



HAL
open science

Étude hydrologique et hydraulique du bassin versant de l'Ardèche : réalisation des cartes des zones inondables

Anass Bergui

► **To cite this version:**

Anass Bergui. Étude hydrologique et hydraulique du bassin versant de l'Ardèche : réalisation des cartes des zones inondables. Sciences de l'ingénieur [physics]. 2012. dumas-01654929

HAL Id: dumas-01654929

<https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-01654929>

Submitted on 31 Jan 2018

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

MEMOIRE DE FIN D'ETUDE

Sujet :

ETUDE HYDROLOGIQUE ET HYDRAULIQUE DU BASSIN VERSANT DE L'ARDECHE

Réalisation des cartes des zones inondables



Présenté par

Monsieur BERGUI Anass

Pour obtenir le titre de :

**INGENIEUR DE L'ECOLE NATIONALE DU GENIE DE L'EAU ET DE
L'ENVIRONNEMENT DE STRASBOURG**

Option : **Gestion Durable de l'Eau en Milieu Urbain**

Promotion : **FES**

Juillet 2012

Remerciement

Je tiens en premier lieu à remercier mon maître de stage Jean Claude CARRE pour m'avoir accueilli avec tant d'enthousiasme et de sympathie. Malgré son emploi du temps chargé, il a toujours pris le temps de m'aider et de répondre à mes questions. J'ai beaucoup appris à ses côtés.

Mes remerciements vont également à l'ensemble des personnes de l'équipe Modélisation Hydraulique et Logiciels d'ARTELIA Eau et Environnement pour leurs conseils, leur accueil chaleureux et pour la bonne ambiance. Je souhaite remercier plus particulièrement Julien MEUNIER, Jean Noël ARNAUD, Thomas GODFROY, Caroline GIRARD et Nicolas ROUILLON pour leur sympathie, leur disponibilité et notamment leur aide pour la maîtrise des logiciels.

Je tiens aussi à remercier Pierre ETIENNE pour la visite du laboratoire des modèles physiques d'ARTELIA pour sa disponibilité et ses explications précieuses.

Je remercie également toutes et tous les jeunes d'ARTELIA pour l'ambiance agréable même en dehors des heures de travail. Merci à Pierre CLOTEAU, Adlane REBAI et aux deux stagiaires Thomas et Laura.

Je suis reconnaissant à Pascal FINAUD-GUYOT, mon tuteur de stage, qui a su répondre à toutes mes interrogations, pour mon accompagnement sur toute la durée de stage ainsi que pour ses remarques pertinentes.

Je remercie particulièrement mes parents, Mohamed et Aziza, mes deux frères Mimi et Yassine et mes deux sœurs Meryem et Chaymae. Qu'ils trouvent dans ce travail le fruit de tous les efforts qu'ils ont fournis pour la réussite de ma carrière.

Merci également à tous les collègues, en France ou au Maroc, pour leur soutien moral. Un grand merci aux amis de Zawia : Abdelilah, Ali, les 2 Amine, Hamza, Hassan, Hicham, les 2 Mohamed, Khalid, Mehdi et Youssef.

Enfin, je remercie tous celles et ceux qui ont contribué de proche ou de loin, - ingénieurs, techniciens, amis ou famille- à la réussite de cette expérience.

Résumé

L'objectif de cette étude est l'élaboration des cartes des zones inondables du bassin versant de l'Ardèche. Elle a été demandée par la Direction Départementale des Territoires de l'Ardèche dans le cadre d'une actualisation des plans de préventions des risques des inondations des différentes communes.

Dans un premier temps, une analyse hydrologique du bassin a été effectuée pour définir ses caractéristiques et calculer les débits des crues pour différentes périodes de retour. Des données sur les crues historiques ont été récupérées et intégrées dans cette analyse. Le calcul des débits des quantiles a été réalisé par la méthode SPEED, une méthode probabiliste développée par SOGREAH/ARTELIA et adaptée au cas des grands bassins versants.

Une reconnaissance du terrain et un traitement des données topographiques ont facilité la définition des paramètres de modélisation hydraulique. Dans la phase hydraulique, la hauteur d'eau et la vitesse d'écoulement dans la rivière de l'Ardèche ont été calculées à l'aide d'une simulation unidimensionnelle sous HEC Ras en considérant un débit centennial comme débit de référence. Ces deux paramètres ont été aussi calculés moyennant une simulation pseudo 2D par CARIMA dans la zone de confluence de l'Ardèche avec la Beaume et le Chassezac. CARIMA est un logiciel développé aussi par SOGREAH et utilisé pour modéliser les écoulements fluviaux dans les zones inondables.

Les résultats de la simulation ont été cartographiés à l'aide de MapInfo. Les cartes de l'aléa inondations ont été déduites du croisement des cartes des hauteurs d'eau et des champs de vitesses en distinguant trois classes : aléa faible, moyen et fort. Une analyse des enjeux et estimation des dommages sont prévues dans une tranche future de l'étude.

Abstract

The goal of this study is the elaboration of flood hazard maps of the watershed of the Ardeche. It was requested by the Ardeche departmental territories as part of an updating of plans preventing floods risks of different municipalities.

At a first step, hydrological analysis was conducted to identify the watershed characteristics and to calculate flood flows for different return periods. Historical floods data was recovered and included in this analysis. Rainfall-runoff transformation was produced by the method SPEED, a probabilistic method developed by SOGREAH and adapted to the case of large watersheds.

A field reconnaissance and topographic data processing have facilitated the definition of hydraulic modeling parameters. During the hydraulic phase, the water level and flow velocity in the Ardeche River were calculated using a one-dimensional simulation in HEC Ras considering Centennial as reference flow. These two parameters were also calculated through a pseudo-2D simulation by CARIMA in the confluence area of the Ardeche with these main tributaries: Beaume and Chassezac. CARIMA is also software developed by SOGREAH and used to model river flow in flood areas.

The simulation results were mapped using MapInfo. The flood hazard maps were derived from crossing maps of water depth and velocity fields. There are three classes: low, moderate and high hazard. An analysis of the issues is provided in a future installment of the study.

Sommaire

Remerciement	2
Résumé	3
Abstract	3
Sommaire	4
Liste des annexes	6
Liste des figures	6
Liste des tableaux	7
Liste des acronymes:	7
INTRODUCTION	8
2 Cadre de l'étude	9
2.1 Problématique et Objectifs:	9
2.2 Les inondations en France	10
3 Le bassin versant de l'Ardèche	11
3.1 Situation géographique	11
3.2 Cours d'eau du bassin versant:	12
3.3 Pluviométrie :.....	14
4 L'APPROCHE HISTORIQUE	15
4.1 Contexte et Objectif	15
4.2 Démarche	15
4.3 Résultats	15
4.4 Analyse :	17
4.5 Critiques des données historiques.....	18
4.6 Conclusion :	19
5 ETUDE HYDROLOGIQUE	20
5.1 Objectif :	20
5.2 Problématique:	20
5.3 Méthodologie :	21
5.3.1 Méthode de calcul des pluies et des débits de référence.....	21
5.3.1.1 Méthodes empiriques :.....	21
5.3.1.2 Méthodes pseudo-empiriques :.....	21
5.3.1.3 Hydrogramme unitaire	22
5.3.1.4 Gradex [EDF, 1968]	23

5.3.1.5	Méthode QdF.....	24
5.3.2	Méthode retenue : SPEED.....	25
5.3.2.1	Présentation de la méthode :.....	25
5.3.2.2	Principe de la méthode.....	25
5.4	Calcul :	25
5.4.1	Analyse des pluies	25
5.4.1.1	Résultat	28
5.4.2	Relation pluie débit :	29
5.4.2.1	Résultats	31
5.5	Critiques des résultats	32
5.6	Hydrogrammes de crue	32
5.6.1	Objectif.....	32
5.6.2	Méthodologie.....	33
5.6.3	Calcul :.....	33
5.6.4	Résultat	34
5.7	Conclusion et critique de l'étude hydrologique.....	35
6	L'ÉTUDE HYDRAULIQUE	37
6.1	Objectifs	37
6.2	Méthodologie et calcul	37
6.2.1	Préparation du MNT.....	37
6.2.2	Modélisation	40
6.2.2.1	Avec Hec-Ras.....	40
6.2.2.1.1	Principe	40
6.2.2.1.2	Présentation de HEC Ras (version 4.0 Beta):	40
6.2.2.1.3	Méthodologie :.....	42
6.2.2.2	Avec CARIMA	50
6.2.2.2.1	Problématique et Objectif :.....	50
6.2.2.2.2	Présentation de CARIMA.....	51
6.2.2.2.3	Méthodologie et analyse	52
6.3	Conclusion sur l'étude l'hydraulique	57
7	Cartographie des zones inondables.....	58
7.1	Principe.....	58
7.2	Méthodologie	58
7.2.1	Cartographie des hauteurs d'eau	59
7.2.2	Cartographie des champs de vitesse.....	59
7.2.3	Cartographie de l'aléa inondation.....	59
7.3	Résultats.....	59
7.4	Conclusion	59
CONCLUSION	60	
BIBLIOGRAPHIE.....	61	

Liste des annexes

Annexe 1 Présentation de l'organisme d'accueil	64
Annexe 2 Méthode de l'Hydrogramme unitaire	65
Annexe 3 : Détermination mathématique de la formule SPEED	66
Annexe 4 Localisation des postes pluviométriques sur le bassin de l'Ardèche	68
Annexe 5 Présentation de la méthode SPEED	69
Annexe 6 Liste des stations pluviométriques utilisées	76
Annexe 7 Démonstration d'évaluation du temps de concentration	77
Annexe 8 Géologie de l'Ardèche	78
Annexe 9 Homogénéité du PO sur le bassin de l'Ardèche	79
Annexe 10 Crues historiques de l'Ardèche à Vallon Pont d'Arc et Sauze Saint Martin (Naulet)	80
Annexe 11 Illustration du travail réalisé sur le terrain	82
Annexe 12 Etapes d'introduction de pont du Basse Vernède sous HEC Ras	83
Annexe 13 MNSLE de l'Ardèche	84
Annexe 14 Schéma topologique du modèle CARIMA (Confluence Ardèche – Chassezac – Beaume)	85
Annexe 15 Cartographie des hauteurs d'eau dans la zone de la confluence Ardèche-Beaume-Chassezac	86
Annexe 16 Résultats de la simulation HEC Ras de l'Ardèche Amont Q(100)	88

Liste des figures

Figure 1 Localisation géographique du bassin versant de l'Ardèche	11
Figure 2 Profil en long de l'Ardèche et surface drainée	12
Figure 3 carte des affluents de l'Ardèche	12
Figure 4 Méthodes empiriques et pseudo-empiriques et leur domaine d'utilisation [10]	21
Figure 5 Analyse régionale de la pluviométrie du bassin versant de l'Ardèche	26
Figure 6 Ajustement des pluies des stations d'Alba et Mirabel	27
Figure 7 Corrélation équifréquence de la station de la Borne à Saint Laurent et la station pluvio de Loubaresse	30
Figure 8 hydrogramme standardisés des plus fortes crues de l'Ardèche à Meyras	33
Figure 9 Ajustement des débits réduits du bassin versant de l'Ardèche	35
Figure 10 Point interpolés par l'outil SOGREAH	38
Figure 11 GRID obtenu du semi point traité de la rivière de l'Ardèche	39
Figure 12 Insertion des profils en travers et du coefficient de Strickler sous MapInfo	43
Figure 13 Profil en travers sous HEC-Ras 4.0	45
Figure 14 Crue de l'Ardèche en novembre 2011 à Aubenas	47
Figure 15 Calage du modèle aux laisses de crue du 22 septembre 1992	48
Figure 16 Comparaison du modèle Artelia (HEC Ras) et BRL entre pk=10 et 20 km de l'Ardèche	49
Figure 17 Identification des points de calcul 1D et 2D sous MapInfo	52
Figure 18 Répartition des niveaux d'eau et des échanges dans la zone de confluence	56
Figure 19 Semi de point du MNSLE	58
Figure 20 Averse unitaire et hydrogramme unitaire associé (extrait de Réménieras, 1972)	65
Figure 21 Hydrogrammes liés à des averses non unitaires	65
Figure 22 Graphique type de Gumbel	69
Figure 23 Corrélation équifréquence Pluie-Débit (Ex : Chassezac)	72
Figure 24 Illustration des relations représentées	73
Figure 25 Carte de situation des stations limnimétriques	75

Liste des tableaux

Tableau 1 Occupation du bassin versant de l'Ardèche.....	11
Tableau 2 Fiche signalétique de la rivière Ardèche et de ses principaux affluents : Chassezac et Beaume	13
Tableau 3 Les plus fortes crues de l'Ardèche par ordre décroissants de débit aux 5 stations hydrométriques.....	16
Tableau 4 Les plus fortes crues du Chassezac (ordre décroissant).....	16
Tableau 5 Les plus fortes crues de la rivière la Beaume (ordre décroissant).....	17
Tableau 6 Débits réduits des plus fortes crues historiques du Chassezac	17
Tableau 7 Pluies journalières aux périodes de retour remarquables par station.....	28
Tableau 8 Débit de crue aux différents endroits de la l'Ardèche pour des T=1, 3, 10, 50, 100,200 et 300 ans.....	31
Tableau 9 Temps de concentration aux différentes stations hydrométriques de l'Ardèche	34
Tableau 10 Débit de l'Ardèche le 07/04/2011.....	44
Tableau 11 Calcul de la hauteur d'eau le 07/04/2011	45
Tableau 12 Débit introduit à différentes abscisses de l'Ardèche.....	46
Tableau 13 Résultats de la simulation HEC Ras entre Ard130 et Ard140.....	49
Tableau 14 Classement des aléas selon la hauteur d'eau et la vitesse d'écoulement.....	59

Liste des acronymes:

BV: Bassin Versant

CARIMA: Calcul des Rivières Maillées

CEMAGREF : Centre d'Etude des Machines Agricoles, du Génie Rural, des Eaux et Forêts

DDT: Direction Départementale des Territoires

MNSLE: Modèle Numérique de la Surface Libre de l'Eau

IRSTEA : Institut de Recherche en Sciences et Technologies pour l'Environnement et l'Agriculture

MNT: Modèle Numérique du Terrain

PAPI : Programme d'Action de Prévention des Inondations

PPRI: Plan de Prévention des Risques des Inondations

Q100: Débit de période de retour 100 ans en m³/s

SPEED: Système Probabiliste d'Etude par Éléments Discrets

TC: Temps de concentration

Z.C: Zone de Confluence

INTRODUCTION

D'un linéaire de 120 km, L'Ardèche est une rivière qui prend sa source dans le Vivarais, en forêt de Mazan située sur la commune d'Astet. Après Aubenas et Ruoms, cette rivière reçoit la Beaume et le Chassezac, ses principaux affluents, puis méandre à partir de Vallon-Pont-d'Arc dans ses célèbres gorges jusqu'à la confluence avec le Rhône en amont de Pont-Saint-Esprit. Son bassin versant de 2429 Km² concerne trois départements, l'Ardèche (07), le Gard (30) et la Lozère (48). L'Ardèche compte en plus d'autres affluents secondaires à savoir l'Ibie, la Ligne, le Lignon, la Fontaulière ...

Sur ce bassin, les pluies d'automne engendrent des inondations dévastatrices des cours d'eau. Des centres-bourgs, des zones urbanisées (habitations ou bâtiments à usage économique), des équipements ainsi qu'un grand nombre de campings sont situés majoritairement dans des secteurs fortement exposés aux crues.

Les crues catastrophiques de cette rivière ou de ses affluents ont obligé Les organismes étatiques, notamment la direction départementale du territoire de l'Ardèche, à lancer de nombreuses études pour une meilleure compréhension de ce risque naturel afin de parvenir à envisager les aménagements nécessaires pour le limiter. En décembre 2007, la société « Alp'Géorisque » a réalisé, pour le compte du syndicat de l'Ardèche Claire, une étude de « définition du schéma de gestion de risque des crues et des phénomènes d'inondation » dans le cadre d'une aide à la décision sur l'orientation du SAGE. La Direction Départementale du Territoire de l'Ardèche (DDT), s'est basée sur cette étude pour lancer une autre étude dont l'objectif est l'établissement des cartes des zones inondables dans le bassin versant de l'Ardèche. Ces cartes constitueront un document de base qui permettra la mise en révision des autres Plans de Prévention des Risques des Inondations approuvés sur le secteur d'étude.

Mon stage de fin d'étude consiste à la réalisation de ce travail. Il comportera trois volets principaux ; une analyse historique des crues de l'Ardèche suivie d'une étude hydrologique bien détaillée de son bassin versant avec une estimation plus précise du débit de référence et des débits des quantiles, une modélisation hydraulique de la rivière de l'Ardèche et de ses affluents (modèle unidimensionnel sous HEC Ras) avec un zoom sur les zones à enjeu et les zones de confluences (modèle bidimensionnel sous CARIMA) et la cartographie des champs de vitesse et de la hauteur d'eau pour en déduire les cartes de l'aléa inondation du bassin versant. Il s'agit en effet d'un travail élémentaire qui assurera une meilleure compréhension du fonctionnement hydraulique de ces cours d'eau en général, et dans la zone de confluence des principaux affluents en particulier. Une analyse des enjeux et une estimation des dommages financiers prévisibles en cas de submersion sont prévues après le stage.

2 Cadre de l'étude

2.1 Problématique et Objectifs:

Les crues de l'Ardèche et de ses affluents, particulièrement la Beume et le Chassezac, menacent de nombreuses zones à enjeux à savoir des centres-bourgs, des parties urbanisées à usage d'habitation et à usage économique des communes, des équipements publics ou non du public et de nombreux campings qui, pour un grand nombre d'entre eux sont situés en totalité dans des secteurs fortement exposés.

Suite à la crue du 22 septembre 1992 au cours de laquelle ont été déplorés plusieurs morts et qui avait causé de nombreux dégâts matériels et conscient de ce danger, l'état français, dans le cadre de sa politique de prévention des risques visant à maîtriser l'urbanisation en zone inondable mise en place dès 1992 à travers un ensemble de textes législatifs [1] (citons en particuliers la loi sur l'eau de janvier 1992, la circulaire de janvier 1994, la loi de février 1995 relative au renforcement de la protection de l'environnement, la loi de juillet 2003 relative à la prévention des risques technologiques et naturels...) a souhaité avoir une meilleure connaissance de ce phénomène sur l'ensemble du bassin versant de la rivière Ardèche. Ceci en exploitant les 10 ans de plus des années d'observation disponible sur le bassin et en utilisant le travail très détaillé de la thèse de Robert Naulet sur les crues historiques pour mieux cerner les débits de projets. La Direction Départementale des Territoires (DDT) de l'Ardèche a donc commandé à ARTELIA, une étude pour l'analyse hydrologique et hydraulique de ce bassin.

Il s'en suit que toutes les communes (à l'exception de St Just d'Ardèche et de St Marcel d'Ardèche situées à la confluence du Rhône et de l'Ardèche), couvertes par des anciennes études hydrauliques, sont dotées d'un Plan de Prévention des Risques d'inondation approuvé. Ce travail servira de document de base pour l'actualisation de ces PPRI.

Quatre objectifs sont assignés à cette étude :

- Obtenir des données hydrologiques fiables et cohérentes sur l'ensemble du bassin versant
- Connaître le fonctionnement hydraulique des principaux secteurs de confluence (Beume et Chassezac) et des principales zones d'expansion de crues.
- Aboutir à la caractérisation des aléas qui constitue un préalable indispensable à la mise en révision de la majorité des PPRI approuvés sur le secteur étudié
- Avoir une bonne connaissance des enjeux soumis au phénomène d'inondation et évaluer le coût des dommages occasionnés par la crue de référence.

Le présent rapport répondra à ces quatre objectifs excepté l'évaluation des dommages qui sera traité ultérieurement dans une tranche conditionnelle.

2.2 Les inondations en France

Le mot inondation désigne la submersion par des eaux douces ou salées d'une zone habituellement hors eau. Cette submersion peut être lente ou brutale et se répète de manière régulière ou plus anecdotique [2]. C'est un **risque majeur**¹ dû au débordement d'un cours d'eau, à une submersion marine, à une remontée de la nappe ou au ruissellement.

[4] Les inondations constituent plus de 50% des catastrophes naturelles dans le monde et causent la mort d'environ 20 000 personnes par an en moyenne. Parmi les inondations les plus désastreuses on cite celles de la Corée du nord en juillet 2006 (54 700 morts), le raz-de-marée en Thaïlande, Sri Lanka, Malaisie, l'Inde et l'Indonésie faisant 226 408 morts en décembre 2004...

En France, les inondations sont le premier risque naturel dans le pays. Les zones inondables touchent 16 134 communes des 36 000 de la république (45% des communes). Elles s'étendent sur une superficie de 27 000 Km² et concernent 5.1 millions de français [3]. Dans les cinquante dernières années, les dommages des inondations ont remarquablement augmentés à cause du développement urbain dans les zones inondables. Les inondations des années 1999, 2002 et 2003 sont les plus mémorables. Elles ont causé plus de 60 victimes et des dégâts matériels estimés à 3.2 millions d'euros.

Afin de limiter ces risques, l'état français s'est engagé dans une politique de prévention. Le 2 février 1995, la loi Barnier a lancé la création des plans de préventions des risques naturels (PPRN), un document principal de planifications des risques naturels en France qui réglemente l'utilisation des sols soumis au danger. Plus précisément, on trouve les plans de préventions contre les risques des inondations élaborés par les services de l'état, qui définissent les mesures applicables de construction en zone vulnérable. C'est un document de cartographie des zones inondables qui résulte de la confrontation des cartes d'aléas hydrauliques avec les cartes de vulnérabilité de l'occupation de sol (cartes des enjeux).

Toujours dans cette politique de prévention, le ministère chargé de l'environnement a lancé en 2002 les Programmes d'Actions de Prévention des Inondations (PAPI). L'objectif était de « promouvoir une approche globale de la prévention des risques d'inondations et de mobiliser l'ensemble des acteurs et des outils réglementaires disponibles à l'échelle du bassin versant » [3]. Entre 2003 et 2009, près de 50 PAPI ont été mis en œuvre sur l'ensemble du territoire français.

Ensuite, et après la transposition en droit français de la directive européenne 2007/60/CE du 23 octobre 2007 relative à l'évaluation et la gestion des risques d'inondation, l'état a relancé officiellement l'appel aux projets PAPI le 17 février 2011 [3]. Cette directive a introduit une nouvelle obligation en droit français : réduire les conséquences négatives de tous les types

¹ Risque majeur : menace sur l'Homme ou sur son environnement direct caractérisée par une fréquence de retour et d'énorme gravité ; victimes et dommages des biens et de l'environnement

d'inondations sur la santé et sur l'environnement. Elle a aussi permis d'objectiver la gestion globale du risque inondation à l'échelle nationale et d'identifier les priorités d'action afin de mieux répartir les moyens sur tout le territoire. Même si la directive impose un plan de travail, elle laisse le choix sur les objectifs à atteindre et les moyens à déployer.

3 Le bassin versant de l'Ardèche

3.1 Situation géographique

Le bassin versant de l'Ardèche tel qu'il a été défini par l'arrêté inter-préfectoral du 8 août 2003 couvre une superficie de 2429 km². Il concerne 158 communes réparties sur trois départements - Ardèche, Lozère et Gard – et deux régions - Rhône-Alpes et Languedoc-Roussillon [11]. Le tableau suivant montre le détail de cette répartition :

Régions	Rhône Alpes	Languedoc Roussillon		
Département	Ardèche	Gard	Lozère	Total
Nombre de communes	133	12	13	158
communautés de communes	16	1	2	19
Nombre d'habitants (recensement2004)	95 000	15 500	2 500	113 000
Superficie du bassin versant (km ²)	1977 (81%)	123 (5%)	329 (14%)	2429
district hydrographique	Rhône Méditerranée			

Tableau 1 Occupation du bassin versant de l'Ardèche

La carte suivante montre la situation géographique du département et de la rivière de l'Ardèche et de ses affluents :

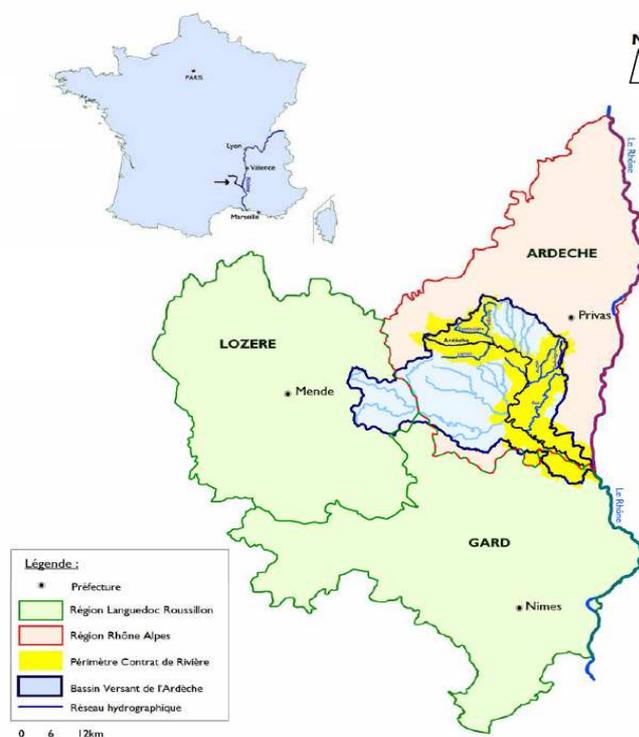


Figure 1 Localisation géographique du bassin versant de l'Ardèche

3.2 Cours d'eau du bassin versant:

Le bassin versant de l'Ardèche est l'un des bassins les plus denses hydrauliquement de la France. D'une superficie de 2429 km², ce bassin versant a une densité de drainage qui avoisine 1.4km/km². On distingue trois secteurs hydrographiques : Le sous bassin Ardèche, le sous bassin Chassezac et le sous bassin Beaume. La figure 2 illustre la répartition de la surface drainée et le profil en long de ces trois cours d'eau. Ainsi, les caractéristiques de chacun de ces secteurs sont récapitulées dans le tableau 2.

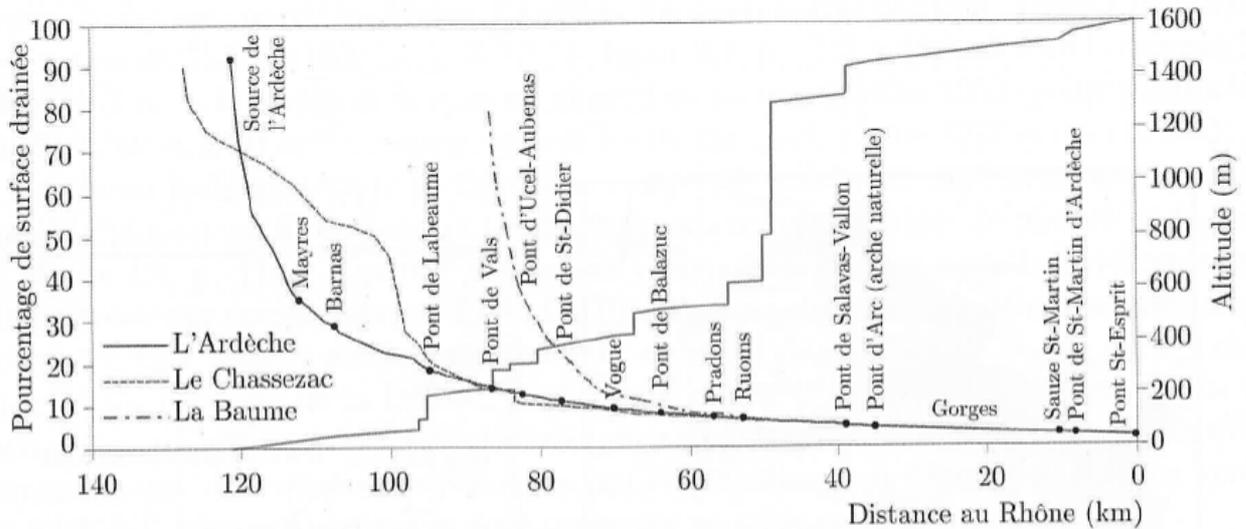


Figure 2 Profil en long de l'Ardèche et surface drainée

Les autres affluents n'ont pas moins d'intérêts. Ils sont aussi concernés par cette étude. On présente leurs caractéristiques dans les encadrés de la page suivante.

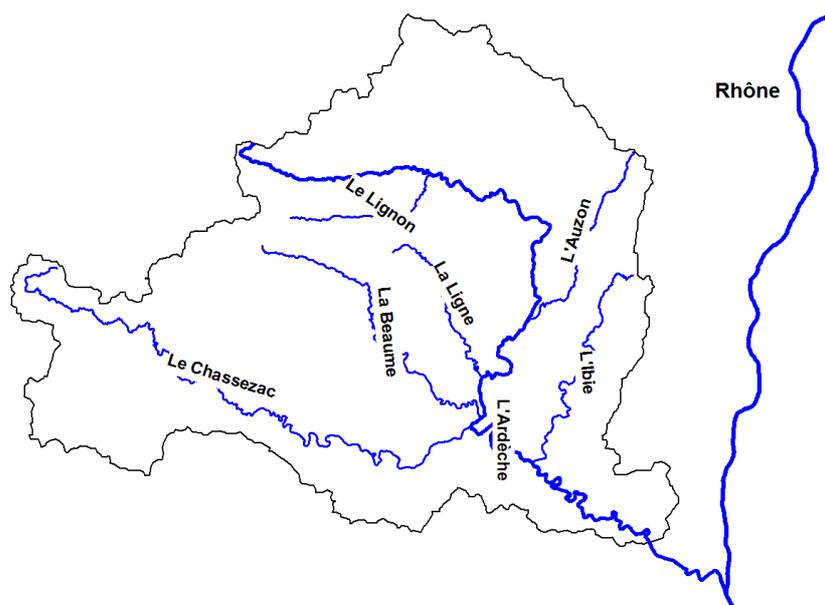


Figure 3 carte des affluents de l'Ardèche

Tableau 2 Fiche signalétique de la rivière Ardèche et de ses principaux affluents : Chassezac et Beaulieu

Cours d'eau	Source	Altitude de la source (m)	Confluence	Linéaire (km)	S drainée (km ²)	Débit moyen (m ³ /s)	point de mesure du débit	Principaux affluents
Ardèche	Flanc Sud-Est du Suchalias	1434	Rhône	120	2429	65	La confluence avec le Rhone	Chassezac, Labeaume, Ligne, Lignon, Auzon, Fontolière et Ibie
Chassezac	Moure de la Gardille	1503	Ardèche	84.6	560	15.3	Chambonas	Altier, Borne
Labeaume	Rochemisole à Loubaresse	1433	Ardèche	43.9	251	7.56	St-Alban-auriolles	Lande

Les fiches des autres affluents qui sont concernés par la présente étude sont les suivantes :

L'Auzon

Source le plateau du Coiron à proximité du village de Freyssenet

Confluence Avec l'Ardèche - Commune de Lanas

Linéaire 26 km

La Fontaulière

Source La Vestide – 1200m - Communes de Montpezat-sous-Bauzon / Le Roux

Confluence Avec l'Ardèche - Communes Pont-de-Labeaume et Meyras

Linéaire 21 km

L'Ibie

Source Serre de roche - 380 m - Communes de Villeneuve de Berg et St Jean le Centenier

Confluence Avec l'Ardèche - Commune de Vallon Pont d'Arc

Linéaire 33 km

Le Lignon

Source Station de la Croix de Bauzon - 1365 m - Commune de La Souche

Confluence Avec l'Ardèche - Communes de Pont-de-Labeaume et Meyras

Linéaire 21 km

La Ligne

Source la commune de Prunet dans le massif du Tanargue à l'ouest d'Aubenas

Confluence Avec l'Ardèche - Communes de Labeaume et Chauzon

Linéaire 23 km

3.3 Pluviométrie :

Le bassin versant de l'Ardèche, comme la plupart des départements du Sud-Est de la France, est affecté d'une part par des masses d'air océaniques arrivant par flux d'ouest occasionnant des pluies relativement régulières et parfois abondantes tout au long de l'année et, d'autre part, par des masses d'air anticycloniques chaudes et humides en provenance de la Méditerranée qui favorisent des épisodes orageux plus intenses et qui se développent principalement à l'automne. Ce bassin connaît aussi des pluies à intensité exceptionnelle dites pluies **cévenoles**. Elles résultent de la descente d'air froid polaire sur le proche océanique qui, en se déplaçant vers l'Est, rentre en collision avec une remontée d'air chaud et humide provenant de méditerranée. Ces deux masses butent sur l'anticyclone centré sur l'Europe Centrale et dont la bordure ouest rase la vallée du Rhône, se retrouvent bloquées et le tout génèrent des orages qui s'étalent de la côte sud jusqu'au versant sud et est du massif central (les Cévennes). Ces orages convectifs amplifient la pluie cévenole et augmentent sa durée. Ils provoquent même des orages et des vents violents, des formations nuageuses fortement pluvio-gènes et des cumuls de précipitations horaires et journaliers particulièrement importants (plusieurs centaines de millimètres par jour). Ces lames d'eau sont à l'origine de crues soudaines et violentes aux conséquences parfois tragiques.

Ces phénomènes surviennent généralement la fin de l'été et au début de l'automne pour des raisons liées à la fois aux températures et à la circulation des masses d'air. A titre d'exemple, trois records de pluie ont été enregistrés sur le département : 792 mm en 21 h à Joyeuse le 9 octobre 1827, 512 mm à Antraigues et 275 mm en moins de 20 h à Vals les Bains les 14 et 15 octobre 1859 et 350 mm en 5 h le 22 septembre 1992. Ainsi, suivant une étude récente de Météo France

[5], 366 aléas pluviométriques forts dépassant 100 mm en 24 heures ont été enregistrés de 1807 à 1994 sur le seul département de l'Ardèche.

Or, la présence de reliefs au Nord-est de la zone d'étude engendre un effet orographique important qui occasionne une augmentation des précipitations sur la partie amont des bassins versants, où les valeurs peuvent dépasser les 2000 mm de moyenne annuelle au niveau des sommets.

L'étagement des altitudes occasionne également des variations climatiques, aussi :

- en Bas-Vivarais, les influences méditerranéennes dominent et se traduisent par des étés chauds et des périodes sèches assez longues.
- dans la zone cévenole, les influences océaniques sont plus marquées. Ce qui se traduit par des précipitations plus abondantes et mieux réparties tout au long de l'année avec un maximum en octobre.
- Les sommets connaissent un climat plus rude avec de nombreuses chutes de neige.

4 L'APPROCHE HISTORIQUE

4.1 Contexte et Objectif

L'étude de la société Alp Géo-risque dans son document d'aide à la décision [13] reproche la non-exploitation des données historiques dans les anciennes études sur l'Ardèche alors que ces données permettent de comparer et d'établir une cohérence entre les résultats. L'objectif de ce chapitre est donc de fouiller dans les archives et essayer de collecter le maximum de données hydrologiques, historiques ou récentes, disponibles sur la zone d'étude afin d'élargir la période d'observation et donc d'avoir l'estimation la plus précise des débits des quantiles. Le travail de thèse de Robert Naulet intitulé « utilisation de l'information des crues historiques pour une prédétermination du risque d'inondation » réalisé en septembre 2002 [17] est un document de base à prendre en compte pour orienter la recherche dans le bon sens. Il s'agit donc d'un travail bibliographique dont le but d'une part est de **collecter toutes les informations possibles sur les crues passées** (repères de crues, laisses de crues, dynamique de propagation, dégâts engendrés...) et d'autre part de définir et **caractériser les événements pluviométriques à l'origine des principales crues historiques**.

4.2 Démarche

Une recherche dans la documentation fournie par la DDT de l'Ardèche, dans les archives d'Artelia (ex Sogreah) ainsi que sur Internet a permis de collecter un certain nombre de documents listant et décrivant les phénomènes majeurs des siècles passés.

Le principal est constitué de la thèse de Robin Naulet mais on a trouvé également des informations nombreuses dans les écrits de Maurice Pardé [19], Maurice Champion [18] ainsi que sur le site de Météo-France [5] et quelques autres sites.

4.3 Résultats

Vu le caractère exhaustif des résultats recueillies, on va se limiter à des tableaux par cours d'eau qui résument les crues historiques les plus fortes ainsi que la source de chaque donnée. Les informations extraites des anciennes d'études seront présentées à titre de comparaison avec les résultats obtenues par la présente étude pour chaque cours d'eau dans le corps de ce rapport.

