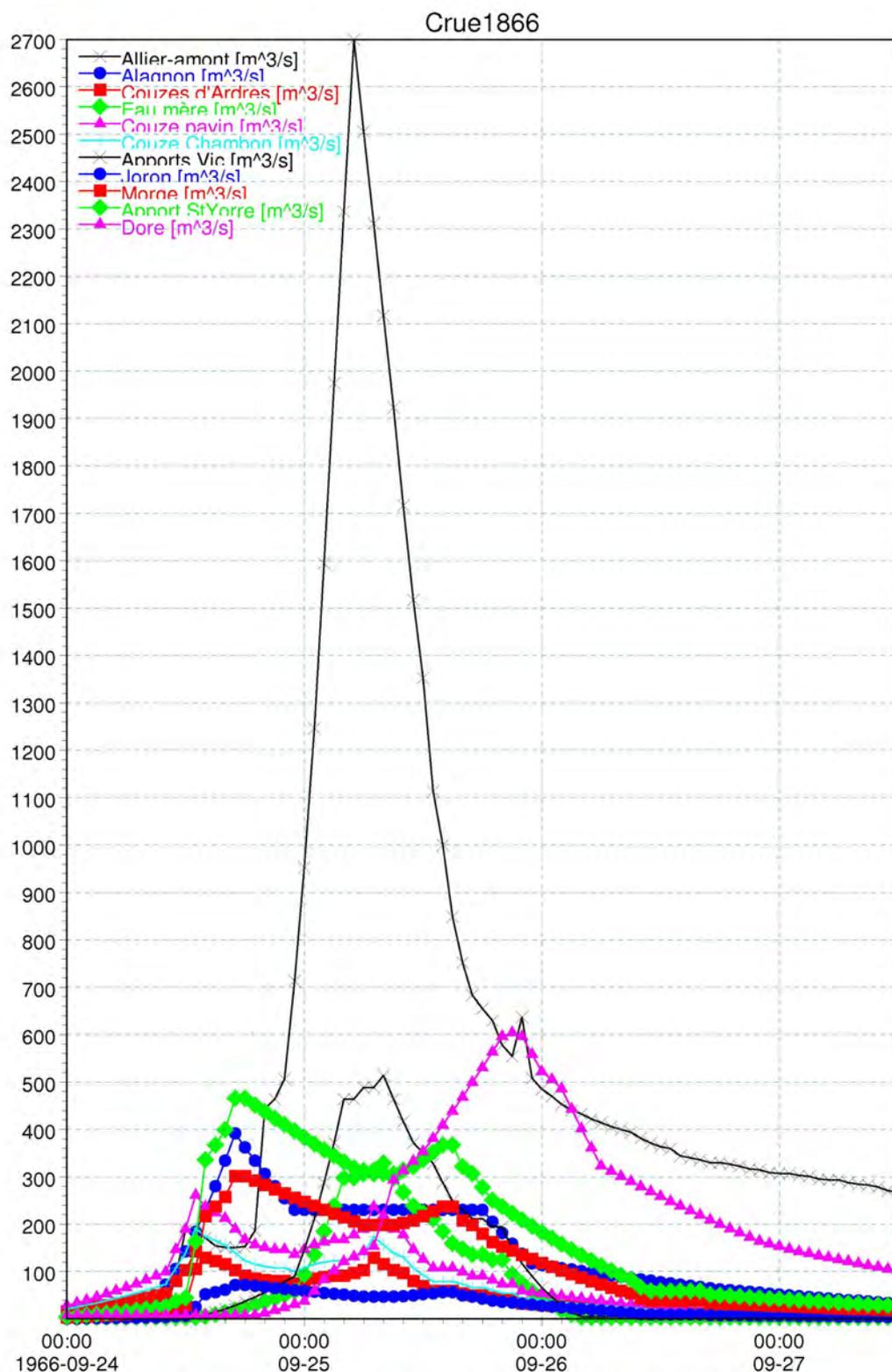
Ayant estimé les débits de pointe des affluents, les limnigrammes ont alors été convertis en débit en considérant une loi d'écoulement du type Manning-Strickler (relation linéaire entre le débit et la cote à l'échelle à la puissance 5/3).

Pour les Couzes d'Ardes et Chambon, les données de la Couze Pavin ont été extrapolées afin d'obtenir les hydrogrammes, les données propres à ces rivières étant insuffisantes ou influencées par le remous de l'Allier.

Pour la Dore et l'Eau Mère, il a été tenu compte de l'accroissement de la surface drainée et de l'allongement probable de la durée de crue entre l'échelle et la confluence.

Les hydrogrammes obtenus sont illustrés par le graphe de la figure 9 page 63.

Les apports intermédiaires sont déduits par la même méthode que celle utilisée pour les crues de 2003 et 2008.



22/06/2010 09:29:58

C:\Documents and Settings\lrcmike\Mes documents\MIKE Zero Projects\allier_1d\Crue1866-v01.dfs0

Page 1/1

Illustration 9: Hydrogrammes de la crue de référence de 1866 aux points d'entrée du modèle hydraulique

4 - Construction et calage du modèle hydraulique en régime transitoire

Cette partie aborde les principales étapes de la construction du modèle hydraulique en régime transitoire sur le cours de l'Allier dans le Puy de Dôme.

4.1 - Données d'entrée

4.1.1 - Données topographiques

Le modèle est basé sur un levé topographique laser aéroporté (LIDAR) réalisé le 15 février 2007 à la demande de la Direction Départementale des Territoires du Puy de Dôme (DDT63).

Le modèle numérique de terrain (MNT) résultant, utilisé pour la modélisation hydraulique, présente résolution en plan de 5 m (mailles carrées de 5 m de côté) et il possède une précision de +/-0.07 m en altitude d'après un test, réalisé par la DDT63, de comparaison avec des levés terrestres classiques sur plusieurs zones d'essai.

Le seul inconvénient de la technologie laser et, par conséquent du MNT qui en découle, est que l'on ne peut connaître la topographie des zones immergées, donc le fond du lit mineur sous la ligne d'eau.

Nous avons remédié à cet inconvénient en considérant les débits le jour du levé, connus en différents points de l'Allier grâce à la Banque HYDRO (voir le Tableau 30 ci-après). Nous avons ensuite interpolé le fond du lit mineur suivant une section rectangulaire sous le plan d'eau restitué par le MNT grâce à la formule de Manning-Strickler :

$$Q=K*I^{1/2}*L*h*Rh^{2/3}$$

Ayant supposé par une valeur de K de $25 \text{ m}^{1/3} \cdot \text{s}^{-1}$, une pente I de 0.001 m/m (pente moyenne de l'Allier dans le Puy de Dôme) et connaissant après examen du profil en travers dit « brut » la largeur L du lit mouillé, nous avons retrouvé le rayon hydraulique Rh et la profondeur moyenne h de la section mouillée. Le profil en travers a donc été approfondi de cette hauteur h au niveau du lit mineur mouillé.

Un exemple de profil corrigé est donné par le graphe de l'illustration 10 page 66.

Compte tenu de la relative modestie des débits le jour du levé (entre 1 fois le module à Auzon et 1.5 fois le module après la confluence avec l'Alagnon) et malgré le réajustement ultérieur du coefficient K pendant la phase de calage du modèle (valeur de K finale retenue en lit mineur très proche de celle considérée ici), l'incertitude dans la correction apportée aux profils en travers est faible et n'est donc pas suffisamment importante pour perturber les modélisations, surtout s'agissant de crues qui ont atteint des débits plus de 10 fois supérieurs comme celles de 2003 ou 1866.

Tronçon	Station hydrométrique sur l'Allier	Débit le jour du levé (15/02/2007)
Partie aval du Haut Allier avant l'Alagnon	Agnat [Pont d'Auzon]	24 m ³ /s
Allier moyen entre Alagnon et Dore	Coudes/Vic le Comte	100 m ³ /s
	Limons	110 m ³ /s
Allier aval entre Dore et Sioule	Saint-Yorre	150 m ³ /s

Tableau 30: Débits enregistrés le jour du levé topographique sur l'Allier dans le Puy de Dôme

Concernant les ouvrages de franchissements (ponts, passerelles), nous avons pris en compte les données disponibles (plans des ouvrages) auprès des services départementaux, de la SNCF et des Autoroutes du Sud de la France pour le pont de l'auto-route A89.

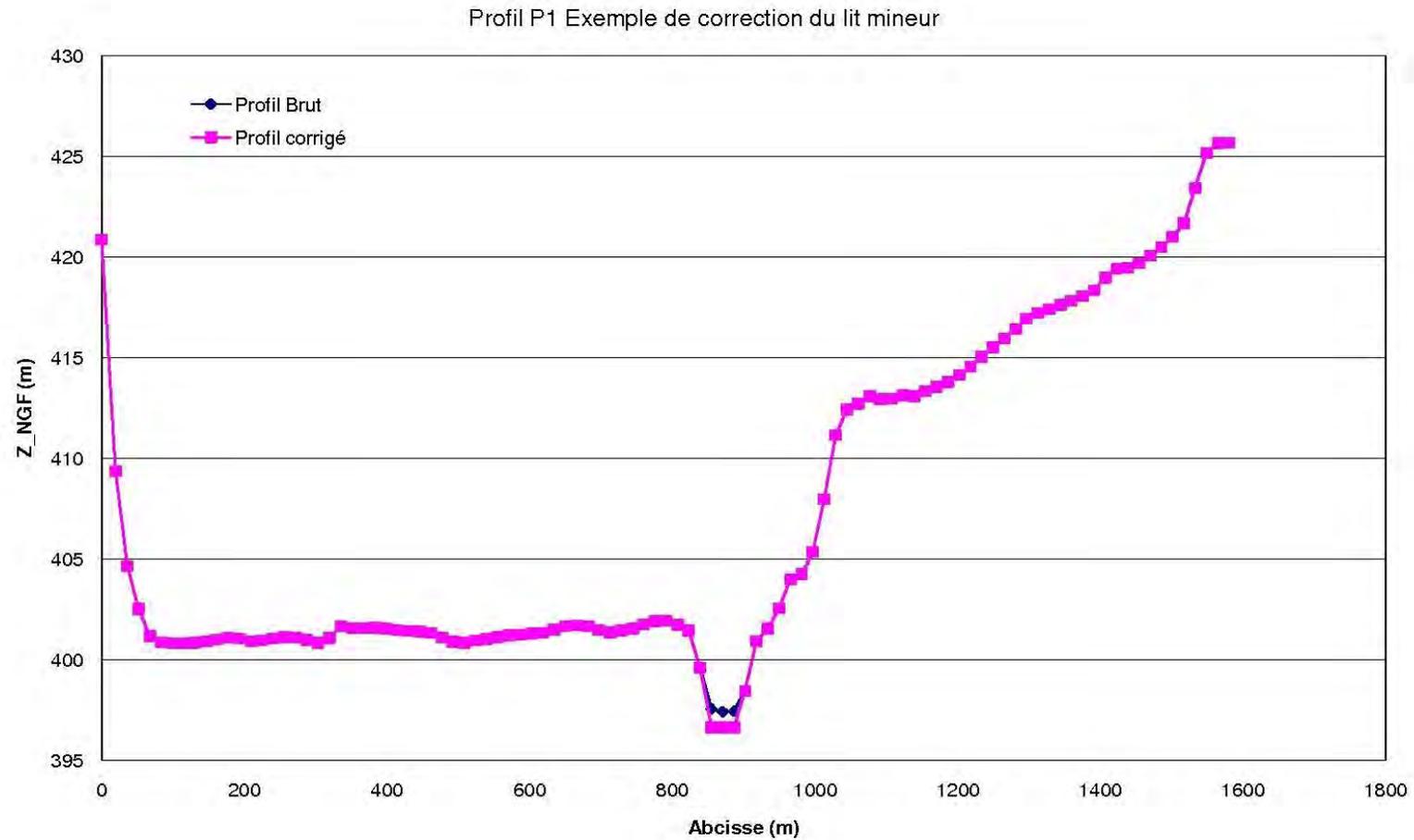


Illustration 10: Exemple de correction du lit mineur sur un profil en travers

4.1.2 - Données hydrologiques

Les données hydrologiques considérées sont les hydrogrammes définis dans la partie 3 de ce rapport.

