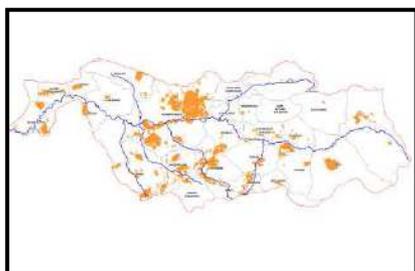
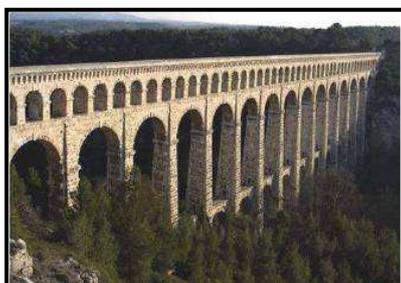
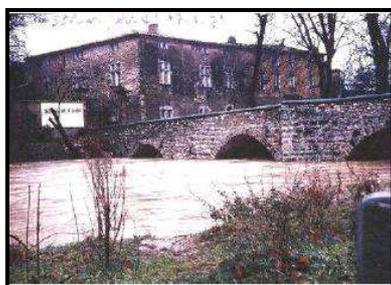


DDTM13

DIRECTION
DÉPARTEMENTALE
DES TERRITOIRES
ET DE LA MER

Indice D

Aout 2015



Étude hydraulique sur le bassin versant de l'Arc dans le cadre de l'identification des Territoires à Risques Importants

*Phase 2 : modélisation hydraulique et
cartographie des aléas*


SAFEGE
Ingénieurs Conseils

SIÈGE SOCIAL
PARC DE L'ILE - 15/27 RUE DU PORT
92022 NANTERRE CEDEX
Agence d'Aix en Provence

SOMMAIRE

Etude hydraulique sur le bassin versant de l'Arc dans le cadre de l'identification des Territoires à Risques Importants	2
<i>Phase 2 : modélisation hydraulique et cartographie des aléas</i>	2
1 Objectifs et contexte de l'étude	8
2 Rappel des conclusions de phase 0 et de phase 1	10
2.1 Phase 0 : Recueil de données et analyse des documents existants, enquête de terrain, Synthèse cartographique des études existantes	10
2.1.1 Présentation générale du bassin versant	10
2.1.2 Crues historiques	11
2.1.3 Données existantes sur les crues historiques	12
2.1.4 Fonctionnement global du bassin versant	12
2.1.5 Débits retenus pour la modélisation hydraulique	15
2.2 Phase 1 : topographie	16
2.2.1 Relevé lidar	16
2.2.2 Relevés terrestres	16
3 Données retenues pour l'hydrologie	17
3.1 Crues fréquentes	17
3.1.1 Crue décennale	17
3.1.2 Crue trentennale	22
3.2 Crue de référence	23
3.2.1 Modélisations hydrologiques réalisées dans l'étude du SABA	24
3.2.2 Scénario 4 : épicentre de la pluie centré sur l'extrémité amont du bassin versant de l'Arc	25
3.2.3 Débits de référence retenus	27
3.3 Crue exceptionnelle	30
3.4 Conclusion sur l'hydrologie retenue	31
4 Modélisation hydraulique	34
4.1 Nombre de modèle	34
4.1.1 Localisation des trois modèles	34
4.1.2 Zones de recouvrement des modèles hydrauliques	35
4.2 Conditions aux limites	37
4.2.1 Injection des débits (conditions aux limites amont)	37
4.2.2 Conditions limite aval	38
4.3 le maillage	39
4.3.1 Généralités	39