Pour l'Ardèche, on retient les crues historiques suivantes [16], [17], [18] et [19] :

Tableau 3 Les plus fortes crues de l'Ardèche par ordre décroissants de débit aux 5 stations hydrométriques

Rang	DATE	Pont de Labeaume	Ucel	Aubenas	Vogüe	Vallon
1	22/09/1890	> 7		7 m soit 3500 m ³ /s (Pardé 1925 : 461 km ² puis 1961 : 3000 m ³ /s 470 km ²)		17.3 m Pardé 1925 : 2700 m ³ /s Pardé 1961 : 6200 à 6500 et St-Martin : 5800 à 6000 Naulet : 7550 m ³ /s
2	10/10/1827					16.1 m Pardé 1925 : 7000 m ³ /s Naulet : 6850 m ³ /s
3	03/09/1644					16 m Naulet : 6800 m ³ /s
4	22/10/1878					14.5 m Naulet 5950 m ³ /s
5	28/09/1900					13.8 m Naulet : 5800 m ³ /s
6	09/09/1772					14 m Naulet : 5650 m ³ /s
7	10/09/1857			2200 m ³ /s selon Pardé 1925		13.52 m Naulet : 5350 m ³ /s
8	29/09/1846					13.1 m Naulet : 5100 m ³ /s
10	23/10/1977					12 m Naulet : 4600 m ³ /s
11	16/10/1907					11.5 m Naulet : 4950 m ³ /s
12	08/11/1982	5.8	3.5		6.7	11.2 m
13	15/10/1859					11.27 m Naulet : 4050 m ³ /s
14	21/10/1891			2200 m ³ /s selon Pardé 1925		11.1 m Naulet : 3950 m ³ /s
15	04/10/1958		4		4	Naulet : 3850 m ³ /s

Les crues retenues pour le Chassezac :

Rang	DATE	Chassezac	Source
1	22/09/1890	9 m (3200 aux Vans selon avec un bassin de 557 km ²)	Pardé 1925
		2500 m ³ /s avec un bassin de 505 km ²	Pardé 1961
		3000 m ³ /s ?	DDE de l'Ardèche
2	21/09/1980	2700 m ³ /s à Malarce	PPRI Les Vans
		3000 m ³ /s au barrage de Malarce	EDF
3	30/09/1958	8m soit 2000 m ³ /s au pont de Thinette (Malarce)	revue Géo Morphologie n°1/2006
4	08/10/1878	8 m aux Vans	revue Géo Morphologie n°1/2006
4	16/10/1907	8 m aux Vans soit 2360 m ³ /s	Pardé 1925
6	10/10/1827	7.54 m aux Vans	revue Géo Morphologie n°1/2006
7	02/11/1899	7.50 m aux Vans	revue Géo Morphologie n°1/2006
8	28/09/1900	6.50 m aux Vans	revue Géo Morphologie n°1/2006
9	22/09/1992	1900 m ³ /s à Malarce	revue Géo Morphologie n°1/2006
		6.31 m soit 2300 m ³ /s au pont de Gravières	
10	10/11/1976	1850 m ³ /s à Gravières	revue Géo Morphologie n°1/2006

Tableau 4 Les plus fortes crues du Chassezac (ordre décroissant)

Enfin, pour la Beume :

Rang	DATE	Beume à Rosières/Joyeuse
1	22/10/1878	la plus forte crue connue
2	22/09/1890	7.5m à Rosières et Labeume
3	04/10/1958	6,8 m
4	22/09/1992	6,6 m
5	22/09/2002	6.60 m soit 1900 m3/s
6	30/09/1958	6,5 m

Tableau 5 Les plus fortes crues de la rivière la Beume (ordre décroissant)

4.4 Analyse :

Les données historiques qu'on a pu trouver, se limitent à l'Ardèche et ses deux principaux affluents. Concernant les autres affluents, même s'ils sont traités par d'autres études, on n'a pas trouvé d'informations particulières sur les crues historiques.

Pour pouvoir comparer ces données avec les résultats de l'hydrologie. On les a tout d'abord classées dans un ordre décroissant. Puis, afin de pouvoir intégrer ces données dans l'analyse SPEED, il faut transformer ces débits de crue en 'débits réduits' par la formule suivante :

$$Q_{re} = \frac{12 \cdot Q}{S^{0,75}}$$

Le résultat obtenu pour le Chassezac par exemple est présenté dans le tableau suivant

Tableau 6 Débits réduits des plus fortes crues historiques du Chassezac

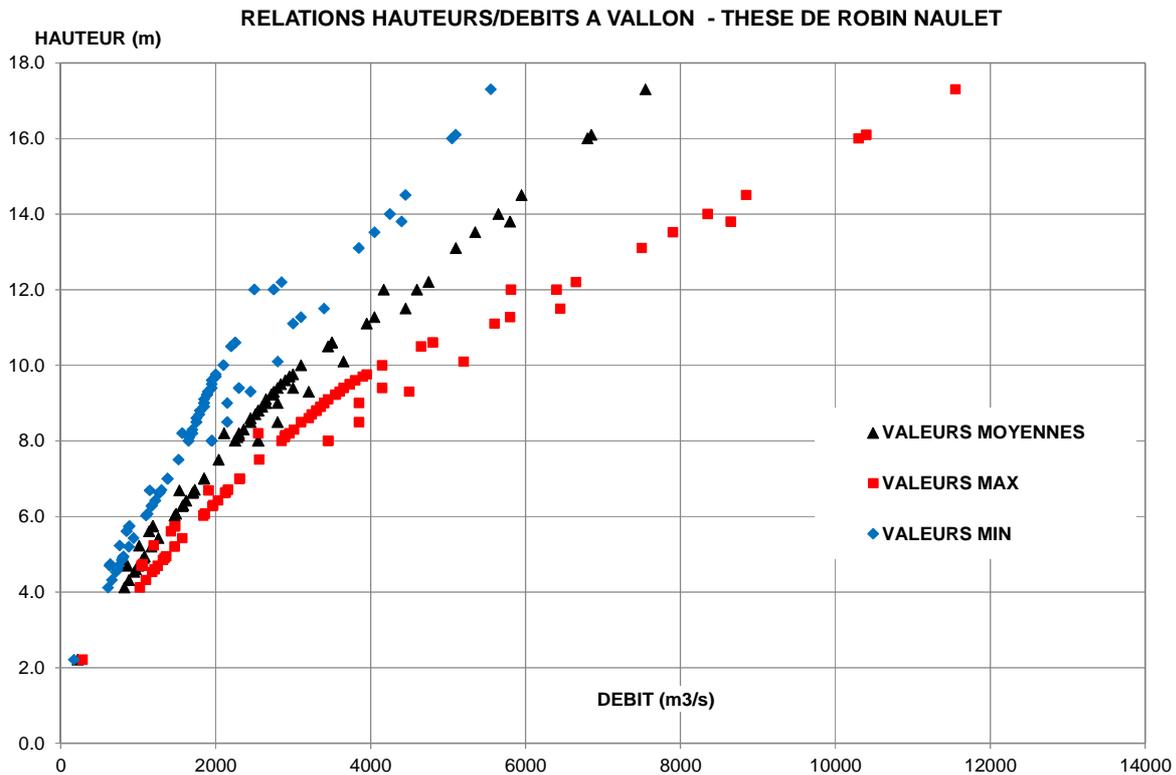
CRUE	Débit	Lieu	S.BV	Qre
10/10/1827	2500	Gravières	500	284
08/10/1878	2750	Les Vans	510	307
22/09/1890	3000	Les Vans	510	335
02/11/1899	2400	Les Vans	510	268
28/09/1900	1800	Les Vans	510	201
16/10/1907	2360	Les Vans	510	264
30/09/1958	2200	Gravières	500	250
10/11/1976	1850	Gravières	500	210
21/09/1980	2820	Gravières	500	320
22/09/1992	1900	Gravières	500	216

Les débits réduits des crues historiques les plus fortes étant connus, on établit maintenant l'ajustement des débits réduits fournies par la Banque hydro et on vérifie par la suite si ces données historiques vérifient ou non cette méthode. L'exploitation de ces informations ne sera concrète qu'après le calcul des débits des quantiles dans la phase hydrologie.

4.5 Critiques des données historiques

On a trouvé que ces valeurs présentent une incertitude notable sur les valeurs des débits. On a établi la relation hauteurs débits pour les valeurs min, moyennes et max. On obtient le graphique suivant :

Graphique 1 Relation hauteur/débit à la station de Vallon pont d'Arc



D'après ce graphique, on constate que plus on se dirige vers des débits plus forts (ce qui est le cas des crues exceptionnelles), plus l'écart de l'intervalle de confiance augmente. Par exemple, pour une hauteur de 14m, on est à un débit de 6000 m³/s plus ou moins 2000 m³/s, soit une erreur relative de plus de 30% ce qui met en question la fiabilité de la considération de ces valeurs pour le calcul des débits de référence.

Par ailleurs, l'information sur les crues historiques n'était pas toujours disponible. C'est le cas dans certaines stations de l'Ardèche et de la Beauce et donc on avait une difficulté d'en déduire des conclusions. Il y a aussi manque de précision dans les données trouvées (4.4). Dans notre cas, seules les crues historiques de l'Ardèche à Vallon pont d'Arc et du Chassezac à Chambonas ont été adoptées.

4.6 Conclusion :

L'analyse historique effectuée sur les crues de l'Ardèche et de ses affluents a permis de constituer deux échantillons des crues les plus importantes dans le passé, un de l'Ardèche même et le deuxième du Chassezac ce qui pourra être exploité dans la phase suivante. Elles donneront (ou non) un appui à la validité des débits des quantiles qui seront calculés par la suite en hydrologie.

Sur le plan **personnel**, grâce à ce travail, j'ai pu me familiariser avec la zone d'étude et intégrer les éléments de base sur l'ensemble des cours d'eau concernés (débit moyen, linéaire, orientation...). Cette analyse bibliographique m'a permis aussi d'avoir un aperçu sur ensemble des études réalisées sur ce bassin versant et m'offrir donc une référence de comparaison de mes résultats.

5 ETUDE HYDROLOGIQUE

5.1 Objectif :

L'étude hydrologique doit permettre de :

- Déterminer les débits caractéristiques (Q_T) de chaque cours d'eau pour différentes périodes de retour, soit : Q_{10} , Q_{50} , Q_{100} et Q exceptionnel pour l'Ardèche, le Chassezac, la Beauce et les autres affluents.
- Comparer les résultats obtenus avec ceux des anciennes études et les débits historiques, et caractériser le débit de référence défini comme le débit centennal (Q_{100}) ou le débit le plus fort connu dans la région s'il dépasse ce débit centennal.
- Etablir les hydrogrammes des plus fortes crues pour chaque cours d'eau.
- Découper en sous bassin versant l'ensemble de la zone d'étude et calculer le temps de concentration T_c pour chaque sous bassin.

5.2 Problématique:

La détermination des débits caractéristiques de crue est en général effectuée en se basant sur des mesures existantes. Ces données limnimétriques sont récupérables sur le site de la banque HYDRO de l'administration. Elles permettent la constitution d'échantillons de valeurs maximales ou de valeurs supérieures à un seuil (échantillons tronqués).

Le bassin qui nous concerne offre la particularité d'être sujet à des crues rapides et violentes dues à des épisodes cévenoles. Ce bassin est équipé de plusieurs stations de débit, tant sur l'Ardèche que sur ses affluents (Ligne, Beauce et Chassezac notamment). Nous analyserons les débits caractéristiques en ces stations.

Il existe deux méthodes d'évaluation des valeurs maximales caractéristiques (de période de retour donnée) à partir d'échantillons :

- Ajuster sur les échantillons des lois statistiques particulières et retenir celle qui « colle » le mieux. C'est la méthode dite « Statistique ». La méthode Akaike-Bayésien² (AIK et BIC) [14] par exemple ;
- Considérer que les échantillons suivent une loi bien particulière et chercher à déterminer les paramètres de cette loi. C'est la méthode dite « Probabiliste »

Le problème qui se pose alors est de savoir si l'extrapolation des ajustements pour des fréquences rares est légitime.

² Méthode qui consiste en le test de différents types d'ajustements et le choix de l'ajustement le plus adéquats en se basant sur les paramètres AIC et BIC minimaux ; deux paramètres permettant de comparer des ajustements en tenant compte du nombre de leurs paramètres

5.3 Méthodologie :

5.3.1 Méthode de calcul des pluies et des débits de référence

Une recherche bibliographique a permis d'identifier plusieurs méthodes dans la littérature pour le calcul des pluies et leur transformation en débits. Voilà un aperçu de ces méthodes.

5.3.1.1 Méthodes empiriques :

Les méthodes empiriques sont des méthodes qui proviennent de l'expérience d'une ou plusieurs personnes. Elles ne possèdent pas d'hypothèses bien définies ni de justification scientifique rigoureuse, car elles ne sont pas fruit de recherches scientifiques. Cependant, leur utilisation dans des bassins versants similaires aux bassins qui les ont générés reste justifiée. La Figure suivante illustre ces méthodes ainsi que leur champ d'application. Les méthodes de type SOCOSE, CRUPEDIX et SOGREAH sont applicables pour des bassins versants naturels mais de taille inférieure à 2000 km² ce qui les écarte de notre cas d'étude (2430 km²).

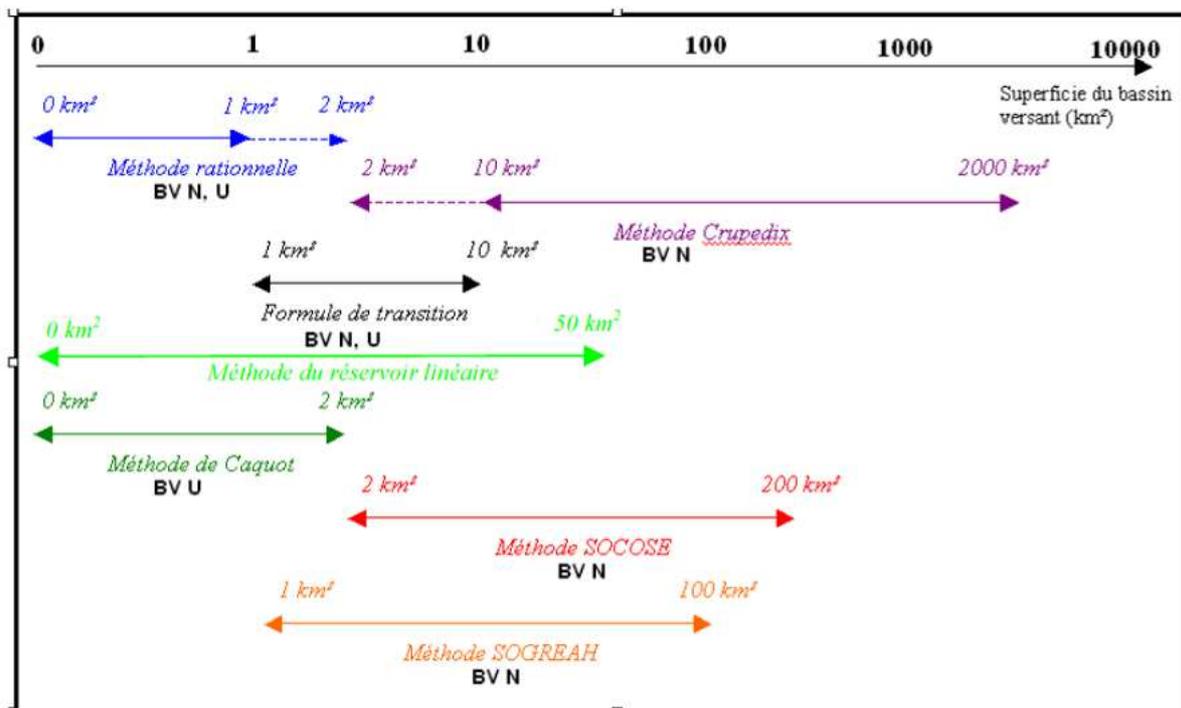


Figure 4 Méthodes empiriques et pseudo-empiriques et leur domaine d'utilisation [10]

5.3.1.2 Méthodes pseudo-empiriques :

[15] Les méthodes pseudo-empiriques se distinguent des modèles empiriques en raison de leur degré de conceptualisation. Elles expriment par exemple souvent les crues en fonction d'une ou plusieurs variables liées aux précipitations maximales pouvant affecter le bassin en question. Parmi ces méthodes, la plus universellement connue est incontestablement la **méthode rationnelle**. Trouvée par l'irlandais Mulvanay (1850), cette méthode est à l'origine de plusieurs autres dérivées appliquées partout dans le monde à titre d'exemple, la

méthode de BRESSAND-GOLOSSOFF qui est utilisées pour les petits bassins versants de l'arc méditerranéen français ou la méthode de Caquot largement utilisée en assainissement urbain en France, notamment pour des bassins versants de moins de 200 ha.

La méthode rationnelle part du principe que le débit de pointe Q_p de l'hydrogramme provoqué par une pluie uniforme de période de retour T donnée est maximal lorsque la durée de cette pluie μ est égale au temps de concentration T_c du bassin versant. C'est à dire lorsque toute la surface du bassin contribue au ruissellement. La méthode suppose l'égalité du temps de retour de la pluie et du débit ainsi calculé dont la relation est la suivante :

$$Q_p(T) = C_r \times I_{\max}(t_c, T) \times A \quad (1)$$

Avec :

$I_{\max}(t_c, T)$: L'intensité moyenne maximale de période de retour T de la pluie de durée μ égale au temps de concentration du bassin versant ($\mu = t_c$)

C_r : Le coefficient de ruissèlement pour la période de retour T

A : La surface du bassin

La méthode du réservoir linéaire est aussi une autre méthode pseudo empirique. Elle présente l'intérêt de s'appliquer jusqu'à des surfaces de 50 km².

5.3.1.3 Hydrogramme unitaire

La théorie de l'hydrogramme unitaire, suggérée par L.K. Sherman (1932), a été la contribution la plus importante au sujet du phénomène de ruissellement de surface [6]. On appelle hydrogramme unitaire, l'hydrogramme correspondant à une averse unitaire de volume unité (équivalente à une lame d'eau de 1 mm uniformément répartie sur tout le bassin).

Il s'agit d'une méthode fondée sur l'hypothèse de la linéarité de la transformation pluie-débit. On applique au bassin versant étudié des averses unitaires, c'est-à-dire des pluies d'une durée dp inférieure au temps de concentration t_c du bassin. On prend généralement dp comprise entre 1/5 et 1/3 de t_c .

L'averse unitaire est choisie de telle sorte qu'elle engendre un volume ruisselé considéré comme volume unitaire, par exemple 1 mm d'eau sur toute la surface du bassin (Annexe 2)

En appliquant l'hypothèse de linéarité, il est facile de calculer les débits engendrés par différentes averses :

- une averse plus longue que l'averse unitaire est considérée comme une succession d'averses unitaires, dont les débits, décalés dans le temps, s'ajoutent ;

- une averse d'intensité différente de celle de l'averse unitaire engendre un hydrogramme dont le rapport à l'hydrogramme unitaire est identique à celui des intensités des pluies (en Annexe 2).

L'hydrogramme unitaire est établi à partir d'observations. On sélectionne les hydrogrammes réels générés par des pluies représentant le mieux l'averse unitaire théorique. On peut alors établir l'hydrogramme unitaire du bassin versant étudié. A défaut de données d'observation, il existe des techniques de constructions d'hydrogrammes unitaires synthétiques, mais dont les résultats restent assez approximatifs.

Cette notion d'hydrogramme unitaire présente des limites. Elle n'est valable que pour des bassins versants de faible étendue puisque les pluies doivent être considérées comme homogènes sur le bassin versant. En outre, elle ne prend en compte que les écoulements en surface et s'applique plutôt dans le cas des réseaux d'assainissements urbains, notamment le séparatif (HYSTEM) [6]. Une autre critique possible porte sur l'unicité de l'hydrogramme unitaire. En effet, le temps de concentration varie avec la nature du sol et avec l'état de la végétation.

5.3.1.4 Gradex [EDF, 1968]

Les pluies sont mieux connues, plus faciles à mesurer : leur distribution spatiale est un peu mieux appréhendée que les débits. Très tôt les hydrologues ont donc cherché à développer des modèles de transformation pluie-débit qui visent à reproduire la génération d'une crue à partir de la pluie [7].

La méthode du Gradex a été proposée à la fin des années 1960 par Pierre Guillot et Daniel Duband (EDF) pour la détermination des crues extrêmes. Le principe de la méthode est très simple, ce qui explique son large succès et sa popularité. En effet, le principe de la méthode est qu'à partir du moment où le bassin versant est saturé, tout supplément de pluie ruisselle intégralement. L'ajustement des débits maximum de crue prend alors une pente (le Gradex) directement liée à celle de l'ajustement des pluies.

Plus explicitement :

- la plupart des pluies maximales annuelles sont distribuées selon une loi exponentielle ou une loi de Gumbel. Ainsi deux pluies extrêmes P1 et P2 de période de retour respective T1 et T2 vérifient la relation:

$$P_2 - P_1 = G_p \ln(T_2/T_1) \quad (2)$$

avec $G_p > 0$ un coefficient exprimé en mm et appelé le Gradex des pluies,

- l'infiltration dans le sol diminue au cours du temps du fait de la saturation progressive du sol. Lorsque le sol est saturé, toute l'eau qui continue de précipiter ruisselle au sol. Cette eau ruisselée participe directement au volume de crue,

- Lorsque le sol est saturé, tout surcroît de pluie pendant une durée égale au temps de concentration t_c se transforme intégralement en un surcroît de débit sur une durée égale à t_c (à 10-20 % près).

De ces observations, on admet l'hypothèse du Gradex : la courbe intensité-fréquence des pluies de durée T_c est parallèle à la courbe intensité fréquence du débit. On peut donc estimer le Gradex des débits grâce à la formule suivante :

$$G_q = S * \frac{G_p}{3.6 * T_c} \quad (3)$$

Où S est la superficie du bassin versant.

En considérant que la période de retour pour laquelle on observe la saturation du sol est $T=10$ ans, on aboutit à une approximation dite du Gradex de la loi intensité-fréquence pour les débits :

$$Q = Q_{10} + G_q * \ln\left(\frac{T}{10}\right) \quad (4)$$

Avec Q_{10} le débit décennal.

La limite d'utilisation de la méthode Gradex figure dans la difficulté de savoir pour quelle période de retour la saturation intervient. La méthode opte pour une pluie de période de retour de 10ans car c'est le résultat obtenu pour des cas test. Cependant, on a pu constater qu'elle peut être très variable selon l'état préalable du sol et l'endroit considéré.

Cette méthode a été traitée plus en détail car elle fait la base de la méthode SPEED qui sera adoptée.

5.3.1.5 Méthode QdF

[10] Elle a été développée par M. Prudhomme, Galéa et Javelle au Cemagref (IRSTEA) de Lyon. Il s'agit de la modélisation synthétique qui s'appuie sur la connaissance globale du régime hydrologique d'un bassin versant, sans chercher à connaître analytiquement les processus détaillés qui le caractérisent. Elle permet de donner une relation intensité-fréquence pour le débit en fonction du débit décennal, de la superficie du bassin versant, du Gradex des pluies, et du type de réponse du bassin versant. L'étude des hydrogrammes de crue s'effectue en les caractérisant par des débits moyens ou bien systématiquement dépassés sur des durées variables. Chaque hydrogramme est valable pour une période de retour T donnée, d'où le nom QdF.

Ces méthodes n'ont pas été testées dans le cadre de ce travail, étant donné la limite de leur champ d'application et le temps imparti à ce volet de l'étude hydrologique.

5.3.2 Méthode retenue : SPEED

5.3.2.1 Présentation de la méthode :

Le travail de l'analyse de l'historique des crues sur l'Ardèche a permis de conclure que les études existantes présentent une grande disparité quant à l'estimation des débits de crue, ceci étant lié à la multitude des méthodes utilisées et aux particularités du bassin versant de l'Ardèche.

Il s'agira donc de réaliser une analyse hydrologique qui tienne compte de ces particularités, qui s'appuie sur une méthode éprouvée et qui recoupe les résultats avec d'une part, les données historiques et, d'autre part, avec les études récentes sur ce bassin connu mondialement pour ses fortes crues.

ARTELIA (Ex Sogreah), étant l'un des bureaux d'études leader dans l'aménagement des rivières et du risque des inondations, a développé il y a 20 ans une méthode de prédétermination des pluies et des crues extrêmes en France et qui se base sur la méthode du Gradex dite **Méthode SPEED** (Système Probabiliste d'Etude par Evènements Discrets). Cette méthode prendra la particularité climatique et géomorphologique du bassin en compte et permettra de mieux cerner l'intervalle de confiance sur les débits de différentes périodes de retour. Mise au point par SOGREAH, elle a été validée en France par de nombreuses études ainsi qu'à l'étranger où elle a été largement appliquée

5.3.2.2 Principe de la méthode

La méthode SPEED est fondée d'une part sur une **analyse** particulière et **régionale des pluies** et, d'autre part, sur la **relation probabiliste** mise en évidence par SOGREAH **entre pluie et débit de crue**. Cette méthode est détaillée en [Annexe 5](#).

Remarque importante :

Vu la grande taille du bassin versant, et afin d'éviter la répétition, on va se limiter dans ce rapport à l'étude hydrologique et hydraulique de la rivière Ardèche seule sachant qu'il suffit de suivre les mêmes étapes pour l'étude des autres affluents.

5.4 Calcul :

5.4.1 Analyse des pluies

Les données des différentes stations pluviométriques du bassin ont été récupérées du site de météo France puis traitées avec des outils développés par SOGREAH puis sous Excel.

L'analyse des pluies journalières maximales annuelles sur les 48 postes pluviométriques (Annexe 4) sur et aux alentours du bassin versant de l'Ardèche a conduit à la [Figure 5](#) qui appelle les remarques suivantes :

Pluie journalière max annuelle (mm)

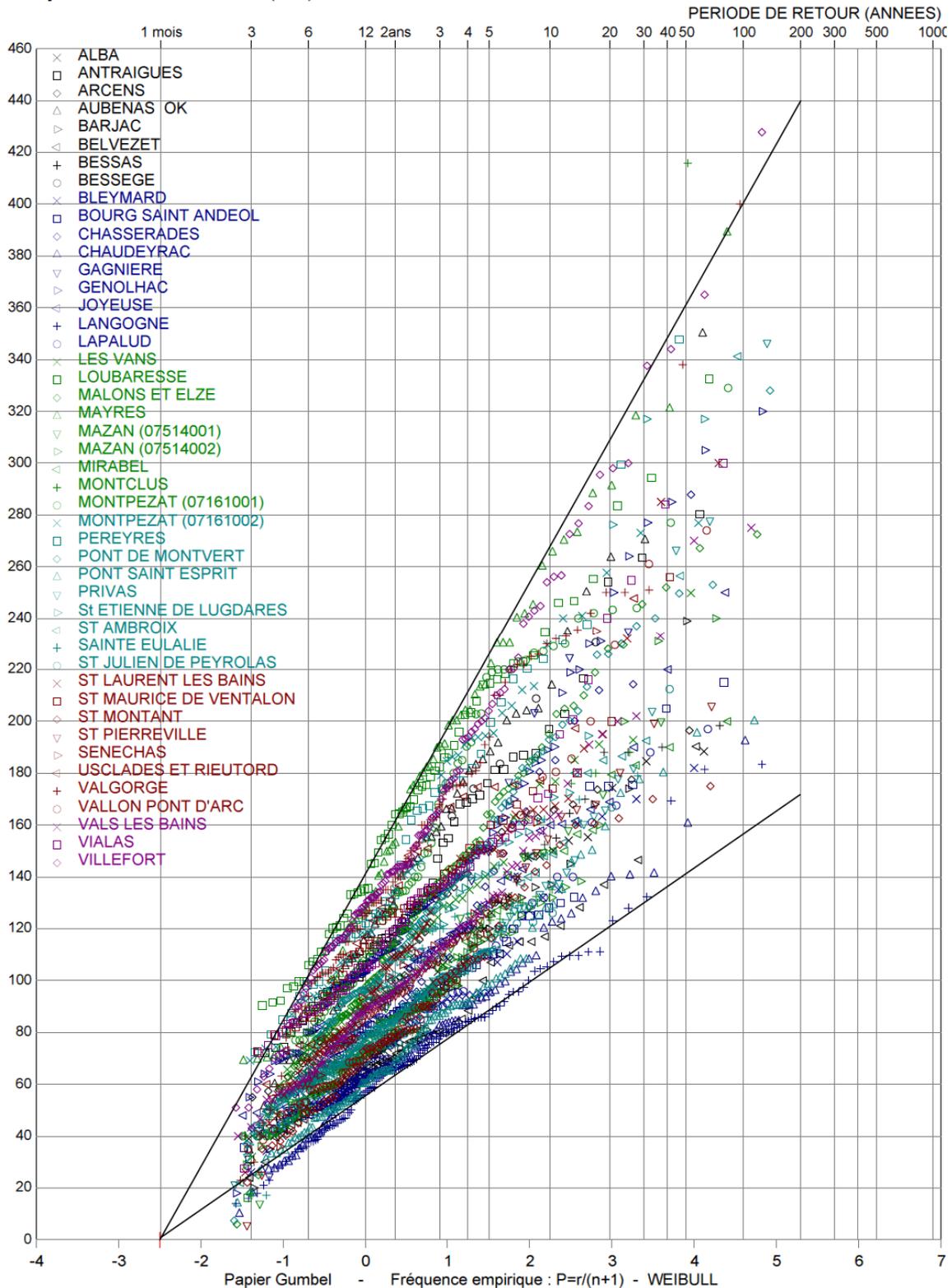


Figure 5 Analyse régionale de la pluviométrie du bassin versant de l'Ardèche

On retrouve le pivot de -2.5, valeur communément trouvée sur la partie Sud-Est de la France relativement aux phénomènes liés à des flux d'air chaud et humide provenant de la Méditerranée et donnant des pluies pouvant être très intenses. Cependant, un ajustement

par une droite passant par le pivot réalisé station par station a permis de détecter un pivot de -3.3 pour quelques stations

Les valeurs maximales s'observent à Valgorge, Loubarès et Mayres du fait que les flux atmosphériques remontent les vallées et viennent butter sur les reliefs amont.

Nous avons également pu mettre en évidence que des cassures existaient sur de nombreux ajustements (32 ajustements de 48). Ces cassures sont liées aux phénomènes de goutte froide, masse d'air froid qui stagne et sur laquelle le flux d'air chaud et humide vient butter et qui, en jouant le rôle du relief, permet de générer des pluies presque aussi intenses que sur les reliefs. On observe cela en particulier sur la moitié aval du bassin versant de l'Ardèche.

On va se limiter à la présentation de l'ajustement obtenu pour deux stations (Alba et Mirabel) à cause de l'abondance des données. On a choisi ces deux stations parce qu'elles illustrent bien le phénomène de cassure et le pivot de -3.3 et -2.5. La

Figure 6 présente l'ajustement obtenu :

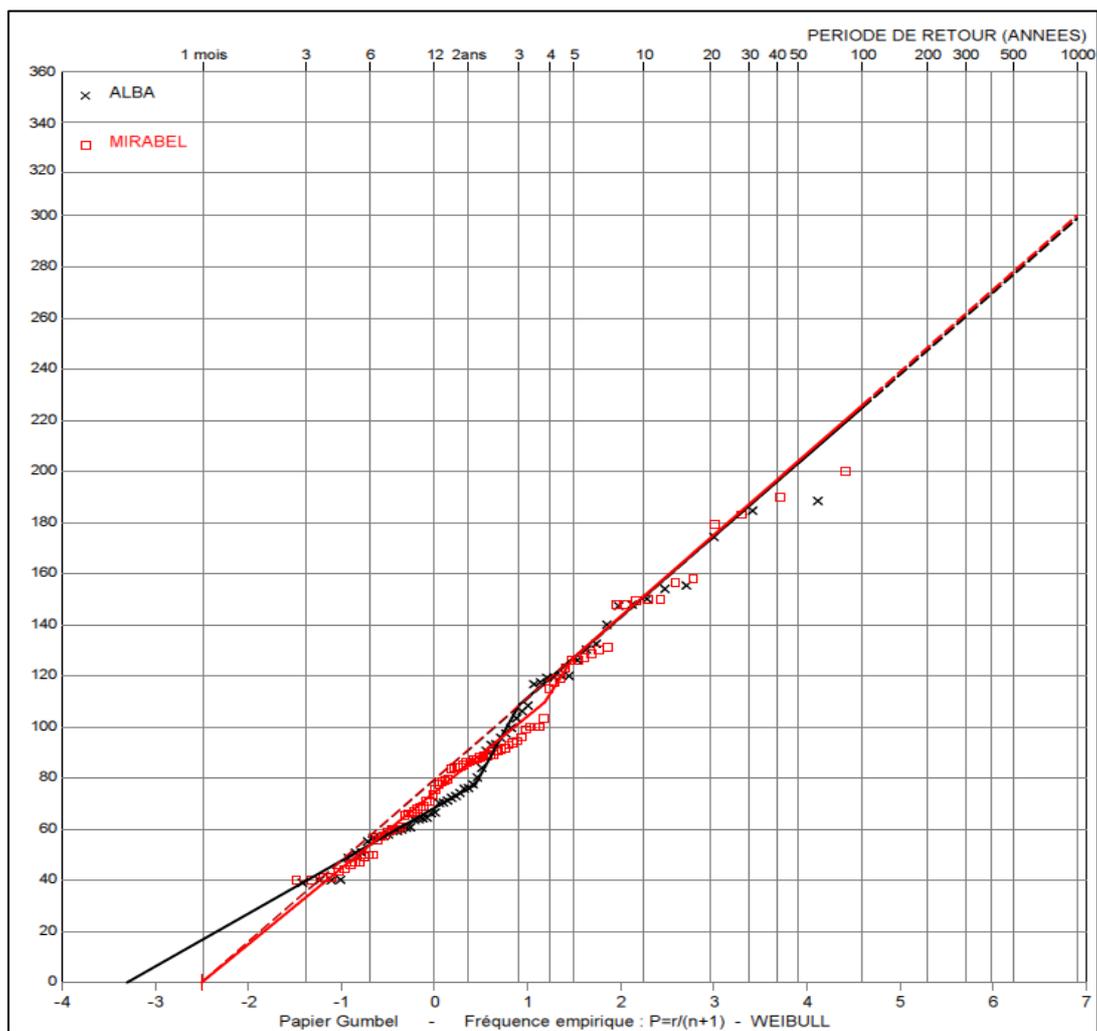


Figure 6 Ajustement des pluies des stations d'Alba et Mirabel

- Station d'Alba

On constate que pour des phénomènes courants, cette station présente un pivot de -3.3 caractéristique des flux océaniques (jusqu'à 2 ans de période de retour).

Pour des phénomènes plus rares, on retrouve le pivot de -2.5 caractéristique des flux de Sud qui peuvent être très importants dans cette zone. La valeur de pluie journalière centennale rejoint celle des stations alentour (Mirabel et Saint Montant) : elle est estimée à 225 mm.

- Station de Mirabel

Les points s'ajustent nettement sur un pivot de -2.5. Il apparaît une possibilité de cassure qui est délicate à positionner et de toute façon très peu marquée. On s'appuie donc sur l'ajustement des pluies à la station d'Alba pour lever l'ambiguïté sur l'extrapolation comme le montre la

Figure 6.

5.4.1.1 Résultat

L'ajustement, étant fait sur chaque station, on en déduit les pluies max journalières pour des périodes de retour de 5,10, 50, 100 et 1000 ans

Tableau 7 Pluies journalières aux périodes de retour remarquables par station

CODE	STATION PLUVIO	Nb ans	5 ans	10 ans	50 ans	100 ans	1000 ans
07005	ALBA	61	127	151	203	226	300
07011	ANTRAIQUES	58	181	214	288	320	423
07012	ARCENS	51	144	171	230	255	338
07019	AUBENAS	62	192	228	307	340	451
48014	BAGNOLS-LES-BAINS	137	80	104	157	176	227
30029	BARJAC	49	123	158	213	236	313
48023	BELVEZET	56	103	123	160	176	227
07033	BESSAS	74	125	158	213	236	313
30037	BESSEGES	16	175	208	280	311	412
48027	BLEYMARD	54	109	143	193	214	283
07042	BOURG-ST-ANDEOL	78	112	129	203	226	300
48040	CHASSERADES	52	130	186	251	278	369
48045	CHAUDEYRAC	101	96	121	163	181	240
30120	GAGNIERES	24	154	209	280	310	410
30130	GENOLHAC	124	152	212	286	330	437
07110	JOYEUSE	80	132	157	236	272	360
48080	LANGOGNE	124	89	106	163	181	238
84064	LAPALUD	64	114	142	192	211	273
07334	LES VANS	52	145	172	232	257	341
07144	LOUBARESSE	65	214	254	343	380	503
30153	MALONS-ET-ELZE	117	162	193	260	288	382
07153	MAYRES	81	223	264	356	395	524
07154	MAZAN-L ABBAYE 1	36	131	156	210	233	309
07154	MAZAN-L'ABBAYE 2	70	116	138	225	250	332
07159	MIRABEL	82	127	151	204	226	299
30175	MONTCLUS	50	115	137	218	242	320
07161	MONTPEZAT 1	82	186	220	297	329	437
07161	MONTPEZAT 2	57	193	229	308	342	453
07173	PEREYRES	45	201	238	321	356	472
48116	PONT-DE-MONTVERT	137	155	194	262	291	385
30202	PONT-ST-ESPRIT	113	98	139	188	208	275
07186	PRIVAS	132	113	143	257	294	390

30316	SENECHAS	16	143	182	270	330	437
30227	ST-AMBROIX	93	120	158	222	246	326
07235	STE-EULALIE	27	139	165	223	247	328
07232	ST-ETIENNE-DE-LUGDARES	61	147	174	313	347	460
30273	ST-JULIEN-DE-PEYROLAS	40	117	139	187	207	275
07262	ST-LAURENT-LES-BAINS	73	146	174	291	322	427
48172	ST-MAURICE-DE-VENTALON	40	158	183	271	330	437
07279	ST-MONTANT	66	126	151	203	225	298
30290	ST-PAULET	9	78	93	125	138	183
07286	ST-PIERREVILLE	67	131	155	209	232	307
07326	USCLADES-ET-RIEUTORD	26	180	214	289	320	424
07329	VALGORGE	95	200	237	353	395	524
07330	VALLON-DU-PONT-D ARC	63	118	182	245	272	360
07331	VALS-LES-BAINS	109	137	162	263	308	424
48194	VIALAS	77	153	177	283	330	437
48198	VILLEFORT	124	206	252	353	391	519

Or, Il faut bien considérer que la position des points associés aux pluies les plus fortes est complètement liée à la taille des échantillons. Ceci implique qu'il existe une relative incertitude sur l'extrapolation aux valeurs des pluies journalières centennales et millennales.

5.4.2 Relation pluie débit :

L'objectif est de calculer les paramètres P_0 (seuil probabiliste de ruissellement) et C_0 (coefficient de proportionnalité des faibles crues aux pluies) et d'en déduire après T_0 la période de retour du phénomène à partir duquel il y a saturation du bassin. Ces paramètres permettront par la suite le calcul du débit réduit et donc du débit pour différentes périodes de retour pour chaque bassin.

On va illustrer ce principe avec un exemple de la station hydrométrique de la Borne à Saint Laurent pour mieux expliquer la méthode.

On a récupéré les Qix de cette station de la banque Hydro. Après, on a extrait les débits max journaliers annuelles et on les a transformés en débit réduit. On obtient donc 39 observations sur les 39 années de mesure. Après, on fait une corrélation équifréquence de ces débits max réduits avec les 39 premières pluies journalières maximales annuelles des stations pluviométriques situées au sein et aux alentours du bassin drainé. En général, la station pluvio offrant la meilleure corrélation est choisie pour représenter la pluviométrie du bassin. Sinon les données de plusieurs stations peuvent être combinées pour évaluer P_0 et C_0 . Dans notre cas, c'est la station de Loubaresse ($R^2 = 0.9475$) qui est représentative du bassin. Ensuite, on trace la courbe de tendance des points et on essaie une droite de régression de pente 1 pour les couples de pluie et débit forts.