4.2 - Structure et exploitation du modèle

La modélisation a été effectuée à l'aide du logiciel de calcul hydraulique MIKE 11.

Le modèle bâti est un modèle filaire considérant deux biefs :

- l'Allier, comportant pour chaque profil en travers au minimum trois zones de rugosités différentes (lit majeur gauche, lit mineur et lit majeur droit) ;
- la Dore aval, construite sur le même modèle que le lit de l'Allier et comportant des échanges avec ce dernier à différents niveaux.

Une fois bâti, le modèle a été exploité en régime transitoire : par opposition au régime permanent, (injection d'un débit constant égal au pic de crue), le régime transitoire consiste à simuler la crue dans son ensemble par l'injection en amont du modèle des hydrogrammes des principaux affluents ou groupes d'affluents. Ce type d'approche permet de mieux prendre en compte les phénomènes hydrauliques liés à la propagation de la crue (allongement de la durée du phénomène, amortissement de l'onde de crue...) qu'une modélisation en régime permanent et est de ce fait adapté au traitement de grands linéaires de cours d'eau, comme c'est le cas pour l'Allier dans le Puy de Dôme. Les apports de l'Allier et de ses affluents ont été injectés dans le modèle suivant le schéma synoptique de la page 54 (Illustration 4). Les hydrogrammes des différentes crues simulées ont déjà été présentés dans la partie 3.2 - Élaboration des hydrogrammes d'entrée (illustrations 5, 6, 7, 8 et 9 pages 57, 58, 60, 61 et 63).

En plus des données hydrologiques d'entrée, tout modèle hydraulique nécessite la définition d'une hypothèse de condition limite aval permettant d'initialiser le calcul de ligne d'eau. Cette dernière a consisté dans tous les cas (pour toutes les crues) en une loi hauteur débit calculée automatiquement par le logiciel pour un régime d'écoulement normal au niveau du profil de plus aval du modèle. Cette condition limite aval permet de retrouver des hauteurs cohérentes avec celles définies dans les divers études hydrauliques conduites dans le département de l'Allier (dont les études hydrauliques du franchissement de l'Allier à l'amont de l'agglomération de Vichy).

Enfin, le calcul mené par le logiciel MIKE 11 consiste en une résolution des équations complètes de Barré de Saint Venant selon un schéma de calcul implicite aux différences finies.

Les résultats (ou sorties) du modèles sont des limnigrammes et des hydrogrammes respectivement calculés au niveau des profils en travers et des points de calculs intermédiaires (entre 2 profils en travers).

Après une première exploitation ayant conduit à la publication d'une première cartographie de l'aléa inondation pour la crue de référence, le modèle a été repris à la marge (modification de profils en particulier) pour tenir compte d'observations faites par les collectivités. Les opérations de calage ont été reprises et les résultats qui sont présentés par la suite tiennent compte de l'ensemble de ces modifications.

4.3 - Calage sur les crues récentes de 2003 et 2008

Le calage d'un modèle hydraulique consiste à ajuster ses paramètres, à savoir essentiellement les coefficients de rugosité des lits mineur et majeur, afin de reproduire de la manière la plus fidèle possible la réalité.

Pour un modèle en régime transitoire l'ajustement des paramètres s'effectue de manière à obtenir une bonne reproduction des cotes et de la dynamique de crue observées. Dans la mesure où nous sommes dans le cadre d'un Plan de Prévention des Risques d'Inondation, c'est surtout les hauteurs d'eau pour la crue de référence que l'on cherche à reproduire. Nous avons donc privilégié un calage en hauteur à partir des laisses de crues relevées pour les événements de décembre 2003 et novembre 2008. Nous avons vérifié, a posteriori, que les hydrogrammes de crue étaient bien reproduits aux stations de contrôle intermédiaires de Coudes, Vic-le-Comte (Pont de Longues), Limons, et Saint-Yorre où nous avons des hydrogrammes observés.

Partant de valeurs de coefficients de Strickler initiales estimées a priori sur la double base de modélisations antérieures réalisées par nos services dans le cadre d'études sur d'autres secteurs et des gammes de valeurs usuellement indiquées dans la littérature (voir Annexe B- page 97) pour des cours d'eau similaires : $25 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$ en lit mineur et $10 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$ en lits majeurs droit et gauche pour l'ensemble des profils en travers, le processus de calage a consisté en un processus itératif visant à affiner les valeurs des coefficients de Strickler pour chaque profil en travers avec le double objectif de :

- reproduire le plus fidèlement possible les cotes des laisses de crue, compte tenu à la fois des limites inhérentes au type de modélisation et des marges d'incertitudes relatives au relevé de laisses ;
- moduler les valeurs des coefficients de rugosité de manière réaliste et physique d'un profil à l'autre compte tenu de l'occupation du sol dans le lit majeur et de la morphologie du lit mineur (présence plus ou moins abondante de bancs ou d'îles végétalisés ou non).

Moyennant cette démarche, la crue de 2003 a servi aux ajustements, celle de 2008 a permis d'en vérifier la pertinence et de valider le modèle.

4.3.1 - Crue du 4 décembre 2003

Pour cette crue, des travaux antérieurs ont permis de relever et, par la suite, de niveler un grand nombre de laisses de crue. Les levés ont été effectués très peu de temps après la crue de décembre 2003. À cette occasion, il a été également défini l'extension de la zone inondée en s'appuyant sur la géomorphologie de la vallée. Ce sont ainsi près de cent laisses (96) géoréférencées et faisant l'objet soit d'une fiche, soit de photographies qui ont pu être exploitées pour le calage du modèle. Ces laisses se répartissent de manière relativement homogène sur l'ensemble de la zone modélisée, ce qui a constitué un facteur favorable supplémentaire à un bon calage du modèle.

Les résultats du calage pour la crue de 2003 sont présentés dans l'illustration 13 de la page 72 .

Les coefficients de rugosité permettant de reproduire au mieux l'ensemble des laisses de crue tout en tenant compte de manière cohérente de l'occupation du sol et de la morphologie du lit variant, sur l'ensemble du linéaire et en fonction des profils en travers :

- entre 12 et $35 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$ pour lit mineur,

- entre 5 et 15 m^{1/3}/s pour le lit majeur.

Deux exemples de variation des coefficients de Strickler à travers le même profil en fonction de l'occupation du sol sont donnés par l'illustration 11 page 70 et peuvent être comparés aux ordres de grandeur issus de la références en la matière en Annexe B-page 97.

Avec les paramètres ainsi calés, le modèle reproduit les cotes observées :

- à plus ou moins 0.50 m pour 92 % des laisses,
- à plus ou moins 1.0 m pour 99 % des laisses.

Ces résultats sont satisfaisants au regard des valeurs de dispersion des laisses de crue constatées pour un même point kilométrique de l'Allier.

Si on considère en outre la répartition des écarts entre le modèle et les laisses le long du linéaire de l'Allier (graphe inclus dans l'illustration 13 page 72), on ne note pas de tendance à la sur ou à la sous-estimation au fur et à mesure que l'on progresse de l'amont vers l'aval. Il n'y a pas non plus de zones marquées de sur ou sous estimation.

Ces constats nous permettent de juger de la bonne adéquation du modèle avec la crue de 2003.

L'étendue de la zone inondée reproduite par le modèle est également très similaire à celle définie par géomorphologie à la suite de la crue de 2003 (cf. atlas cartographique des hauteurs d'eau de la crue de 2003).

La comparaison des hydrogrammes estimés et observés montre cependant quelques divergences (temps de propagation et débit de pointe à Coudes en particulier, voir les graphiques de l'illustration 12 page 71).

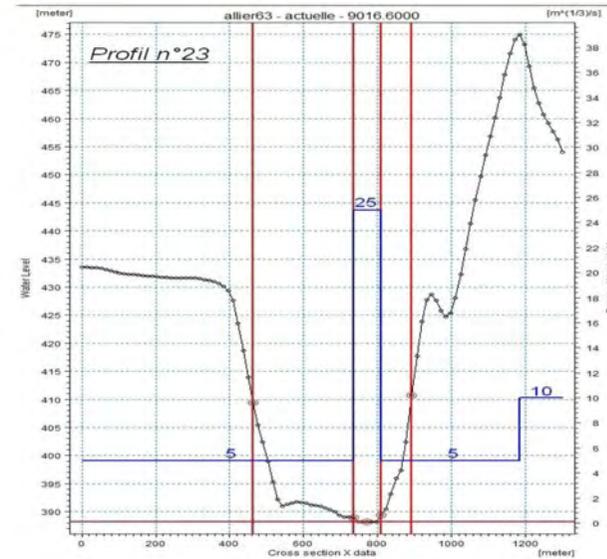
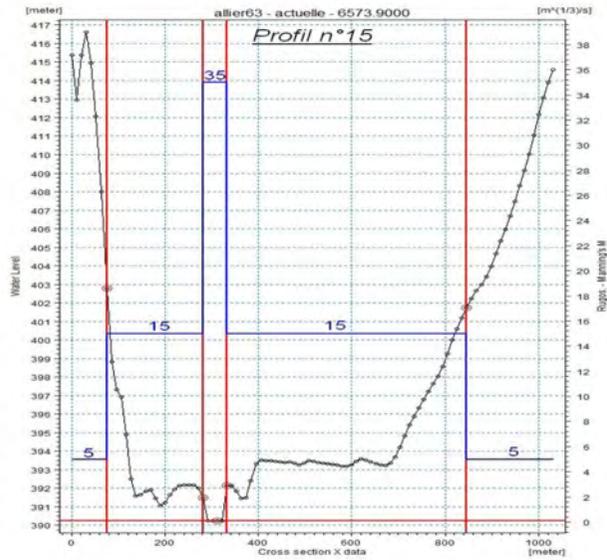
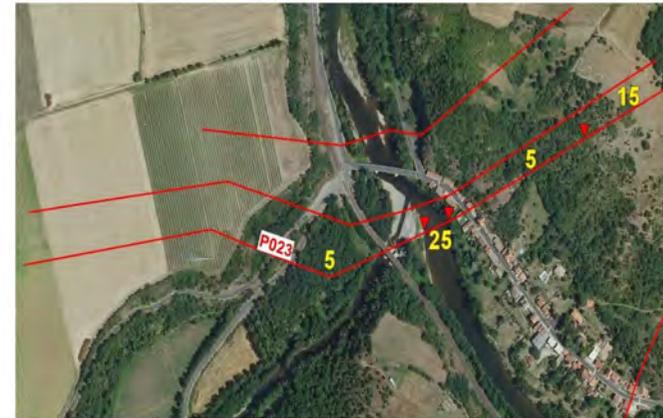


Illustration 11: Exemples de modulation des coefficients de Strickler en fonction de l'occupation du sol