4.3.2	Maillage amont.....	40
4.3.3	Maillage centre.....	42
4.3.4	Maillage aval.....	44
4.4	Traitement du bâti.....	46
4.5	Exemple de la transformation du MNT au maillage.....	48
5	Calage du modèle hydraulique.....	50
5.1	Généralités sur le calage.....	50
5.2	Choix des crues de calage.....	51
5.2.1	Données existantes sur les crues historiques.....	51
5.2.2	Conclusion.....	53
5.3	La crue de 1978 et les données de calage disponibles.....	54
5.3.1	PHE nivelées.....	54
5.3.2	Autres données disponibles.....	54
5.3.3	Adaptation du maillage à la topographie de 1978.....	55
5.4	La crue de 2008 et les données de calage disponibles.....	60
5.5	Conditions aux limites des modèles de calage.....	63
5.5.1	Conditions limites amont.....	63
5.5.2	Condition limite aval.....	63
5.6	Paramètres de calage retenu.....	64
5.6.1	Coefficients de strickler.....	64
5.6.2	Calage au niveau des ouvrages.....	66
5.7	Résultats de la modélisation de la crue de 1978.....	67
5.7.1	Modèle amont (de l'amont du bassin versant aux gorges de Langesse).....	67
5.7.2	Modèle centre : des gorges de Langesse aux gorges de Roquefavour :.....	82
5.7.3	Modèle aval : des Gorges de Roquefavour à l'étang de Berre (avec niveau étang de Berre = 1 m NGF).....	92
5.7.4	Comparaison des hydrogrammes du modèle pluie-débit du SABA (Ginger) avec les hydrogrammes extraits du modèle hydraulique.....	103
5.7.5	Analyse des volumes sur le tronçon central (des gorges de Langesse à Saint Pons).....	109
5.7.6	Conclusion de la modélisation de la crue de 1978.....	112
5.8	Résultats de la modélisation de la crue de 2008.....	113
5.8.1	Généralités.....	113
5.8.2	Modèle amont (de l'amont du bassin versant aux gorges de Langesse).....	114
5.8.3	Modèle centre (des gorges de Langesse aux gorges de Roquefavour).....	118
5.8.4	Modèle aval (des gorges de Roquefavour à l'étang de Berre).....	121
5.8.5	Analyse des résultats de la modélisation de la crue de 2008.....	124
5.8.6	Analyse des temps de propagation.....	135
5.9	Test de sensibilité.....	137
5.9.1	Généralités.....	137
5.9.2	Test de sensibilité sur la rugosité.....	137
5.9.3	Test de sensibilité sur la condition limite aval au niveau de l'étang de Berre.....	144
5.10	Conclusion sur la modélisation des crues de calage.....	147
6	Résultats des modélisation des crues fréquentes, de référence et exceptionnelle.....	148

6.1	Crues fréquentes	148
6.1.1	Crue décennale	148
6.1.2	Crue trentennale	151
6.2	Crue de référence.....	156
6.2.1	Allure générale de la crue.....	156
6.2.2	Aléa inondation	162
6.2.3	Cas particulier de la digue de Bachasson	163
6.3	Crue exceptionnelle	164
6.4	Crue de premier débordement	168
7	Annexe 1 : Localisation des ouvrages hydrauliques et profils en travers relevés sur l'Arc	169
8	Annexe 2 : fiches PHE pour la crue de 1978	171
9	Annexe 3 : Carte récapitulative de la crue de 1978 (extrait de l'étude de mise en cohérence des études hydrologiques et hydrauliques sur le bassin versant de l'Arc – GINGER – SABA – 2010).....	172
10	Annexe 4 : Hydrogrammes injectés dans le modèle hydraulique	173
11	Annexe 5 : Cartes des hauteurs et vitesses de la crue décennale	174
12	Annexe 6 : Cartes des hauteurs et vitesses de la crue trentennale.....	175
13	Annexe 7 : Cartes des hauteurs et vitesses de la crue de référence.....	176
14	Annexe 8 : Cartes des hauteurs et vitesses de la crue exceptionnelle	177
15	Annexe 9 : Cartes d'aléa de la crue de référence	178
16	Annexe 10 : Cartes d'aléa de la crue exceptionnelle	179
17	Annexe 11 : Cartes des premiers débordements	180