Nous analyserons la corrélation des débits de cette station avec les pluies à Loubaresse.

Cette station est située en limite de bassin versant, et au milieu, en termes de flux (provenant du Sud). La période commune entre les deux stations couvre 39 années (1970 à 2008) c'est-à-dire l'ensemble de la période des données de débit.

La corrélation est établie à partir du graphique suivant qui est lié aux échantillons classés par valeurs croissantes (chaque point correspond à des valeurs équifréquentes).

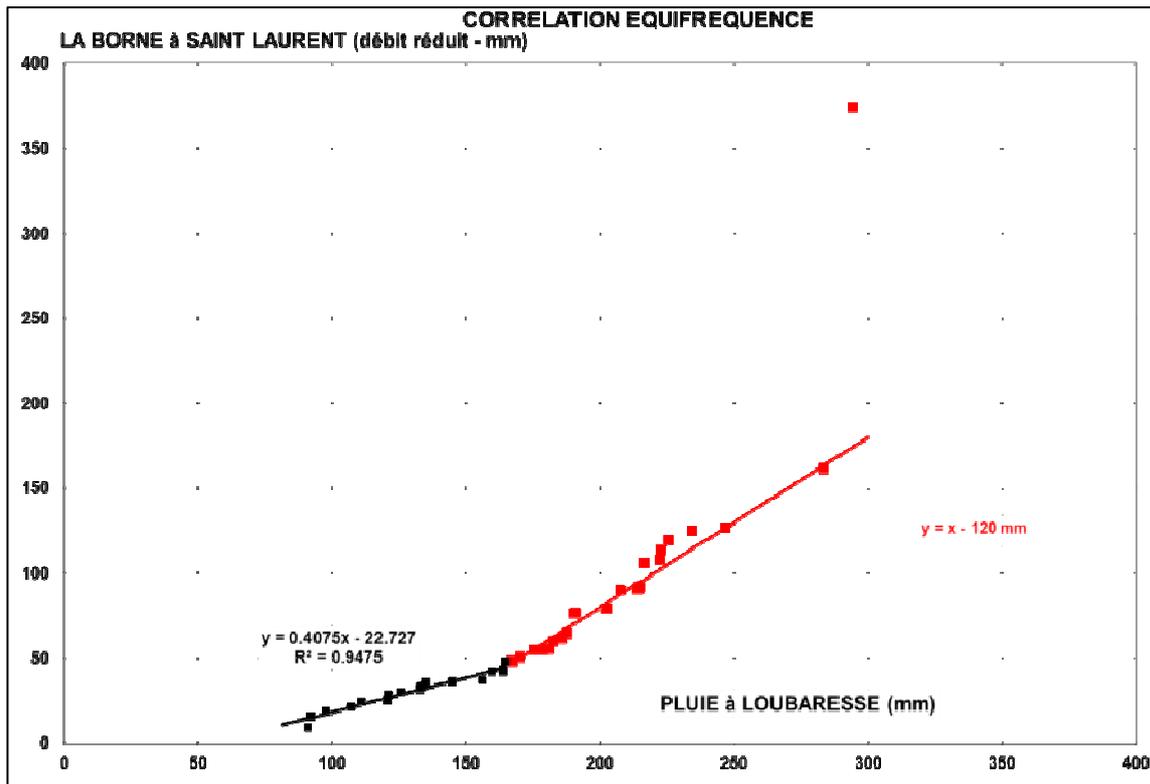


Figure 7 Corrélation équiprobabilité de la station de la Borne à Saint Laurent et la station pluvio de Loubaresse

Ce graphique appelle plusieurs remarques :

On observe la présence de pertes initiales avec un coefficient P_0 initial de 55mm. Pour la première partie de l'ajustement (en noir), le coefficient C_0 est de 0,41. La corrélation est très bonne ($R^2 = 0.95$).

On détecte la présence d'un point de cassure que l'on peut positionner sans ambiguïté ($P_j=165 \text{ mm}$, $Q_{re}=45 \text{ mm}$). La valeur de P_0 déterminée à la cassure est donc de 120mm, ce qui est relativement élevé mais est lié à la présence de pertes initiales importantes.

L'analyse probabiliste menée avec cette station de Loubaresse est satisfaisante d'une part car cette station est idéalement positionnée (au milieu du bassin en termes de flux météorologiques), et d'autre part car on observe de très bonnes corrélations, ce qui confirme que les pluies mesurées à Loubaresse expliquent bien les débits observés à Saint Laurent.

Cette analyse, effectuée pour l'ensemble des stations limnimétriques a permis de cerner les valeurs du paramètre P_0 , le seul paramètre véritablement essentiel pour déterminer les valeurs extrêmes de débit. On trouve que :

Sur les terrains non calcaires, le P_0 aurait une valeur comprise entre 110 et 120 mm.

Sur le bassin de la Ligne, comportant une bonne proportion de marne et de calcaire (> 40%), le P0 ne serait que de 100 mm. La Beaume, également calcaire sur sa partie aval, indiquerait une valeur de P0 comparable. On peut donc penser que les bassins calcaires réduisent un peu la perméabilité en grand des bassins versants.

A Sauze-St-Martin, il n'a pas été possible de mettre en évidence le phénomène de saturation mais on a pu montrer que la valeur minimale du P0 est comprise entre 100 et 120 mm.

Compte tenu des valeurs obtenues pour les sous-bassins versants amont et en tenant compte qu'une partie non négligeable du bassin de l'Ardèche à Sauze-St-Martin est constitué de calcaires et de marnes (environ 35%), nous avons retenu une valeur de 110 mm. Au final, il apparaît que le bassin de l'Ardèche est relativement homogène. L'Annexe 9 montre cette homogénéité (les échantillons des différentes stations s'ajustent sur un seul rang). Ce paramètre étant connu maintenant pour l'ensemble du bassin, on peut donc trouver les débits réduits pour différentes périodes de retour aux différents points du bassin de l'Ardèche. Après, en utilisant la relation (13), on peut trouver le débit.

5.4.2.1 Résultats

Après une redéfinition des sous bassins versants à partir d'un SIG (MapInfo et des scans 25 de l'IGN), Les superficies ont été revérifiées. Nous n'avons pas noté de différence notable entre les superficies annoncées dans la banque Hydro ou dans les autres études.

Les résultats sont synthétisés dans le tableau ci-dessous en considérant les périodes de retour suivantes : 1, 3, 5, 10, 50, 100, 200 et 300 ans.

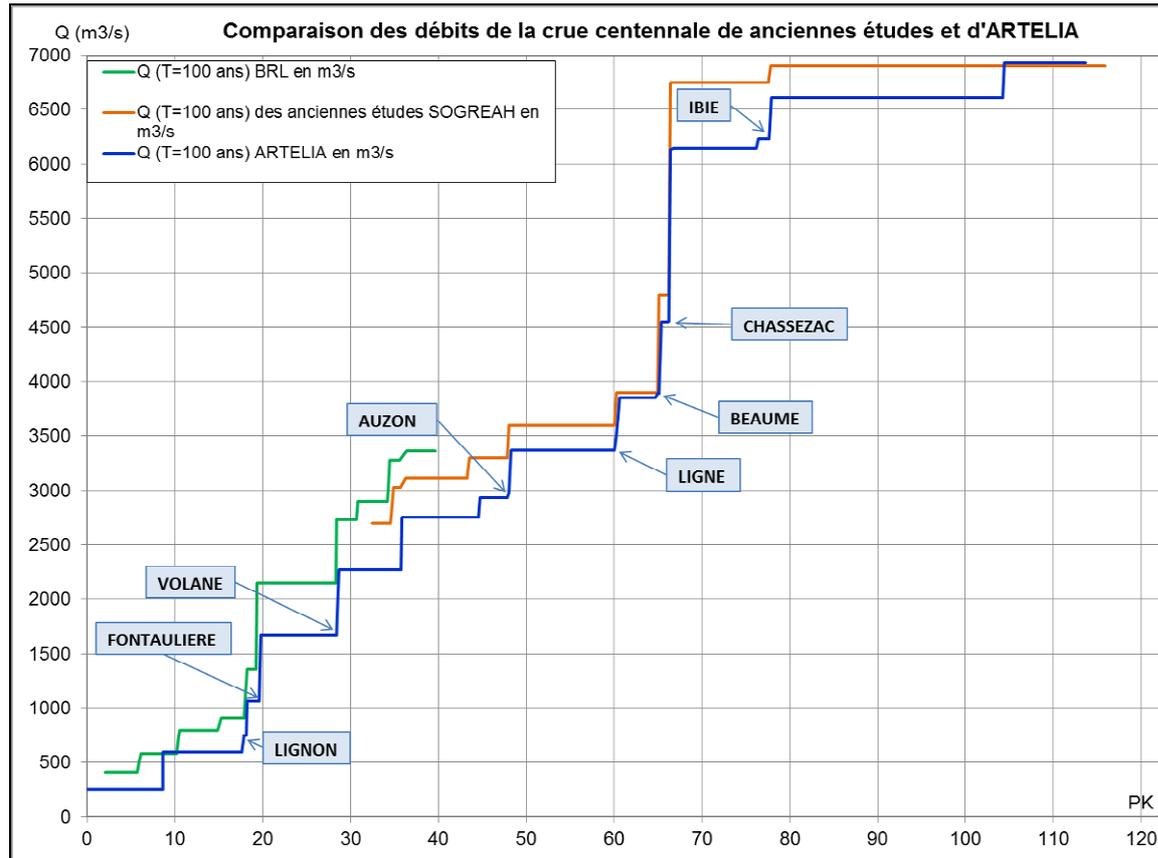
Endroit	S(km ²)	X (km)	Q1	Q3	Q10	Q50	Q100	Q200	Q300
Amont du secteur à modéliser	23	0.0	51	76	117	218	253	288	308
Amont confluence avec le Lignon	99	17.7	152	224	345	644	747	851	911
Aval confluence avec le Lignon	159	18.2	216	319	491	917	1064	1211	1297
Au pont de Labeaume (aval Fontaulière)	291	19.6	340	501	773	1443	1675	1907	2042
A l'aval de la confluence avec la Volane	436	28.4	460	678	1045	1952	2266	2579	2762
L'Ardèche à Vogüé	616	44.7	596	879	1354	2529	2935	3341	3578
Amont confluence avec l'Auzon	628	48.2	606	892	1375	2568	2981	3393	3634
Aval confluence avec l'Auzon	749	48.2	681	1006	1547	2891	3365	3831	4103
Amont confluence avec la Ligne	796	60.2	713	1053	1620	3027	3523	4011	4296
Aval confluence avec la Ligne	914	60.3	777	1148	1760	3300	3851	4387	4699
Amont confluence avec la Beaume	927	64.9	786	1161	1780	3337	3894	4436	4751
Aval confluence avec la Beaume	1177	65.3	909	1350	2058	3880	4551	5187	5557
Amont confluence Chassezac	1178	66.3	910	1351	2060	3883	4555	5192	5562
Aval confluence Chassezac	1918	66.4	1195	1794	2688	5144	6134	7003	7511
A Vallon pont d'Arc	1959	76.3	1214	1823	2731	5226	6232	7115	7630
Aval confluence avec L'ibie	2118	77.6	1288	1933	2896	5541	6608	7545	8091
A Sauze-Saint Martin	2256	104.4	1350	2027	3036	5810	6929	7911	8484

Tableau 8 Débit de crue aux différents endroits de la l'Ardèche pour des T=1, 3, 10, 50, 100,200 et 300

On note un débit de 6930 m³/s pour la crue centennale tout en aval et de 3895 m³/s en amont de la confluence avec la Beaume et le Chassezac pour la Q100 toujours.

5.5 Critiques des résultats

On a effectué une comparaison des Q100, débit de référence considéré, avec celui des anciennes études ; une étude de BRL Ingénierie sur la partie amont de l'Ardèche et 3 études Sogreah sur le reste du linéaire avec notre Q100. Cette comparaison est illustrée dans le graphique suivant :



De ce graphique, nous remarquons que la méthode SPEED permet d'obtenir des débits moins forts notamment sur la partie amont du bassin à l'exception de l'aval où on a presque les mêmes débits.

5.6 Hydrogrammes de crue

5.6.1 Objectif

La forme des hydrogrammes est déterminante pour connaître les volumes des crues ainsi que la durée du maintien d'un débit donné. Elle est aussi étroitement liée au temps de concentration T_c du bassin (égale temps de base pour des pluies extrêmes). En effet, pour les phénomènes rares ce qui est le cas de notre étude, le T_c est une constante qui dépend seulement de la géomorphologie du bassin versant (considéré homogène dans notre cas). L'Annexe 7 montre la stabilisation du T_c sur la durée minimale pour les pluies extrêmes.

5.6.2 Méthodologie

Pour calculer ce Tc, on établit d'abord les hydrogrammes de crue en procédant de la façon suivante :

- Extraire de la banque hydro les hydrogrammes des crues les plus fortes aux stations hydrométriques.
- Réduction de ces hydrogrammes sous la forme d'un débit relatif calculé comme suit :

$$Q_{rel} = \frac{(Q - Q_{base})}{(Q_{max} - Q_{base})} \quad (5)$$

- Superposition des hydrogrammes relatifs de façon à dégager une forme standard aux stations.
- Recherche de la formule théorique la plus appropriée pour déterminer le temps de concentration

5.6.3 Calcul :

En appliquant les étapes mentionnées dans la méthodologie. On obtient des hydrogrammes standards (parfois des limnigrammes quand seules les hauteurs d'eau sont fournies) pour chaque crue pour une station donnée. On illustre ce résultat par la *Figure 8*

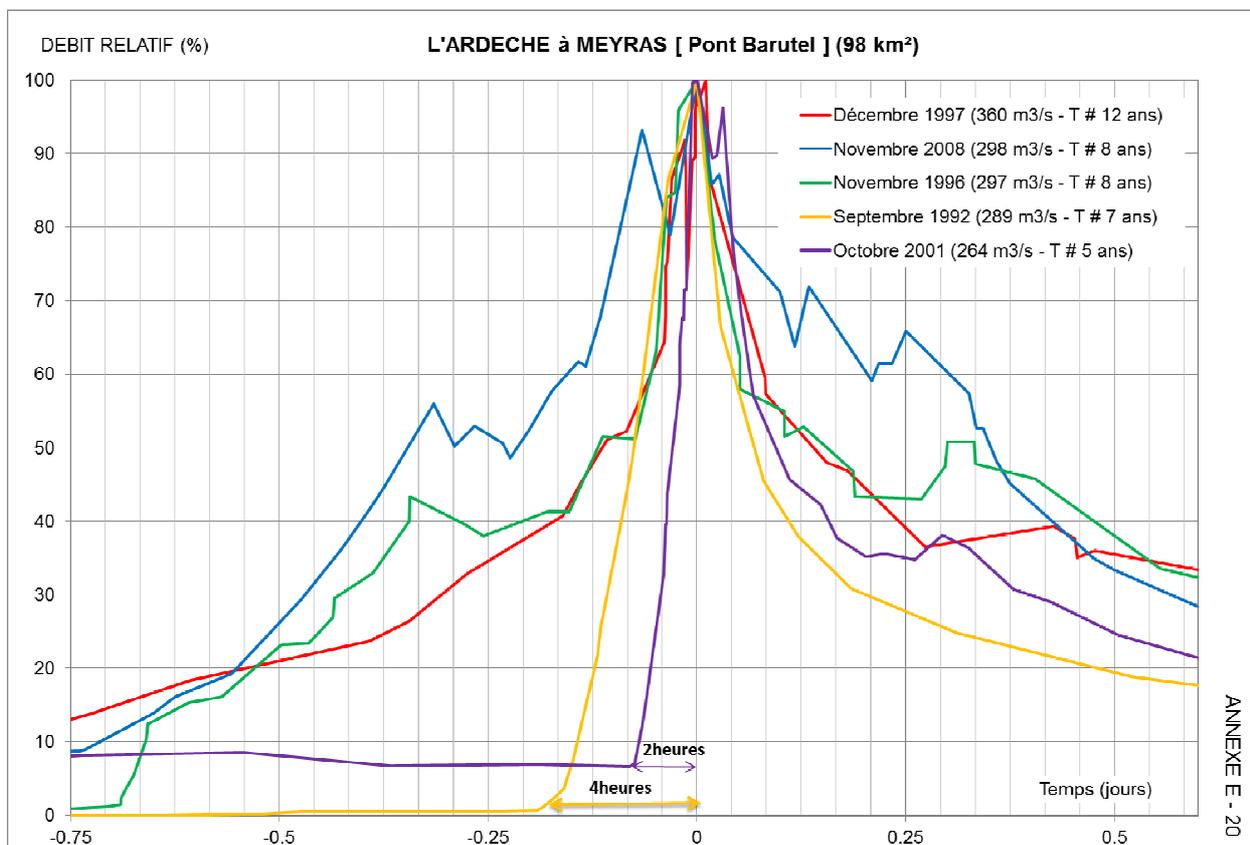


Figure 8 hydrogramme standardisés des plus fortes crues de l'Ardèche à Meyras

On déduit de ce graphique un Tc empirique de 2 à 4 heures. On compare ce Tc avec des temps de concentration calculés à l'aide de formules classiques de la littérature [[9]:

$$\text{Kirpich} \quad Tc = 0.0195 \times \left(\frac{L}{\sqrt{P}} \right)^{0.77}$$

$$\text{Giandotti} \quad Tc = 60 \frac{0.4\sqrt{S} + 0.0015L}{0.8\sqrt{P} \times L}$$

$$\text{Passini} \quad Tc = 0.14 \frac{(S.L)^{0.33}}{\sqrt{P}}$$

Avec :
 Tc = temps de concentration en mn
 S = superficie en ha
 L = longueur du drain principal en m
 P = pente en m/m

Nous avons déterminé ces paramètres physiques à l'aide du Système d'information Géographique MAPINFO [[8].

5.6.4 Résultat

Les résultats comparatifs des stations de l'Ardèche sont les suivants :

Bassin versant	Superficie (km ²)	Code station	Tc empirique (heures)	Temps de concentration (heures)		
				Giandotti	Passini	Kirpich
L'Ardèche à Meyras	98	V5004030	2 à 4h	3.7	8.8	3.1
L'Ardèche à Pont de Labeaume	292	V5004010	3 à 4h	6.0	15.6	3.9
L'Ardèche à Ucel	440	V5014030	6h	7.6	23.3	5.7
L'Ardèche à Vogüé	623	V5014010	2.5 à 4h	9.3	32.8	7.9
L'Ardèche à Vallon Pont d'Arc	2020	V5054010	8 à 10 h	18.1	81.1	14.9
L'Ardèche à Sauze Saint Martin	2260	V5064010	18 h	22.9	114.9	21.5

Tableau 9 Temps de concentration aux différentes stations hydrométriques de l'Ardèche

On constate que c'est la formule de Kirpich qui correspond le mieux aux observations, suivie de près par celle de Giandotti. Ces valeurs de temps de concentration permettront d'avoir une meilleure connaissance sur la concomitance des crues de l'Ardèche et de ses affluents. On parlera de la concomitance des crues lors de la modélisation 2D de la confluence Ardèche-Beaume-Chassezac.

5.7 Conclusion et critique de l'étude hydrologique

Les résultats obtenus en cette phase de l'étude que ce soit pour les pluies, les débits de projet ou les temps de concentration sont globalement satisfaisants (on est au même ordre de grandeur que les autres études). Le travail de l'historique §4.5 permettra de valider ou non ces résultats.

En effet, pour le Chassezac, en considérant que les valeurs des plus fortes crues historiques étaient maximales sur les derniers 400 ans (ce qui permet de se raccorder à l'ajustement), il apparaît nettement que les points se superposent parfaitement sur l'ajustement (le maximum de septembre 1890 aurait cependant une période de retour de 250 ans). Le même résultat a été obtenu pour l'Ardèche en considérant les 47 crues comme les plus fortes sur 370 ans (de 1643 à

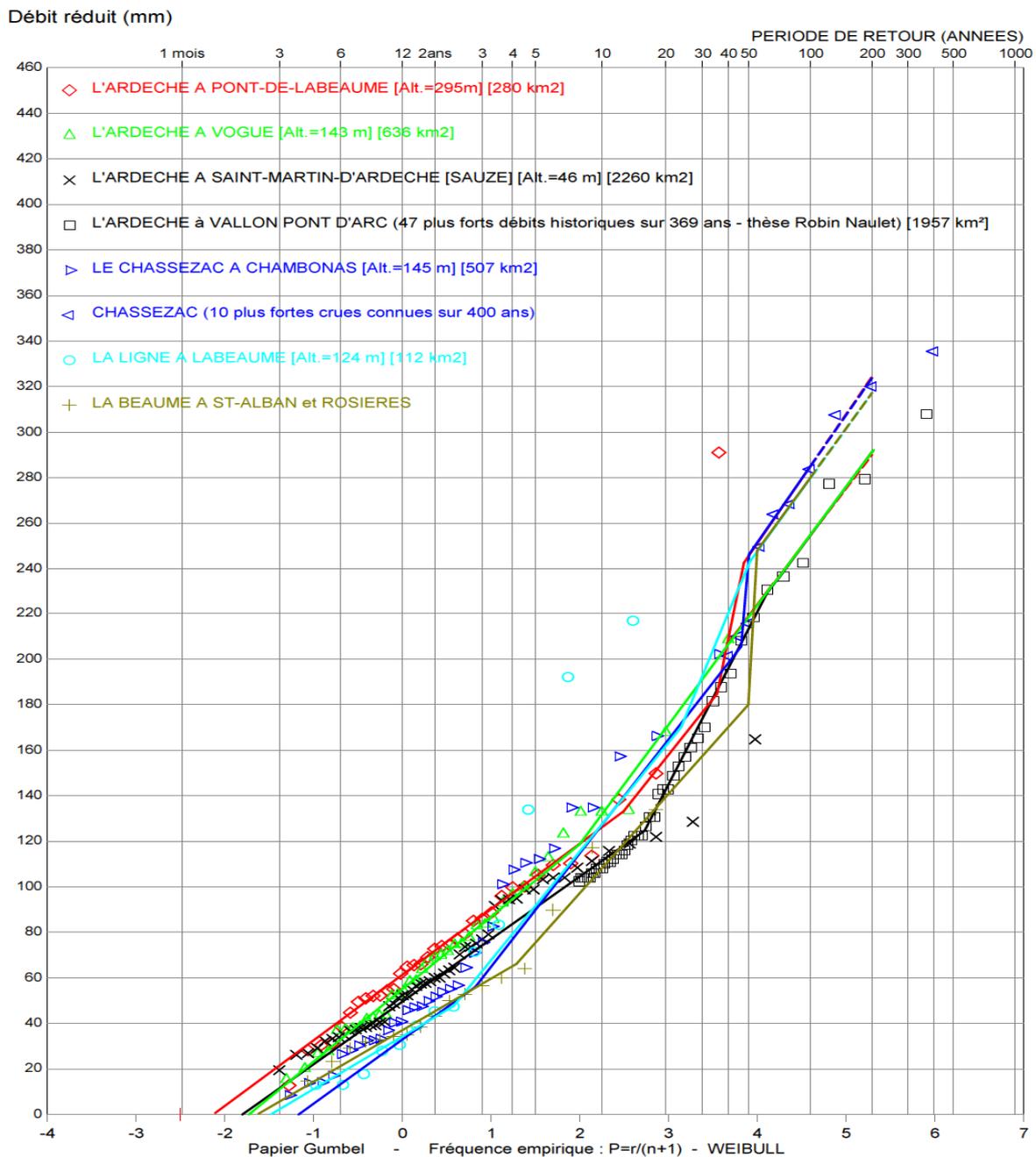


Figure 9 Ajustement des débits réduits du bassin versant de l'Ardèche

2012).

En effet, les valeurs des crues historiques s'ajustent parfaitement avec les ajustements des débits réduits adoptés par SPEED de l'Ardèche à Vallon pont d'Arc et du Chassezac à Chambonas (respectivement la droite noire et la droite bleue). Donc nos résultats sont tout à fait cohérents avec ce qui était trouvé dans l'analyse historique pour ces deux stations. Or, On rappelle aussi l'enveloppe droit des $Q_{\text{réd}}$ pour les différentes stations ce qui montre l'homogénéité du P_0 du bassin.

La méthode SPEED utilisée est une méthode hydrologique récente qui commence à faire sa place dans les études des bassins versants. Elle est plus considérée comme méthode pour décrire les particularités d'une rivière en prenant les paramètres du climat, de la géologie et de la géomorphologie en compte et pas pour faire rentrer chaque rivière dans un moule et obtenir des résultats exacts. Elle est toutefois souvent controversée pour son aspect probabiliste et compliquée à comprendre.

6 L'ÉTUDE HYDRAULIQUE

6.1 Objectifs

Dans cette partie de l'étude, notre objectif est de définir l'enveloppe des zones inondables pour les crues de différentes périodes de retour en exploitant les résultats obtenus en étude hydrologique. En outre, On s'intéresse aux conditions d'écoulements sur tous les secteurs à enjeux et les zones jouant un rôle important dans la propagation des crues (secteurs de confluence, zones d'expansion des crues). Pour ceci, on a prévu une modélisation 1D sous Hec Ras et une modélisation 2D sous CARIMA.

6.2 Méthodologie et calcul

Afin d'atteindre les objectifs du paragraphe précédent, et pour élaborer les cartes des ZI de l'Ardèche, on procédera de la façon suivante :

- Un traitement de la topographie fournie par la DDT et complétée par des levés complémentaires effectués par SINTEGRA, bureau de géomètres experts en co-traitance avec Artelia, permettra la réalisation d'un MNT (modèle numérique de terrain) représentant correctement le relief (tous les remblais et digues en particulier).
- Modélisation hydraulique de la rivière, d'une part de type filaire (1D) avec le logiciel HEC-RAS et, d'autre part, de type maillé (2D) avec un logiciel développé par Sogreah dit CARIMA (Calcul de Rivière Maillé).
- Construction d'un modèle numérique de la surface libre en eau (MNSLE) à partir des résultats de la modélisation.
- Etablissement des cartes des zones inondables du bassin versant par différence entre le MNT et le MNSLE.

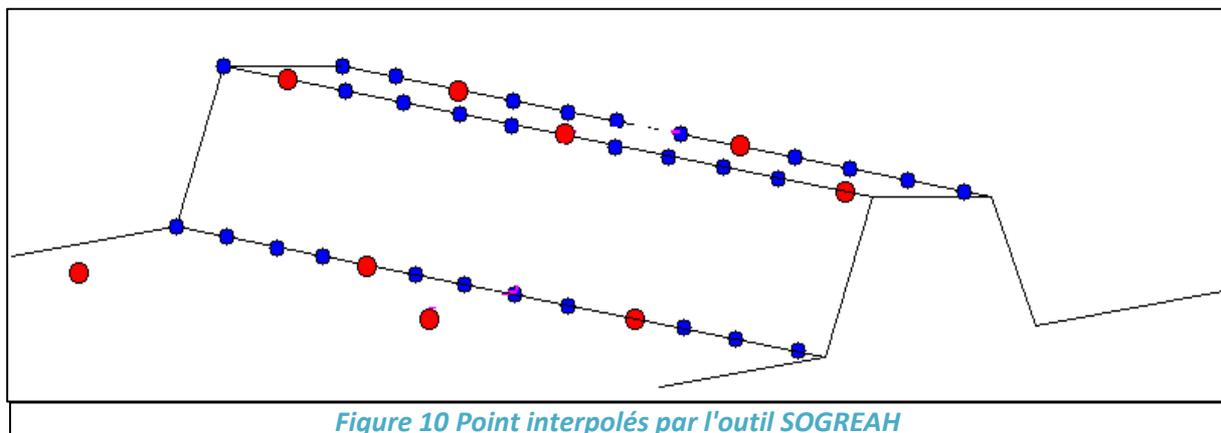
Par ailleurs, une visite du terrain à l'occasion de la première réunion avec le client a permis d'avoir une meilleure connaissance des conditions, de recenser des témoignages et des laisses de crue et d'analyser les secteurs à enjeux qui seront concernés par une modélisation 2D. Une panoplie de photos a été prise avec un appareil photo à GPS pour apprécier les conditions de l'écoulement aux différents endroits lors de la construction des modèles (rugosité, perte de charge singulière, ponts, seuils...). Voir Annexe 11

6.2.1 Préparation du MNT

Le client nous a fourni un rendu (fichiers Autocad) d'une étude topographique qu'il a lancée sur la zone de projet en début d'année 2011. Ce rendu est obtenu par la technique de photogrammétrie (photo-restitution) à partir des photos aériennes prises sur l'Ardèche. Il contient les informations suivantes :

- ✚ Semi de points: 25 points /ha (1 point tous les 20 mètres) ; points 3D;
- ✚ Eléments de rupture de pente avec restitution des talwegs, des pieds et crêtes de talus, et des berges; figurés linéaires 3D;
- ✚ éléments transversaux : ponts, barrages... et longitudinaux : canaux, digues, biefs...
- ✚ éléments courbes de niveau équidistantes de 2 m, avec intercalaires de 1 m en terrain plats,
- ✚ référence cadastrale communales et départementales :
- ✚ voiries, voies SNCF
- ✚ bâtiments et toutes constructions dont la surface est >20m² : figurés surfaciques 3D,
- ✚ campings et végétation

Nous avons extrait l'ensemble des points cotés sous MapInfo. Puis, avec des outils développés par Sogreah sous Mapinfo, et afin de permettre la génération d'une surface représentant finement l'ensemble du relief, nous complétons le semis de points en dessinant des lignes reliant les points de haut de berges, de bas et de haut de talus ou de digue, les remblais etc...on génère après des points le long de ces nouvelles lignes, espacés de quelques mètres et interpolés entre les points reliés par ces lignes et on obtient donc une description du relief qui ne sera plus décrite par des points espacés de 20 m en moyenne mais de 2 à 5 m comme le montre la [Figure 10](#).



Les gros points rouges correspondent aux points du MNT brut. Les petits points bleus seront générés par interpolation entre deux points rouges situés sur la même ligne.

A la fin, on génère le Modèle Numérique du Terrain (le GRID) à l'aide du logiciel Vertical Mapper, associé à MapInfo. C'est une table qui permet d'avoir les coordonnées (x,y,z) en tout point de la zone d'étude

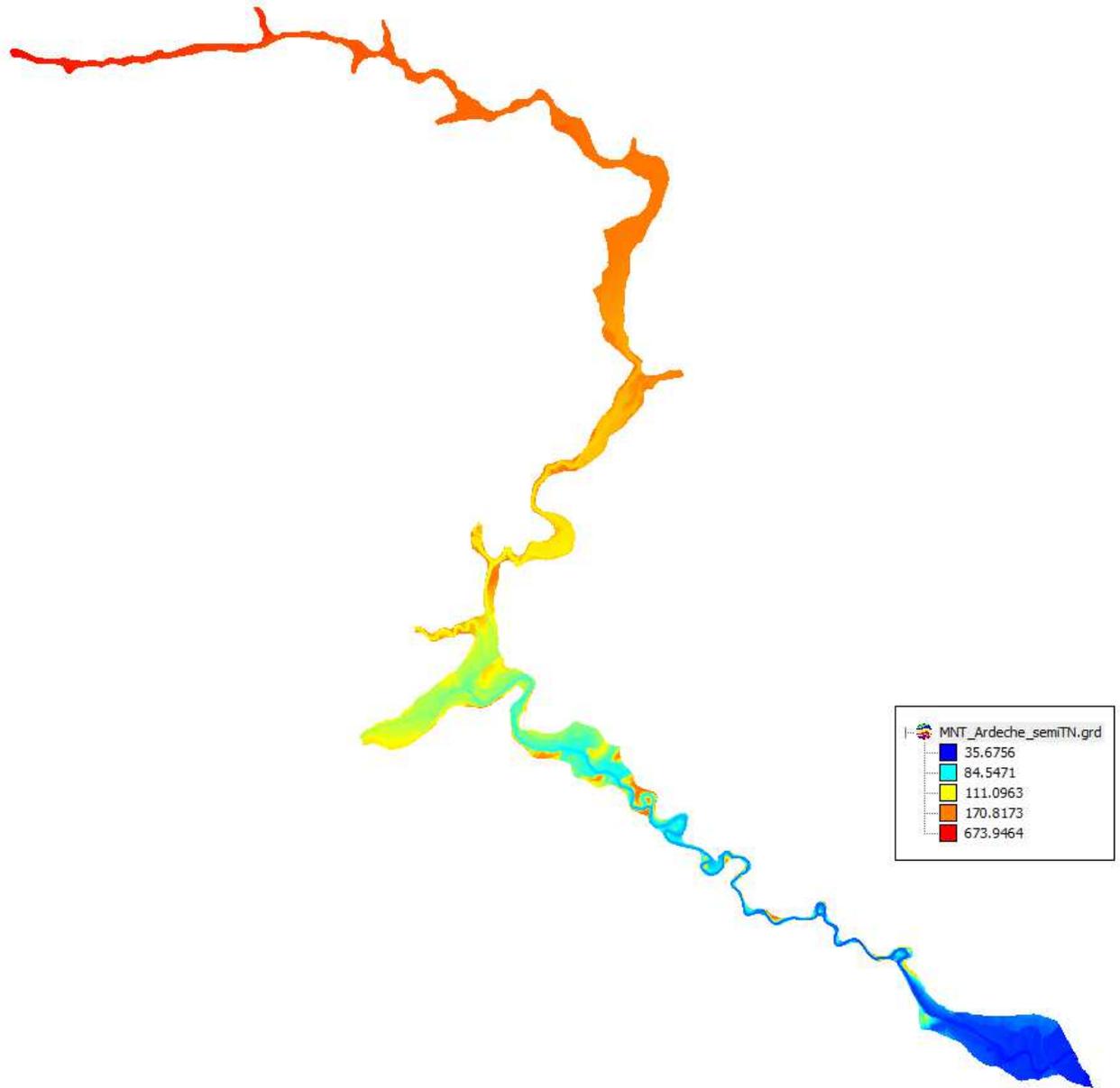


Figure 11 GRID obtenu du semi point traité de la rivière de l'Ardèche

6.2.2 Modélisation

6.2.2.1 Avec Hec-Ras

6.2.2.1.1 Principe

L'objectif de cette modélisation est de simuler les crues de l'Ardèche pour différentes périodes de retour et de générer par la suite la cartographie des hauteurs d'eau et des vitesses d'écoulement pour la crue de référence. Ces deux paramètres serviront après pour établir les cartes d'aléa.

Le calcul se fera en régime permanent avec les débits calculés dans la phase de l'hydrologie (Tableau 12). Le choix de modéliser en ce régime et pas en transitoire est dû aux raisons suivantes :

- Une modélisation en régime permanent est considérée pessimiste car on considère qu'on a le pic de notre hydrogramme de crue sur tout le linéaire de nos rivières ce qui ne correspond pas à la réalité mais offre une bonne marge de sécurité.

Il est plus intéressant de simuler en régime transitoire dans le cas de bassin à faible pente (0.5 pour mille) où l'hydrogramme de la crue se déplace moins vite dans les zones ± plates et où on aura un rapport significatif d'amortissement de la crue. Néanmoins, dans notre cas d'étude, on n'est pas à cet ordre de grandeur de pente (la pente dépasse 1% en moyenne sur les 50 km en amont !)

- Suite à une étude réalisée par Sogreah sur une partie de la Moselle, où la pente ne dépassait pas 2‰, une comparaison entre une simulation en régime permanent et en transitoire a été effectuée. La différence moyenne entre les résultats obtenus était de 5cm ! ce qui est totalement négligeable dans le cas de l'Ardèche car la précision des calculs n'est pas à cette échelle (Les fluctuations de l'écoulement pendant la crue, le jaugeage des stations limnimétriques, la différence entre le niveau et la charge (20cm de différence par exemple pour une vitesse de 2 m/s...))
- Le rapport précision/vitesse de calcul qui est assez important en régime permanent

6.2.2.1.2 Présentation de HEC Ras (version 4.0 Beta):

[20],[21] C'est un logiciel de modélisation 1D développé par le Hydrologic Engineering Center de l'US Army Corps of Engineers. La construction du modèle nécessite l'entrée de deux types d'informations : des données géométriques et des conditions de l'écoulement.

Les données géométriques sont représentées par des profils en travers (numérotés par ordre croissant de l'aval vers l'amont), la distance entre chaque profil, le coefficient de Manning du lit mineur et des lits majeurs droit et gauche. A cela, il faut rajouter les ouvrages spécifiques : pont, buse, déversoirs transversaux...

Les conditions aux limites sont de deux types : les débits entrants dans chaque cours d'eau modélisé et les conditions de niveau aux extrémités. Selon le type d'écoulement, ces conditions ne sont pas les mêmes :

- Pour un écoulement fluvial, les conditions aux limites nécessaires se situent à l'aval (la hauteur normal ou bien une hauteur d'eau connue)
- Pour un écoulement torrentiel, nous avons besoin de conditions aux limites à l'amont des thalwegs (hauteur critique ou hauteur d'eau connue)

Ici, la pente est suffisamment faible à l'aval pour que le régime soit fluvial.

En régime permanent graduellement varié, le calcul de la hauteur d'eau se fait d'une section en travers à l'autre en résolvant l'équation d'énergie avec un processus itératif. L'équation d'énergie s'écrit de

$$Y_2 + Z_2 + \frac{\alpha_2 V_2^2}{2g} = Y_1 + Z_1 + \frac{\alpha_1 V_1^2}{2g} + h_e \quad (6)$$

Avec

Y_1 et Y_2 : hauteur d'eau dans la section

Z_1 et Z_2 : altitude du fond du lit

V_1 et V_2 : vitesse moyenne (correspondant à la différence du débit total sur la surface totale)

α_1 et α_2 : coefficient de vitesse

g : accélération de la gravité

h_e : perte de charge entre les sections 1 et 2

Les pertes de charge sont de deux types :

- Pertes de charge linéaires liées aux frottements sur toute la distance concernée
- Pertes de charges singulières (locales) liées à une variation brutale de la vitesse (divergence ou convergence de l'écoulement)

Les pertes de charges sont calculées à partir de l'équation suivante :

$$h_e = L\bar{S}_f + C \left| \frac{\alpha_2 V_2^2}{2g} - \frac{\alpha_1 V_1^2}{2g} \right| \quad (7)$$

Avec :

L : longueur entre les sections calculée par la moyenne des longueurs de chaque partie de la section (rive gauche, lit mineur, rive droite) pondérée par les débits correspondant

C : coefficient de contraction / d'expansion

S_f : La pente de frottement. Elle est égale au rapport Q^2/D^2 où Q est le débit et D la débitance

A partir de ces équations, la hauteur d'eau est déterminée en utilisant au départ une hauteur d'eau définie à l'aval (lorsque l'écoulement est fluvial) ou à l'amont (lorsque l'écoulement est torrentiel).