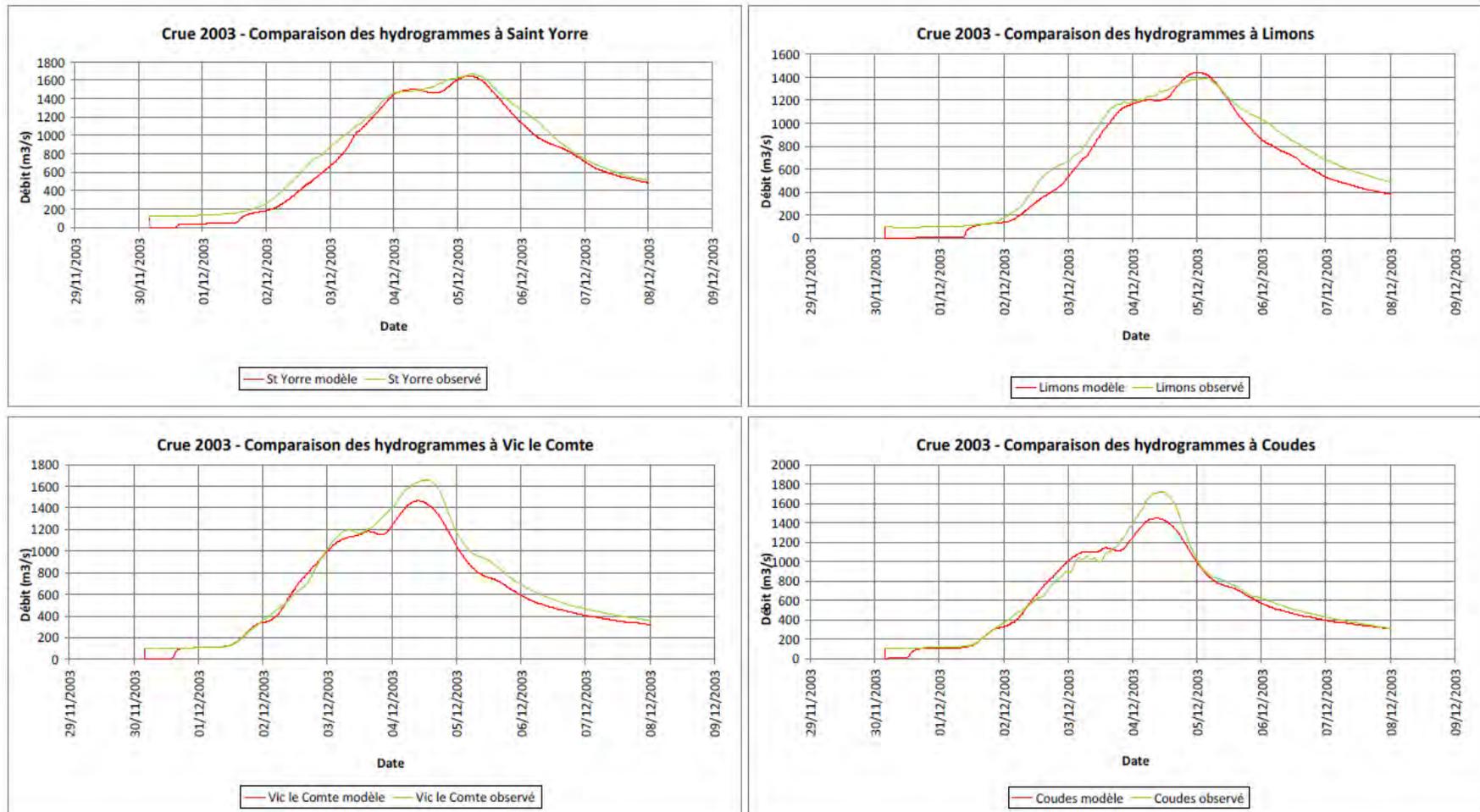


Illustration 12: Crue de Décembre 2003 - Comparaison des hydrogrammes observés et modélisés

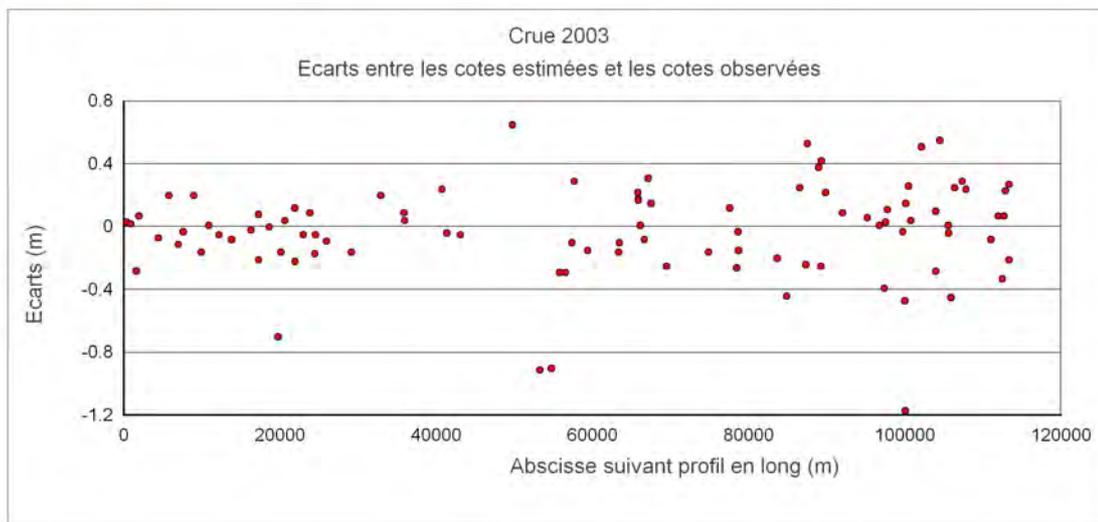
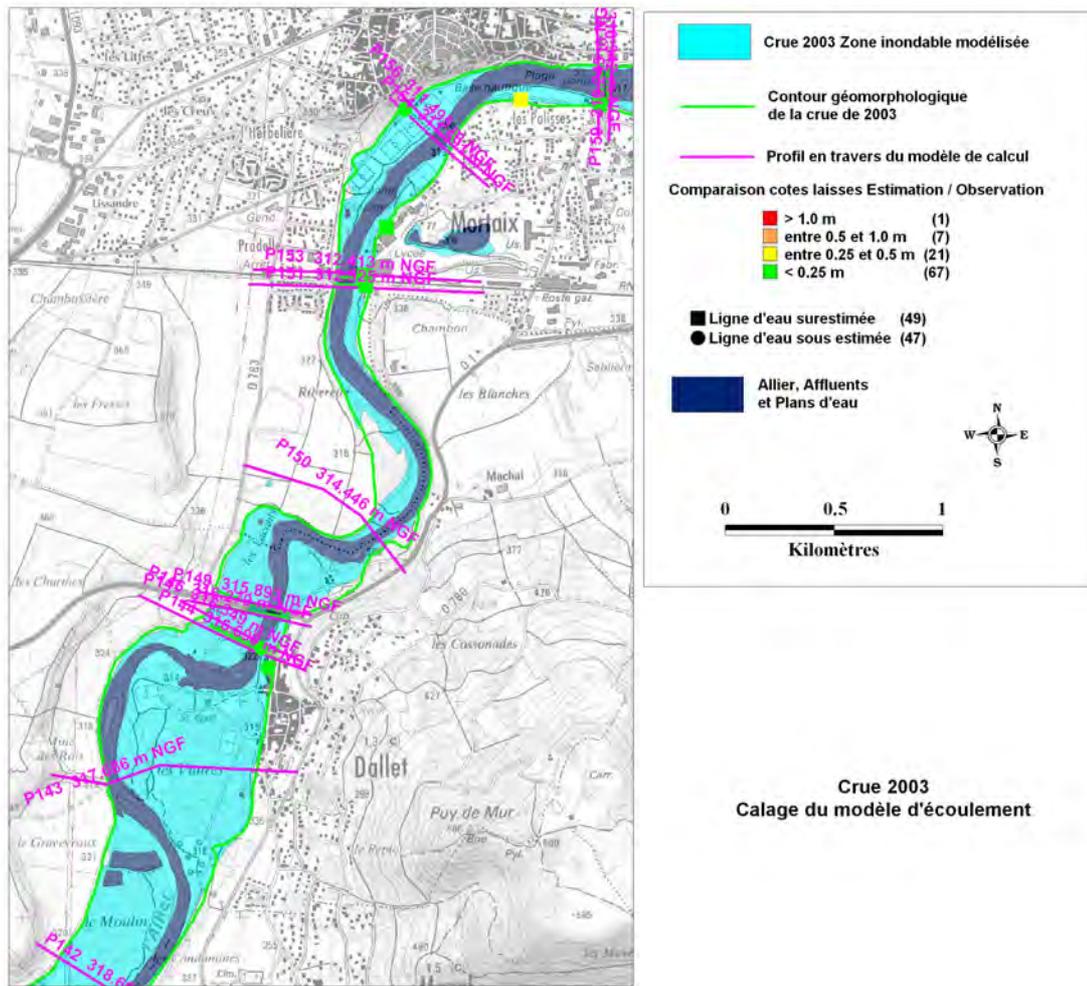


Illustration 13: Synthèse du calage du modèle avec la crue de 2003

4.3.2 - Crue du 2 novembre 2008

En conservant les paramètres estimés grâce au calage sur la crue de 2003, le modèle a été exploité pour simuler la crue de novembre 2008. Les cotes observées sur les 51 laisses répertoriées en 2008, 90 % se situent dans une fourchette de plus ou moins 0.50 m par rapport à la cote modélisée et 98 % se situent dans une fourchette de plus ou moins 1.0 m. Ces résultats sont très corrects et comparables à ceux obtenus pour la crue de 2003. La dispersion des écarts le long de l'axe de l'Allier est un peu plus forte que celle observée pour la crue de 2003 (cf. illustration 15 page 75). Cependant on n'observe ni dérive marquée de l'amont vers l'aval ni tendance à la sur- ou à la sous-estimation des niveaux d'eau. Les paramètres déterminés lors du calage avec la crue de 2003 sont ainsi validés.

Tout comme pour la crue de 2003, les hydrogrammes estimés présentent quelques divergences avec ceux observés (cf illustration 14 page 74).