FIGURES

Figure 1 : L'Arc et ses principaux affluents : le Grand Vallat de Fuveau ; la Cause, la Luyne, le Vallat des Marseillais ; le Grand Torrent, le Grand Vallat de Cabriès.....	11
Figure 2 : Fonctionnement hydraulique de l'Arc : de Trets aux gorges de Langesse	13
Figure 3 : Fonctionnement hydraulique de l'Arc- secteur d'Aix en Provence.....	14
Figure 4 : Fonctionnement hydraulique de l'Arc – en aval des gorges de Roquefavour	15
Figure 5 : Emprise du relevé LIDAR	16
Figure 6 : Localisation des points de calcul des débits du SAGE de l'Arc	18
Figure 7 : Débits décennaux retenus pour le TRI de l'Arc.....	19
Figure 8 : Inondation de 2008 dans la ZEC des Milles	20
Figure 9 : Hydrogrammes de la crue de 2008 au niveau de la ZEC de Milles	20
Figure 10 : Inondation de 2008 en amont de la Voie ferrée de Berre	21
Figure 11 : Hydrogrammes de la crue de 2008 en amont de la voie ferrée de Berre	21
Figure 12 : Débits trentennaux retenus pour le TRI de l'Arc	22
Figure 13 : Lame d'eau précipitée pour les 3 scénarii – Extrait de « l'Évaluation de l'incidence hydrologique sur le bassin versant de l'Arc d'un épisode pluvieux tel que celui qui a affecté le var le 15 juin 2010 – GINGER – SABA – 2010 »	25
Figure 14 : Episode du 15 juin 2010 : Lame d'eau précipitée pour le scénario 4	26
Figure 15 : Episode du 15 juin 2010 : graphique des débits des 4 scénarii modélisés	27
Figure 16 : Episode du 15 juin 2010 : scénario retenu par tronçon.....	28
Figure 17 : Débits de référence retenus pour le TRI de l'Arc	29
Figure 18 : Débits de la crue exceptionnelle retenus pour le TRI de l'Arc	30
Figure 19 : Graphique des débits retenus pour le TRI de l'Arc	31
Figure 20 : Synthèse des débits retenus pour le TRI de l'Arc.....	32
Figure 21 : Localisation des points de calcul des débits	33
Figure 22 : Emprise des trois modèles hydrauliques.....	34
Figure 23 : zone de recouvrement des modèles hydrauliques.....	35
Figure 24 : Raccord des modèles hydrauliques et nombre de simulations.....	36
Figure 25 : Localisation des points d'injection des hydrogrammes	37
Figure 26 : maillage amont	41
Figure 27 : maillage centre	43
Figure 28 : Maillage aval agrandi	44
Figure 29 : maillage aval	45
Figure 30 : Localisation des bâtis extrudés	47
Figure 31 : Transformation du MNT en maillage	48
Figure 32 : Débits des crues historiques (source : SAGE de l'Arc).....	51
Figure 33 : Localisation des modifications apportées au maillage pour la modélisation de la crue de 1978...59	59
Figure 34 : Localisation de l'avenue Jean Pierre Lyon à Berre.....	62
Figure 35 : photos de la crue de 2008 au pont Saint Estève (Berre l'Etang).....	62
Figure 36 : localisation des différentes rugosités appliquées dans le modèle hydraulique	65