Lorsque la hauteur d'eau passe en dessous de la hauteur critique, l'équation d'énergie n'est plus valable. Elle est en effet seulement applicable lors d'écoulements graduellement variés et les transitions fluvial / torrentiel ou torrentiel / fluvial représentent des situations d'écoulement rapidement varié. Cette situation de changement de type d'écoulement se retrouve notamment lors de passage sur des seuils où l'écoulement passe de fluvial à torrentiel (passage en critique sur la crête du seuil) puis de torrentiel à fluvial par un ressaut hydraulique, en aval de la chute. Aux ponts et confluences, c'est l'équation de perte d'énergie par divergence/convergence qui est appliquée

Pour le calcul du ressaut, il est alors nécessaire d'appliquer l'équation des moments pour que le modèle converge. Cette équation des moments provient de la deuxième loi de mouvement de Newton ($\sum F = m \times a$) ce qui donne :

$$P_2 - P_1 + W_x - F_f = Q\rho\Delta V_x \quad (8)$$

Avec :

P_1 et P_2 : résultante des forces de pression hydrostatiques

W_x = composante selon l'axe x du poids de l'eau

F_f : force de frottement

Q : débit

ρ : densité de l'eau

V_x : composante selon l'axe x de la variation de vitesse entre les sections 1 et 2

6.2.2.1.3 Méthodologie :

Le modèle sous Hec-Ras est constitué de trois composantes :

6.2.2.1.3.1 La géométrie

Tout d'abord, il faut identifier les tronçons homogènes pouvant être décrits par un profil en travers. Pour cela, on a établi un profil en long de l'Ardèche à partir du MNT généré en suivant l'axe de la rivière. Après, on a extrait de ces profils en long les abscisses des points où il y a un changement de pente. Sous MapInfo, on a récupéré aussi les abscisses des points de changement de largeur d'écoulement. La distance maximale entre profils est de 300 m.

Il faut ensuite repérer les ouvrages ponctuels (ponts, barrages, seuils) afin de les décrire en implantant un profil de calcul à l'amont et à l'aval de ces ouvrages. Puis, on a introduit l'ensemble de ces abscisses sous MapInfo sur l'axe de notre rivière. On avait en moyenne un point tous les 180m. Ensuite, en se basant sur les photos aériennes, utilisées pour la photogrammétrie et fournies par le client, et sur les photos prises lors de la reconnaissance de terrain, on a tracé les profils en travers avec une poly-ligne en mettant un point à chaque

fois qu'il y a un changement de type de sol et de la densité de végétation en indiquant sur la table des données des profils en travers le Strickler correspondant comme l'indique le tableau suivant :

		K Strickler	n Manning
Lit mineur		30	0.033
Lit majeur	Prairie	15	0.067
	Champs-Clôture-Quelques arbre	12	0.083
	Verger-Vigne	10	0.100
	Forêts	5	0.200

L'intérêt de ce travail est de récupérer les profils en travers avec le coefficient de Strickler automatiquement sous HEC-Ras à partir de Mapinfo à l'aide d'un programme développée sous Python par Sogreah. La Figure 12 illustre ce travail.

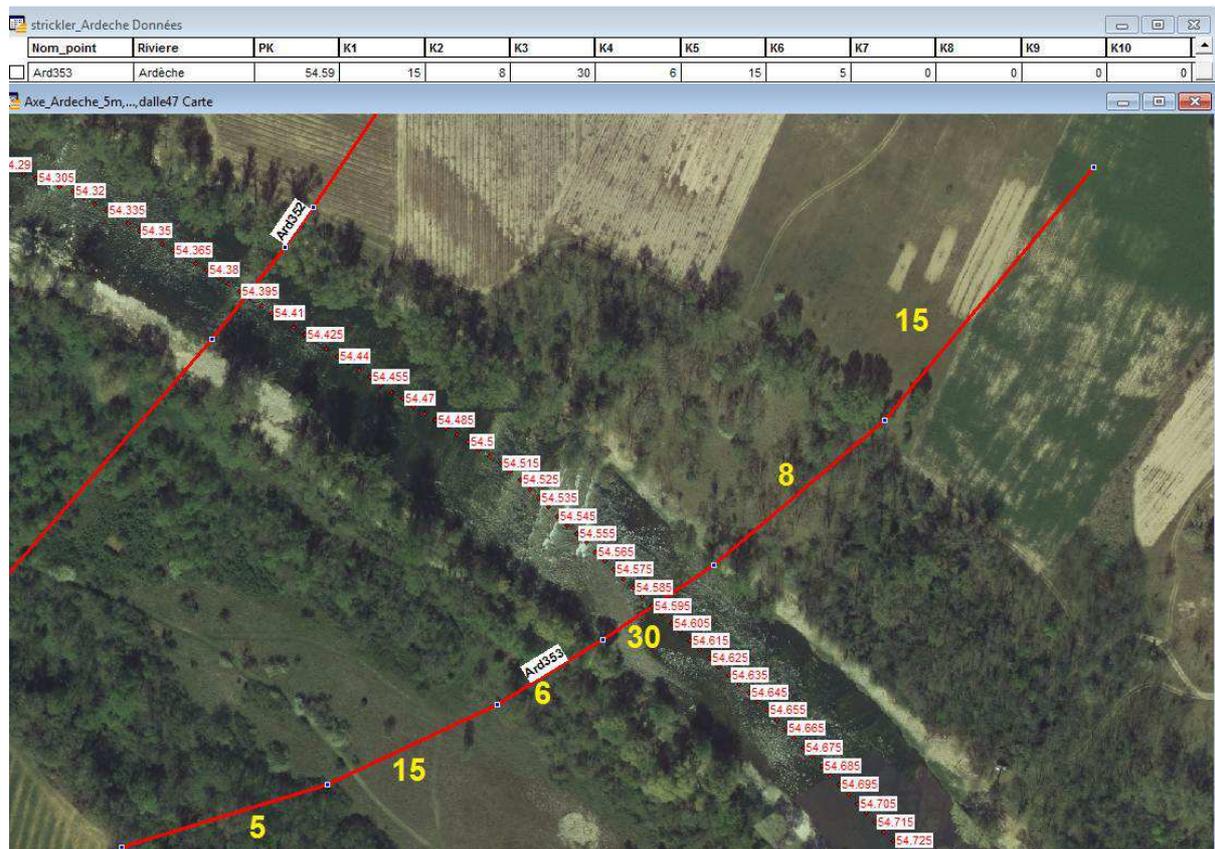


Figure 12 Insertion des profils en travers et du coefficient de Strickler sous MapInfo

Le problème qui reste maintenant est la topographie du lit mineur de la rivière. Le MNT étant réalisé à partir des photos aériennes, ne prend pas en compte la bathymétrie (partie sous eau du lit mineur) et on n'a que la cote de la surface d'eau au niveau des berges.

Nous avons représenté cette partie sous eau de façon simplifiée par un rectangle dont la largeur est appréciée grâce aux photos aérienne et la profondeur par un calcul hydraulique. Pour calculer cette hauteur d'eau, on a suivi la procédure suivante :

On applique la relation de Manning Strickler appliquée aux rivières larges (rapport hauteur/largeur faible) [22] :

$$y = Q^{3/5} K^{-3/5} L^{-3/5} i^{-3/10} \quad (9)$$

Où

Y : Hauteur d'eau cherchée

Q : Le débit du jour de la prise de la photo

K : Le coefficient de Strickler. On prend K= 30 (entre 25 et 30)

L : La largeur du lit. On l'a déduite à partir de MapInfo

i : La pente sur le tronçon considéré

Les photos aériennes ont été prises le 07 avril 2011. On a récupéré de la banque Hydro les débits enregistrés aux stations limnimétriques de l'Ardèche ce jour-là. Ils sont reportés sur le tableau suivant :

Station	Code station	S (km ²)	PK (km)	Q max (m ³ /s)	Q min (m ³ /s)	Q moy (m ³ /s)
Ardèche à Meyras [Pont Barutel]	V5004030	98	17.16	1.95	3.57	2.76
Ardèche à Pont-de-Labeaume	V5004010	292	19.67	7.1	5.08	6.09
Ardèche à Ucel	V5014030	447	32.47	13.8	10.6	12.2
Ardèche à Vogüé	V5014010	623	44.65	16	14.3	15.15
Ardèche à Vallon-Pont-d'Arc	V5054010	2020	76.02	61.4	38.9	50.15
Ardèche à [Sauze-Saint-Martin]	V5064010	2260	104.43	57.2	39.1	48.15

Tableau 10 Débit de l'Ardèche le 07/04/2011

A titre de sécurité, on retient le débit max instantané enregistré. Ensuite, on interpole le débit pour les différentes abscisses par une macro sous Excel

Pour la largeur et la pente. On s'est basé sur le profil pour les calculer. En effet, pour chaque partie du profil en long où on avait une pente homogène, on a calculé sa largeur moyenne sous MapInfo. La pente du tronçon était déduite par la relation suivante :

$$i = \frac{Z_i - Z_{i+1}}{X_{i+1} - X_i} \quad (10)$$

Le tableau suivant illustre le résultat obtenu sur les 2 premiers kilomètres depuis l'amont.

Tableau 11 Calcul de la hauteur d'eau le 07/04/2011

Abscisse (Km)	Cote (m)	Largeur (m)	Pente	Rugosité K	Q (m3/s)	Tirant d'eau (m)	Si (Seuil)
0	639	10					
0.15	633.3	10	3.80%	30	1.00	0.087	
0.25	633.2	13	0.10%	30	1.00	0.222	
0.44	623	11	5.37%	30	1.01	0.075	
0.72	614.8	13	2.93%	30	1.02	0.085	Seuil
0.72	612.3	13		30			
0.885	608.2	13	2.48%	30	1.02	0.086	
0.885	605.2			30			
0.96	605	12	0.27%	30	1.02	0.175	
1.37	588	10	4.15%	30	1.03	0.086	
1.6	584	10	1.74%	30	1.04	0.112	
1.87	574.2	9	3.63%	30	1.04	0.096	
2.08	570.6	10	1.71%	30	1.05	0.104	Seuil
2.08	568.6	9		30			

Cette hauteur est faible en amont car le débit de la rivière est faible et le lit est ± large. Par contre, cette valeur atteint plus de 2 mètres dans des endroits où le débit est plus fort et le lit mineur est plus étroit. A l'aide d'un programme sous Python, on a retranché cette hauteur des côtes du lit mineur.

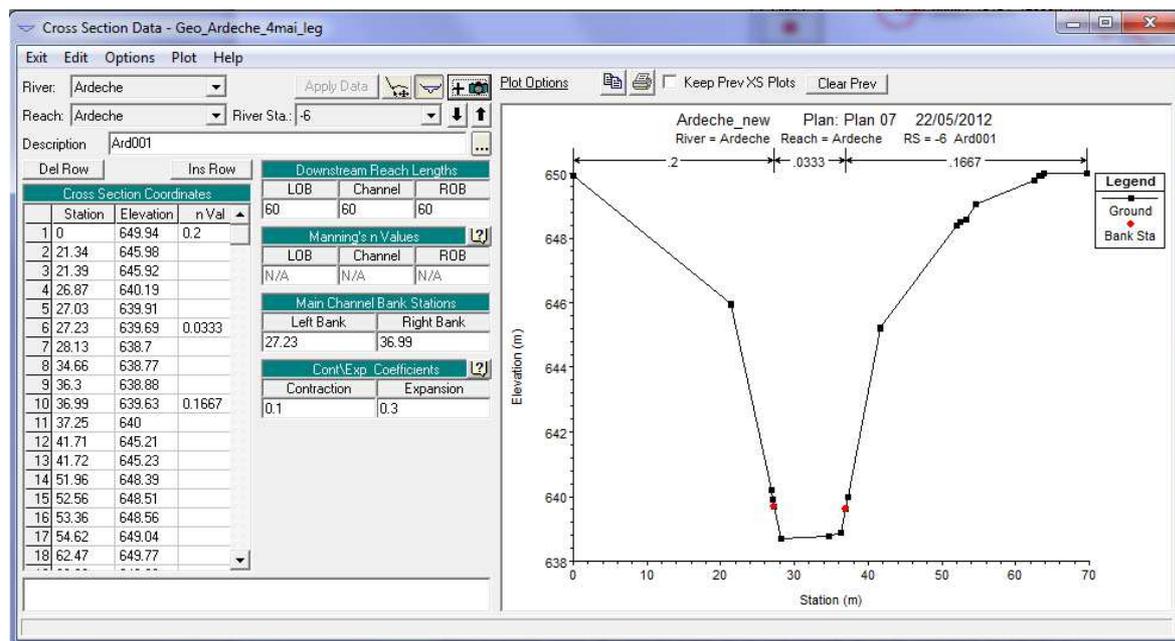


Figure 13 Profil en travers sous HEC-Ras 4.0

Les points rouges dans le profil en travers correspondent aux berges de la rivière. On remarque l'abaissement du lit mineur et les coefficients de Manning aussi récupérés automatiquement (nVal dans le tableau à gauche).

Notons juste qu'on a effectué plus de 630 profils sur l'Ardèche sans compter les affluents d'où l'utilité d'automatiser la procédure.

Toujours dans la définition de la géométrie, il faut maintenant insérer les ponts dans HEC Ras.

On a récupéré des anciennes études fournies par la DDT (BRL 1997 [24] et de l'archives de SOGREAH des plans de l'ensemble des ponts de l'Ardèche. Pour les ponts récents, on a demandé au cotraitant (SINTEGRA) de les lever. On compte 150 ouvrages à définir sur l'Ardèche !!

MapInfo a facilité cette tâche, L'Annexe 12 montre la procédure suivie pour la définition des ponts (pont de la Basse Vernède comme exemple).

6.2.2.1.3.2 Conditions hydrauliques :

Donc, comme c'est expliqué dans le paragraphe (Principe), la simulation sera faite en régime permanent. La table suivante montre les débits introduits aux différents PK (abscisse) du modèle.

Tableau 12 Débit introduit à différentes abscisses de l'Ardèche

Range Location		Profile Names and Flow Rates						
Reach	RS	Q1	Q3	Q10	Q50	Q100	Q200	Q300
Ardeche	-5.0	51.4	75.7	116.7	218	253	288	308
Ardeche	-8635.0	121.3	178.7	275.5	514	597	680	728
Ardeche	-17890.0	151.8	223.7	344.9	644	747	851	911
Ardeche	-18180.0	216.2	318.5	491.1	917	1064	1211	1297
Ardeche	-19605.0	340.3	501.4	772.9	1443	1675	1907	2042
Ardeche	-28665.0	460.3	678.1	1045.4	1952	2266	2579	2762
Ardeche	-35855.0	559	823.6	1269.6	2370	2752	3132	3354
Ardeche	-44705.0	596.3	878.5	1354.4	2529	2935	3341	3578
Ardeche	-48005.0	605.6	892.2	1375.5	2568	2981	3393	3634
Ardeche	-48240.0	681.1	1005.5	1547.1	2891	3365	3831	4103
Ardeche	-60295.0	713.1	1052.8	1619.8	3027	3523	4011	4296
Ardeche	-60640.0	776.9	1148.1	1760.2	3300	3851	4387	4699
Ardeche	-64925.0	785.5	1160.8	1779.7	3337	3894	4436	4751
Ardeche	-65325.0	909.2	1349.6	2057.9	3880	4551	5187	5557
Ardeche	-66240.0	909.9	1350.7	2059.5	3883	4555	5192	5562
Ardeche	-66445.0	1195.4	1794.3	2687.9	5144	6134	7003	7511
Ardeche	-66725.0	1198.3	1798.7	2694.4	5156	6149	7021	7529
Ardeche	-76440.0	1214.5	1822.9	2730.7	5226	6232	7115	7630
Ardeche	-77860.0	1287.8	1933	2895.6	5541	6608	7545	8091
Ardeche	-104415.	1350.3	2026.8	3036.1	5810	6929	7911	8484

RS : L'abscisse d'introduction de débit indiqué en mètre

Pour les conditions limites amont, on considère la hauteur critique en entrée du modèle. Ce choix est dû à la pente forte en amont et aux irrégularités dans le substratum qui font que les vitesses sont amorties. En plus, pendant les crues, la surface de l'eau n'est pas uniforme (Figure 14)³ et l'hypothèse de la charge critique en entrée du modèle reste la plus valable.

³ <http://www.ledauphine.com/ardeche/2011/11/03/rivieres-en-cruet-tres-fortes-bourrasques>



Figure 14 Crue de l'Ardèche en novembre 2011 à Aubenas

En sortie du modèle, la hauteur d'eau au niveau de la confluence avec le Rhône a été fixée par le client à 49.15m pour la crue centennale.

6.2.2.1.3.3 Calage du modèle

Le calage consiste à ajuster les paramètres principaux du modèle et sa structure de telle manière que les calculs fournissent une ligne d'eau et une limite de la zone inondable aussi proche que possible des observations.

Les paramètres principaux du modèle qu'il faut ajuster lors du réglage sont les coefficients de rugosité du lit mineur et de la plaine d'inondation, et les coefficients de perte de charge (dissipation d'énergie). Cette perte de charge est liée à des variations brutales de vitesse (convergence – divergence).

On peut aussi ajuster certains coefficients empiriques des lois de fonctionnement des ouvrages (ponts, vannes...) ainsi que la distance de frottement entre les points de calculs du lit majeur.

En modifiant ces différents paramètres, on tente de se rapprocher des laisses de la ou des crues passées.

Malgré le travail réalisé dans la phase historique, on n'a pas pu récupérer des anciennes études des laisses des crues les plus fortes connues sur l'Ardèche. La meilleure référence est une étude réalisée par Sogreah [23] sur l'ensemble du bassin et qui consistait en l'analyse la crue de septembre 1992 de période de retour de 50 [23] ans au Pont de Labeaume. C'est la crue de période de retour la plus forte enregistrée en différentes stations hydrométriques. Les laisses fournies par cette étude ont été reprises et validées par une étude plus récente (Décembre 1997) réalisée par BRL ingénierie [24]. Donc on se basera sur les laisses de cette crue pour régler notre modèle.

Il s'agit donc de jouer sur les paramètres du modèle afin de retrouver les niveaux identifiés des laisses pour un débit égal au débit de la crue de 1992.

Au niveau des ponts, des soucis de modélisation ont été rencontrés. On a essayé d'ajuster leur définition au maximum pour avoir un résultat proche de la réalité

La Figure 15 illustre le résultat du calage de notre modèle

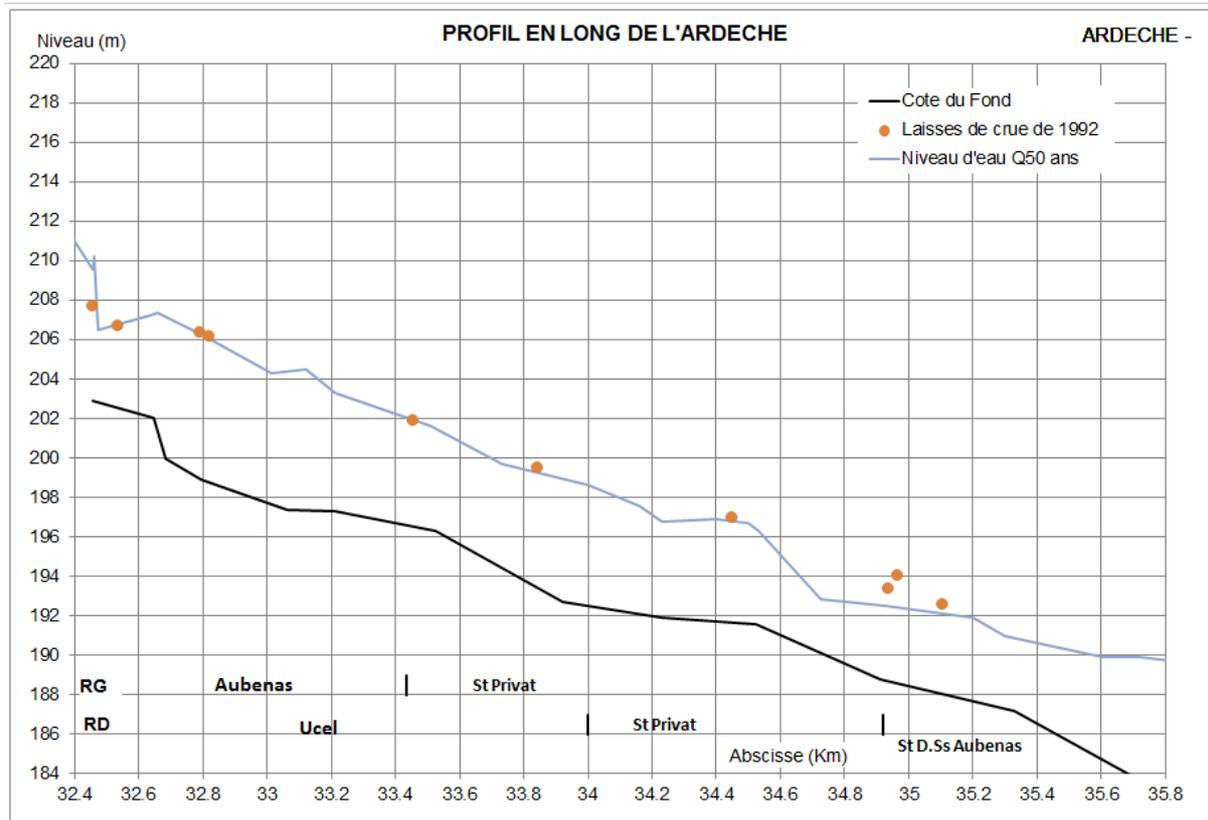


Figure 15 Calage du modèle aux laisses de crue du 22 septembre 1992

6.2.2.1.3.4 Résultat de la modélisation 1D

Le modèle étant calé, on a lancé une simulation en mode « subcritical flow regime ». Ceci permet de considérer le régime critique quand l'écoulement est torrentiel et de rester en fluvial dans le cas contraire ce qui correspond le plus au cas des rivières. On a récupéré les résultats de la charge critique, du niveau critique, de la charge calculée et du niveau calculé. Le niveau retenu pour la cartographie va être choisi selon le régime d'écoulement ; on prendra la charge critique sur les tronçons où l'écoulement est torrentiel et la charge calculée dans les autres cas. Le niveau calculé est considéré dans des cas rares très particuliers. Le Tableau 13 montre les résultats obtenus sur 10 profils en travers de l'Ardeche.

NOM	PK (km)	Ch crit (m)	Ch.Cal	N.Crit	N.calculé (m)	Id	Niv retenu	Cote BRL (m)
Ard131	16.44	330.22	330.28	328.65	328.67	1	330.22	330.71
Ard132	16.825	327.29	327.34	325.15	326.11	1	327.29	328.00
Ard133	17.02	326.34	326.34	324.04	324.33	1	326.34	326.29
Ard134_AmP	17.15	322.97	323.36	321.07	322.94	1	322.97	325.13
Pont	17.165	322.97	323.03	321.07	321.7	1	322.97	324.91
Ard135_AvP	17.17	322.96	322.97	321.37	321.85	1	322.96	324.84
Ard136	17.35	321.11	321.11	319.75	319.82	1	321.11	322.25
Ard137	17.615	317.69	318.09	316.49	316.64	2	318.09	318.58
Ard138	17.89	316.02	316.02	314.77	314.81	2	316.02	316.10
Ard139	17.985	314.63	314.98	313.44	314.42	2	314.98	315.80
Ard140_SnAm	18.095	313.66	314.62	312.44	314.31	2	314.62	315.45

Tableau 13 Résultats de la simulation HEC Ras entre Ard130 et Ard140

Vue la taille de la rivière, on s'est limité à donner un exemple de résultats qui illustre le mieux la méthodologie suivie. La case Id correspond au numéro de la cote à retenir (1 pour la charge critique, 2 pour la charge calculée...)

Afin de comprendre l'impact des nouvelles conditions hydrologiques définies par la présente étude, on a effectué une comparaison avec le modèle BRL sur les 40 premiers kilomètres du linéaire. Notre ligne d'eau est généralement plus basse. On trouve un écart moyen absolu de 1m mais on rappelle qu'on n'a pas les mêmes débits. L'enveloppe des zones inondables sera donc plus étroite dans notre cas. La Figure 16 montre l'écart entre les deux modèles :

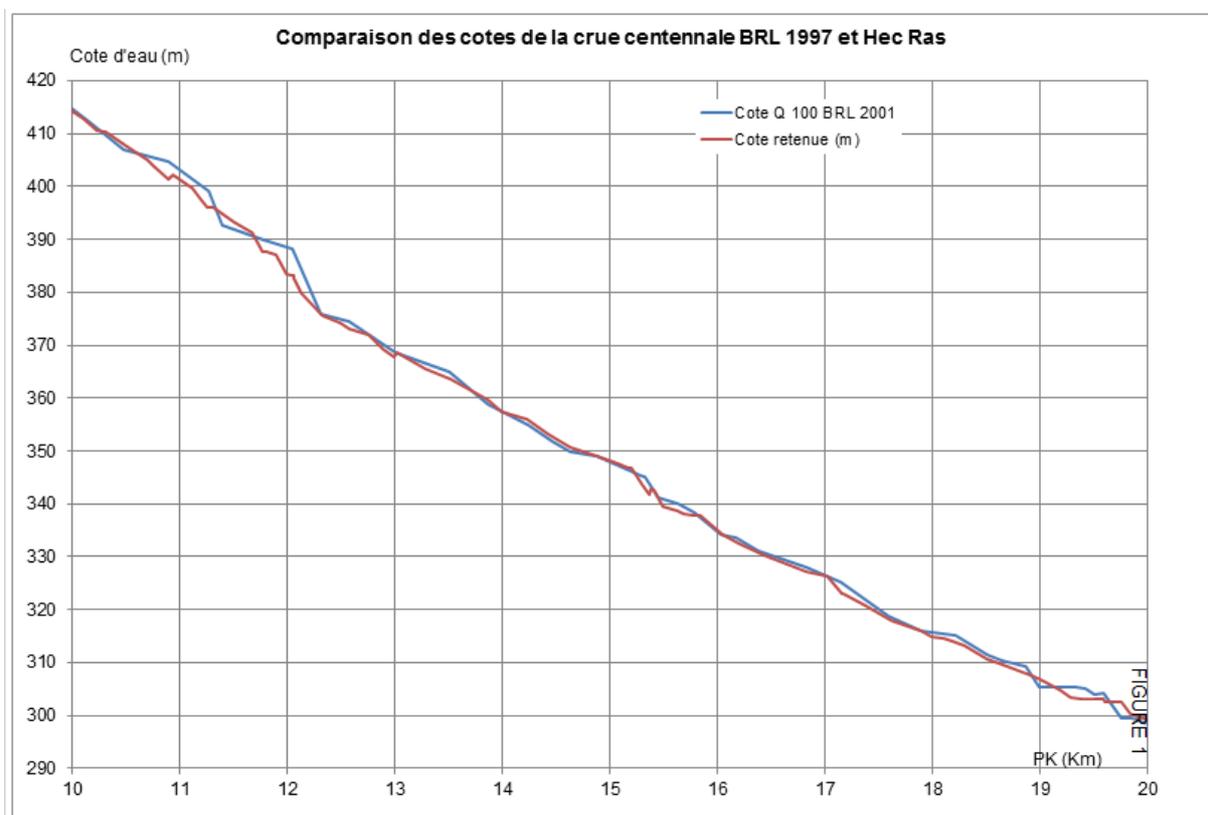


Figure 16 Comparaison du modèle Artelia (HEC Ras) et BRL entre pk=10 et 20 km de l'Ardèche

Le niveau de la charge, le niveau critique et la charge calculée sont reportés sur les profils en long en Annexe 16 au long des 40 premiers kilomètres.

6.2.2.1.3.5 Critique du modèle 1D

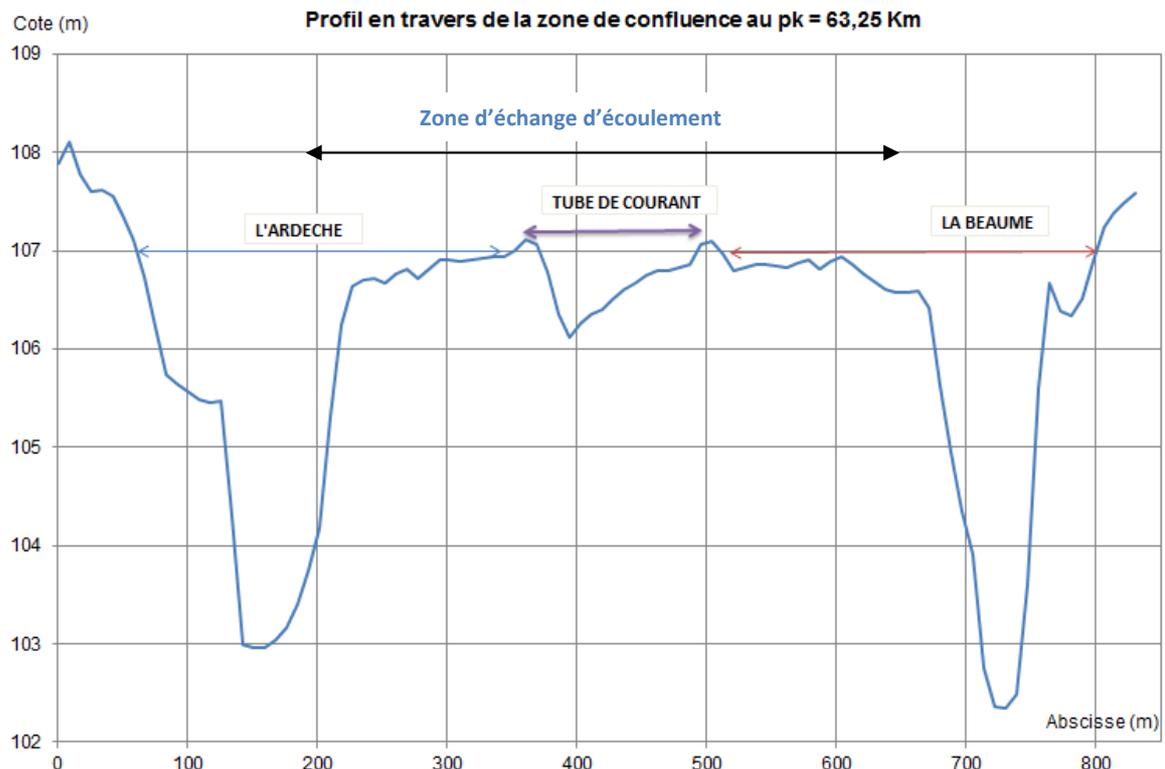
La simulation avec HEC Ras a abouti à des résultats. L'avantage de cette simulation en 1D est sa simplicité de mise en œuvre, comparée à un modèle 2D. La combinaison de Mapinfo et du programme Python pour la définition de la géométrie du modèle a beaucoup facilité cette simulation. L'automatisation du processus était utile vue la taille du cours d'eau et de ses affluents.

Le problème d'une modélisation monodimensionnelle apparaît lorsque l'écoulement s'effectue de façon maillée (au droit de certaines confluences par exemple). En effet, dans ce cas, les échanges entre deux « tubes de courant ne peuvent être représentés de façon correcte.

6.2.2.2 Avec CARIMA

6.2.2.2.1 Problématique et Objectif :

Dans la zone de confluence, en période de crue, les échanges de débit qui peuvent avoir lieu entre chaque cours d'eau restent difficiles à estimer avec un modèle filaire. Les niveaux d'eau dans le lit majeur peuvent aussi varier latéralement de façon importante... Un modèle unidimensionnel ne pourrait pas expliquer tous ces phénomènes et il est nécessaire d'envisager une simulation qui prendra ces écoulements latéraux en compte (figure suivante)



Selon le débit de crue de chaque rivière, le niveau d'eau et la répartition des débits dans chaque section élémentaire vont varier. Ceci dépend des débits dans chacune des rivières et des capacités d'écoulement de chacune d'elles.

Toutefois, un modèle en deux dimensions (au vrai sens du terme), par exemple avec Telemac ou avec Mike, risque de prendre beaucoup de temps pour la construction du maillage. Le calcul sous ces logiciels est en outre très lent surtout lorsqu'on travaille sur une grande zone d'étude. Ils sont nécessaires si on cherche une grande précision et la connaissance de la répartition fine des écoulements et des niveaux et, surtout, si le modelé de terrain est complexe. Ce n'est pas le cas pour la présente étude.

C'est pour cette raison qu'on a opté pour un modèle **pseudo bidimensionnel** (1D maillé) sous CARIMA, un logiciel de calcul rapide et présentant des résultats satisfaisants. L'objectif de cette modélisation est donc de comprendre le fonctionnement hydraulique dans la zone de confluence, et d'en déduire son rôle dans l'amortissement de l'onde de la crue pour parvenir par la suite à cartographier les hauteurs d'eau et les échanges de débit dans ces zones. A ce stade de l'étude, seule la confluence Ardèche-Beaume-Chassezac a été étudiée à la demande du client.

6.2.2.2 Présentation de CARIMA

Le système CARIMA (CALcul des Rivière MAillée) est un outil de calcul des écoulements à surface libre des régions fluviales (rivières et zones inondables) développé par des ingénieurs de SOREAH.

La rivière et le champ d'inondation sont représentés par un ensemble de points de calcul (le maillage du modèle) reliés par des tronçons d'écoulement

La description des cours d'eau et du terrain est basée sur une large bibliothèque d'objets et d'options qui permettent de représenter finement l'ensemble des situations rencontrées en hydraulique fluviale. En particulier, CARIMA permet de décrire les singularités d'écoulement provoquées par les d'ouvrages (digues, barrages, vannes, orifices, déversoirs, etc.).

En transitoire comme en permanent, le module hydraulique de CARIMA traite deux régimes de base des écoulements :

- L'écoulement unidimensionnel (1-D) suivant le ou les lits mineurs de la rivière, représenté par les équations complètes de Barré de Saint-Venant qui tiennent compte de l'inertie;
- L'écoulement dans le champ d'inondation, représenté par une modélisation dite "à casiers" (ou quasi 2-D) et des équations simplifiées de l'écoulement (sans termes d'inertie).

L'état hydraulique du système est décrit dans CARIMA par la valeur des variables suivantes:

- Le niveau de la surface libre en chaque point du maillage,
- Le débit pour chaque point de calcul unidimensionnel,
- Le débit pour chaque tronçon d'écoulement dans le champ d'inondation (entre casiers par exemple).

En fonction des conditions hydrauliques initiales et des contraintes internes et externes (conditions aux limites) imposées au système, CARIMA calcule l'évolution de l'état hydraulique en chaque point du maillage.

6.2.2.2.3 Méthodologie et analyse

6.2.2.2.3.1 Construction du modèle

Tout d'abord, On a commencé par une reconnaissance du terrain de la zone à modéliser en examinant, sous MapInfo, les profils en travers du lit mineur des rivières et du champs de l'inondation toujours en se basant sur le MNT et sur les photos aériennes de la zone de confluence fournies par le client. Ce travail a permis d'identifier un tube de courant (une zone concave) au milieu du champ d'inondation à la confluence entre l'Ardèche et Labeaume. A partir de cette analyse, on a pu définir les casiers de notre modèle comme le montre la Figure 17 (Les points 1D ont été déjà définis lors de la modélisation sous HEC Ras).

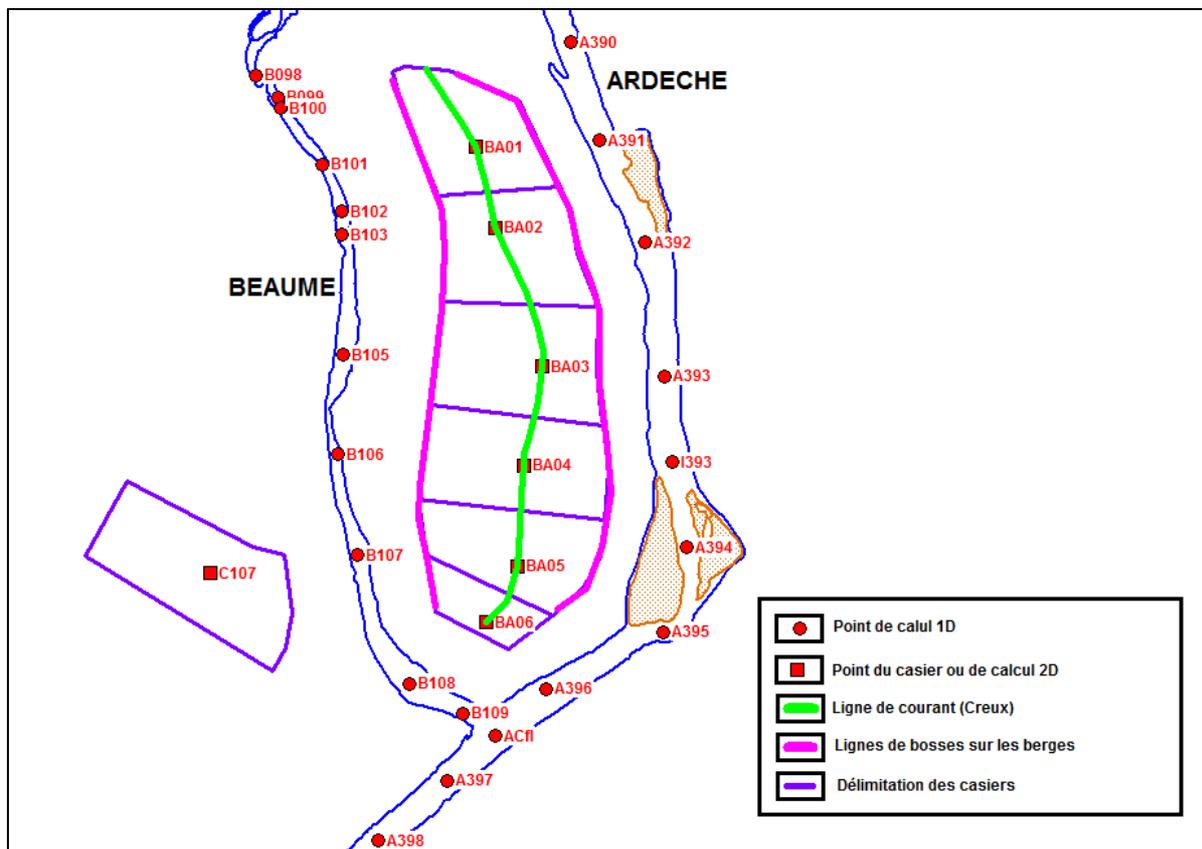


Figure 17 Identification des points de calcul 1D et 2D sous MapInfo

Le maillage du modèle étant défini, il faut maintenant introduire les données du modèle sous CARIMA.