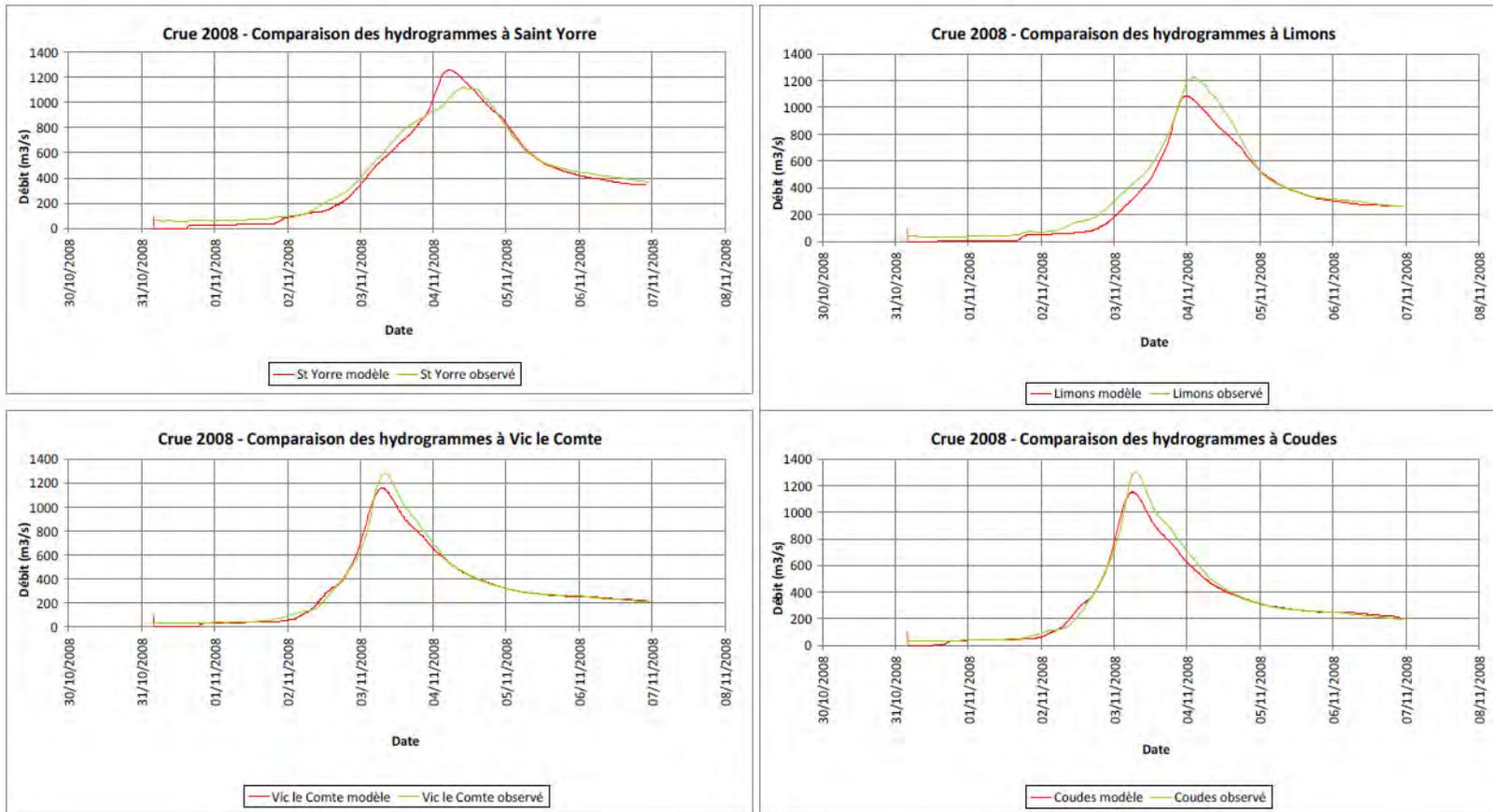
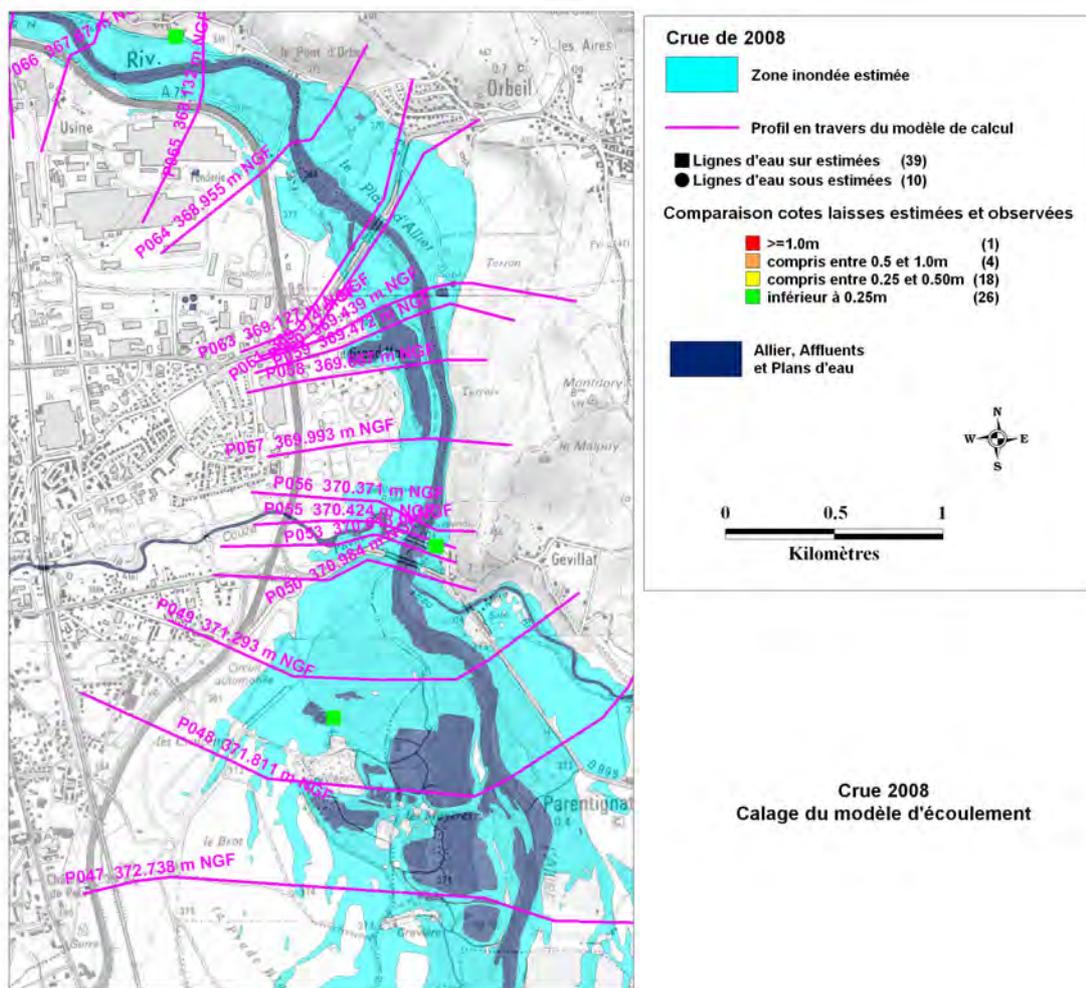


Illustration 14 : Crue de Décembre 2008 - Comparaison des hydrogrammes observés et modélisés



Cru 2008
Calage du modèle d'écoulement

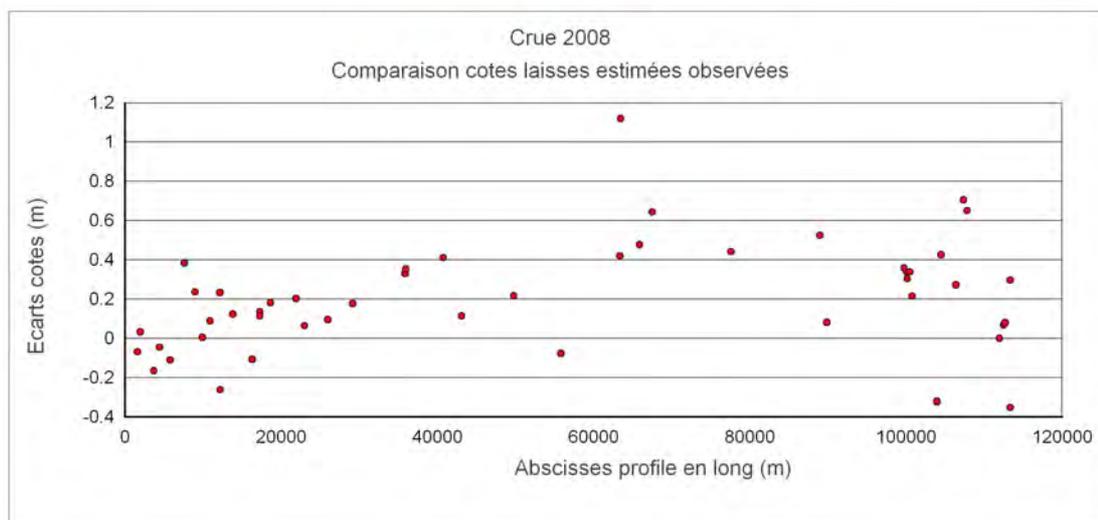


Illustration 15: Synthèse du calage du modèle avec la crue de 2008

4.4 - Vérification de la cohérence avec les laisses connues de la crue de 1866.

Quelques repères de la crue de 1866 sont connus en altitude. Ces laisses sont reportées sur les cartes des zones inondées modélisées pour la crue de 1866 et une estimation de la cote de l'eau simulée y a été réalisée permettant ainsi de mesurer l'adéquation du modèle avec les repères de la crue de 1866 (cf. Tableau 31 page 76)

Numéro du repère	Localisation	Cote observée crue de 1866	Cote simulée crue 1866	Delta simulée /observée
14	pont de Jumeaux	399.85	400.404	0.55
15	pont du Saut du Loup	395.95	395.31	-0.64
17	Les Gravieres	379.98	377.795	-2.19
18	Chât. de Lavaur	379.33	376.265	-3.07
19	pont de Parentignat	373.93	374.38	0.45
20	ancien pont d'Orbeil	372	373.435	1.43
21	pont de Coudes	356.54	355.658	-0.88
22	pont des Goules	344.67	344.945	0.27
24	pont de Cournon	324.26	324.595	0.34
26	pont du Château	310.92	311.692	0.77
27	pont de Joze	298.3	295.92	-2.38
28	pont de Limons	274.67	274.06	-0.61
29	pont D43	268.18	268.042	-0.14

Tableau 31: Adéquation du modèle pour la crue de 1866

On constate une relativement bonne concordance de la surface de l'eau estimée avec les repères de la crue de 1866. Il y a de très gros écarts comme ceux des repères 17 et 18 que l'on a du mal à expliciter. Comme pour les autres écarts, on peut avancer comme explication les modifications importantes des conditions d'écoulements dans le val d'Allier depuis 1866. Cependant, la surface de l'eau estimée est plutôt légèrement plus basse que celle observée en 1866 (peut-être l'influence de l'approfondissement généralisé du lit de l'Allier).

Le Tableau 32 ci-après donne, en des points remarquables du modèle, (ponts ou confluences) les débits de pointe obtenus par simulation de la crue de 1866. Ces résultats sont à comparer avec les données du Tableau 28 de la page 52.

Code_bief	Code_prof	Ouvrage	Chainage (m)	Débit crue de 1866 m3/s
ALLIER63	P011	Pont de Jumeaux	4606.5	2764
ALLIER63	P026	Pont du Saut du Loup	9195.4	2922
ALLIER63	P032	Pont de Pakowski	12117.3	2929
ALLIER63	P035	Aval de Couze d'Ardes	13009.8	2992
ALLIER63	P056	Pont de Parentignat (Aval de la Couze Pavin)	22994.51	2841
ALLIER63	P063	Pont d'Orbeil	24510.13	2815
ALLIER63	P083	Amont Pont de Coudes	35285.54	2838
ALLIER63	P088	Aval Pont de Coudes	35814.7	2883
ALLIER63	P106	Pont de Longues	42915.73	2893
ALLIER63	P124	Pont de Mirefleurs	49730.92	2919
ALLIER63	P135	Pont de Cournon	55760.01	2929
ALLIER63	P147	Pont de Dallet	63505.3	2842
ALLIER63	P159	Pont de Pont du Château	67483.73	2856
ALLIER63	P167	Pont de l'Autoroute	74821.47	2900
ALLIER63	P172	Pont de Joze	78637.8	2903
ALLIER63	P181	Pont de Crevant	89255.74	2926
ALLIER63	P190	Pont de Limons (Allier)	100092.92	2726
ALLIER63	P195	Pont de la D43	105549	3178
ALLIER63	P202	Pont de Saint Yorre	112849.66	3125
DORE	P190	Pont de Limons (Dore)	1943	484

Tableau 32: Débits issus de la modélisation de la crue de 1866

On constate que les valeurs de débits issues de la simulation de la crue de 1866 sont, dans une certaine mesure, comparables avec les estimations faites lors de l'analyse hydrologique (Tableau 28 page 52) puisque situées dans la marge d'erreur de 10% couramment admise dans ce type d'estimation. On remarque également le peu de variation du débit de pointe de la crue durant la traversée du département. Les apports compensent les phénomènes d'étalement dans le champ d'inondation. Tout à l'aval du modèle, le débit de pointe estimé est comparable, aux marges d'incertitudes près, à celui pris en compte dans les études conduites dans le val d'Allier dans le département de l'Allier.

4.5 - Synthèse sur le calage du modèle hydraulique

Les bons résultats obtenus pour la crue de 2008 avec les paramètres calés à partir de la crue de 2003, valident tout à la fois, la structure du modèle et les paramètres choisis. Une seconde validation est la relativement bonne adéquation de la surface de l'eau estimée pour la crue de 1866 avec les repères de cette même crue malgré des conditions d'écoulement très différentes entre 1866 et nos jours.