Figure 37 : Coupes des ouvrages à débitance limitée	67
Figure 38 : Cartes des hauteurs et vitesses maximales pour la crue de 1978 (secteur amont du bassin versant – Gorges de Langesse)	67
Figure 39 : zoom 1978 : secteur de Pion Para à Trets	76
Figure 40 : zoom 1978 : amont de la zone industrielle de Rousset	77
Figure 41 : zoom 1978 : secteur de Favary (Rousset)	78
Figure 42 : zoom 1978 : secteur Bachasson	79
Figure 43 : zoom 1978 : secteur de Pont de Bayeux	80
Figure 44 : Cartes de hauteurs et vitesses maximale pour la crue de 1978 (secteur des gorges de Langesse aux gorges de Roquefavour)	82
Figure 45 : zoom 1978 : secteur de Palette (Le Tholonet)	88
Figure 46 : zoom 1978 : secteur de la Pioline (Aix en Provence)	89
Figure 47 : zoom 1978 : ZEC plaine des Milles	90
Figure 48 : Cartes des hauteurs et vitesses maximales pour la crue de 1978 – secteur Gorges de Roquefavour / Étang de Berre	92
Figure 49 : zoom 1978 : secteur amont de la voie ferrée à Berre	98
Figure 50 : zoom 1978 : débordements vers le centre de Berre	99
Figure 51 : comparaison LIDAR et emprise historique de 1978 à Berre l'Étang	100
Figure 52 : zoom 1978 : centre ancien de Berre	100
Figure 53 : Photos de la crue de 1978 à Berre l'Étang	101
Figure 54 : La mairie de Berre l'Étang	102
Figure 55 : Localisation et photos de l'hôtel Arquier	103
Figure 56 : Crue de 1978 : comparaison des hydrogrammes du modèle hydraulique, des stations hydrométriques et du modèle pluie débit	105
Figure 57 : Localisation des points de comparaison des hydrogrammes et vitesses de propagation issues du modèle hydraulique.	106
Figure 58 : vitesses de propagation sur le tronçon Pont de Bayeux – Pont de l'Arc d'après de modèle pluie-débit	107
Figure 59 : Hauteur d'eau en 1978 dans la ZEC plaine des Milles	108
Figure 60 : Crue de 1978 : comparaison de la zone inondable de Berre avec les débits GINGER et avec les débits « modèle hydraulique ».	109
Figure 61 : Volumes cumulés pour la crue de 1978 pour le modèle pluie-débit et le modèle hydraulique – tronçon Gorges de Langesse/ Saint Pons	110
Figure 62 : Écart au cours du temps entre le volume en entrée et le volume en sortie sur le tronçon Gorges de Langesse/ Saint Pons pour le modèle pluie débit et le modèle hydraulique	111
Figure 63 : Hauteurs d'eau issues du modèle hydraulique de la crue de 1978 et emprise historique de la crue sur le secteur Gorges de Langesse/Saint Pons	111
Figure 64 : Cartes des hauteurs d'eau pour la crue de 2008 – modèle amont	114
Figure 65 : Cartes des hauteurs d'eau pour la crue de 2008 – modèle centre	118
Figure 66 : Cartes des hauteurs d'eau pour la crue de 2008 – modèle aval	121
Figure 67 : Comparaison des différents hydrogrammes pour la crue de 2008	124
Figure 68 : Hydrogramme à Roquefavour en 2008	129
Figure 69 : Exemple de méandre coupé en aval de la ZI de Rousset	130
Figure 70 : Crue de 2008 sur le secteur de Bachasson (Meyreuil)	130
Figure 71 : Crue de 2008 en amont immédiat des gorges de Langesse	131
Figure 72 : Promenade de l'Arc à Aix – crue de 2005	131
Figure 73 : L'Arc aux milles et à la Pioline en 2008	132
Figure 74 : Le pont de Saint Pons en 2008	132