Un modèle CARIMA est constitué d'éléments « topologiques » qui sont :

- Des points de calcul en lit mineur (pouvant inclure une partie du lit majeur si celui-ci n'est pas séparé du lit mineur par un obstacle important – digue par exemple) auxquels sont associés des profils en travers ainsi que les rugosités.
- Des tronçons entre points de lit mineur qui définissent le poids de chaque profil sur la perte de charge linéaire et les coefficients de perte de charge singulière.
- Des casiers pour représenter les « tubes » de courant en lit majeur séparé des lits mineurs et définis par une relation niveau-volume.
- Des tronçons entre casiers ou entre casier et lit mineur définis par une section d'écoulement et sa rugosité.
- Des tronçons particuliers de type seuil par exemple.
- Des nœuds permettant de définir les confluences ou diffluences d'écoulement.

Ces informations sont introduites de façon explicite (abscisse cote pour un profil en travers par exemple) tout en respectant un langage précis de CARIMA.

Pour faciliter la visualisation du modèle, et afin de synthétiser les informations, on établit un « *Schéma topologique* » qui nous sert tant lors de la construction du modèle que lors de son exploitation. Ce schéma est fourni en Annexe 14.

6.2.2.2.3.2 Simulation

On rappelle que l'objectif de cette modélisation pseudo 2D est double :

- déterminer la capacité d'amortissement de cette zone relativement plane et étendue.
- connaître les hauteurs d'eau et les échanges susceptibles de débits entre les différents cours d'eau dans la zone de la confluence pour un phénomène qui soit centennal en tout point ;

❖ Définition des apports et concomitance :

Nous avons cherché à définir des apports qui soient cohérents avec les données de l'hydrologie en entrée et en sortie de cette zone d'où la nécessité de l'analyse de l'amortissement dans un premier temps et l'étude de la concomitance des crues dans un deuxième.

Dans la réalité, il est peu probable d'observer une crue qui soit centennale à la fois dans chacune des rivières et en aval de leurs confluences. En effet, un débit centennal de

l'Ardèche en aval de la confluence peut être dû à une panoplie de scénario de crues de lui-même, du Chassezac et de la Beume. En général, l'addition de deux ou trois crues centennales induit, à l'aval, une crue dont la période de retour est bien supérieure 100 ans.

Dans notre cas, nous avons cherché à combiner les hydrogrammes en introduisant un décalage des pointes de crue de façon à ce que les débits soient sensiblement centennaux en tout point du modèle, compte tenu des phénomènes d'amortissement.

L'assemblage d'hydrogrammes que nous avons effectué n'a de sens que par rapport à notre objectif de déterminer la capacité d'amortissement globale du lit majeur sur la zone de confluences et, surtout, de cartographier une crue qui soit centennale en tout point de la zone modélisée.

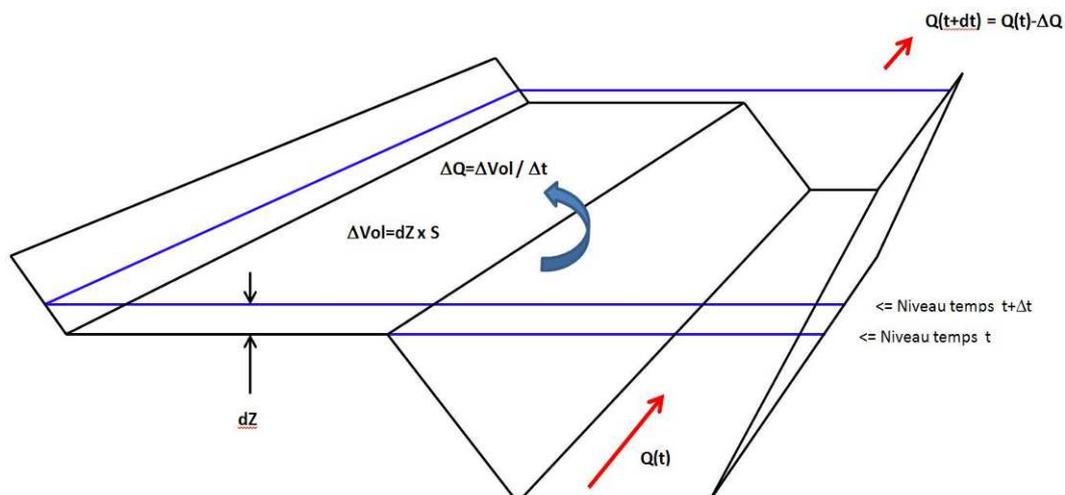
Les temps de concentration établis lors de l'étude hydrologique sont les suivants : entre 2.5 et 4 heures pour la Beume et l'Ardèche et entre 6 et 7 heures pour le Chassezac.

Supposer que les pointes de crues surviennent selon ces valeurs imposerait que la crue soit associée à une pluie homogène sur tout le bassin (ce qui n'est pas nécessairement le cas en réalité vue la taille du bassin de 2429 km²).

Les temps des maximums qui nous ont permis d'obtenir le résultat souhaité sont les suivants : 2.35 heures pour l'Ardèche, 2.5h pour la Beume et 4.1 heures pour le Chassezac (soit un décalage de -2h). Les écarts entre le temps de concentration réel et le temps considéré restent acceptables. Le débit max calculé dans cette situation en aval de la confluence est de 6148 m³/s. On est à 6134 m³/s en hydrologie. Donc on représente assez finement les conditions hydrologiques à cet endroit.

❖ Calcul de l'amortissement dans la zone de la confluence :

Le phénomène d'amortissement de l'onde de crue, qui s'opère lorsqu'il y a débordement en lit majeur, est lié au stockage qui intervient au fur et à mesure que le niveau monte. Le schéma de principe suivant illustre ce phénomène.



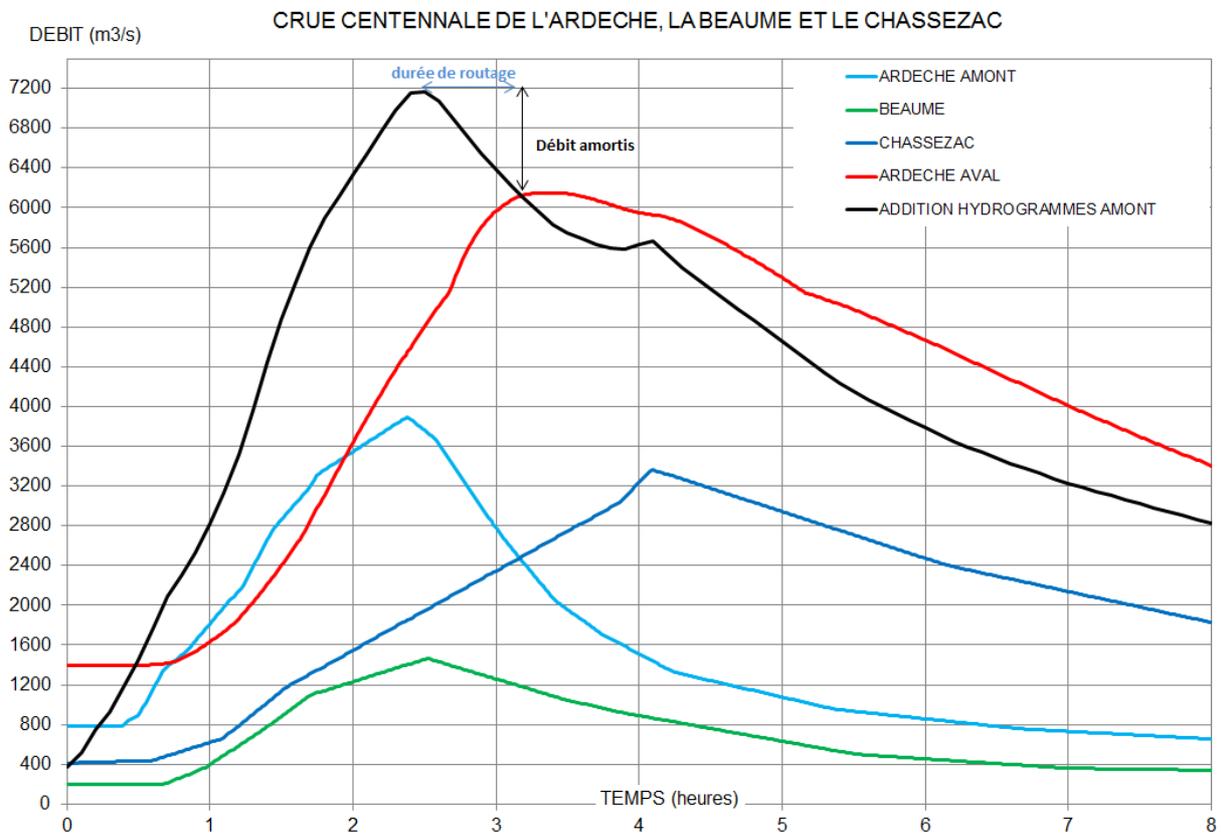
Considérons un tronçon de rivière le long de laquelle des débordements peuvent avoir lieu en lit majeur, sur une surface S .

Lorsque, pendant une durée Δt , le niveau monte d'une hauteur Δz au-dessus du niveau de plein bord, un volume ΔVol est stocké en lit majeur ($\Delta Vol = \Delta z \times S$).

Ainsi, le débit sortant du tronçon est diminué de $\Delta Q = \Delta Vol / \Delta t$.

❖ Résultats

On a calculé l'amortissement dans la zone de la confluence en considérant le cas de notre scénario (Cruée centennale en aval de la confluence due aux cruées centennales des trois cours d'eau avec la crue du Chassezac qui arrive 2h plutôt). On obtient les graphiques suivants :

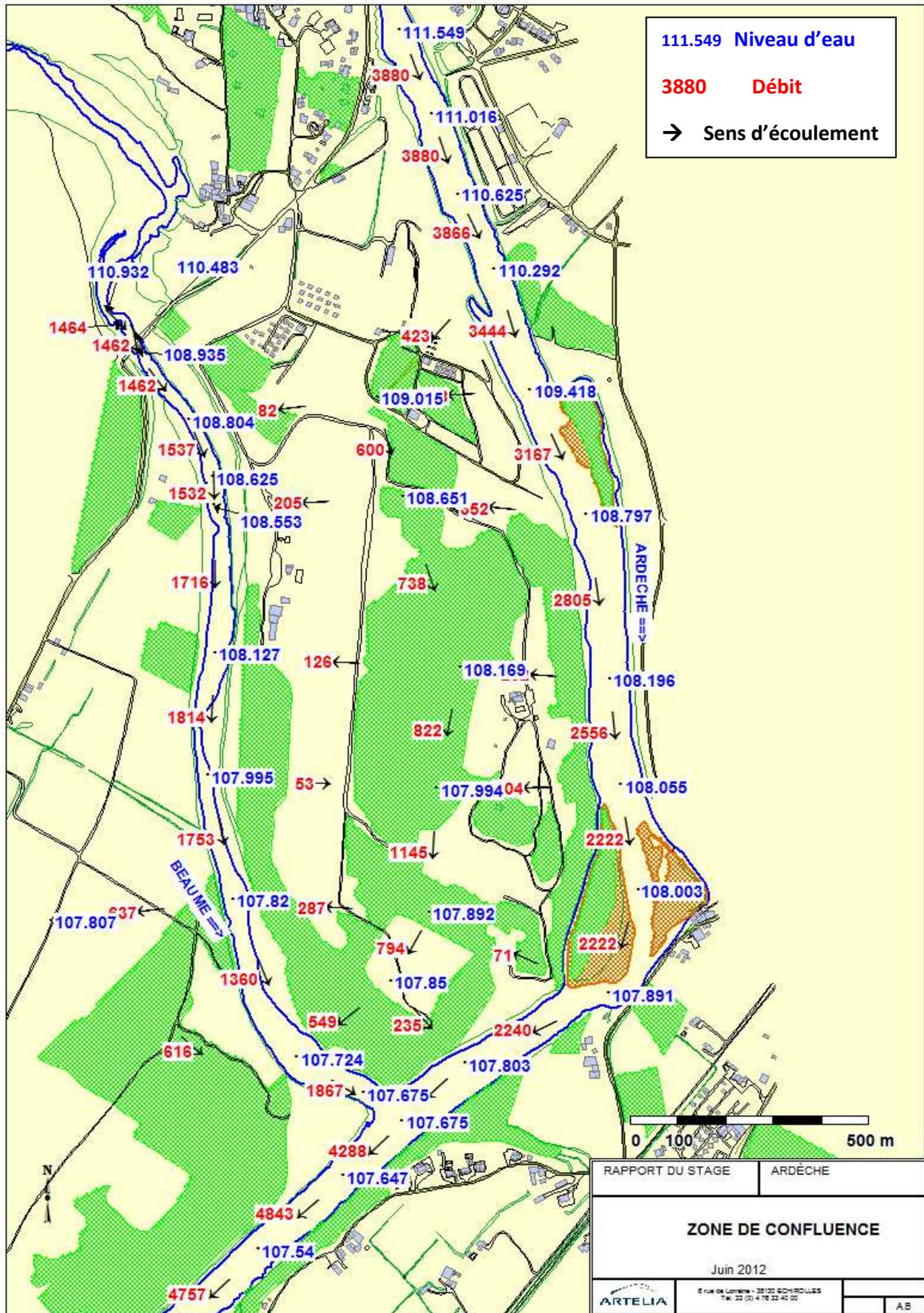


En additionnant les hydrogrammes des trois cours d'eau en amont, on se trouve à un débit max d'entrée de $Q_e = 7162 \text{ m}^3/\text{s}$. en aval de la zone de la confluence et après le laminage des cruées, on retrouve le débit de la crue centennale ($Q_s = 6148 \text{ m}^3/\text{s}$) ; soit un taux d'amortissement de **14.1%**.

❖ Echanges et répartition des niveaux :

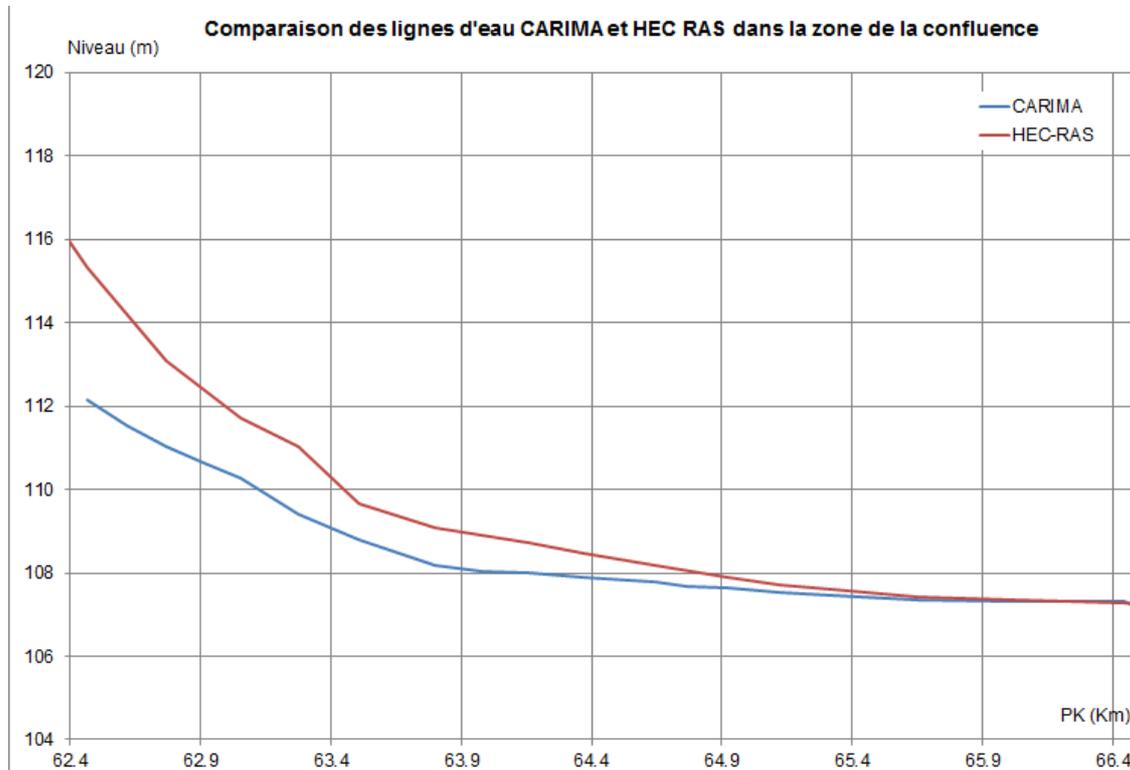
CARIMA a permis de calculer le niveau d'eau et les échanges des écoulements dans la zone de la confluence. La carte suivante représente ces résultats pour la confluence Ardèche-Beauce.

Figure 18 Répartition des niveaux d'eau et des échanges dans la zone de confluence



❖ Critique du modèle :

On a effectué une comparaison de ces résultats avec ceux obtenus par Hec Ras sur le profil en long de l'entrée de la confluence jusqu'à l'aval. Le graphique suivant montre la différence du niveau d'eau



On constate qu'il y a un grand écart entre les deux modèles en amont de la confluence. Cet écart se réduit en allant vers l'aval. La justification de cette différence est que le modèle Hec Ras ne prend pas en compte les transferts d'écoulement de l'Ardèche vers la Beauce. Le débit de l'Ardèche sous HEC Ras reste le même jusqu'au point de la confluence alors que ce débit diminue dans le cas de CARIMA (Echanges latéraux) d'où une ligne d'eau plus haute de HEC Ras (Q augmente, Z augmente). A l'aval de la confluence, les deux rivières se rejoignent et l'écoulement se fait dans un seul tube de courant, les deux modèles donnent le même résultat du niveau d'eau. Ceci permet aussi de confirmer la justesse des résultats obtenus par CARIMA, un logiciel local comparé à HEC Ras un logiciel universel.

6.3 Conclusion sur l'étude l'hydraulique

La modélisation CARIMA a permis d'être plus précis sur les niveaux d'eau dans la zone de la confluence de l'Ardèche avec la Beauce et le Chassezac. Les résultats de HEC Ras dans la zone de la confluence comme la comparaison avec CARIMA le montre sont fausses. Ceci influencera les niveaux d'eau calculés en amont et en aval de cette zone. Il serait plus judicieux de diviser l'Ardèche en trois parties à modéliser ; la première jusqu'à l'amont de la confluence avec HEC Ras, la seconde sera la zone de la confluence avec CARIMA et la 3^{ème} sera de l'aval de la zone de confluence jusqu'au Rhône.

7 Cartographie des zones inondables

7.1 Principe

Le principe de la cartographie des zones inondables consiste à faire une soustraction de deux surfaces différentes ; celle du modèle numérique du terrain (MNT) et celle du modèle numérique de la surface libre de l'eau (MNLSE).

Notons juste qu'on va se limiter à la cartographie des zones inondables pour le débit de référence considéré pris égal à Q100 dans ce rapport. Le client exige par contre des cartes pour les différentes périodes de retour de crue.

7.2 Méthodologie

Pour créer le MNSLE, le principe consiste à avoir un semi de point (x,y,n) (avec n le niveau d'eau retenu de la simulation) assez dense et suffisant pour générer un modèle numériques de la surface libre de l'eau. Pour cela, il faut définir, à partir des points de calcul du modèle des lignes équipotentielles (courbes le long desquelles le niveau est constant) et des lignes de courant (lignes le long desquelles le niveau varie linéairement entre le niveau amont et le niveau aval).

On interpole le niveau d'eau en suivant les lignes de courant entre deux équipotentielles successives et on attribue le même niveau d'eau aux points situés sur le même équipotentielles. On obtient la Figure 19 suivante :



Figure 19 Semi de point du MNSLE

En utilisant vertical Mapper, on génère le MNSLE de la même manière qu'un MNT. Le résultat obtenu est en Annexe 13

Il suffit maintenant de faire la soustraction des deux GRID avec l'outil de *calcul* de vertical Mapper pour produire les zones inondables.

7.2.1 Cartographie des hauteurs d'eau

Par différence entre le MNSLE et le MNT, on obtient une table Mapinfo représentant le modèle numérique des hauteurs d'eau.

Nous en déduisons ensuite les classes de hauteur servant à la détermination des aléas. Trois intervalles de hauteur d'eau sont retenus : Entre 0 et 0.5 m, 0.5 et 1m et supérieur à 1m.

7.2.2 Cartographie des champs de vitesse

De la même manière pour les hauteurs d'eau, on identifie les champs de vitesse au niveau de chaque profil en travers selon la variation du Strickler. On les répartit en trois classes permettant après de déduire les cartes d'aléa : $V < 0.2$ m/s, $0.2 < V < 0.5$ m/s et $V > 0.5$ m/s.

7.2.3 Cartographie de l'aléa inondation

Les cartes des aléas pour la crue de référence sont obtenues par croisement des deux paramètres (vitesses d'écoulement et hauteur d'eau) en fonction de la grille suivante :

ALEA	$0 < H < 0,50$ m	$0,50 < H < 1$ m	$H > 1$ m
$V < 0,2$ m/s	ALEA FAIBLE	ALEA MOYEN	ALEA FORT
$0,2 < V < 0,50$ m/s	ALEA MOYEN	ALEA FORT	ALEA FORT
$V > 0,50$ m/s	ALEA FORT	ALEA FORT	ALEA FORT

Tableau 14 Classement des aléas selon la hauteur d'eau et la vitesse

7.3 Résultats

A ce stade de l'étude, seule les cartes de la hauteur d'eau ont été réalisées. Nous présenterons dans les annexes les cartes des hauteurs d'eau obtenue dans la zone de la confluence. On s'est limité dans ce rapport à la cartographie de cette zone pour sa particularité et pour la taille limitée du document.

7.4 Conclusion

Les cartes des aléas inondation qui seront élaborées dans le cadre de cette étude ne sont pas l'objectif final de l'étude lancée par la DDT de l'Ardèche. Cette dernières s'attend en plus à une analyse des enjeux de la situation actuelle (sans projet d'aménagement) qui sera réalisé ultérieurement par des ingénieurs spécialisés en aménagement du territoire d'Artelia. Cependant, cette étape était primordiale dans mesure qu'elle fournira les éléments de base qui seront exploités lors du diagnostic territorial et économique. Donc, un soin particulier a été porté aux résultats de la modélisation et à la cartographie.

CONCLUSION

Sur le plan personnel, ce stage était une vraie occasion pour moi pour m'initialiser au monde du travail en traitant une problématique du début à la fin. Il m'a permis d'approfondir mes connaissances sur l'hydraulique fluviale et le traitement des données ainsi que la maîtrise de logiciels fréquents dans ce domaine (HEC Ras, MapInfo...). J'ai pu aussi à travers cette expérience découvrir les méthodes de travail dans une grande structure comme Artelia, et d'apprendre plus sur l'organisation des tâches. La visite du terrain était un plus à haute valeur ajoutée dans ce stage car elle m'a permis d'avoir une image concrète du travail à réaliser. Néanmoins, travailler avec des logiciels développés par l'entreprise a des avantages et des inconvénients au terme d'apprentissage. Si leur utilisation reste locale et limitée à la boîte qui les a développés, ils apportent par contre une meilleure compréhension en matière des algorithmes et des équations de l'hydrauliques des autres logiciels plus performants (Carima contre Télémac ou Mike).

A la fin, pour conclure ce travail, je n'ai pas trouvé mieux qu'une phrase de Maurice PARDE, un grand hydrologue français qui a dit en décrivant l'Ardèche et sa crue de 1890: *«La terrible Ardèche est une véritable monstruosité hydrologique qui avait accoutumé ses riverains. Avec un débit de 7.500 m³/s (et nous ne croyons pas ce chiffre susceptible d'une exagération de plus de 1.000 m³/s), elle peut soutenir la comparaison avec les débits moyens de l'Ohio (9.000 m³/s), de la Volga (6.000 à 8.000 m³/s). Il dépasse ceux de l'Indus, du Nil et du Danube à son embouchure (6.000 m³/s)»* [19] une phrase qui donne une idée sur l'immensité des crues de cette rivière exceptionnelle.

BIBLIOGRAPHIE

Documents numériques

- [1]: Décret n° 2009-1484 du 3 décembre 2009 relatif aux directions départementales interministérielles, site web : <http://legifrance.gouv.fr/affichTexte.do?cidTexte=JORFTEXT000021373095>
- [2]: Magazine Futura-science : http://www.futura-sciences.com/fr/definition/t/meteorologie-2/d/inondation_6305/
- [3]: Direction générale des risques des inondations (ministère d'écologie, de Développement Durable, de transport et de logement), Doc numérique : [Prevention_des_inondations.pdf](#)
- [4]: Magazine risque majeure, <http://www.risquesmajeurs.fr/le-risque-inondation>
- [5]: METEO-France, <http://comprendre.meteofrance.com/jsp/site/>

Supports de cours

- [6]: KRAJEWSKI J.B., Cours d'Hydrologie Urbaine-Partie 4 : le ruissellement, INSA Lyon, novembre 2006, pages : 10-12
- [7]: ANCEY C. Notes de cours – Risques hydrologiques et aménagement du territoire. EPFL, Laboratoire hydraulique environnementale, décembre 2007, pages : 161-164
- [8]: HERRMANN A., FINAUD GUYOT P., PAYRAUDEAU S. Système d'information géographique support de TD, Strasbourg, ENGEES, 2011.

Mémoires de fin d'études :

- [9]: OUCHEN L. ET ALIJHAD Y. Mémoire de fin d'étude, contribution à l'élaboration d'une approche pour la délimitation du domaine publique hydraulique des oueds, Institut Agronomique et Vétérinaire Hassan II, septembre 2011, pages : 64-66
- [10]: MANDRAS C. Etude hydrologique et hydraulique du bassin versant de la Gardi, Mémoire de fin d'étude, ENGEES, Juin 2006

Documents de la DDT de l'Ardèche :

- [11]: CLE 04/11/2010, Schéma d'Aménagement et de Gestion de l'Eau de l'Ardèche, 4 novembre 2010, pages : 22-24
- [12]: SOCIETE FRANÇAISE DES RISQUES MAJEURS, Plan de prévention des risques naturels prévisibles vallée de l'Ardèche commune de MAYRES, Mars 2003, page : 9
- [13]: ALP-GEORISQUE, Définition d'un schéma de gestion du risque crue et des phénomènes d'inondation, Décembre 2007, page : 58

Ouvrages :

- [14]: BÉLIVEAU J., Analyse fréquentielle multi variée de la pointe, du volume et de la durée de la crue, 2006
- [15]: HINGRAY B., PICOUET C., MUSY A., «Hydrologie: Une science pour l'ingénieur tome2 », 2009, page 384
- [16]: DE MARDIGNY M., Les inondation des rivières de l'Ardèche, Dalmond et Dunod éditions, 1860
- [17]: NAULET R., Utilisation de l'information des crues historiques pour une meilleure prédétermination du risque d'inondation. Application au bassin de l'Ardèche à Vallon Pont-d'Arc et St-Martin d'Ardèche. septembre 2002, Grenoble
- [18]: CHAMPION M., Les inondations en France du VIe au XIXe siècle, Paris Dunod, 1858-1864
- [19]: PARDE M., Quelques chiffres sur les crues des cours d'eau, La Houille Blanche, 1932
- [20]: Hydraulic Engineering Center (HEC) del U.S. Army Corps of Engineers. HEC-RAS, RiverAnalysis System. User's Manual, Version 4.0 BETA
- [21]: Hydraulic Engineering Center (HEC) de l'U.S. Army Corps of Engineers. HEC-RAS, River Analysis System. Hydraulic Reference Manual, version 4.0 BETA.
- [22]: DEGOUTTE G., Aide-mémoire d'hydraulique à surface libre chapitre : 1. Page 16

Anciennes études:

[23] : SOGREAH, *Etude hydrologique et hydraulique de la crue du 22/09/1992, décembre 1994, page 12*

[24]: BRL INGENIERIE, *Bassin versant de l'Ardèche amont et du Lignon, Décembre 1997*

[25]: SOGREAH, *Schéma de gestion du transport solide et des espaces de mobilité des principaux cours d'eau du bassin versant de l'Ardèche, Novembre 2006*

ANNEXES

Annexe 1 Présentation de l'organisme d'accueil



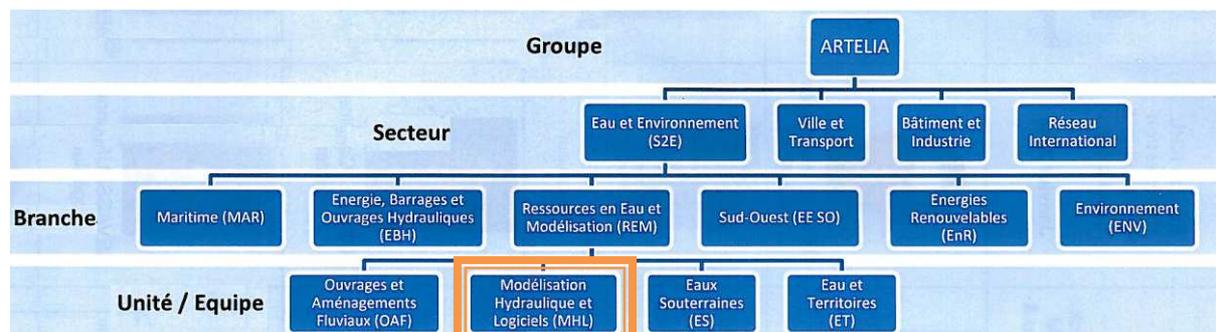
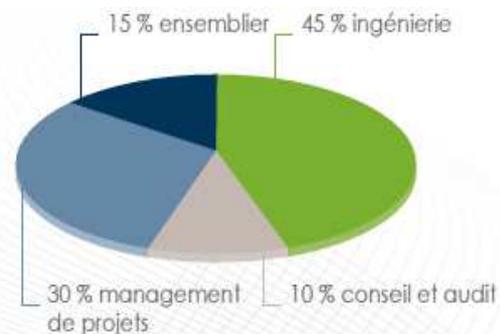
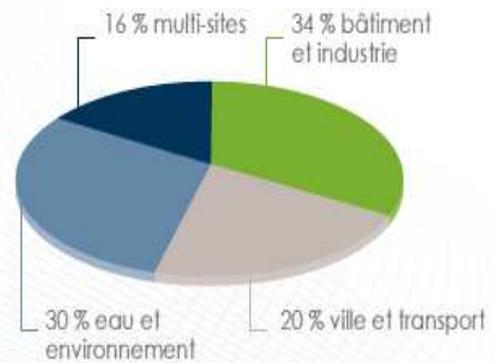
Artelia est né de l'union de Coteba et de Sogreah concrétisée le 30 mars 2010. L'ambition de cette union est de construire un leader européen de l'ingénierie indépendante qui offre à ses clients, publics et privés, une approche originale de l'ingénierie, du management de projet et du conseil répondant aux attentes d'un monde en évolution.

Subdivisée en 4 grands groupes, Artelia exerce ses missions dans neuf domaines d'activité : bâtiment, eau, environnement, énergie, maritime, ville, transport, industrie, multi-sites.

D'un chiffre d'affaire de 300 millions d'Euros, dont 65 % en France et 35 % à l'international Artelia compte 35 agences en France et 60 implantations à l'international.

S'appuyant sur un capital humain de grande valeur, Artelia attire plus de 2800 collaborateurs dont 300 cadres actionnaires.

Mon stage de fin d'étude a été effectué au sein de l'équipe Modélisation Hydraulique et Logiciels (MHL) au siège principale de Sogreah à Grenoble. L'organigramme suivant montre la hiérarchie de l'entreprise jusqu'à l'équipe MHL



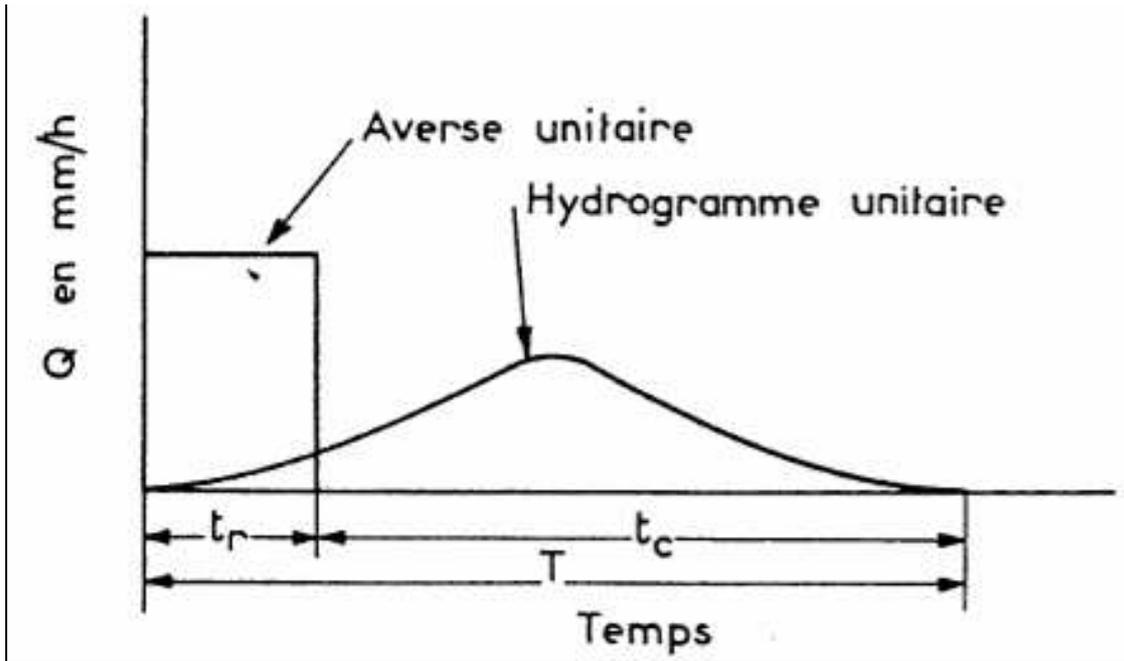


Figure 20 Averse unitaire et hydrogramme unitaire associé (extrait de Réméniéras, 1972)

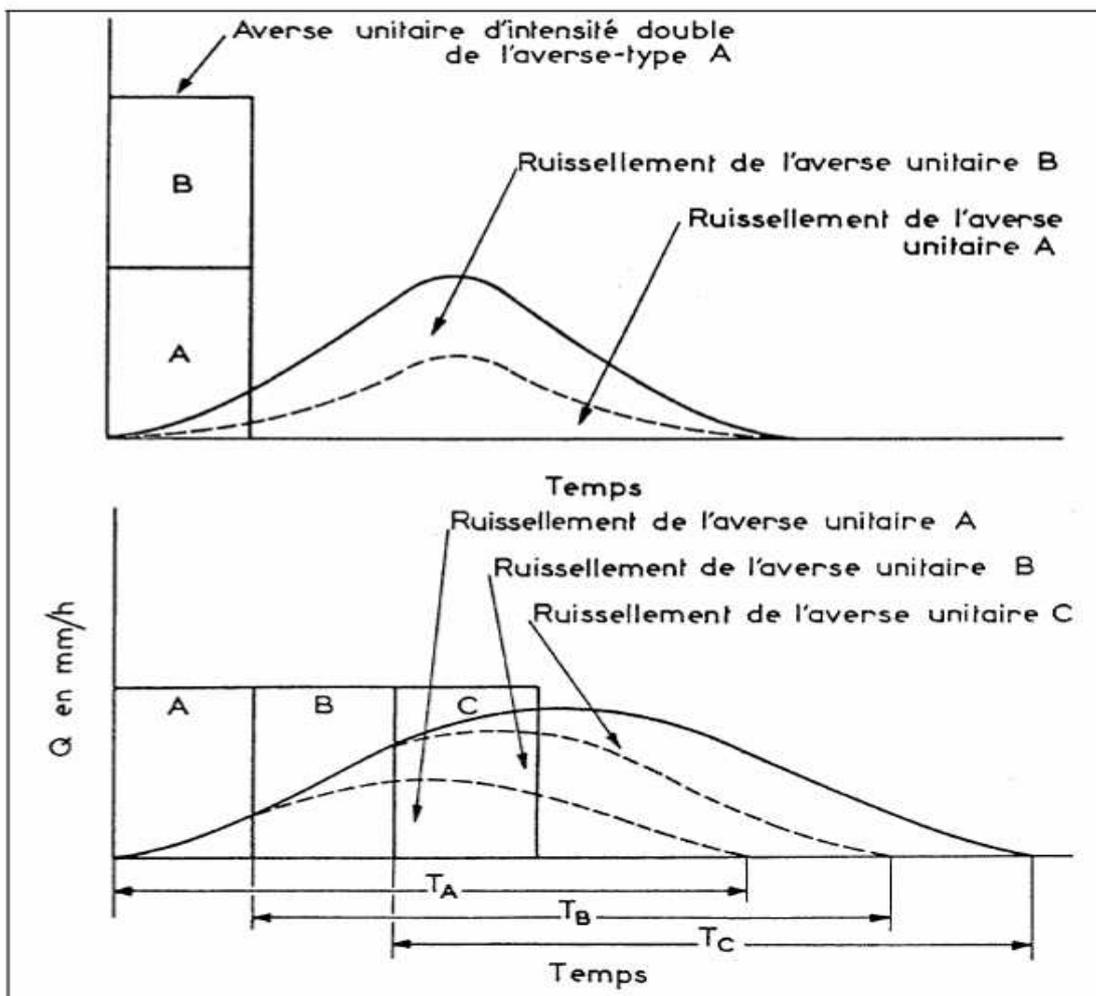


Figure 21 Hydrogrammes liés à des averses non unitaires

Annexe 3 : Détermination mathématique de la formule SPEED

Formules	Paramètres
$t_{base} = 1000 \frac{V}{1,8Q} \quad (1)$	t_{base} Temps de base de la crue triangulaire équivalente (h) V volume de la crue (millions de m ³) Q débit max de la crue (m ³ /s)
$t_{base} = t_{eff} + t_c \quad (2-1)$ $t_{base} = 2 T_c \quad (2-2)$ pour phénomènes exceptionnels (soit $t_{eff} = t_c$)	t_{eff} Durée efficace de la pluie (h) t_c Temps de concentration de la crue (h)
<u>Loi intensité-durée-fréquence :</u> $P_T(t) = a.P_{jT}.t^b \quad (3-1)$ $\text{souvent } P_T(t) = \frac{1}{3}.P_{jT}.t^{0,4} \quad (3-2) \text{ pour les pluies cycloniques pures}$	$P_T(t)$ pluie de durée t et de période de retour T (mm) P_{jT} pluie journalière de même période de retour T (mm)
<u>Gradex :</u> Loi probabiliste des lames d'eau ruisselées parallèle à celle des pluies dès que le temps de retour T est supérieur à T_0 . (On a alors $t_{eff} = t_c$). $R_t = P_T(t_c) - P_0(t_c) \text{ si } T > T_0 \quad (4-1)$ $R_t = 1000 \frac{V}{S} \quad (4-2)$	R_t lame d'eau ruisselée (mm) S surface du BV (km ²)
<u>Temps de base :</u> $t_{base} = k.S^\alpha \quad (5-1)$ souvent $t_{base} = k.S^{0,417}$ Formule proche de Kirpich $t_c = K \left(\frac{L}{\sqrt{P}} \right)^{0,77} \text{ avec } t_{base} = 2t_c$	L longueur du thalweg (km)

$$(1) \Rightarrow Q = 1000 \frac{V}{1,8t_{base}}$$

$$(4-1) \Rightarrow Q = \frac{S^{1-\alpha}}{1,8.k} (P_T(t_c) - P_0(t_c))$$

$$(5-1) \Rightarrow Q = 1000 \frac{V}{1,8.k.S^\alpha}$$

$$(3-2) \Rightarrow P_T(t_c) - P_0(t_c) = a.(P_{jT} - P_{j0})t_c^b$$

$$(4-2) \Rightarrow V = \frac{R_t.S}{1000} \text{ et } Q = \frac{R_t.S}{1,8.k.S^\alpha}$$

$$\Rightarrow Q = \frac{a.S^{1-\alpha}.t_c^b}{1,8.k} (P_{jT} - P_{j0})$$

$$(2-2) \text{ et } (5-1) \Rightarrow t_c = \frac{t_{base}}{2} = \frac{k.S^\alpha}{2}$$

$$\Rightarrow Q = \frac{a.k^{b-1}S^{1+\alpha.(b-1)}}{1,8 \times 2^b} (P_{jT} - P_{j0})$$