En ce qui concerne la propagation et l'étalement des crues, malgré les divergences déjà constatées, les formes des hydrogrammes sont relativement bien reproduites. Il faut ici souligner quelques imprécisions dans les données d'entrée du fait de l'estimation de certains apports.

On peut également rappeler la bonne adéquation entre les zones inondées simulées pour 2003 et les zones inondées observées pour cette crue.

5 - Exploitation du modèle hydraulique et cartographie de l'aléa inondation

En conservant la structure et les paramètres validés précédemment, le modèle est exploité pour définir les caractéristiques des écoulements pour la crue de référence (crue de 1866) et pour les crues remarquables de période de retour 10 ans et 30 ans. La crue centennale n'a pas été modélisée car très proche de la crue de 1866.

Avant d'obtenir la cartographie de l'aléa inondation, différentes opérations sont à réaliser entre les résultats des simulations et cette dernière.

5.1 - Exploitation des données de sortie du modèle pour la cartographie: mode opératoire

Le modèle hydraulique fournit, au droit des profils en travers et aux points de calculs intermédiaires, les cotes de l'eau et les débits transités à chaque instant. Des limniogrammes ainsi calculés sont extraites les valeurs maximales atteintes au cours de la crue. Ces cotes d'eau maximales aux profils servent d'entrées pour la construction du modèle numérique de surface d'eau maximale pour chacune des crues modélisées. Ce modèle permet en particulier de connaître la cote maximale de l'eau en tout point de la zone d'étude.

5.2 - Cartographie des hauteurs d'eau

Par croisement du modèle numérique de terrain extrait du LIDAR avec le modèle numérique de surface de l'eau, on calcule par soustraction les hauteurs d'eau au-dessus du terrain naturel en tout point de la zone d'étude. Par classification, on peut obtenir l'étendue de la zone inondée et un zonage de celle-ci en fonction de hauteurs d'eau.

Les cartographies réalisées concernent les champs d'inondation et leur zonage en hauteurs d'eau pour les crues de 2003, de 2008 et de référence (1866).

5.3 - Cartographie des vitesses

Si la définition de la hauteur d'eau en tout point du modèle est relativement aisée, celle des vitesses est nettement plus délicate. Les modèles de calculs mono-dimensionnels des écoulements ne fournissent que des vitesses moyennes dans les sections de calcul. Pour palier cela, on fait l'hypothèse que les zones inondées pour les crues les plus fréquentes sont celles où l'on retrouvera les plus fortes vitesses pour les crues plus fortes, en particulier pour la crue de référence. On a donc choisi de définir 3 classes de vitesse :

- vitesse forte qui est définie par l'enveloppe de la crue de période de retour 10 ans,
- vitesse moyenne qui est définie par différence des enveloppes des crues de période de retour 30 ans et 10 ans,

- vitesse faible qui est définie par différence des enveloppes de la crue de référence (1866) et des enveloppes des vitesses moyenne et forte.

Il faut également noter qu'un travail de simplification des contours des crues de période de retour 10 ans et 30 ans a été réalisé en s'appuyant sur la géomorphologie en particulier.

Cet exercice de construction de la carte des vitesses n'a été réalisé que pour la crue de référence en vue de la cartographie de l'aléa inondation.

5.4 - Cartographie de l'aléa inondation

La définition de la classification de l'aléa inondation est basée sur la capacité d'un être humain à se mouvoir ou à se maintenir dans un écoulement. Ainsi, ce zonage est défini par le croisement de classes de hauteur et de vitesse selon la grille suivante :

Vitesse / Hauteur	H < 0.50 m	0.50 < H < 1.0 m	H > 1.0 m
V faible	faible	moyen	fort
V moyenne	moyen	moyen	fort
V forte	fort	fort	fort

Tableau 33: Grille de classification de l'intensité de l'aléa

Les cartes ont fait l'objet de trois atlas (un par Plan de Prévention du Risque Inondation prescrit) au format A3 séparés du présent rapport.

Ces cartographies montrent que la majeure partie du champ d'inondation de la crue de référence est en aléa fort (environ 87 % de la surface du champ d'inondation), l'aléa moyen (8 %) et faible (5 %) se cantonnant le plus souvent en bordure de la zone inondable et quelquefois dans des zones où le champ d'inondation est particulièrement large (plaine de Lavaur-Labéchade, en amont d'Issoire, secteur du bec de Dore...).

La classification en aléa fort est essentiellement due à la hauteur d'eau dans le champ d'inondation. En effet, seulement 2 % environ de la surface du champ d'inondation classée en hauteur moyenne passe en aléa fort du fait d'une vitesse forte, et moins de 0.2 % de la surface passe d'une hauteur faible en aléa fort en raison de la vitesse.

Ces cartes appellent trois remarques :

- Au droit des affluents, l'aléa représenté n'est dû qu'à l'influence de la ligne d'eau de l'Allier et ne préjuge pas de l'aléa inondation propre à l'affluent lui même.
- Le champ d'inondation de la crue de 1866 atteint (ou dépasse) en certains points l'emprise du modèle numérique de terrain. Ces zones sont signalées, sur les cartographies, par un figuré spécifique.
- Les iso-cotes de la surface de l'eau sont représentées sur ces cartes au pas de 1 m en trait épais et au pas de 0.25 m en trait plus fin.

Rédigé, le 16/12/2011

Les chargés d'étude



J.-N. AUDOUY

J.-C. GUILLIN, POSTEL
P. POSTEL

Jean-Nicolas AUDOUY
Fanny POSTEL
Jean-Claude GUILLIN

Vu et vérifié, le 21/03/2013

Le responsable de l'unité HCF



Jean-Nicolas AUDOUY

Vu et approuvé, le ²² 03/2013

Le responsable de groupe REI



Marianne CHAHINE

Annexes

Annexe A- Étude des crues historiques à la station de Vieille-Brioude (1846-2009)

L'échelle historique installée en septembre 1857, comme l'actuelle station d'annonce et de prévision des crues, sont situées au pont de la RN102 à Vieille Brioude, dans le département de la Haute Loire (voir la Illustration 16 ci-dessous).

Si l'on en croit les différentes sources anciennes⁷, les nivellements récents et en prenant en compte une incertitude de l'ordre quelques cm, le zéro des différentes échelles et limnigraphes qui se sont succédés à cet endroit en rive droite et en rive gauche a toujours été fixé à la même cote de 427.22 m NGF⁸, ce qui permet de comparer l'ensemble de la série de données.



Illustration 16: Vue du site de la station de Vieille Brioude (source: www.vigicrues.gouv.fr)

7 Dans le dossier de la station, 2 mesures de cotes de 1893 et 1924 indiquent : 428.326 m au-dessus du niveau de la mer en 1893, 427.41 m en Bourdalou soit 428.22 m NGF (le Bourdalou étant 81 cm plus bas que le système NGF actuel) en 1924 et 428.26 sur le profil IGN de 1935 pour le zéro. En fait, après enquête du SPC Allier et d'après une correction apposée en 1954 sur le profil IGN de 1935, il s'agit du niveau +1 m de l'échelle, le zéro étant donc compris entre 427.22 m et 427.326 m, cote donc identique à quelques cm près aux levés les plus récents (cf. note 2).

8 427.22 m : cote qui apparaît dans la Banque HYDRO et concorde avec les 2 levés les plus récents (1998 par l'IGN pour la DIREN Centre, 2009 par le SPC Allier).

L'ensemble des sources consultées permet de remonter jusqu'en 1846⁹. Les données de H. Onde ne sont disponibles que jusqu'à la crue d'octobre 1920 incluse, ce qui est logique car son article est paru en 1923, tandis que les indications de cotes dans la Banque HYDRO n'apparaissent qu'en 1963, alors que la présence d'un limnigraphe est attestée sur le site dès 1943.

Après avoir constaté que fort peu de crues inférieures à 3 m étaient citées par les sources, très vraisemblablement en raison de leur caractère à la fois fréquent et peu impactant pour les activités humaines, nous ne nous sommes intéressés qu'aux **événements supérieurs à 3 m d'après au moins une des sources disponibles**. De la sorte, nous recensons au total 66 épisodes de crue supérieurs à 3 m d'après au moins une source entre 1846 (inclus) et 2009 (inclus), donc sur une période de 164 années.

Nous verrons, après l'inévitable phase de critique des données, que l'on doit ramener ce chiffre à 61 crues réellement supérieures à 3 m recensées entre 1846 et 2009.

1. Critique et validation des cotes de crue

1.1. Période de 1846 à 1920

Les sources disponibles sont, sur cette période :

- Les fichiers du SPC Allier et du SAC 43 ;
- Les cotes indiquées par H. Onde (1923) ;
- Les débits journaliers de la Banque HYDRO (à partir de 1919) qui ont servi à vérifier et/ou affiner la date de certaines crues.

Toutes ces sources sont plus ou moins étroitement liées entre elles, l'article d'H. Onde ayant servi de source au SAC 43, lui même étant à l'origine de certaines valeurs indiquées par le SPC Allier (sans qu'il soit possible de dire précisément pour chaque valeur qui est la source de qui ou de quoi).

Dans cette période, on recense 35 crues supérieures à 3 mètres. Ces événements sont cités en majorité par au moins 2 sources différentes.

La plupart du temps, les cotes fournies pour un même événement concordent entre les sources qui les mentionnent. On note cependant des différences pour 6 crues :

- **Crue du 30 mai 1856 :**

Les cotes indiquées sont de :

- 6.50 m pour le SPC Allier (fichier « crues historiques.xls ») ;
- 6.40 m dans le fichier « grandes crues allier.xls » du SAC 43 ;
- 6.48 m dans l'article de H. Onde ainsi que dans les fichiers « grancrues.xls » et « crues historiques.doc » du SAC 43.

9 Avant 1857, date de mise en place de l'échelle d'annonce de crue, mention des 2 seules crues de 1846 et 1856, crues remarquables de l'Allier et de la Loire, probablement nivelées et rattachées à l'échelle a posteriori sur la base de repères préexistants.

La différence de cote entre les différentes sources, 10 cm au maximum, reste faible, pour ne pas dire presque négligeable par rapport à l'importance de la crue. Nous avons retenu la cote de **6.48 m**, déjà citée en 1923 par H. Onde et qui apparaît le plus souvent.

– **Crue du 19 octobre 1857 :**

Les cotes indiquées sont de :

- 6.54 m pour le SPC Allier (fichier « crues historiques.xls ») ;
- 6.54 m également dans le fichier « grandes crues allier.xls » du SAC 43 ;
- 6.54 m encore dans l'article de H. Onde ainsi que dans les fichiers « gran-crues.xls » et « crues historiques.doc » du SAC 43 ;
- 6.34 m dans le fichier « ALLAFFLU.xls » du SAC 43.

La valeur de 6.54 m apparaît presque systématiquement, tandis que la cote de 6.34 m n'apparaît qu'une fois et est très certainement le résultat d'une erreur de saisie. Nous retenons donc la cote de **6.54 m**.

– **Crue du 25 septembre 1866 :**

Les cotes indiquées sont de :

- 9.21 m pour le SPC Allier (fichier « crues historiques.xls ») ;
- 9.25 m dans le fichier « grandes crues allier.xls » du SAC 43, correspondant à la cote approximative gravée in situ sur l'échelle de Vieille Brioude ;
- 9.21 m dans l'article de H. Onde ainsi que dans les fichiers « gran-crues.xls » et « crues historiques.doc » du SAC 43 ;
- 9.21 m dans le fichier « ALLAFFLU.xls » du SAC 43.