Figure 75 : Premiers débordements sur la partie centrale du bassin pour la crue de 2008.....	133
Figure 76 : Aval du pont de Saint Estève à Berre – crue de 2008.....	133
Figure 77 : Le Club de la Sabretache à Berre, en 2008.....	134
Figure 78 : Crue de 2008 au hameau de Mauran (Berre).....	134
Figure 79 : Propagation des hydrogrammes d'après le modèle hydraulique.....	136
Figure 80 : Comparaison modèle de base – modèle Strickler -20%	138
Figure 81 : Comparaison modèle de base – modèle Strickler +20%.....	138
Figure 82 : Comparaison modèle de base – modèle Strickler +20% - ZEC plaine des Milles.....	140
Figure 83 : Comparaison modèle de base – modèle Strickler -20% - ZEC plaine des Milles.....	140
Figure 84 : Comparaison modèle de base – modèle Strickler +/- 20% -.....	142
Figure 85 : Comparaison modèle de base – modèle Strickler +/- 20% -.....	143
Figure 86 : Impact du choix de la condition limite aval sur les niveaux d'eau (secteur de la confluence de l'Arc avec l'étang de Berre)	145
Figure 87 : Courbes des niveaux d'eau en fonction du temps à proximité de la confluence Arc/Etang de Berre pour les deux conditions limite aval testées	146
Figure 88 : Schéma de principe de la ligne d'eau dans le centre-ville de Berre.....	146
Figure 89 : hauteurs d'eau décennales (Trets, Rousset, Peynier, Le Tholonet, Val de l'Arc, Pont de l'Arc) 150	
Figure 90 : hauteurs d'eau décennales (La Pioline, Les Milles, Saint Pons).....	150
Figure 91 : hauteurs d'eau décennales (Berre l'Etang)	151
Figure 92 : Hauteurs de la crue trentennale – secteur Trets – Rousset – Peynier – Fuveau – Meyreuil - Chateauneuf	152
Figure 93 : Hauteurs de la crue trentennale – secteur Le Tholonet – Val de l'Arc – Pont de l'Arc – Beauvalle – Parade - Pioline	152
Figure 94 : Hauteurs de la crue trentennale – secteur La Pioline – Les Milles – Saint Pons	153
Figure 95 : Hauteurs de la crue trentennale – entre la ZEC des Milles et Berre l'Etang.....	154
Figure 96 : Hauteurs de la crue trentennale – plaine de Berre l'Etang.....	155
Figure 97 : hauteurs d'eau de référence (Bachasson).....	156
Figure 98 : hauteurs d'eau de référence (Le Tholonet – Val de l'Arc – Pont de l'Arc).....	157
Figure 99 : hauteurs d'eau de référence (Pont de l'Arc, Beauvalle, La Parade, La Pioline).....	158
Figure 100 : hauteurs d'eau de référence (La Pioline, Les Milles, Saint Pons).....	159
Figure 101 : hauteurs d'eau de référence (entre la ZEC des Milles et Roquefavour)	160
Figure 102 : hauteurs d'eau de référence (entre la ZEC des Milles et Roquefavour)	160
Figure 103 : hauteurs d'eau de référence (entre le Moulin du Pont et la voie ferrée de Berre).....	161
Figure 104 : hauteurs d'eau de référence (Plaine de Berre l'Etang)	162
Figure 105 : grille d'aléa	163
Figure 106 : Localisation de la rupture de la digue de Bachasson	163
Figure 107 : Impact de la rupture de la digue de Bachasson.....	164
Figure 108 : Hauteurs de la crue exceptionnelle – secteur de Bachasson	165
Figure 109 : Hauteurs de la crue exceptionnelle – secteur de Meyreuil – Le Tholonet	165
Figure 110 : Hauteurs de la crue exceptionnelle – secteur de Val de l'Arc - Beauvalle	166
Figure 111 : Hauteurs de la crue exceptionnelle – secteur de la Pioline, la Parade	166
Figure 112 : Hauteurs de la crue exceptionnelle – secteur Coudoux - Velaux.....	167
Figure 113 : Hauteurs de la crue exceptionnelle – secteur delta de Berre.....	167
Figure 114 : Illustration lit mineur/lit moyen sur un profil en travers.....	168

TABLEAUX

Tableau 1 : Points de calcul des débits du SAGE	17
Tableau 2 : Débit décennal du SAGE de l'Arc	18
Tableau 3 : Comparaison Q100 du SAGE de l'Arc et Qref	29
Tableau 4 : Linéaires et superficies des trois modèles hydrauliques.....	35
Tableau 5 : Caractéristiques des maillages	39
Tableau 6 : Coefficients de Strickler utilisés dans les modèles hydrauliques	64
Tableau 7 : Test de sensibilité sur les coefficients de Strickler – modèle amont	137
Tableau 8 : Test de sensibilité sur les coefficients de Strickler – modèle centre	139
Tableau 9 : Test de sensibilité sur les coefficients de Strickler – modèle aval.....	141