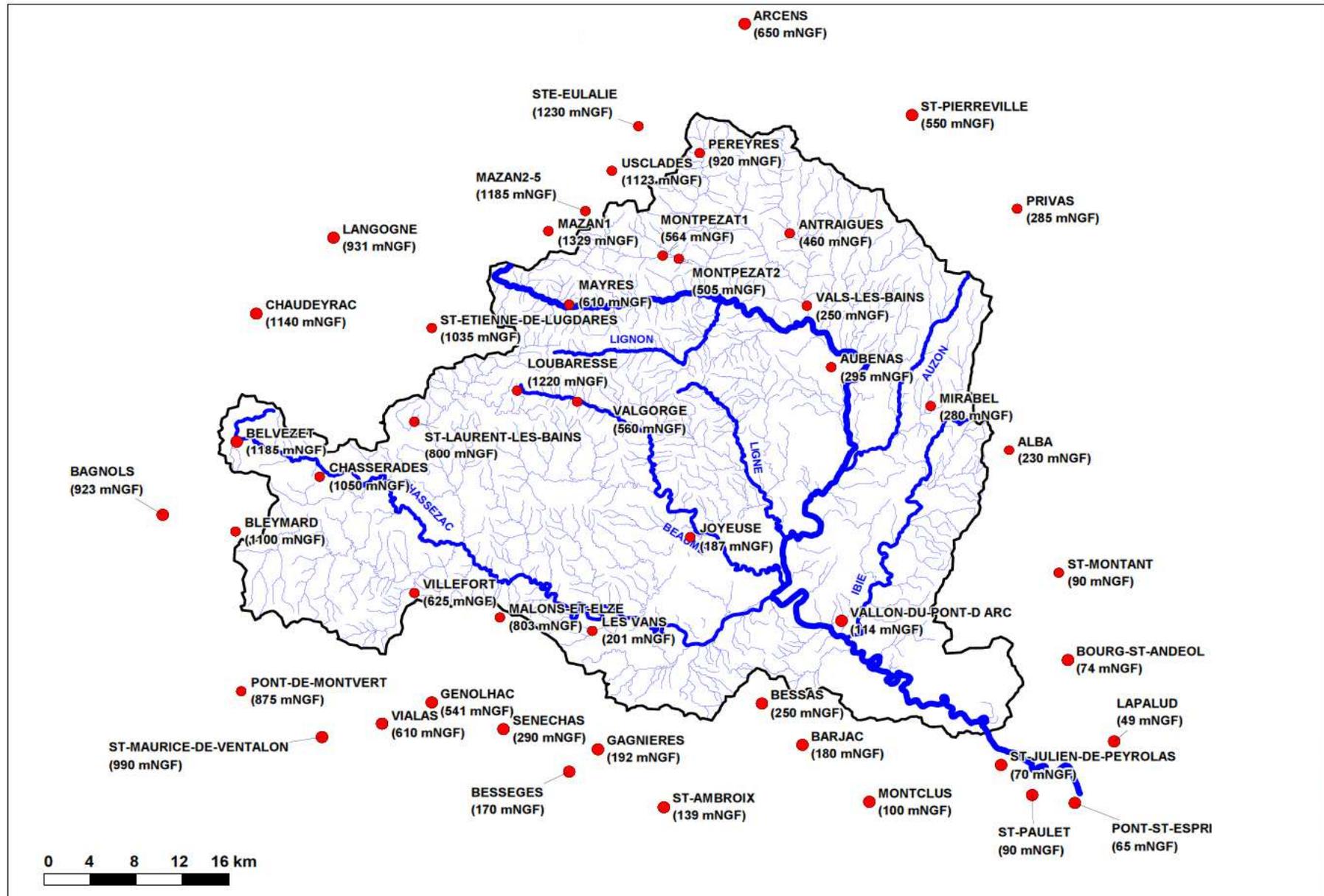
Application numérique :

a=	0.33333333
b=	0.4
α =	0.417
k=	2.384



$$Q = \frac{S^{0,7498}}{12} (P_{jT} - P_{j0})$$

Annexe 4 Localisation des postes pluviométriques sur le bassin de l'Ardèche



Annexe 5 Présentation de la méthode SPEED

La méthode SPEED est fondée d'une part sur une **analyse** particulière et **régionale des pluies** et, d'autre part, sur la **relation probabiliste** mise en évidence par SOGREAH **entre pluie** et **débit de crue**. Elle présente donc deux aspects distincts :

- **L'analyse régionale des pluies journalières :**

Les maxima annuels des pluies journalières, comme d'autres phénomènes météorologiques accidentels, suivent une loi de Gumbel ; L'ajustement des pluies observées sur graphique de Gumbel se traduit par une droite définie par Y_0 , le pivot de la distribution et P_{jm} , la valeur moyenne des pluies journalières

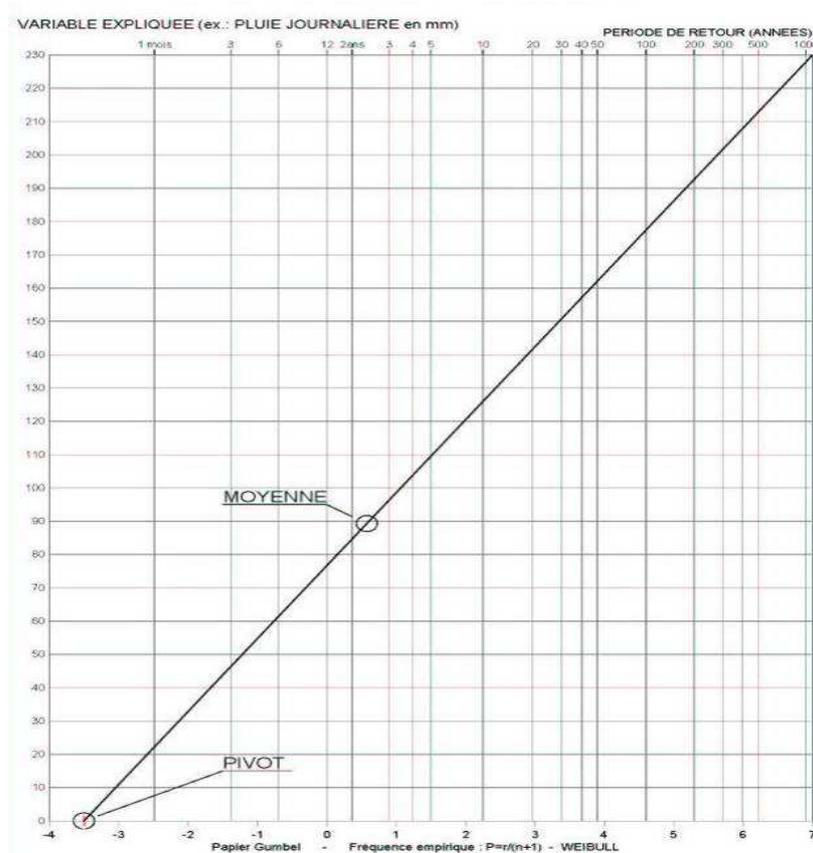


Figure 22 Graphique type de Gumbel

On a pu démontrer qu'il est lié au nombre d'événements indépendants d'où sont tirés les maxima annuels. Ce nombre est donc invariant sur une région donnée.

Ce paramètre Y_0 étant connu, la caractérisation des pluies sur le bassin ne dépend plus alors que de la seule valeur moyenne des pluies.

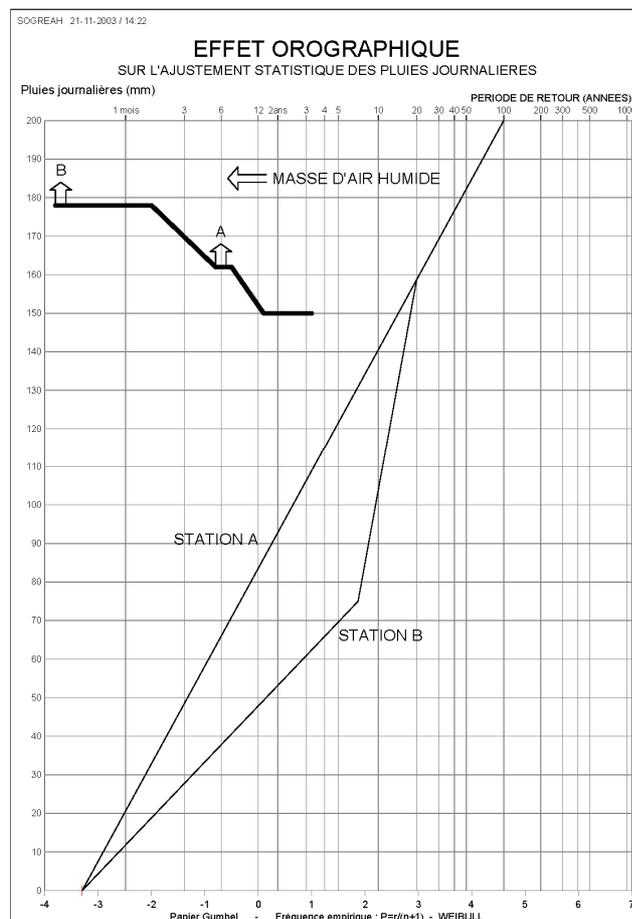
L'intérêt de régionaliser l'étude réside en premier lieu dans la détermination du pivot ce qui permet de réduire l'incertitude sur les ajustements statistiques. Mais la régionalisation a permis, au fil des applications de la méthode, de mettre en évidence des phénomènes

particuliers liés à la géographie du secteur d'étude et révélant des "cassures" dans les droites d'ajustement de Gumbel. Des cassures qui sont dues aux **effets orographiques**, aux **pluies mixtes** ou au phénomène de **Bulle Froide**

EFFET OROGRAPHIQUE

Le premier effet est observable sur une station située en aval d'une chaîne de montagne (par rapport au flux des masses d'air humides).

Considérons deux stations A et B comme indiqué sur la figure suivante, la première étant sur le versant montagneux amont et la seconde en aval du versant recevant la perturbation.



Lorsqu'une masse d'air chaude et humide arrive sur le versant, le massif montagneux l'oblige à s'élever en altitude ce qui se traduit par des pluies. Lorsque la masse d'air arrive en B, son humidité a diminué ce qui se traduit en B par des pluies moins intenses qu'en A. Sur un graphique de Gumbel cela se traduirait par deux ajustements A et B passant par le même pivot mais dont la pente (le Gradex) est plus faible pour la station B que pour la station A.

Or, si l'on considère une masse d'air de grande ampleur et très humide donc un phénomène de fréquence rare, on peut imaginer que les pluies tombant en A ne provoquent qu'un faible "assèchement" de la masse d'air qui arrive en B avec quasiment les mêmes potentialités

qu'en A. Il s'en suit des pluies en B comparables à celles tombées en A. Sur un graphique de Gumbel, cela conduit à une cassure pour l'ajustement B : en dessous d'une certaine période de retour T1 les pluies sont inférieures aux pluies en A et au-dessus d'une autre période de retour T2, les pluies sont identiques aux pluies A.

BULLES FROIDES (GOUTTE FROIDE)

Le phénomène des bulles froides conduit au même résultat que celui exposé précédemment.

Il peut apparaître sur des stations situées à proximité d'un relief même réduit et en amont de ce relief par rapport au flux des perturbations atmosphériques.

Il arrive parfois qu'une masse d'air froide se bloque contre le relief et joue alors, pour la masse d'air chaude et humide qui survient, le rôle d'un relief plus prononcé c'est à dire provoque une ascension de cette masse d'air humide générant ainsi des pluies plus intenses que celles qu'il y aurait en l'absence de la masse d'air froide.

Ce phénomène est fréquent dans les Pyrénées orientales ou dans le sud-est de la France où il peut concerner des bassins étendus et explique les crues exceptionnelles survenues ces deux dernières décennies à Nîmes, Vaisonla Romaine entre autres. Il explique également des cassures constatées sur le bassin de la Moselle par exemple.

Il conduit à des ajustements comparables à ce qui était décrit précédemment pour la station B.

PLUIES MIXTES

Si l'échantillon est composé de deux familles distinctes de pluies (pluies d'origine convective et pluies d'origines cyclonique) il peut y avoir une cassure. C'est le cas par exemple lorsque les orages conduisent à des pluies journalières largement supérieures aux pluies journalières d'origine cyclonique.

Les études conduites jusqu'à présent en France ont permis de dégager quatre classes différentes de valeur du pivot. Chacune de ces classes est associée à un processus pluviométrique particulier. On trouve les pivots compris entre -3.3 et -3.5 pour les pluies liées aux flux d'ouest. Un pivot de -2.5 pour le sud Est de l'hexagone dû aux pluies cévenoles. Les hautes altitudes comme les Alpes ont leur propre pivot de -4.5. Ces pivots sont obtenus à partir d'un travail sur les maxima annuels des pluies journalières sur différentes régions de la France.

- **Relation pluie-débit :**

La relation pluie-débit de la méthode SPEED a été obtenue à partir d'une recherche théorique basée sur les théories de l'hydrogramme unitaire et du Gradex, en tenant compte

de précipitations réparties en intensité-durée-fréquence par une loi classique de Montana (voir démonstration en Annexe 3).

$$\begin{aligned}
 Q_T &= \frac{S^{0,75}}{12} (P_T - P_0) && \text{si } T > T_0 \\
 Q_T &= \frac{S^{0,75}}{12} (C_0 P_T) && \text{si } T < T_0
 \end{aligned}
 \tag{11}$$

Avec

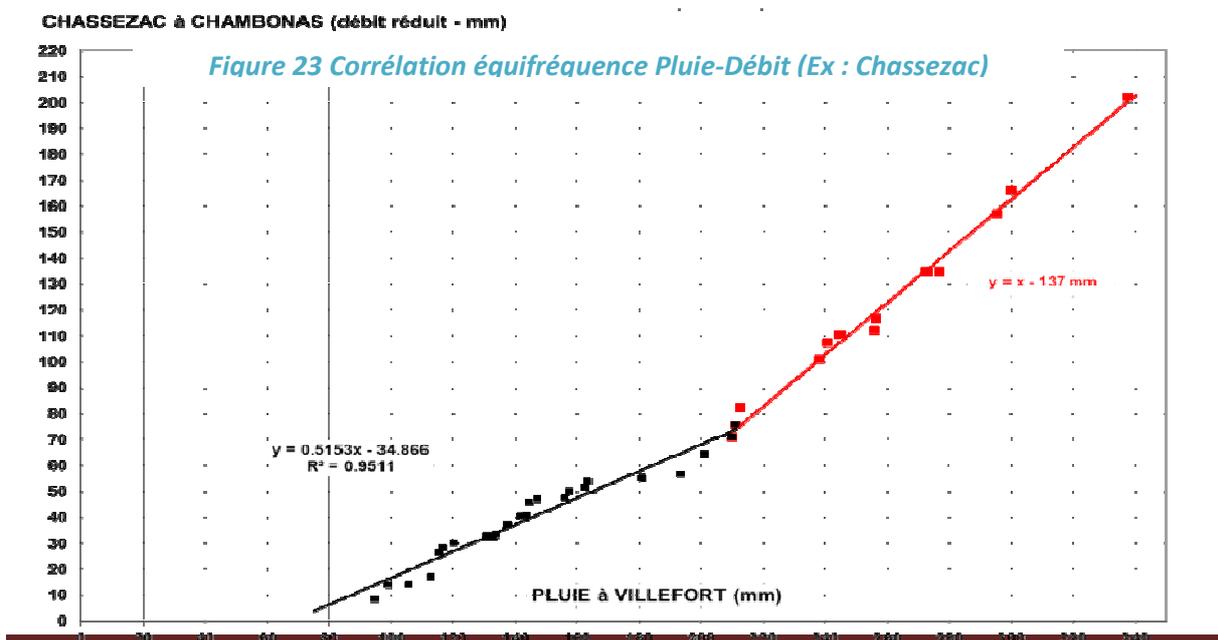
- QT = débit de pointe de crue de période de retour T (années),
- PT = précipitation journalière ponctuelle de même période T,
- S = superficie du bassin versant, en km²,
- P0 = seuil probabiliste de ruissellement, en mm,
- Co = coefficient de proportionnalité des faibles crues aux pluies.

La théorie s'ajuste aussi à la pratique pour inciter à choisir la **loi de Gumbel** comme loi universelle d'ajustement des maxima annuels de crues et de précipitations journalières.

Les analyses à effectuer consistent donc à comparer les **échantillons de débits à des échantillons de pluies disponibles sur la même période** que celle des débits. On transforme tout d'abord les débits de pointe en un équivalent Qre en mm (appelé débit réduit) :

$$Q_{re} = \frac{12 \cdot Q}{S^{0,75}} \tag{12}$$

Cette analyse par corrélation probabiliste s'effectue séparément pour chaque station hydrométrique. La corrélation est probabiliste dans la mesure où l'on compare les échantillons classés dans l'ordre croissant (on dispose sur un graphique les points de coordonnées pluie-débit, le premier point correspondant à la plus forte valeur de débit réduit et à la plus forte valeur de pluie, le second point aux secondes valeurs etc...). Ceci est illustré par **Figure 23** où l'on détecte bien deux branches distinctes.



A partir des relations obtenues entre un poste limnigraphique et plusieurs postes pluviométriques, on détermine les paramètres C_0 et P_0 propres au bassin considéré.

Les relations obtenues sont ensuite appliquées à l'ajustement de la pluie caractéristique sur le bassin pour en déduire l'ajustement des débits réduits, comme le montre la figure suivante où on a disposé sur un graphique de Gumbel l'ajustement des pluies et celui des débits réduits (Q_{re} en mm).

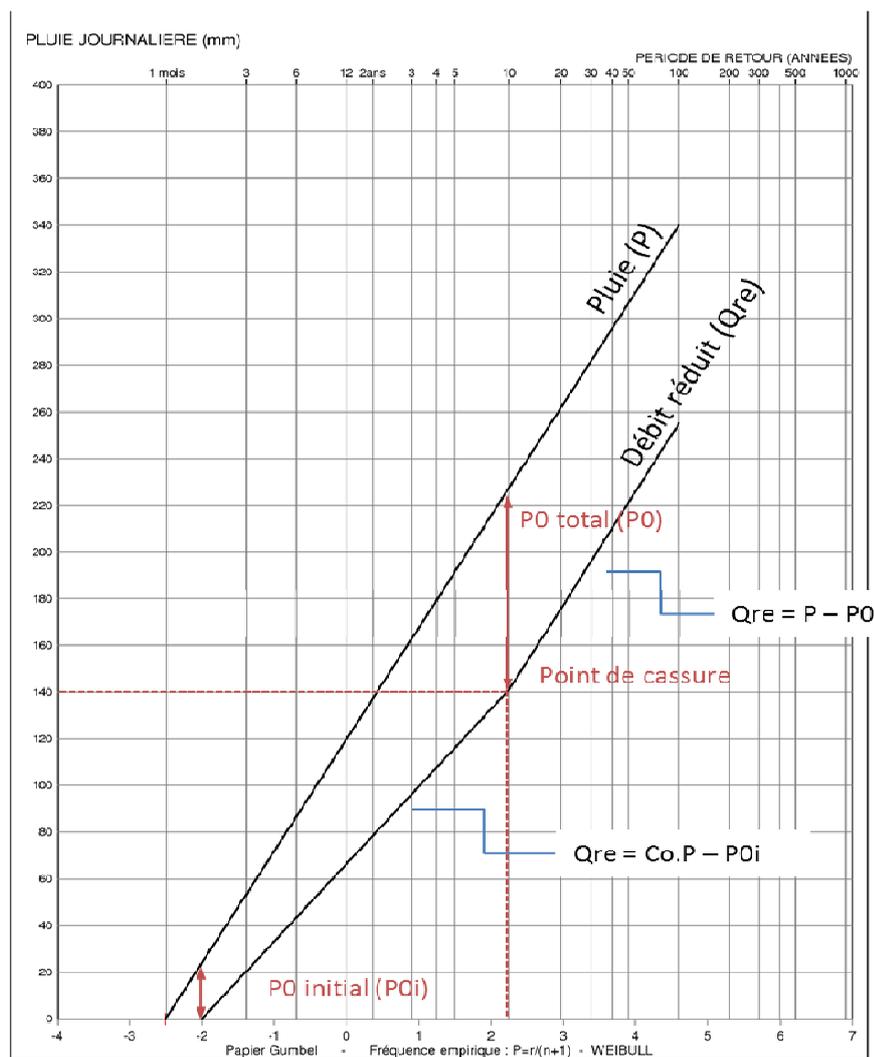


Figure 24 Illustration des relations représentées

Parfois, on observe que la première partie de la lame d'eau précipitée n'est pas directement transformée en lame d'eau écoulee : une partie s'infiltré. Cela se traduit par une différence de pivot entre la pluie et le débit : c'est alors que l'on parle de la notion de pertes initiales caractérisées par la grandeur « P_{0i} ». Ce cas est principalement observé sur des bassins de nature karstique mais a été également constaté sur des bassins dont la couche supérieure du substratum (granitique ou basaltique) est fortement dégradée.

En résumé, c'est la connaissance du pivot (ou des pivots) ainsi que la compréhension des cassures (zone de transition de pivot ou phénomènes orographiques) qui permet de réduire l'incertitude sur les ajustements des pluies. Ensuite Il s'agit de déterminer les paramètres des lois de probabilité existant entre les pluies journalières et les débits de pointe de crue pour transférer le gain de précision obtenu sur les pluies à l'ajustement des débits pour lesquels, en général, les données sont moins nombreuses, tant temporellement que spatialement.

Les paramètres C0 et surtout P0 dépendent de la géologie du bassin versant considéré.

L'étude consistera donc à déterminer le paramètre P0 associé à la saturation de chacun des bassins versants considérés puis à l'appliquer aux pluies caractéristiques sur ces bassins pour déterminer les débits réduits caractéristiques.

Sur un bassin versant homogène (en pluviométrie et en géologie), il suffira de déterminer la superficie du bassin au droit du point considéré pour connaître les débits caractéristiques en transformant les débits réduits en débit par la formulation suivante :

$$Q_{(T)} = Q_{re(T)} \frac{S^{0,75}}{12} \quad (13)$$

Nous traiterons ainsi chacune des stations limnimétriques fournissant suffisamment de données. Celles-ci sont représentées sur la Figure 25.

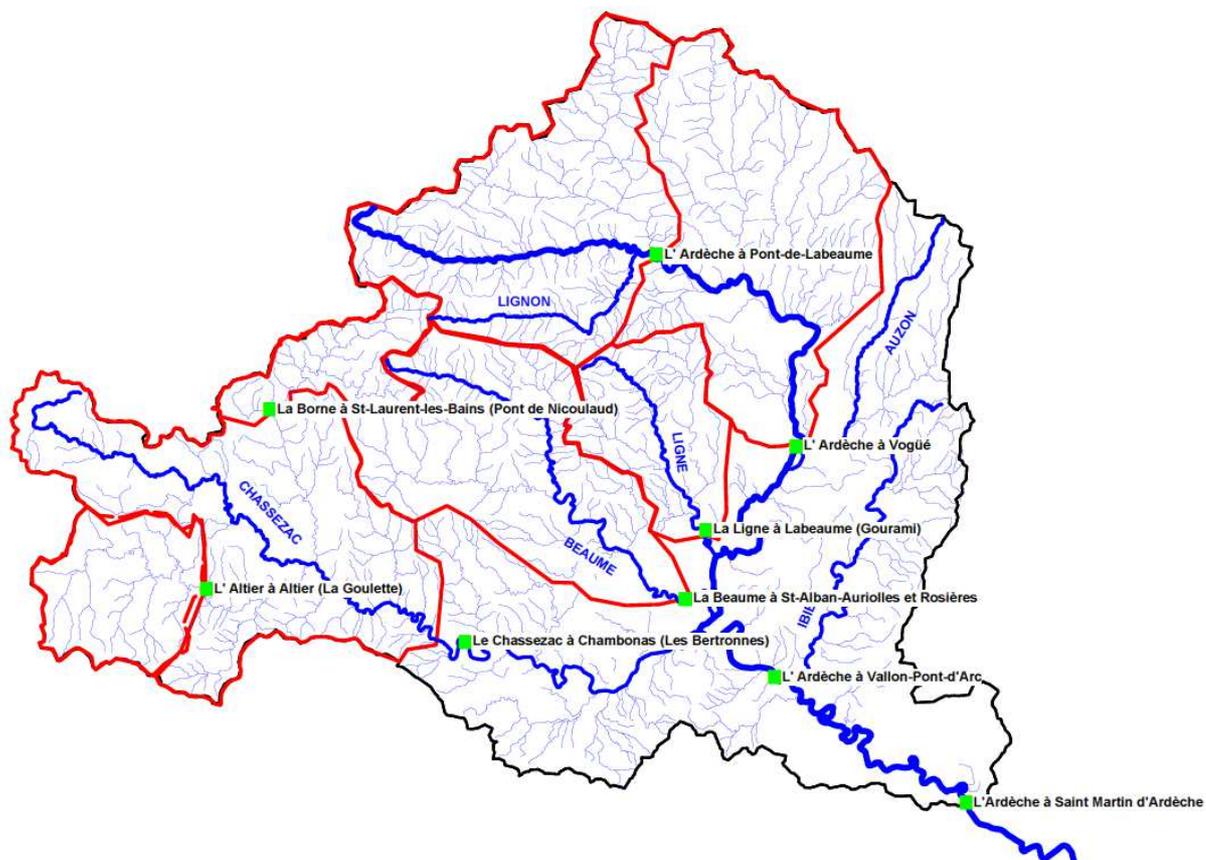


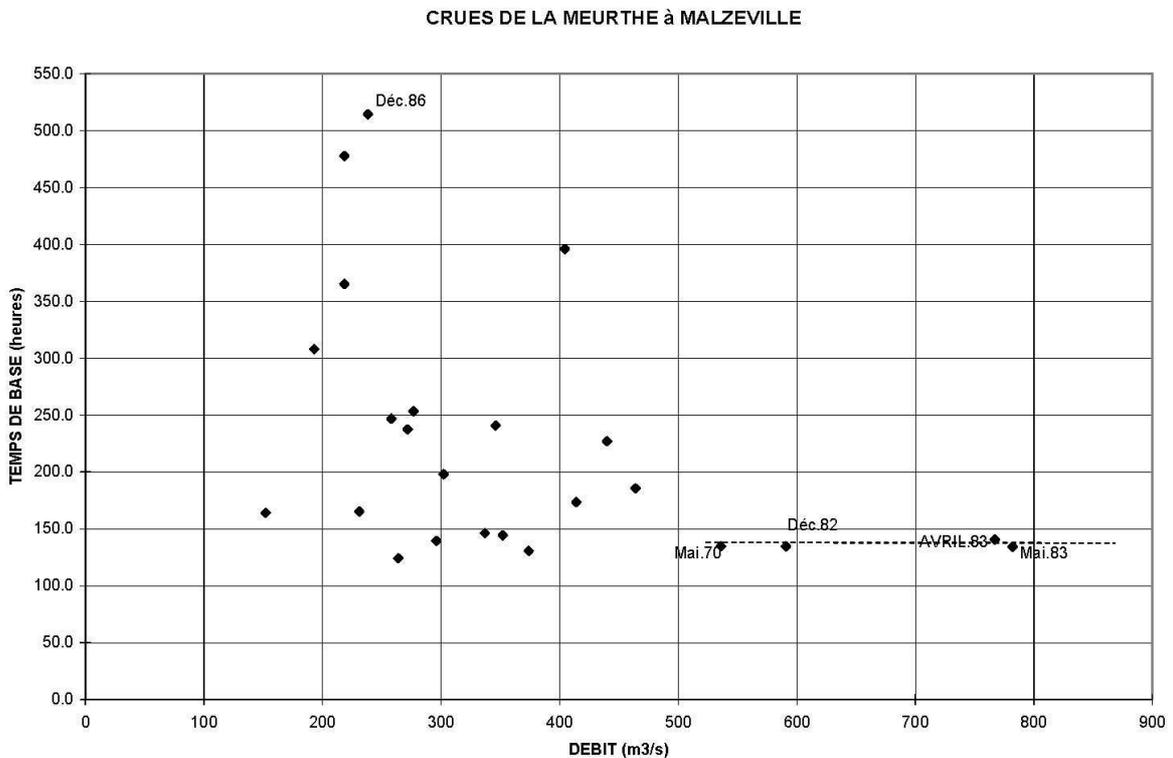
Figure 25 Carte de situation des stations limnimétriques

Annexe 6 Liste des stations pluviométriques utilisées

CODE	STATION PLUVIO	ALTITUDE (mNGF)	Début	Fin	Nb années
07005	ALBA	230	1948	2010	61
07011	ANTRAIQUES	460	1953	2010	58
07012	ARCENS	650	1960	2010	51
07019	AUBENAS	180	1853	2010	62
48014	BAGNOLS-LES-BAINS	918	1873	2010	137
30029	BARJAC	180	1887	1934	49
48023	BELVEZET	1185	1923	1978	56
07033	BESSAS	230	1933	2010	74
30037	BESSEGES	170	1970	1985	16
48027	BLEYMARD	1199	1957	2010	54
07042	BOURG-ST-ANDEOL	74	1930	2010	78
48040	CHASSERADES	1050	1971	2010	52
48045	CHAUDEYRAC	1140	1884	2004	101
30120	GAGNIERES	192	1953	1976	24
30130	GENOLHAC	541	1887	2010	124
07110	JOYEUSE	187	1933	2010	80
48080	LANGOGNE	931	1871	2004	124
84064	LAPALUD	46	1877	2010	64
07334	LES VANS	201	1957	2010	52
07144	LOUBARESSÉ	1220	1942	2010	65
30153	MALONS-ET-ELZE	803	1885	2010	117
07153	MAYRES	610	1900	2010	81
07154	MAZAN-L ABBAYE 1	1300	1931	1968	36
07154	MAZAN-L'ABBAYE 2	1240	1928	2010	70
07159	MIRABEL	280	1929	2010	82
30175	MONTCLUS	120	1961	2010	50
07161	MONTPEZAT 1	600	1900	2010	82
07161	MONTPEZAT 2	480	1954	2010	57
07173	PEREYRES	920	1965	2010	45
48116	PONT-DE-MONTVERT	865	1873	2010	137
30202	PONT-ST-ESPRIT	65	1887	2010	113
07186	PRIVAS	285	1865	2010	132
30316	SENECHAS	290	1985	2000	16
30227	ST-AMBROIX	139	1887	2000	93
07235	STE-EULALIE	1400	1928	1970	27
07232	ST-ETIENNE-DE-LUGDARES	1025	1950	2010	61
30273	ST-JULIEN-DE-PEYROLAS	70	1971	2010	40
07262	ST-LAURENT-LES-BAINS	800	1965	2010	73
48172	ST-MAURICE-DE-VENTALON	990	1944	1989	40
07279	ST-MONTANT	90	1944	2010	66
30290	ST-PAULET-DE-CAISSON	90	1945	1953	9
07286	ST-PIERREVILLE	600	1900	2010	67
07326	USCLADES-ET-RIEUTORD	1123	1952	1976	26
07329	VALGORGE	560	1900	2010	95
07330	VALLON-DU-PONT-D ARC	114	1946	2010	63
07331	VALS-LES-BAINS	250	1867	2010	109
48194	VIALAS	610	1874	2010	77
48198	VILLEFORT	620	1872	2010	124

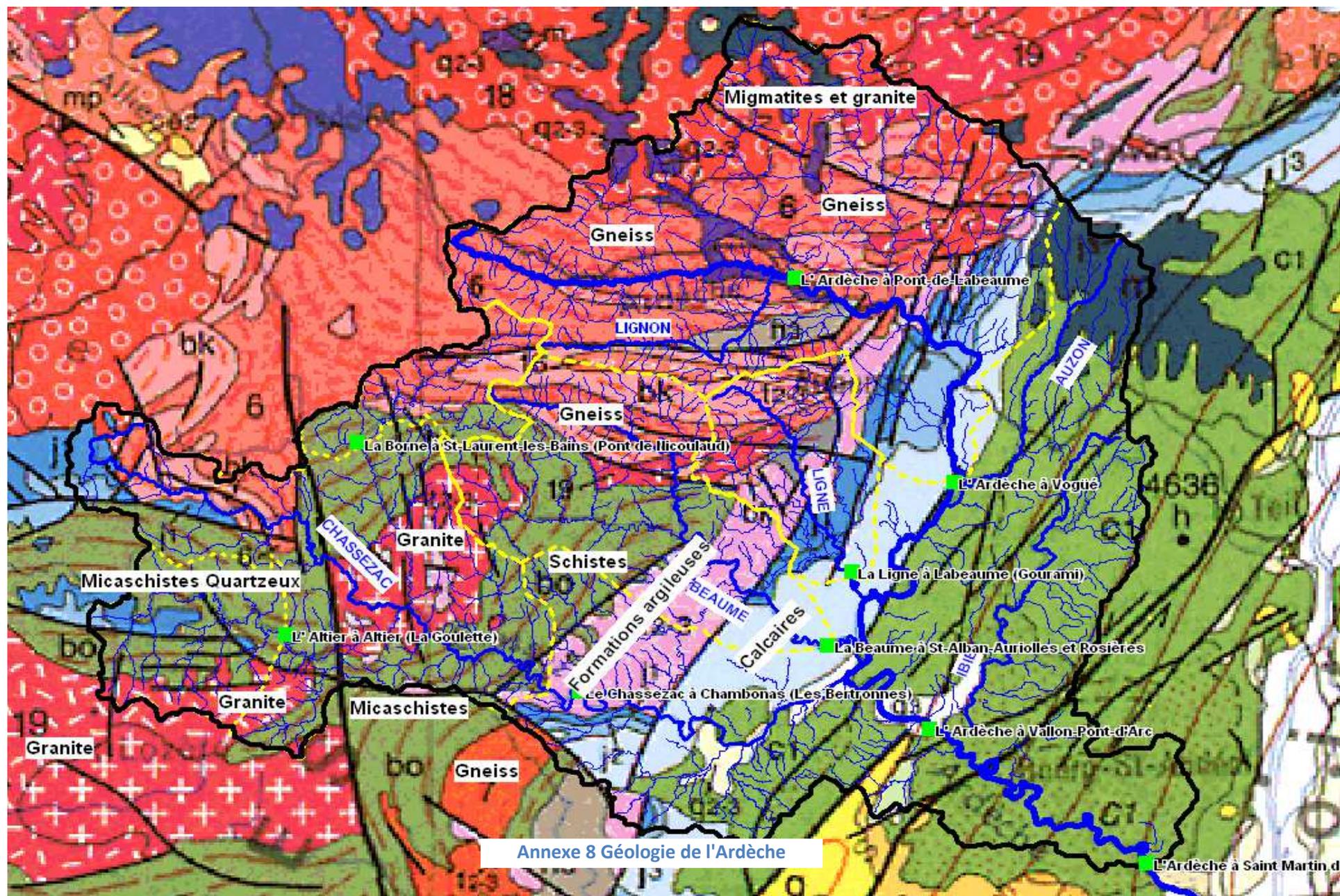
Annexe 7 Démonstration d'évaluation du temps de concentration

Lors d'une étude générale sur le bassin de la Moselle et de la Meurthe pour laquelle les données étaient très nombreuses. Le graphique suivant, extrait de cette étude, montre qu'à partir d'une certaine période de retour (environ 10 ans dans le cas de la Moselle), le temps de base est constant.



On voit que, si on ne dispose pas d'hydrogramme de crue exceptionnelle, la valeur minimale empirique correspond en principe au temps de concentration inhérent au bassin.