La différence est mineure (4 cm au plus) entre les sources. De plus, le nivellement par le SPC Allier du repère de l'échelle donne une cote de 436.42 m soit 9.20 m au-dessus du zéro de l'échelle, proche de la cote 9.21 m la plus largement admise. Nous retenons donc **9.21 m**.

– **Crue du 18 octobre 1872 :**

Les cotes indiquées sont de :

- 5.14 m pour le SPC Allier (fichier « crues historiques.xls ») ainsi que dans les fichiers « gran-crues.xls » et « crues historiques.doc » du SAC 43 ;
- 6.50 m dans le fichier « grandes crues allier.xls » du SAC 43 ;
- 6.55 m encore dans l'article de H. Onde.

La différence est très sensible (1.41 m !) entre les valeurs extrêmes de 5.14 m et 6.55 m indiquées par les différentes sources.

Après recherche dans les archives par le SPC Allier, la cote de 5.14 m correspond à la cote relevée le matin du 18 octobre 1872 par l'observateur : ce n'est donc pas forcément celle du pic de crue.

Par conséquent, nous retiendrons la cote de **6.55 m** indiquée par H. Onde en 1923, qui se révèle quasiment identique à celle de 6.50 m citée par le fichier « grandes crues allier.xls » du SAC 43 et correspond bien à celle du repère gravé in situ sur l'échelle à Vieille Brioude.

– **Crue du 13 septembre 1875 :**

Les cotes indiquées sont de :

- 7.50 m pour le SPC Allier (fichier « crues historiques.xls ») ;
- 7.50 m encore dans l'article de H. Onde ainsi que dans les fichiers « gran-crues.xls » et « crues historiques.doc » du SAC 43 ;
- 7.75 m dans le fichier « grandes crues allier.xls » du SAC 43 et sur le repère gravé in situ à Vieille Brioude ;
- 7.50 m dans le fichier « ALLAFFLU.xls » du SAC 43.

Toutes les sources disponibles indiquent une cote identique de 7.50 m. Cette cote provient après enquête d'un relevé de Monsieur Paris pour le 13 septembre 1875 à 12h. Là encore, cette valeur ne correspond sans doute pas au maximum de la crue. Ce dernier a pu (dû) être légèrement supérieur, comme le laissent entendre l'un des fichiers des archives du SAC 43, qui reprend sans doute la cote de 7.75 m du repère gravé sur l'échelle de Vieille Brioude. Nous retiendrons donc la cote de **7.75 m**, qui correspond plus vraisemblablement que celle de 7.50 m au maximum réel pour cette crue du 13 septembre 1875.

– **Crue du 11 mars 1895 :**

Les cotes indiquées sont de :

- 3,90 m pour le SPC Allier (fichier « crues historiques.xls ») ;
- 3.80 m dans l'article de H. Onde ainsi que dans les fichiers « gran-crues.xls » et « crues historiques.doc » du SAC 43 ;
- 3.90 m dans le fichier « gran-crues.xls » du SAC 43 ;
- 3.80 m dans le fichier « ALLAFFLU.xls » du SAC 43.

La différence de 10 cm entre les cotes indiquées par tel ou tel groupe de sources est mineure eu égard à l'importance de la crue. Après confirmation sans ambiguïté par les archives du SPC Allier d'un maximum de 3.80 m le 11 mars à 12h30, nous retenons la cote de **3.80 m** citée par H. Onde pour cette crue du 11 mars 1895.

1.2. Période de 1921 à 2009

Aux sources de la période précédente 1846-1920, il faut enlever l'article de H. Onde (écrit en 1923 et qui ne mentionne donc aucune crue postérieure à 1920) et rajouter :

- De 1943 à 1950 puis de 1963 à 2008 : les indications de cote maxi données par la Banque HYDRO en plus des débits moyens journaliers disponibles, eux ,depuis 1919 ;
- À partir de 1984 : les données horaires du SAC 43 (résumées pour les pics de crue par le fichier « cruesapres84.xls.»

Entre 1921 et 1962 inclus, on dénombre peu de crues (seulement 6 événements) mais les cotes des différentes sources concordent toutes, mis à part pour octobre 1933.

Le fichier « historique des crues.xls » du SPC Allier indique en effet une cote de 3.85 m tandis que le fichier « grandes crues allier.xls » du SAC 43 cite une cote de 5 m. La différence entre les 2 cotes est très sensible et cela nous a amené à émettre l'hypothèse de 2 poussées distinctes survenues dans le même mois. Nous avons donc consulté les débits moyens journaliers de la Banque HYDRO et, effectivement, il apparaît que 2 crues d'importance égale en moyenne journalière ont affecté l'Allier en octobre 1933 :

- Le 1er octobre 1933 : une crue au profil très aigu au moins en débit journalier, avec un maximum de débit journalier de 515 m³/s ;
- Le 24 octobre 1933 : une crue de même débit maximum journalier de 515 m³/s mais au profil plus mou (au moins en débit journalier).

Nous avons donc attribué sans plus d'informations la cote la plus forte de 5 m à la crue du 1er octobre en raison de son profil plus aigu, qui plaide pour une cote supérieure du maxi instantané pour un même débit journalier de 515 m³/s. Par suite, nous avons donc attribué la cote de 3.85 m à la crue du 24 octobre.

Entre 1963 et 1980 inclus, les cotes indiquées dans la Banque HYDRO coïncident parfaitement avec celles des autres sources à 2 exceptions près :

- **Le 11 novembre 1976** : les fichiers « historique des crues.xls » du SPC Allier, « grancrues.xls » et « crues historiques.doc » du SAC 43 indiquent 4.27 m contre 4.90 m dans la Banque HYDRO. Or cette poussée apparaît plus importante que celle du 26 octobre précédent sur le reste du Haut Allier (à Rogleton et Prades notamment d'après la Banque HYDRO). La crue du 26 octobre ayant déjà coté 4.44 m, la cote de 4.27 m est certainement erronée et nous avons retenu la cote de **4.90 m** de la Banque HYDRO, cote qui s'avère proche d'une valeur retrouvée entre temps par le SPC Allier de 4.99 m et issue du dépouillement du limniogramme.
- **Le 21 septembre 1980** : la cote indiquée par le SPC Allier (fichier « historique des crues.xls » et RIC) est de 5.31 m contre 5.47 m dans la Banque HYDRO. La différence étant assez faible (16 cm) eu égard à l'importance de la crue et ne sachant pas l'origine de la valeur indiquée par le SPC Allier, nous avons retenu la cote de **5.47 m** de la Banque HYDRO.

Entre 1981 et 1983 inclus, seules les cotes indiquées dans la Banque HYDRO sont connues pour les 2 crues supérieures à 3 m recensées, celles du 8 novembre 1982 et du 27 avril 1983: Vu leur bonne concordance avec les cotes connues par ailleurs sur la période précédente, confirmée par le SPC Allier, et en l'absence d'autres données, ce sont donc les cotes de la Banque HYDRO qui ont été retenues.

L'année 1984 marque l'entrée en service du réseau CRISTAL sur le bassin de la Loire et de l'Allier. On peut distinguer 2 sous-périodes :

- Entre 1984 et mai 1999 inclus, les cotes indiquées dans la Banque HYDRO diffèrent très souvent de celles données par le SAC43 sur la base des données relevées par ses soins au pas de temps horaire pendant les crues. La différence toujours proche ou égale à 1 m provient d'un décalage artificiel de 1 m opéré pour des raisons électroniques (interface n'acceptant pas les cotes négatives de l'étiage) : le SAC 43 citait alors la cote augmentée de 1 m tandis que le SAC de Clermont, « ancêtre » du SPC Allier, de même que la Banque HYDRO citaient bien la cote réelle qui pouvait être lue à l'échelle sur le terrain. Par conséquent, en cas de différence entre les sources, nous privilégions la cote donnée par la Banque HYDRO.

Dans le détail, les divergences(expliquées ou non) concernent les crues :

- Du 1er décembre 1984 : les fichier « crues_apres84.xls » et du SAC 43 indique une cote de 3.18 m pour cette crue (laquelle est d'ailleurs affectée par erreur au 1er décembre 1985 dans le fichier « crues historiques.-doc » alors que, vérification faite, il n'y a pas eu de crue sensible en décembre 1985). Dans le même temps, la Banque HYDRO indique 4.70 m (cote que nous avons retenue suite à la remarque faite plus haut) ;
 - Des 25 avril et 15 novembre 1986, du 2 mai 1988 et du 27 avril 1993: les cotes indiquées par le fichier « crues_apres84.xls » sont respectivement de 3.72 m, 3.26 m, 3.65 m et 3.12 m contre 2.73 m, 1.01 m, 2.37 m et 2.21 m dans HYDRO. Nous avons retenu ici encore les cotes de la Banque HYDRO.
 - Des 24 septembre, 21 octobre et 5 novembre 1994, du 13 novembre 1996 et du 18 mai 1999 : Conformément à la remarque faite plus haut, les cotes du SAC 43 sont 1 m plus importantes que celles du SPC Allier et de la Banque HYDRO, ces dernières étant bien les cotes réelles et par conséquent celles qui ont été retenues.
- Depuis mai 1999 (non inclus) et jusqu'à aujourd'hui, les cotes sont identiques à 1 ou 2 cm près suivant les sources entre la Banque HYDRO et les données du SPC Allier et du SAC 43 (le problème électronique à l'origine du décalage des cotes de 1m ayant apparemment été résolu au cours de l'année 1999). Du fait du caractère occasionnel et mineur de ces différences (les valeurs de la Banque HYDRO étant alors toujours les plus élevées) et par souci de cohérence avec la période antérieure 1984-1999, nous avons donc retenu de préférence les cotes de la Banque HYDRO.

2. Estimation des débits

Étant donné le site de mesure, près d'un pont et au niveau d'une gorge rocheuse sans possibilité de débordements importants, la section de mesure est a priori relativement stable dans le temps, mis à part au fond du lit mineur (agencement des bancs de galets).

Or, pour les crues supérieures à 3 m considérées ici et qui sont des poussées déjà relativement importantes, les seules variations de la géométrie du fond du lit mineur n'engendrent a priori d'une crue à l'autre que des variations de la section mouillée négligeables par rapport à la section d'écoulement totale. Nous avons donc supposé que la section, et donc les conditions d'écoulement, n'avaient pas varié de manière significative depuis 1846 au droit de la station de Vieille Brioude.

Ceci nous a permis d'estimer les débits de l'ensemble des crues supérieures à 3 m recensées depuis 1846. à l'aide de la seule courbe de tarage actuelle. Cette dernière est basée sur des jaugeages échelonnés jusqu'à une cote maximale de 5,26 m lors de la crue du 4 décembre 2003. La DREAL Centre, actuel gestionnaire de la station a produit une extrapolation jusqu'à la cote 7,28 m. Nous avons prolongé linéairement cette extrapolation jusqu'à la cote 10,00 m en considérant le débit généralement admis dans la littérature (notamment le RIC du SPC Allier de 2006) pour la crue de 1866 : 2500 m³/s pour 9,21 m à l'échelle. Cette courbe de tarage est représentée sur le graphe de l'illustration 17 ci-après et un détail du barème de tarage correspondant par pas de 0,25 m en cote est donné dans le Tableau 34 de la page 91.