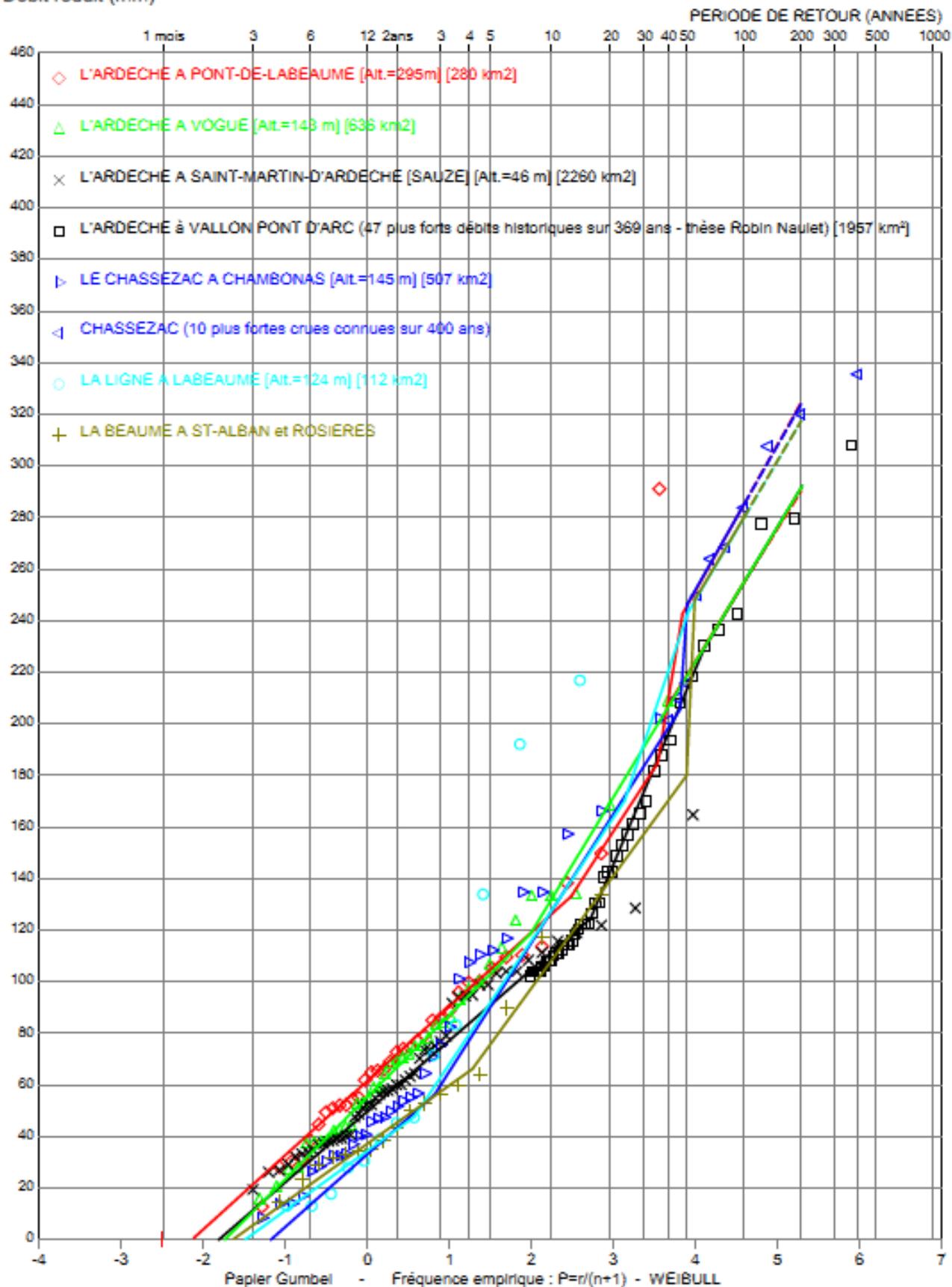
Tant que le seuil n'est pas atteint, le temps de base est une variable aléatoire qui dépend essentiellement de la pluie (durée, déplacement, répartition spatiale).



BASSIN VERSANT DE L'ARDECHE

ANALYSE REGIONALE DES DEBITS REDUITS

Débit réduit (mm)



Annexe 9 Homogénéité du P0 sur le bassin de l'Ardèche

Annexe 10 Crues historiques de l'Ardèche à Vallon Pont d'Arc et Sauze Saint Martin (Naulet)

TAB. 5.8 (suite) – Liste des crues de l'Ardèche à Vallon, Sauze et St-Martin

Station de Vallon (n 53)													Station de St-Martin (n 61)												
ans	mm	j	hh	min	H	Z0	C	Q	Qsup	Qinf	S	N	ans	mm	j	hh	min	H	Z0	C	Q	Qsup	Qinf	S	N
seuil													seuil												
2250													5.00 45.70 3 2400												
f1													h2												
Période													Période												
1892	01	01	00	00									1892	01	01	00	00								
1979	12	31	23	59									1979	12	31	23	59								
1899	11	02	30	00	10.10	78.69	1	3650	5200	2900	8		1899	11	02	22	00	6.20	45.70	3	3950	5500	2400	8	
1900	09	28	22	00	13.80	78.69	1	5800	8650	4400	8		1900	09	29	01	00	7.40	45.70	3	5750	8850	3450	9	
1903	10	29						2600	3500	3000		d1	1903	10	29			5.30	45.70	3	2750	3600	1900	30	
1907	09	27	00	00	8.00	78.69	1	2550	3450	1950	9		1907	09	27			5.30	45.70	3	2750	3600	1900	20	
1907	10	16	21	00	11.50	78.69	1	4450	6450	3400	9		1907	10	16			6.80	45.70	3	4800	6750	2900	30	
1910	10	30			8.50	78.69	1	2800	3850	2150	10		1910	10	30						3000	5300	950		c2
1910	12	06	17	00	9.30	78.69	1	3200	4500	2450	11		1910	12	06			5.80	45.70	3	3400	4650	2200	20	
1914	07	22	07	30	8.00	78.69	1	2550	3450	1950	11		1914	07	22						2700	4800	800	30	c2,k2
1914	11	03			8.00	78.69	1	2550	3450	1950	9		1914	11	03	18	00	5.10	45.70	3	2500	3200	1800	30	
1917	05	29						3200	4500	2450	11	d1,g1	1917	05	29	19	30	5.80	45.70	3	3400	4650	2200	20	
1924	11	29			8.80	78.69	2	2550	3300	1800	12		1924	11	29						2700	4800	800		c2
1927	08	18			9.00	78.69	2	2650	3400	1850	12		1927	08	18						2800	5000	850		c2
1930	06	26			9.70	78.69	2	3000	3950	2000	12		1930	06	26						3200	5650	1000		c2
1933	09	29			8.15	78.69	2	2300	2900	1650	12		1933	09	29						2450	4350	700	20	c2,j2
1933	10	08			10.60	78.69	2	3500	4800	2250	12		1933	10	08						3700	6450	1200	20	c2,k2
1935	12	25						2350	3000	1700	11	d1,h1	1935	12	25			5.10	45.70	3	2500	3200	1800	12	
1937	11	01						2700	3500	1850	11	d1,j1	1937	11	01			5.35	45.70	3	2850	3700	1950	12	
1947	02	10						2300	2900	1650	11	d1,j1	1947	02	10	16	00	4.40	45.70	4	2450	3100	1750	12	
1949	11	20	11	00	8.80	78.69	2	2550	3300	1800	11		1949	11	20						2700	3200	1900	20	c2,l2
1951	11	10			10.60	78.69	2	3500	4800	2250	13		1951	11	10	15	00	7.80	45.70	4	3700	5100	2300	18	
1951	11	19			8.50	78.69	2	2450	3100	1750	11	k1	1951	11	19						2900	3300	1850		c2
1956	03	22						3000	4050	1950	11	d1,j1	1956	03	22	06	00	5.30	45.70	4	3200	4300	2100	20	
1957	12	25	12	00	8.20	78.69	2	2300	2950	1700	11		1957	12	25	15	00	5.50	45.70	4	3400	4600	2300	16	
1958	09	30	19	30	12.20	78.69	2	4750	6850	2850	14		1958	09	30	22	30	6.70	45.70	4	4800	6700	2850	14	
1958	10	04						3850	5400	2300	11	d1,m1	1958	10	04	16	30	6.15	45.70	4	4100	5750	2450	16	
1958	12	20	07	00	9.70	78.69	2	2950	3900	2000	11		1958	12	20	06	00	5.90	45.70	4	3800	5300	2350	16	
1959	12	11	00	00	8.00	78.69	2	2250	2850	1650	11		1959	12	11						2400	3050	1750		c2
1960	10	06	04	00	9.00	78.69	2	2650	3400	1850	11		1960	10	06	06	00	5.40	45.70	4	3300	4450	2150	20	
1960	10	23	16	00	9.30	78.69	2	2750	3600	1900	11		1960	10	23	18	30	5.48	45.70	4	3400	4600	2200	20	
1963	11	06	07	00	9.40	78.69	2	2800	3650	1950	11		1963	11	06	13	30	5.66	45.70	4	3550	4900	2250	20	
1970	10	08	00	00	10.00	78.69	2	3100	4150	2100	14		1970	10	08						3300	4400	2250		c2
1973	12	24	09	00	8.60	78.69	2	2450	3200	1750	14		1973	12	24						2600	3400	1850		c2
1976	08	29	22	00	9.10	78.69	2	2650	3450	1850	14		1976	08	29						2900	3650	1950		c2
1976	09	12	14	20	9.60	78.69	2	2900	3800	1950	14		1976	09	12						3100	4050	2050		c2
1976	11	10	18	00	10.50	78.69	2	3450	4650	2300	14		1976	11	10						3650	4950	2350		c2
1977	01	01	17	45	8.00	78.69	2	2250	2850	1650	14		1977	01	01						2400	3050	1750		c2
1977	10	23	29	15	12.00	78.69	2	4600	6400	2750	14		1977	10	23						4900	6800	2950		c2
1977	12	08	12	00	8.90	78.69	2	2600	3350	1850	14		1977	12	08						2750	3550	1950		c2

Station de Sauze (n 61)												
ans	mm	j	hh	min	H	Z0	C	Q	Qsup	Qinf	S	N
1957	12	25	15	00	7.25	45.62	5	3300	4450	2150	22	
1958	09	30	22	30	9.20	45.62	5	5400	7550	3250	21	
1970	10	08			7.72	46.00	5	4150	5800	2500	23	
1977	10	23			8.12	46.00	5	4600	6450	2750	23	

NOTES :

- d1 Débit transféré depuis St-Martin
- f1 Seuil à partir de la place de l'église à St-Martin
- g1 Maximum manqué (7.9 m à 17:00 et 8.1 m à 20:00)
- h1 Maximum manqué (5.2 m à 12:00 et 5.8 m à 17:00)
- i1 Maximum manqué (6.5 m à 7:00 et 6.8 m à 12:00)
- j1 Maximum manqué (5 m à 7:00)
- k1 Maximum manqué (8 m à 7:00), maxi d'après la source H
- l1 Maximum manqué (2.8 m à 7:00)
- m1 Maximum manqué (9.2 m à 12:00 et 8.4 m à 17:00)
- c2 Débit transféré depuis Vallon
- h2 Seuil à partir de la place de l'église à St-Martin
- l2 Maximum Manqué (4.5 m à 7:00)
- j2 Maximum Manqué (2.1 m à 7:00)
- k2 Maximum Manqué (0.7 m à 7:00)
- l2 Maximum Manqué (4.1 m à 11:00)

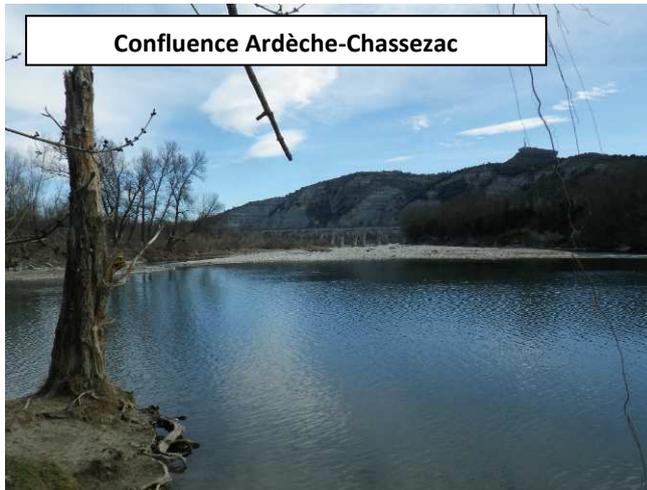
TAB. 5.8 (suite) – Liste des crues de l'Ardèche à Vallon, Sauze et St-Martin

Station de Vallon (n 53)													Station de St-Martin (n 64)																				
ans	mm	jj	hh	min	H	Z0	C	Q	Qsup	Qinf	S	N	ans	mm	jj	hh	min	H	Z0	C	Q	Qsup	Qinf	S	N								
												seuil																					
												2250																					
												f1																					
Période													Période																				
1892	01	01	00	00													1892	01	01	00	00												
1979	12	31	23	50													1979	12	31	23	50												
1899	11	02	20	00	10.10	78.69	1	3650	5200	2800	8		1899	11	02	22	00	6.20	45.70	3	3950	5500	2400	8									
1900	09	28	22	00	13.80	78.69	1	5800	8650	4400	8		1900	09	29	01	00	7.40	45.70	3	5750	8050	3450	9									
1903	10	29						2600	3500	3000		d1	1903	10	29			5.30	45.70	3	2750	3600	1900	30									
1907	09	27	00	00	8.00	78.69	1	2550	3450	1950	9		1907	09	27			5.30	45.70	3	2750	3600	1900	20									
1907	10	16	21	00	11.50	78.69	1	4450	6450	3400	9		1907	10	16			6.80	45.70	3	4800	6750	2900	20									
1910	10	30			8.50	78.69	1	2800	3850	2150	10		1910	10	30						3000	5300	950		e2								
1910	12	06	17	00	9.30	78.69	1	3200	4500	2450	11		1910	12	06			5.80	45.70	3	3400	4650	2200	20									
1914	07	22	07	30	8.00	78.69	1	2550	3450	1950	11		1914	07	22						3700	4800	800	20	e2,k2								
1914	11	03			8.00	78.69	1	2550	3450	1950	9		1914	11	03	18	00	5.10	45.70	3	2500	3200	1800	20									
1917	05	20						3200	4500	2450	11	d1,g1	1917	05	20	10	30	5.80	45.70	3	3400	4650	2200	20									
1924	11	20			8.80	78.69	2	2550	3300	1800	12		1924	11	20						2700	4800	800		e2								
1927	08	18			9.00	78.69	2	2650	3400	1850	12		1927	08	18						2800	5000	850		e2								
1930	06	26			9.70	78.69	2	3000	3950	2000	12		1930	06	26						3200	5950	1000		e2								
1933	09	29			8.15	78.69	2	2300	2900	1650	12		1933	09	29						2450	4350	700	20	e2,j2								
1933	10	08			10.00	78.69	2	3500	4800	2250	12		1933	10	08						3700	6450	1200	20	e2,k2								
1935	12	25						2350	3000	1700	11	d1,h1	1935	12	25			5.10	45.70	3	2500	3200	1800	12									
1937	11	01						2700	3500	1850	11	d1,l1	1937	11	01			5.35	45.70	3	2850	3700	1950	12									
1947	02	10						2300	2900	1650	11	d1,j1	1947	02	10	16	00	4.40	45.70	4	2450	3100	1750	12									
1949	11	20	11	00	8.80	78.69	2	2550	3300	1800	11		1949	11	20						2700	3300	1900	20	e2,l2								
1951	11	10			10.60	78.69	2	3500	4800	2250	13		1951	11	10	15	00	5.80	45.70	4	3700	5100	2300	18									
1951	11	19			8.50	78.69	2	2450	3100	1750	11	k1	1951	11	19						2800	3300	1850		e2								
1956	03	22						3000	4050	1950	11	d1,j1	1956	03	22	06	00	5.30	45.70	4	3300	4300	2100	20									
1957	12	25	12	00	8.20	78.69	2	2300	2950	1700	11		1957	12	25	15	00	5.50	45.70	4	3400	4600	2200	16									
1958	09	30	19	30	12.30	78.69	2	4750	6050	2850	14		1958	09	30	22	30	6.70	45.70	4	4800	6700	2850	14									
1958	10	04						3850	5400	2300	11	d1,m1	1958	10	04	14	30	6.15	45.70	4	4100	5750	2450	16									
1958	12	20	07	00	9.70	78.69	2	2950	3900	2000	11		1958	12	20	06	00	5.90	45.70	4	3800	5300	2350	16									
1959	12	11	00	00	8.00	78.69	2	2250	2850	1650	11		1959	12	11						2400	3050	1750		e2								
1960	10	06	04	00	9.00	78.69	2	2650	3400	1850	11		1960	10	06	06	00	5.40	45.70	4	3300	4450	2150	20									
1960	10	23	16	00	9.30	78.69	2	2750	3600	1900	11		1960	10	23	18	30	5.48	45.70	4	3400	4600	2200	20									
1963	11	06	07	00	9.40	78.69	2	2800	3650	1950	11		1963	11	06	13	30	5.66	45.70	4	3550	4900	2250	20									
1970	10	08	00	00	10.00	78.69	2	3100	4150	2100	14		1970	10	08						3300	4400	2250		e2								
1973	12	24	09	00	8.60	78.69	2	2450	3200	1750	14		1973	12	24						2600	3400	1850		e2								
1976	08	29	22	00	9.10	78.69	2	2650	3450	1850	14		1976	08	29						2800	3650	1950		e2								
1976	09	12	14	20	9.60	78.69	2	2900	3800	1900	14		1976	09	12						3100	4050	2050		e2								
1976	11	10	18	00	10.50	78.69	2	3450	4650	2300	14		1976	11	10						3650	4950	2350		e2								
1977	01	01	17	45	8.00	78.69	2	2250	2850	1650	14		1977	01	01						2400	3050	1750		e2								
1977	10	23	20	15	12.00	78.69	2	4600	6400	2750	14		1977	10	23						4900	6800	2950		e2								
1977	12	08	12	00	8.90	78.69	2	2600	3350	1850	14		1977	12	08						2750	3550	1950		e2								

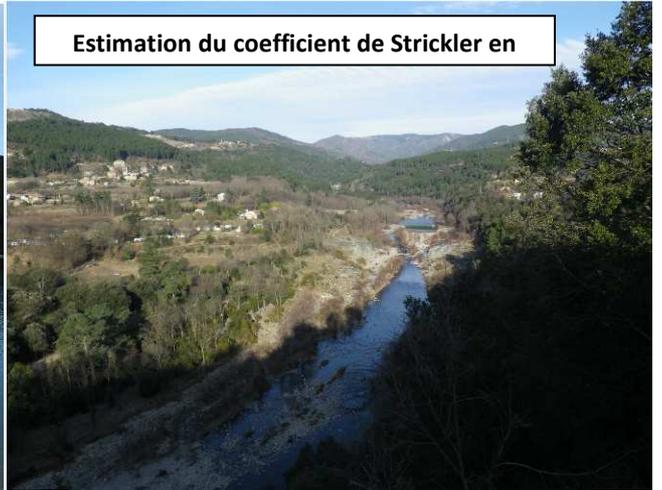
Station de Sauze (n 61)												
ans	mm	jj	hh	min	H	Z0	C	Q	Qsup	Qinf	S	N
1957	12	25	15	00	7.25	45.62	5	3300	4450	2150	22	
1958	09	30	22	30	9.20	45.62	5	5400	7550	3250	21	
1970	10	08			7.72	46.00	5	4150	5800	2500	23	
1977	10	23			8.12	46.00	5	4600	6450	2750	23	

NOTES :

- | | |
|---|---|
| d1 Débit transféré depuis St-Martin | e2 Débit transféré depuis Vallon |
| f1 Seuil à partir de la place de l'église à St-Martin | h2 Seuil à partir de la place de l'église à St-Martin |
| g1 Maximum manqué (7.9 m à 17:00 et 8.1 m à 20:00) | l2 Maximum Manqué (4.5 m à 7:00) |
| h1 Maximum manqué (5.2 m à 12:00 et 5.8 m à 17:00) | j2 Maximum Manqué (2.1 m à 7:00) |
| i1 Maximum manqué (6.5 m à 7:00 et 6.8 m à 12:00) | k2 Maximum Manqué (0.7 m à 7:00) |
| j1 Maximum manqué (5 m à 7:00) | l2 Maximum Manqué (4.1 m à 11:00) |
| k1 Maximum manqué (8 m à 7:00), maxi d'après la source l1 | |
| l1 Maximum manqué (2.8 m à 7:00) | |
| m1 Maximum manqué (9.2 m à 12:00 et 8.4 m à 17:00) | |



Confluence Ardèche-Chassezac



Estimation du coefficient de Strickler en



Camping en zone à enjeu



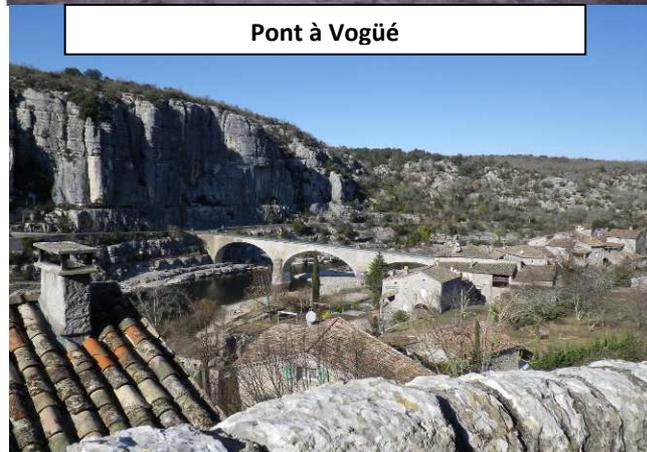
Maisons en zone à enjeu à Vogüé



Laisse de crue sur la végétation



Laisse de la crue de 1992 au Pont d'Aubenas



Pont à Vogüé

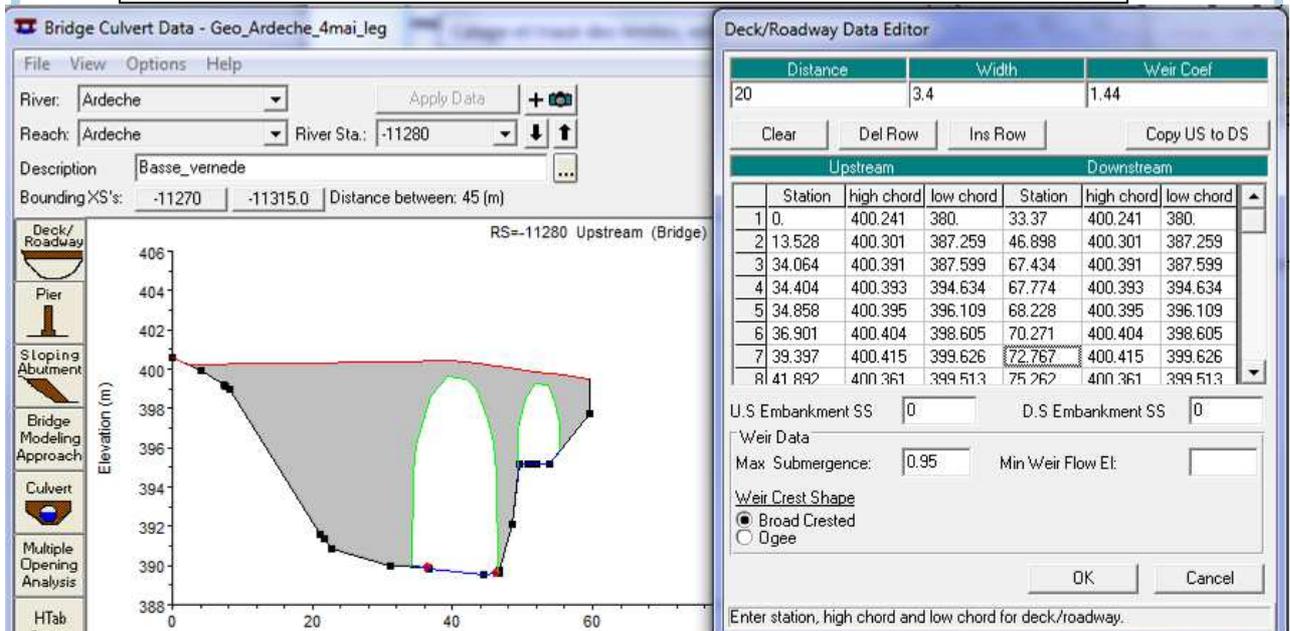
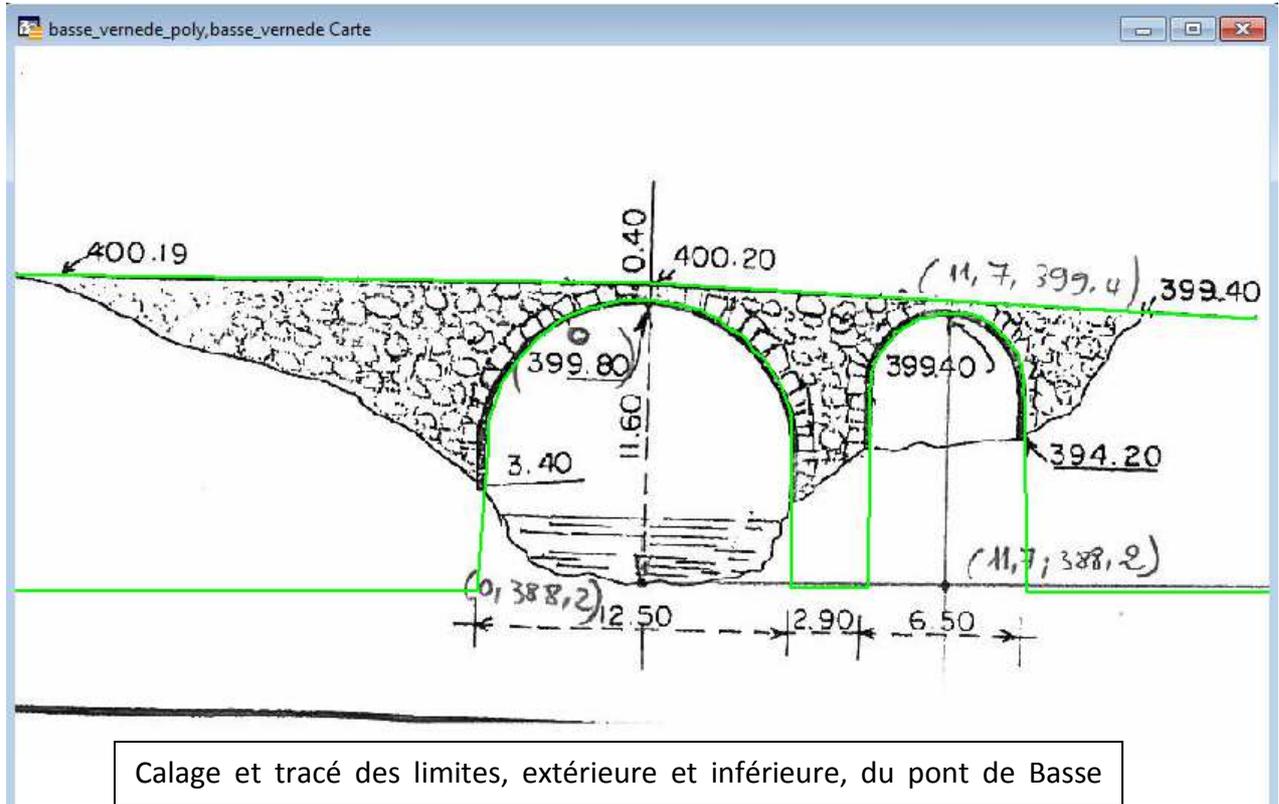


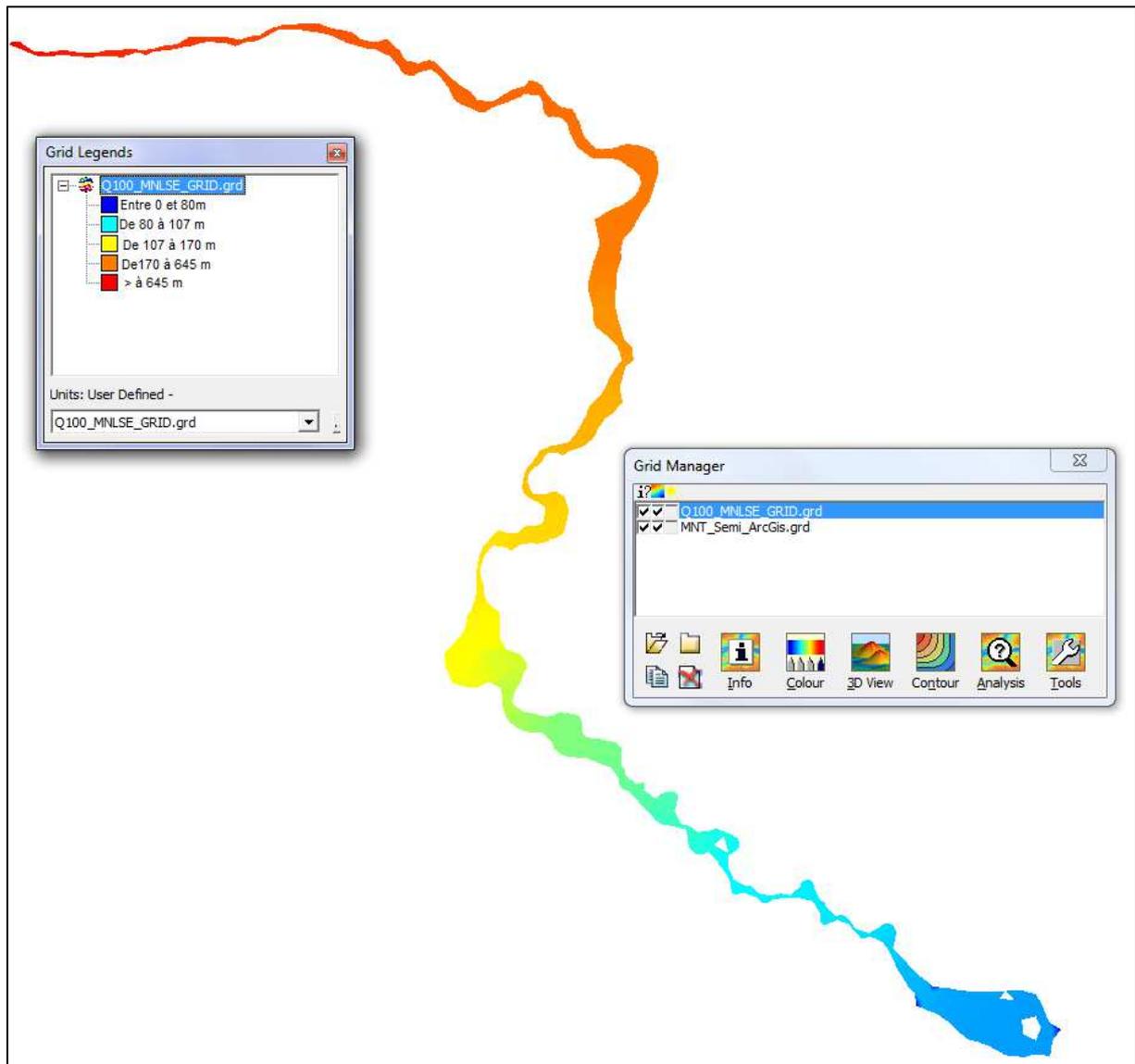
Seuil à Ucel

Annexe 11 Illustration du travail réalisé sur le terrain

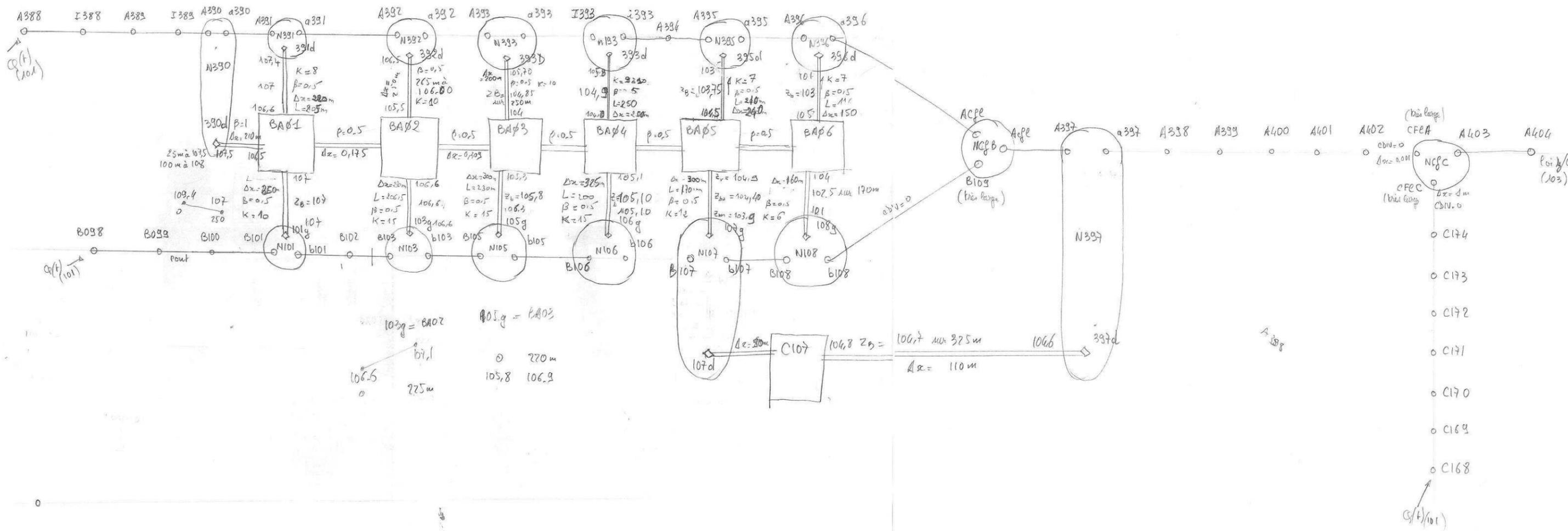
Annexe 12 Etapes d'introduction de pont du Basse Vernède sous HEC Ras

On a scanné l'ensemble des plans dont on dispose en JPEG. Puis, on les a **calés** sous MapInfo en se basant sur les côtes indiquées sur ces plans. Ensuite, on a dessiné les deux limites, extérieure et intérieure, de l'ouvrage en suivant le dessin du scan. On a généré des points par un outil de Sogreah au long de ces deux lignes et on a récupéré les coordonnées de ces points à l'aide de l'outil extracteur de coordonnées. On a exporté la table sous Excel et il suffit maintenant de copier ces informations et les coller dans les paramètres de l'ouvrage sous HEC Ras.

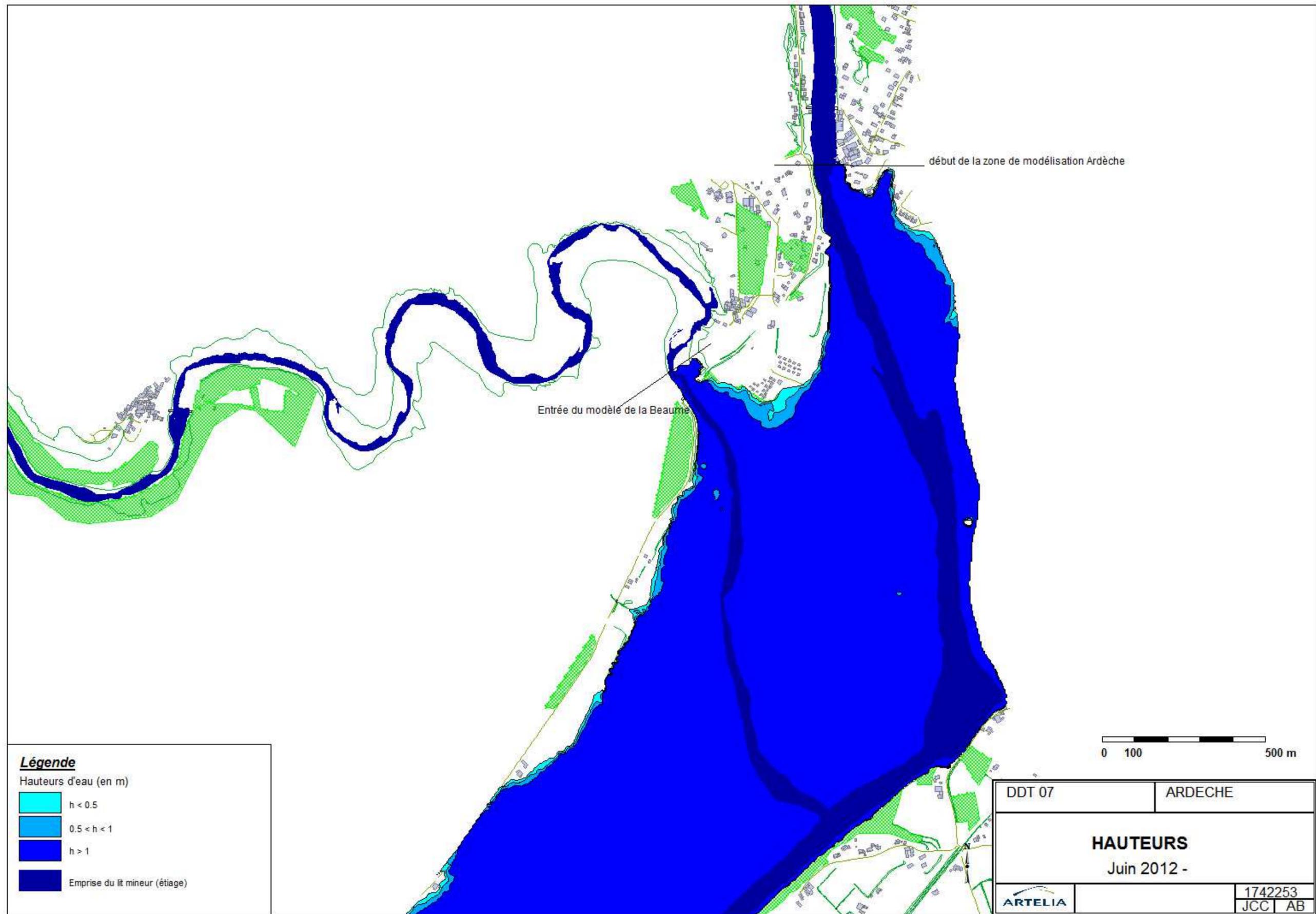




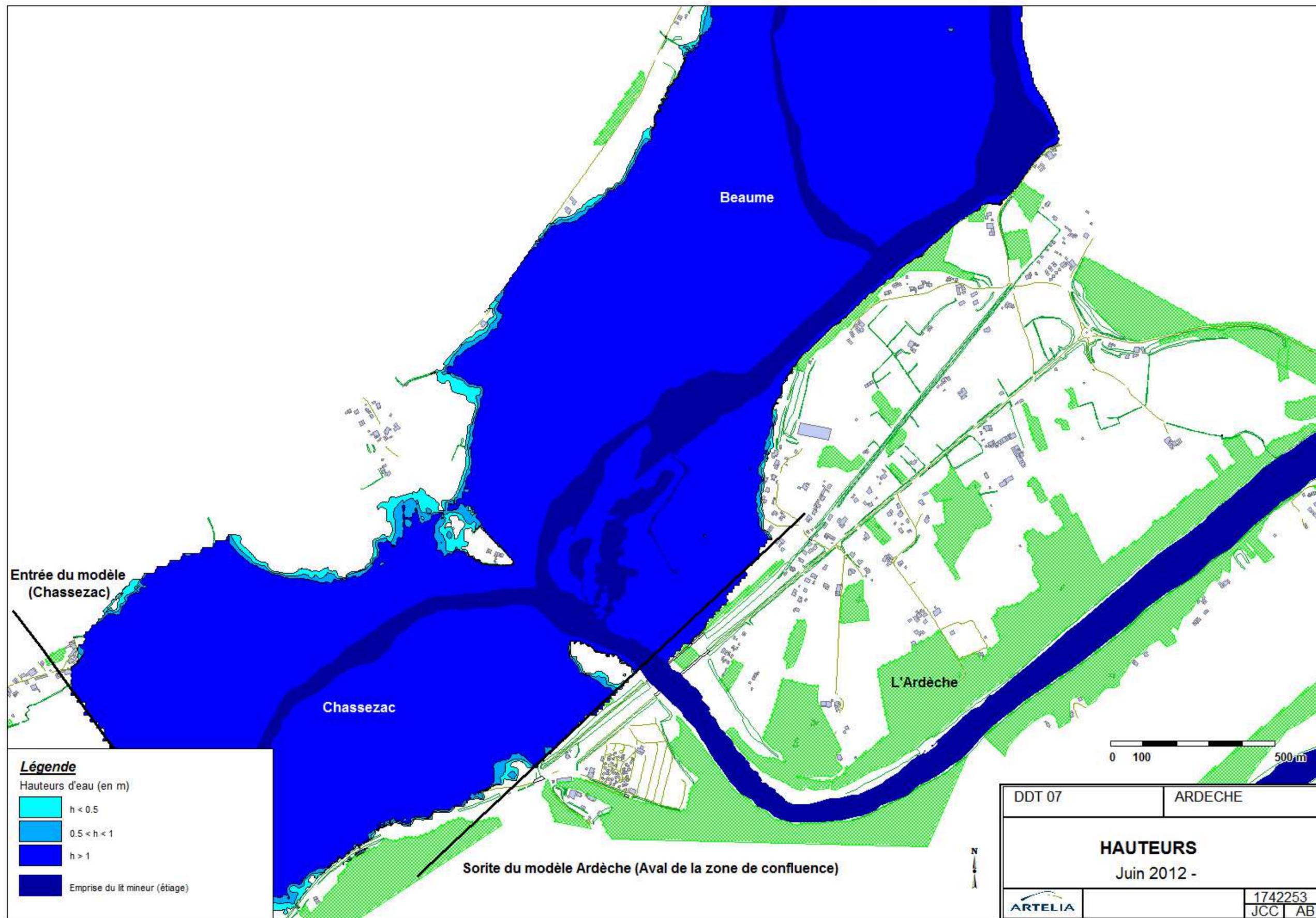
Annexe 13 MNSLE de l'Ardèche

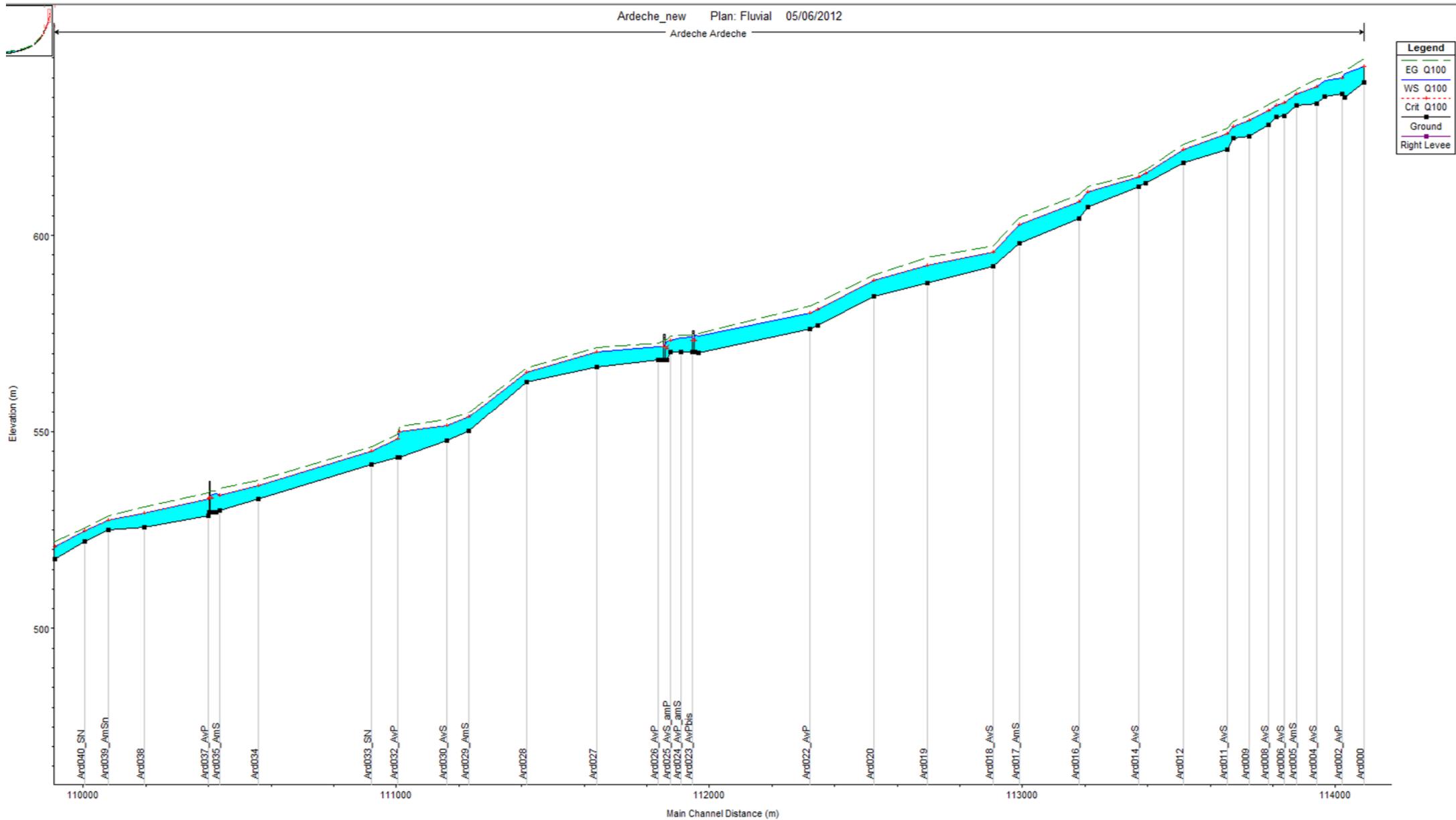


Annexe 14 Schéma topologique du modèle CARIMA (Confluence Ardèche – Chassezac – Beaume)

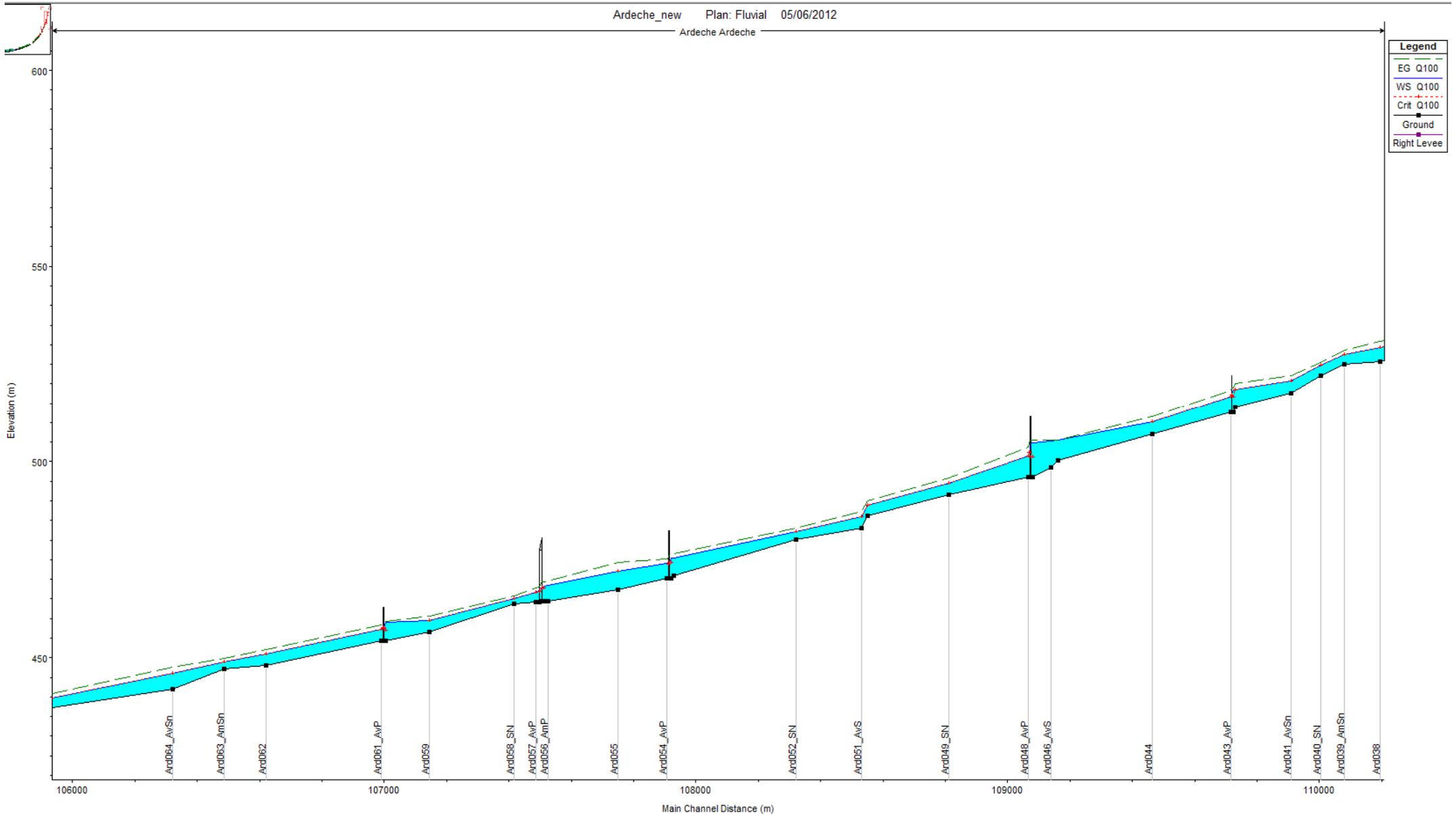


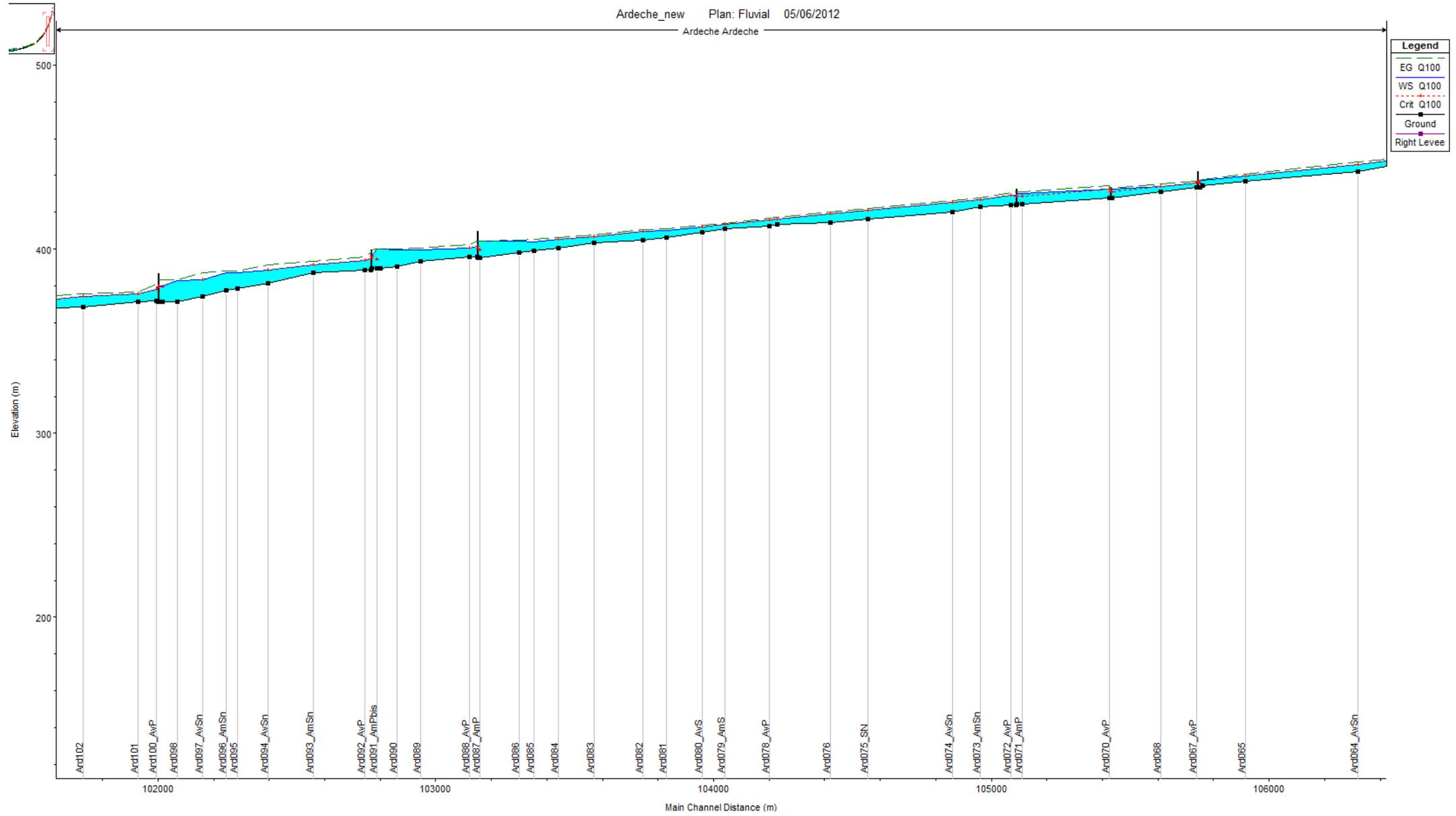
Annexe 15 Cartographie des hauteurs d'eau dans la zone de la confluence Ardèche-Beaume-Chassezac

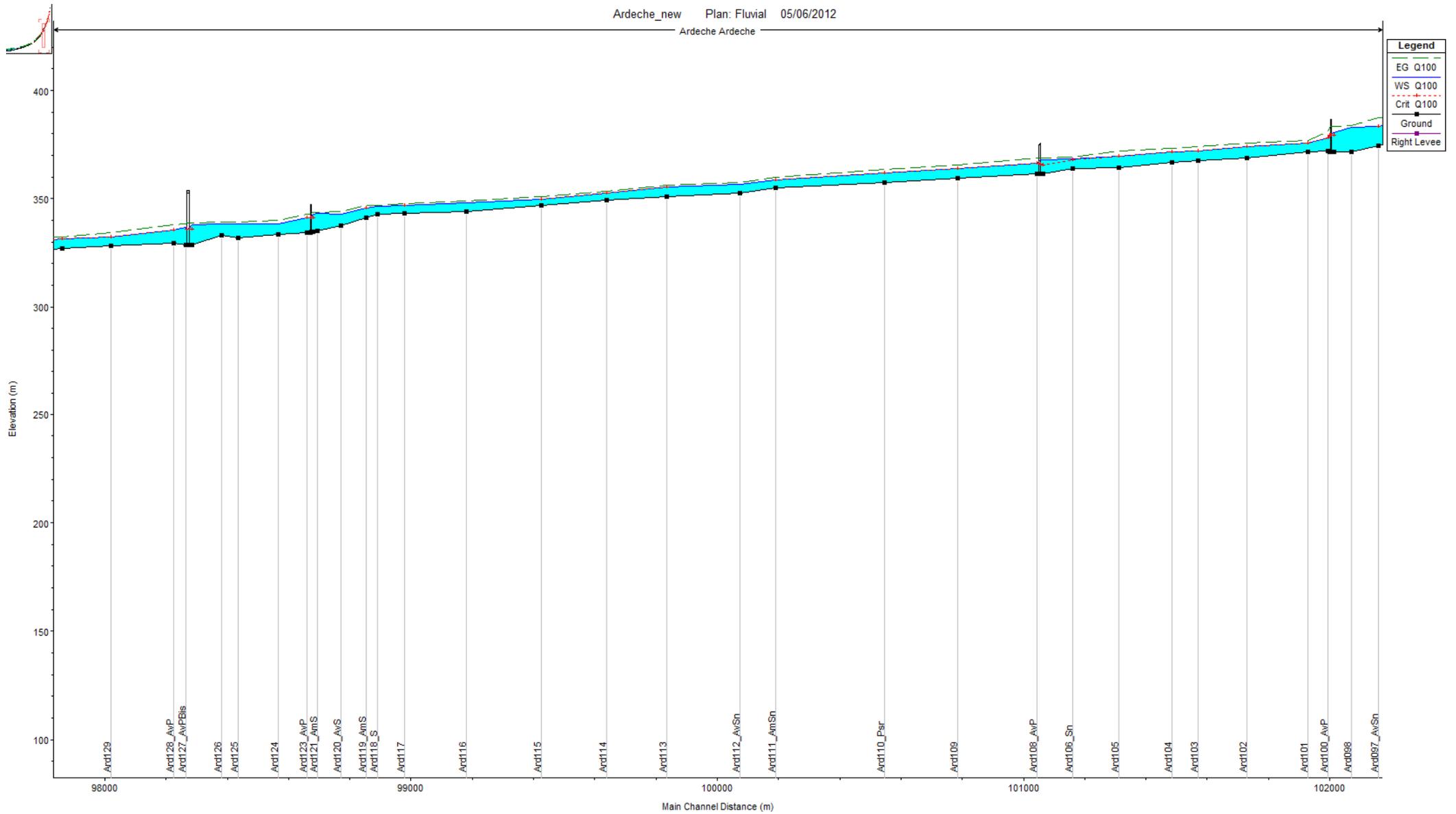


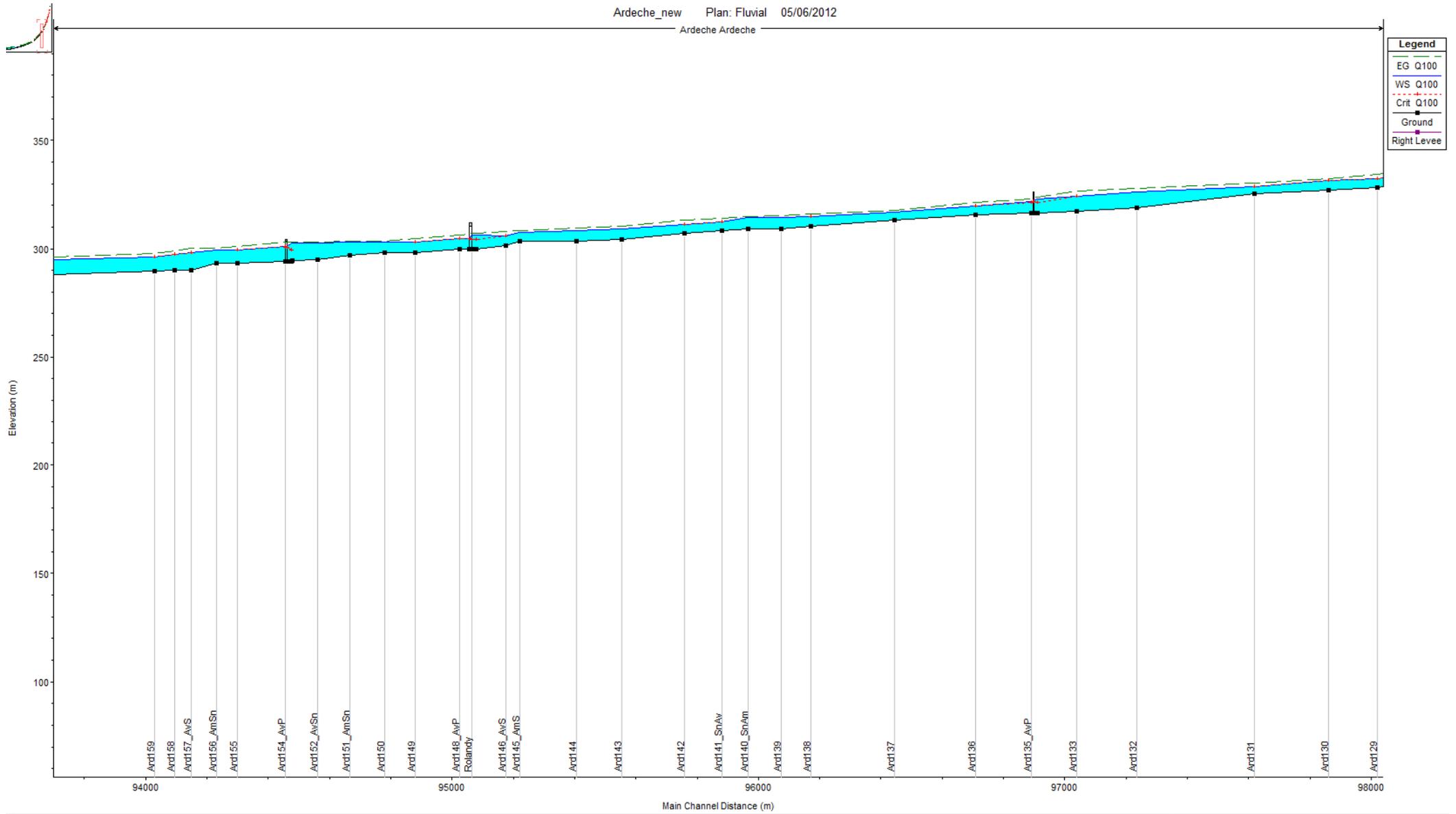


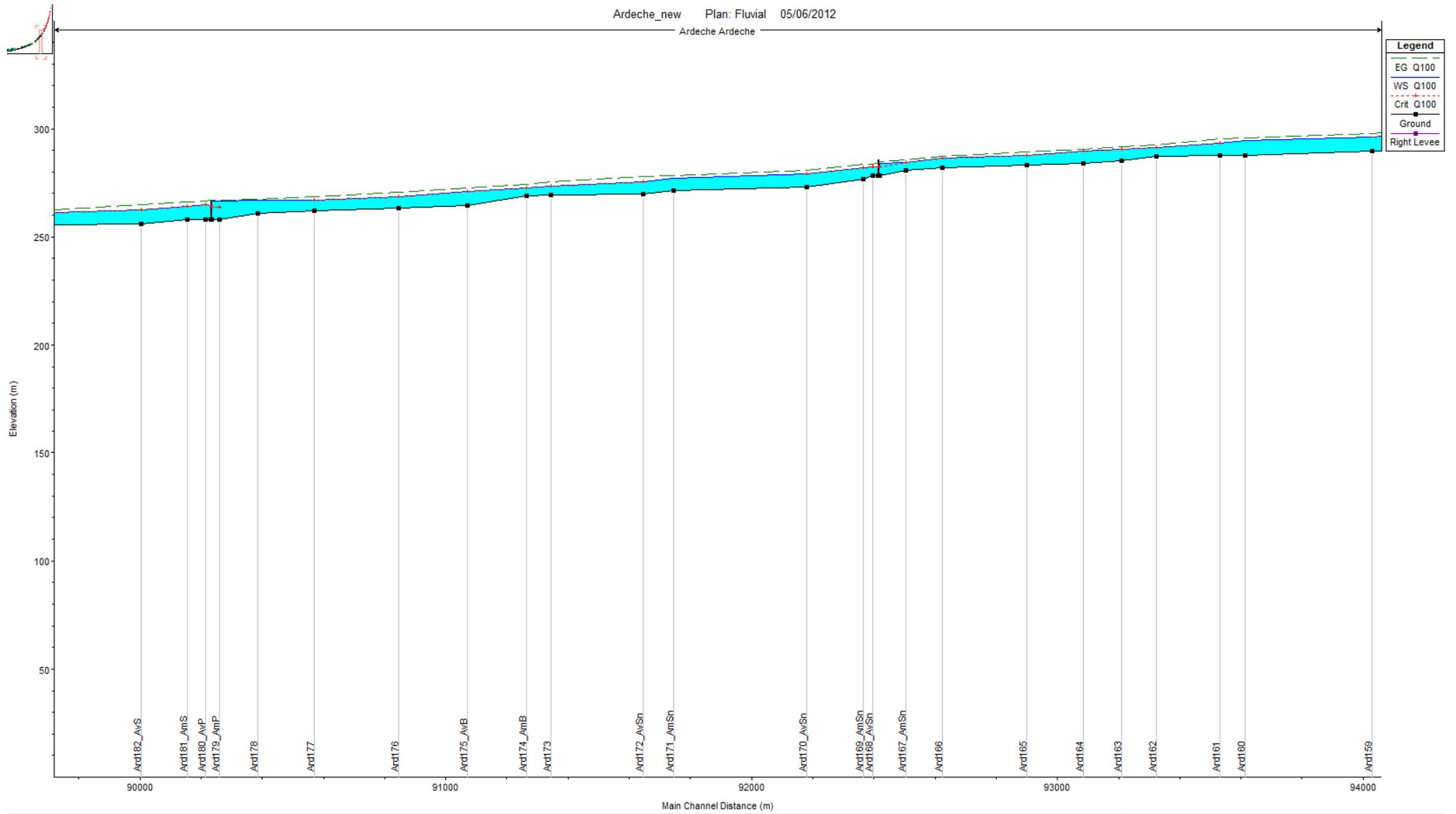
Annexe 16 Résultats de la simulation HEC Ras de l'Ardèche Amont Q(100)

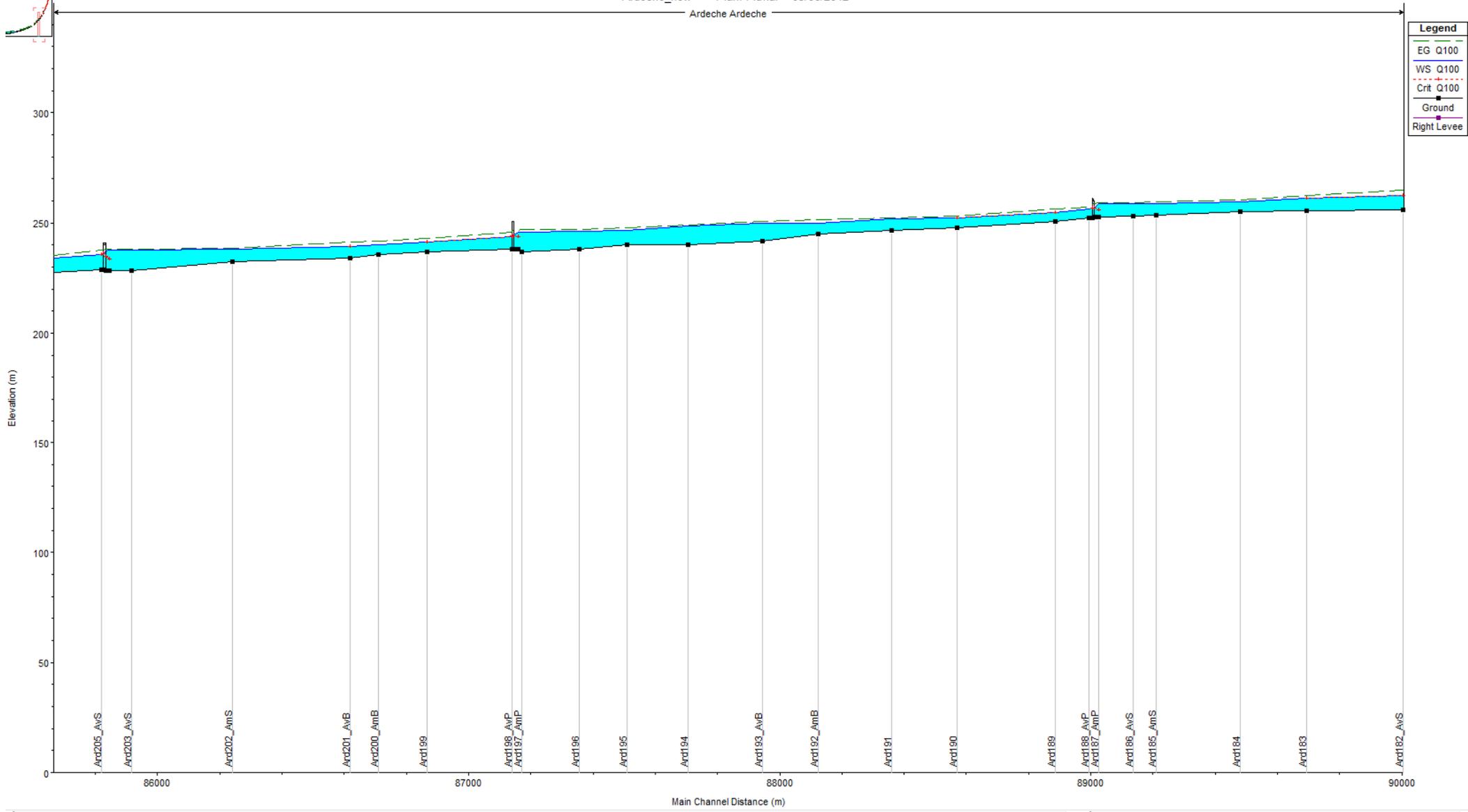


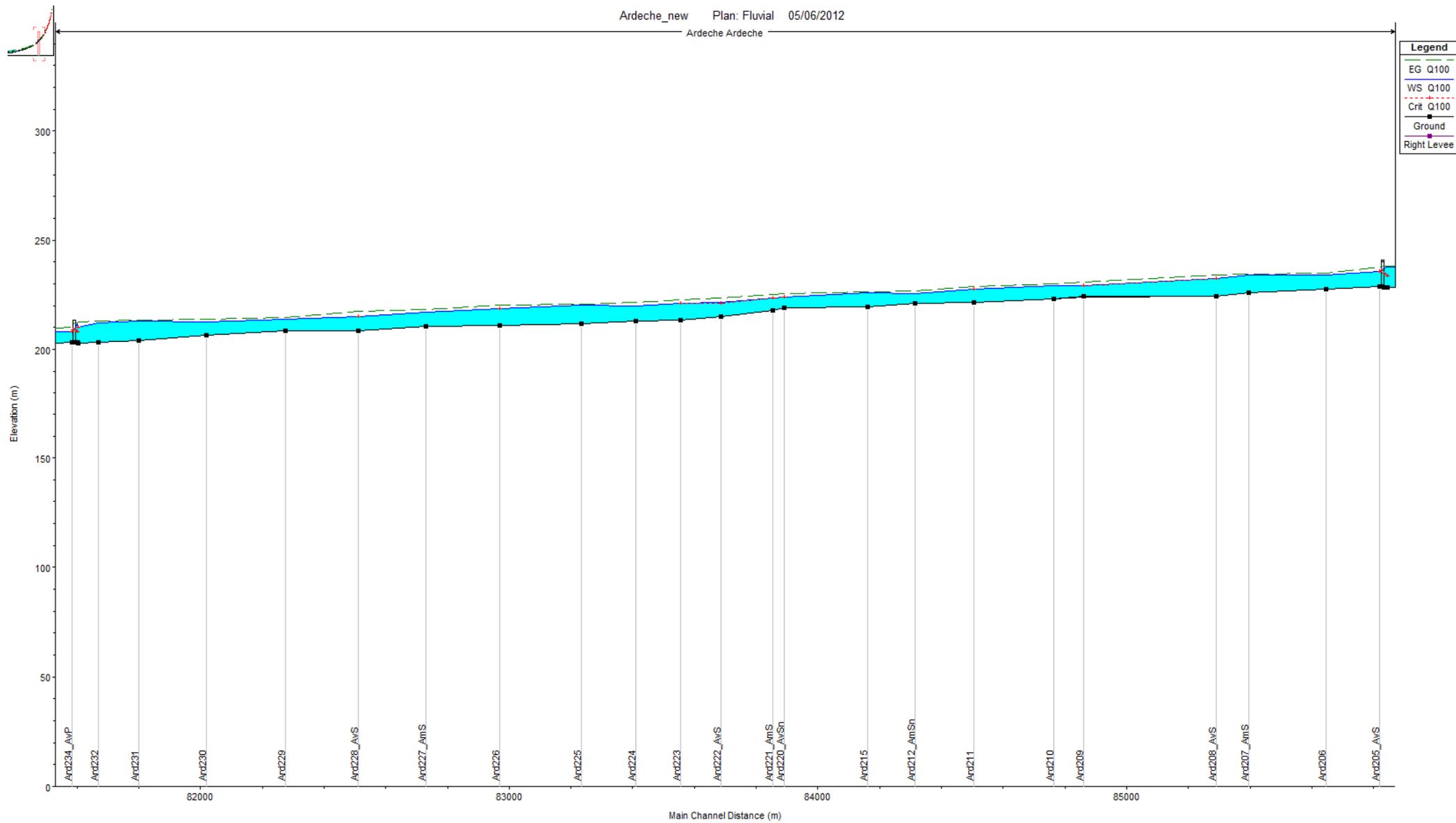


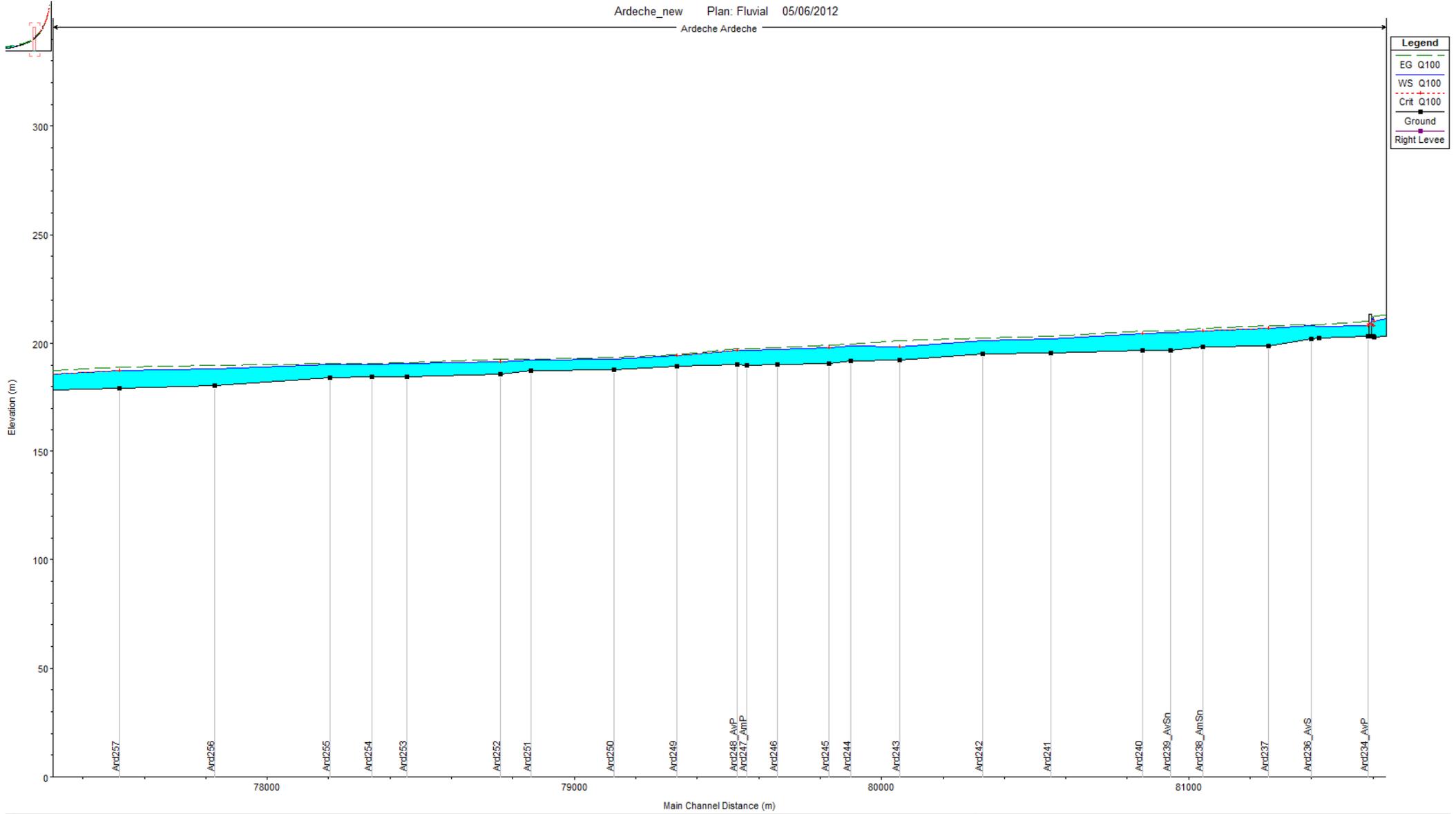












Ardeche Ardeche