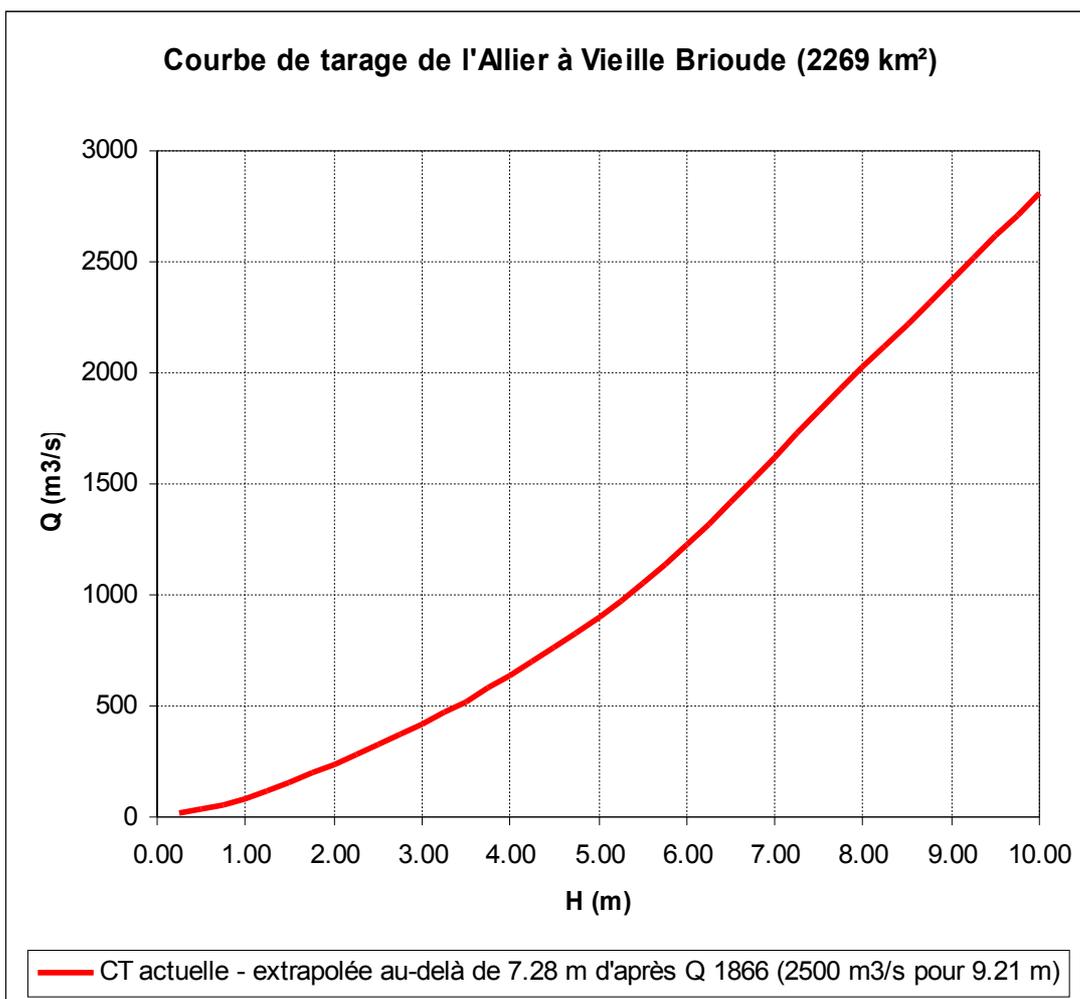


Illustration 17: Courbe de tarage pour l'Allier à Vieille Brioude

Hauteur à l'échelle (m)	Débit en m ³ /s	Hauteur à l'échelle (m)	Débit en m ³ /s
-0,25	3	5,00	898
0,00	9	5,25	969
0,25	20	5,50	1051
0,50	36	5,75	1138
0,75	58	6,00	1227
1,00	85	6,25	1320
1,25	119	6,50	1417
1,50	157	6,75	1517
1,75	197	7,00	1620
2,00	239	7,25	1727
2,25	283	7,50	1827
2,50	328	7,75	1925
2,75	374	8,00	2024
3,00	422	8,25	2122
3,25	471	8,50	2220
3,50	522	8,75	2319
3,75	578	9,00	2417
4,00	637	9,25	2516
4,25	699	9,50	2614
4,50	763	9,75	2713
4,75	829	10,00	2811

Tableau 34: Barème de tarage de l'Allier à Vieille Brioude

3. Liste finale des crues supérieures à 3.00 m ou 422 m³/s de l'Allier à Vieille Brioude entre 1846 et 2008

À partir de ce barème et des cotes précédemment retenues, on arrive alors à la liste suivante de crues supérieures entre 1846 et 2009 :

Crues connues > 3,00 m ou 422 m³/s de l'Allier à Vieille Brioude entre 1846 et 2009			
Date crue	Cote échelle (m)	Débit retenu en m³/s	Débit Banque HYDRO (si connu, pour info) en m³/s
18 octobre 1846	8,50	2220	
30 mai 1856	6,48	1409	
19 octobre 1857	6,54	1432	
29 novembre 1862	3,71	569	
28 octobre 1864	3,20	461	
25 septembre 1866	9,21	2500	
16 février 1867	3,05	431	
18 octobre 1868	4,75	829	
18 octobre 1872	6,55	1436	
13 septembre 1875	7,75	1925	
31 décembre 1888	5,80	1155	
20 septembre 1890	4,50	763	
20 octobre 1891	4,20	686	
1er novembre 1892	3,10	441	
25 mai 1894	3,10	441	
11 mars 1895	3,80	590	
3 novembre 1899	3,15	451	
6 juin 1900	3,00	422	
27 août 1900	3,10	441	
29 septembre 1900	4,90	870	
29 novembre 1900	3,00	422	
2 avril 1901	3,00	422	
24 septembre 1901	4,15	674	
24 avril 1902	3,10	441	
29 octobre 1903	3,00	422	
9 octobre 1907	5,80	1155	
16 octobre 1907	6,80	1537	
6 décembre 1910	4,00	637	
22 mars 1911	3,45	511	
9 février 1912	3,60	544	
3 juin 1913	4,50	763	
29 octobre 1913	3,50	522	
20 mai 1917	3,25	471	
23 janvier 1918	3,10	441	

Crues connues > 3,00 m ou 422 m³/s de l'Allier à Vieille Brioude entre 1846 et 2009			
Date crue	Cote échelle (m)	Débit retenu en m³/s	Débit Banque HYDRO (si connu, pour info) en m³/s
9 octobre 1920	3,60	544	
13 novembre 1923	4,05	650	
9 mars 1927	3,20	461	
1er octobre 1933	5,00	898	
24 octobre 1933	3,85	602	
13 novembre 1941	3,50	522	
25 octobre 1943	5,75	1138	
6 novembre 1963	3,48	518	615
25 mai 1964	3,30	481	550
26 septembre 1965	3,02	426	457
2 novembre 1968	4,89	867	1050
12 janvier 1970	3,58	540	560
24 décembre 1973	5,51	1055	1250
26 octobre 1976	4,47	755	895
11 novembre 1976	4,90	870	1060
21 septembre 1980	5,47	1041	1360
8 novembre 1982	3,85	602	740
27 avril 1983	3,77	583	700
2 décembre 1984	4,70	816	1070
24 septembre 1994	4,45	750	780
5 novembre 1994	4,98	892	925
24 janvier 1996	3,04	429	441
13 novembre 1996	3,53	529	543
18 mai 1999	3,24	469	557
24 novembre 2003	3,40	501	499
4 décembre 2003	5,27	975	977
2 novembre 2008	5,49	1048	1050

Tableau 35: Crues connues > 3,00 m ou 422 m³/s de l'Allier à Vieille Brioude entre 1846 et 2009

La comparaison des débits obtenus en fonction des hauteurs retenues et des débits instantanés publiés dans HYDRO pour les crues postérieures à 1943 ne fait pas apparaître d'erreurs ou incohérences très importantes avec les débits que nous avons calculés à partir de la courbe de tarage présentée précédemment. Tout au plus doit-on noter des différences pour les débits des crues les plus fortes (>3,50 m) avant 2003, du fait que la station n'avait alors été jaugée que jusqu'à une cote maximale de l'ordre de 3,50 m.

De ce point de vue, la courbe de tarage actuelle prolongée par nos soins est donc plus exacte pour les fortes crues que les courbes de tarage antérieures à partir desquelles ont été calculés les débits publiés dans HYDRO. Nous retiendrons donc les valeurs que nous avons calculées, pour tous les calculs ultérieurs, en remarquant qu'elles coïncident à 2 m³/s près avec les débits publiés dans HYDRO depuis 2003.

4. Commentaires sur la répartition des crues dans le temps ou quel est le seuil d'exhaustivité de l'échantillon ?

Nous avons restreint notre recensement des crues historiques aux événements supérieurs à 3.00 m ou 422 m³/s. Pour pouvoir tenter un ajustement statistique le plus cohérent qui soit par la méthode du renouvellement sur la période 1846-2009, il nous faut être certain de connaître TOUS les événements supérieurs à un seuil donné, appelé « seuil d'exhaustivité. » Par hypothèse, comme nous avons restreint notre analyse aux crues supérieures à 3.00 m ou 422 m³/s pour les raisons déjà évoquées plus haut, le seuil d'exhaustivité ne pourra être que supérieur ou égal à 3.00 m pour l'Allier à Vieille Brioude.

Nous avons donc cherché à voir si l'on connaissait bien tous les événements supérieurs à 3.00 m depuis 1846.

Un premier élément de réponse nous a été fourni par l'examen de la répartition cumulée des crues sur la période (cf. graphe de l'illustration 18 ci-après, page 94)

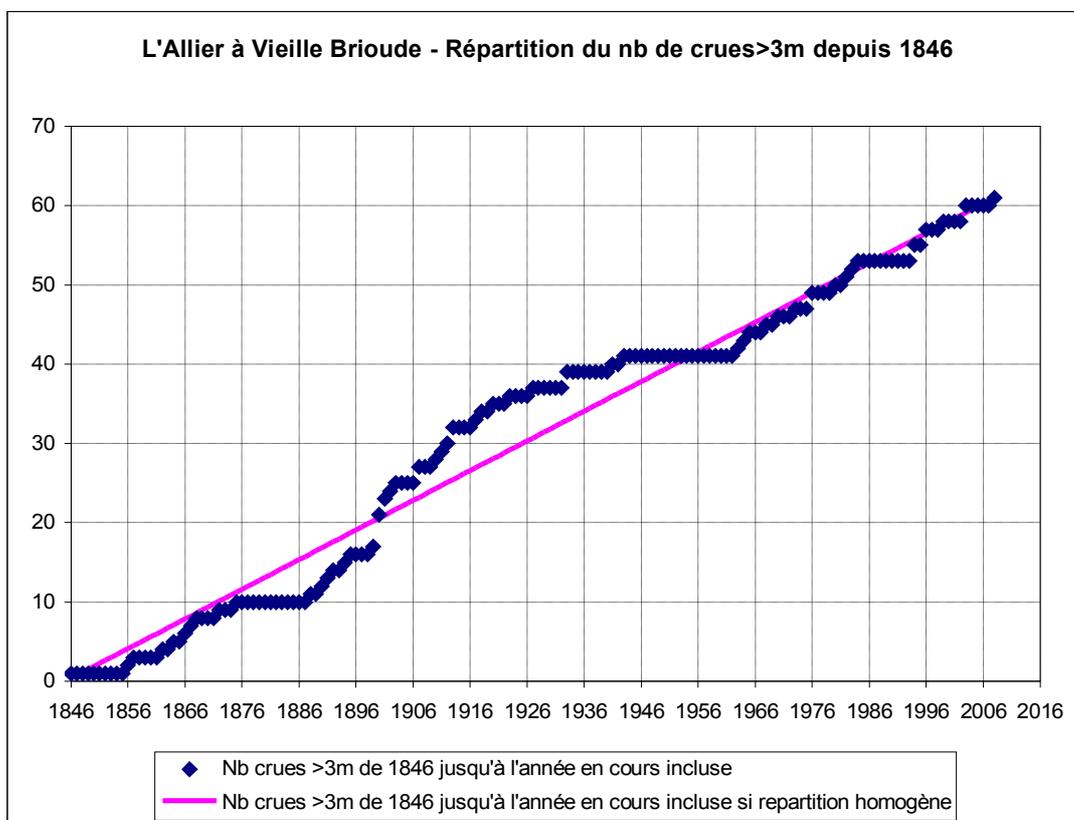


Illustration 18: Répartition du nombre de crues >3m à Vieille Brioude entre 1846 et 2009

La répartition des crues semble relativement régulière. Toutefois on note 3 périodes apparemment sans crues supérieures à 3 m :

- Entre 1876 et 1887 ;
- Entre 1944 et 1962 ;
- Entre 1985 et 1993.

Entre 1985 et 1993, l'ensemble des relevés de hauteur étant connu depuis 1962, il s'agit bien d'une période sans grosses crues correspondant à la sécheresse de la fin des années 1980 – début des années 1990.

Entre 1876 et 1887, il semble s'agir aussi avec une quasi-certitude d'une absence avérée de crues supérieures à 3 mètres puisque H. Onde fait bien mention de plusieurs crues pendant cette période mais d'aucune ayant franchi le seuil (les plus fortes, celles de mai 1877 et avril 1879 n'ont atteint que 2.62 m)

Entre 1944 et 1962, nous savons grâce aux mentions de hauteurs dans la Banque HYDRO que l'absence de crue est confirmée pour les années 1944 à 1950 incluse, période qui correspond à la plus grave sécheresse qu'a connu l'ensemble du bassin de la Loire au XXème siècle. Par contre, sur la période 1951-1962, alors que les mentions de cotes instantanées disparaissent momentanément dans la Banque HYDRO, les débits journaliers publiés dans cette dernière suggèrent l'existence de 6 crues de débits journaliers compris entre 250 et 380 m³/s, donc fortement susceptibles d'avoir franchi le seuil de 3.00 m ou 422 m³/s. Nous avons même la certitude que la crue du 11 décembre 1959, avec 380 m³/s en moyenne journalière a dû franchir le seuil de 3.00 m ou 422 m³/s en débit instantané. Même si nous ne connaissons pas, hélas, la cote exacte de cette crue, son existence nous montre que le seuil d'exhaustivité de notre échantillon est forcément supérieur à 3 mètres.

Par contre, vu la valeur du débit moyen journalier de cette crue du 11 décembre 1959, par ailleurs la plus forte d'assez loin de la période 1944-1962 si on se fie au débit journalier, il semble très peu probable qu'une crue de cette période ait franchi le seuil de 4 m ou 637 m³/s.

Comme, de plus, toutes les hauteurs de crue depuis 1962 sont connues grâce à la Banque HYDRO, nous avons donc de fait la quasi-certitude de connaître toutes les crues supérieures à 4 m depuis au moins 1944.

Pour ce qui est de la période antérieure à 1944, il nous faut remarquer, d'après les indications du RIC du SPC Allier, que la cote de 4 m à Vieille Brioude se situe à peine 20 cm sous le seuil de vigilance orange (ie. « crue génératrice de débordements importants susceptibles d'avoir un impact significatif sur la vie collective et la sécurité des biens et des personnes ») et correspond approximativement au début des inondations significatives sur la partie aval du Haut-Allier (inondation de la plaine de Von à Langeac, coupure de plusieurs routes de desserte locale...) Nous pouvons donc légitimement supposer que toutes les crues supérieures à 4 m ont dû laisser des traces dans la mémoire et être systématiquement relevées depuis 1857, date de la mise en place de l'échelle, et même avant, depuis 1846, puisque les 2 crues fortes de 1846 et 1856 ont bien été reportées. C'est de toute façon, ce que semble confirmer la répartition assez homogène du nombre de crues supérieures à 4 m depuis 1846 (graphe de l'illustration 19 ci-après, page 96.)

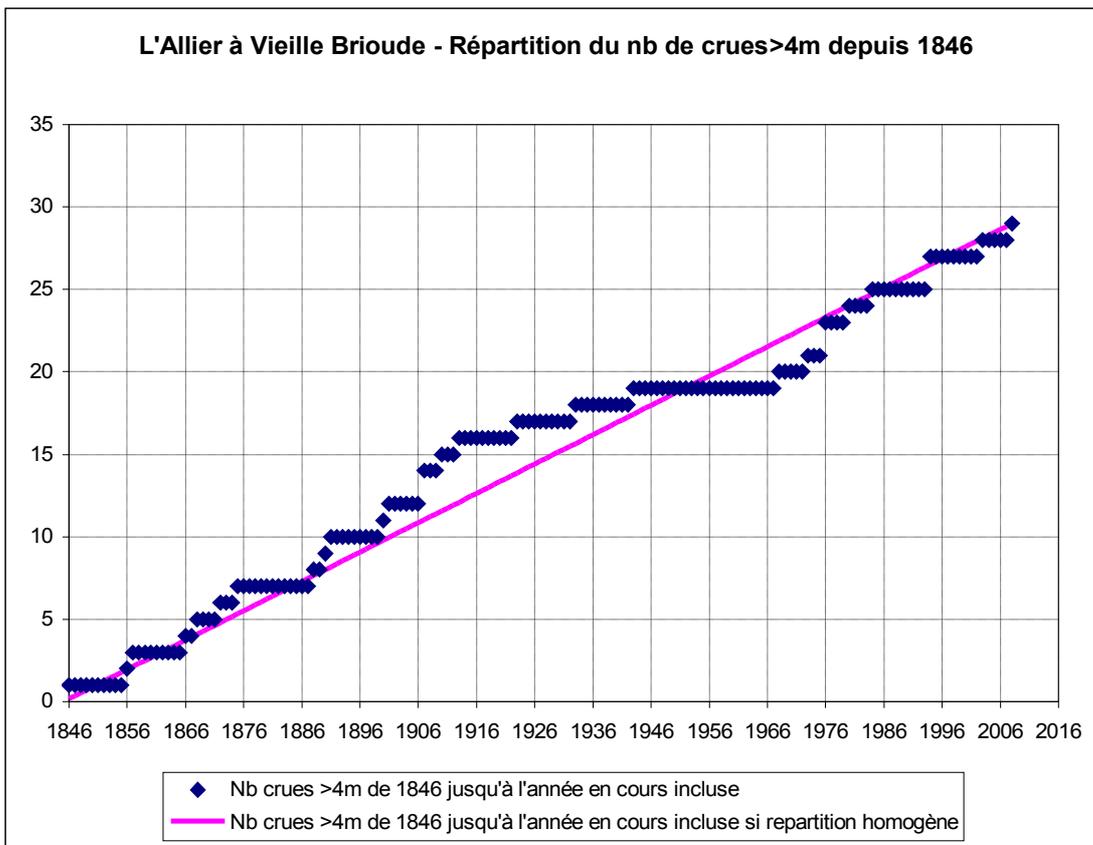


Illustration 19: Répartition du nombre de crues >4m à Vieille Brioude entre 1846 et 2009

Par conséquent, nous retiendrons un **seuil d'exhaustivité de 4 m ou 637 m3/s pour les crues historiques de l'Allier à Vieille-Brioude de la période 1846-2008.**

Annexe B- Exemples de tables de valeurs des coefficients de Strickler issues de la littérature

Les deux tableaux présentés sont cités par le guide technique « Hydraulique des cours d'eau – La théorie et sa mise en pratique », édité par le Centre d'Études techniques Maritimes et Fluviales (CETMEF) en Août 2001.

Le premier tableau présenté ci-dessous (cité en page 14 du guide) est issu des études du grand hydrologue Maurice Pradé (1893-1972) :

<i>Catégories selon les études de Pradé</i>	<i>K (Strickler)</i>
Petits cours d'eau de montagne à fond très irrégulier, largeur de l'ordre de 10 à 30 mètres	23 à 26
Cours d'eau de montagnes larges de 30 à 50 mètres, avec pentes supérieures à 0,002 et fond de gros graviers (par exemple 10 à 20 centimètres de diamètre pour beaucoup d'entre eux)	27 à 29
Rivières de largeur comparable ou supérieure, à pente comprise entre 0,0008 et 0,002, avec fond de graviers dont le diamètre extrême en général ne dépasse pas 10 centimètres (Rhin à Bâle)	30 à 33
Pente comprise entre 0,0006 et 0,0008, graviers de 4 à 8 centimètres (Rhône à Lyon)	34 à 37
Même pente mais cailloux plus petits (Rhône à la porte de Scex avant le Léman)	38 à 40
Pente inférieure à 0,0006 et supérieure à 0,00025, cailloux très petits ou sable (Danube à Vienne)	41 à 42
Cours d'eau peu turbulents, avec pentes de 0,00012 à 0,00025, fond de sable et de boue (Seine, Saône, Rhin inférieur)	43 à 45
Très gros cours d'eau à très faible pente (moins de 0,00012) et fond très lisse (Volga, Danube hongrois, Mississippi inférieur)	46 à 50

Le deuxième tableau présenté ci-après (cité page 53 du guide) provient du Centre d'Études du Machinisme Agricole, du Génie Rural, des Eaux et des Forêts (CEMA-GREF) devenu aujourd'hui l'Institut national de Recherche en Sciences et technologies pour l'Environnement et l'Agriculture (IRSTEA) :

Rivières naturelles	K Strickler
<i>Pour les cours d'eau à section suffisamment constante voir le tableau suivant</i>	
Petit cours d'eau de largeur inférieure à 30 m	
<i>cours d'eau de plaine</i>	
net, droit, niveau d'eau élevé, peu de variation de la section mouillée	30 à 40
idem, mais pierres et mauvaises herbes plus nombreuses	30
net, sinueux avec seuils et mouillées	25
idem, mais avec pierres et mauvaises herbes	20
idem, mais niveau bas	20
cours paresseux, mauvaises herbes, trous d'eau profonds	15
nombreuses mauvaises herbes et nombreux trous d'eau	10
pentés et fond irrégulier, nombreuses souches, arbres et buissons, arbres tombés dans la rivière	5 à 7
<i>cours d'eau de montagne</i>	
(Pas de végétation dans le lit, rives escarpées, arbres et broussailles pour les niveaux élevés)	25
fond en gravier et cailloux, peu de gros galets	20
fond avec gros graviers	
Plaines d'inondation	
pâturages sous broussailles	30 à 35
zones cultivées, absences de récoltes	35
zones cultivées, récoltes sur pied	25 à 30
broussailles dispersées et mauvaises herbes ou broussailles et quelques arbres en hiver	20
quelques arbres et broussailles en été; broussaille moyenne ou dense en hiver	15
broussaille moyenne ou dense en été	10
souches d'arbres sans rejet	25
souches d'arbres avec rejets durs	16
forêt de hautes futaies; peu de broussailles	10
forêt de hautes futaies; peu de broussailles avec niveau d'eau atteignant les branches	8
souches denses	7
Grands cours d'eau largeur maximale supérieure à 30 m	
<i>(La valeur de K est supérieure à celle des petits cours d'eau d'allure analogue car les rives offrent moins de résistance efficace)</i>	
section régulière sans broussailles	25 à 40
section irrégulière et rugueuse	10 à 25

Ressources, territoires, habitats et logement
Énergies et climat Développement durable
Prévention des risques Infrastructures, transports et mer

**Présent
pour
l'avenir**

Centre d'Études Techniques de Lyon
25 avenue François Mitterrand
Case n°1
69674 BRON cedex
Tél. : 04 72 14 30 30
Fax : 04 72 14 30 35
CETE-Lyon@developpement-durable.gouv.fr

Département Laboratoire de Clermont-Ferrand
ZI du Brézet
8 à 10, rue Bernard-Palissy
63 017 CLERMONT-FERRAND CEDEX 2
Tél. : +33 (0)4 73 42 10 10
Fax : +33 (0)4 73 42 10 01
dpcf.cete-lyon@developpement-durable.gouv.fr

www.cete-lyon.developpement-durable.gouv.fr