1 OBJECTIFS ET CONTEXTE DE L'ÉTUDE

Dans le cadre de l'évaluation préliminaire du risque inondation (EPRI), le bassin de l'Arc, et plus largement d'Aix-Salon, a été identifié pour être l'un des territoires à risque important (**TRI**) de la région méditerranéenne. Dans le cadre de la mise en œuvre de la directive européenne sur la gestion du risque inondation d'octobre 2007, et de la **nécessaire amélioration de la connaissance des phénomènes d'inondation**, la DDTM des Bouches-du-Rhône a missionné SAFEGE pour la réalisation d'une étude hydraulique qui a pour objectif **d'établir des cartographies détaillées des zones inondables du cours d'eau principal de l'Arc** pour différentes occurrences :

- les crues dites « **fréquentes** » (période de retour de l'ordre de 10-30 ans),
- la crue dite « **moyenne** » dans le cadre de la Directive Inondation, qui correspond à l'évènement de référence (période de retour 100 ans ou crue historique documentée si elle lui est supérieure),
- la crue dite « **exceptionnelle** ».

Cette mise à jour de la connaissance **doit permettre une meilleure prise en compte du risque inondation** dans l'aménagement et la gestion de l'espace des communes riveraines de l'Arc que ce soit dans les domaines de l'information préventive, de la prévention du risque (prise en compte dans les documents d'urbanisme, PPRi), la prévision des inondations et la préparation à la gestion de crise.

L'étude se décompose de la manière suivante :

- **Phase 0** : Recueil de données et analyse des documents existants, enquête de terrain, Synthèse cartographique des études existantes ;
- **Phase 1** : Synthèse et définition des besoins en topographie ;
- **Phase 2** : Modélisation hydraulique et cartographies des Aléas ;
- **Phase 3** : Restitution cartographique.

Le présent rapport est relatif aux résultats de **la phase 2**. Dans la mesure où il rappelle les résultats des phases principales, il contient les principaux résultats de l'étude.

2 RAPPEL DES CONCLUSIONS DE PHASE 0 ET DE PHASE 1

2.1 PHASE 0 : RECUEIL DE DONNEES ET ANALYSE DES DOCUMENTS EXISTANTS, ENQUETE DE TERRAIN, SYNTHESE CARTOGRAPHIQUE DES ETUDES EXISTANTES

2.1.1 Présentation générale du bassin versant

Extrait du SAGE de l'Arc - PAGD : synthèse état des lieux :

« L'Arc est un fleuve méditerranéen qui prend sa source à Pourcieux dans le département du Var et se jette dans l'Étang de Berre dans le département des Bouches-du- Rhône. Sa longueur est de 85 km pour une pente moyenne inférieure à 1 %. Le bassin versant s'étend sur une superficie de 715 km² couverte par 30 communes dont 15 riveraines de l'Arc. Le réseau hydrographique est très développé. On parle d'ailleurs de "l'Arc et son chevelu" :

- Le réseau hydrographique est dense sur la haute Vallée car les hauts-reliefs facilitent l'érosion et donc la naissance de nombreux vallats.
- Sur la basse vallée, il y a peu d'apports latéraux.

Les 20 affluents principaux sont temporaires ou permanents:

- En rive droite de l'Arc : la Tune, la Partie, la Croule, l'Aigue Vive, le Bayeux, la Cause, la Torse, le Malvallat, le Vallat des Marseillais, le Vallat des Eyssarettes.
- En rive gauche de l'Arc : le Vallat des Très Cabrès, la Gardi, le Longarel, le Ruisseau de Genouillet, le Ruisseau de la Foux, le Verdalaï, le Grand Vallat de Fuveau, la Luynes, la Jouïne, le Grand Torrent. »

Les 30 communes du bassin versant de l'Arc sont les suivantes (en gars sont indiquées les 15 communes traversées par l'Arc): **Pourcieux, Pourrière, Trets**, Puylobier, **Peynier, Rousset**, Vauvenargues, Saint Antonin sur Bayon, **Chateauneuf le Rouge, Fuveau**, Belcodène, Gréasque, Mimet, Saint Savournin, Simiane Collongue, Gardanne, **Meyreuil**, Beaurecueil, **Le Tholonet**, Saint Marc Jaumegarde, **Aix en Provence**, Bouc Bel Air, Cabriès, Les Pennes

Mirabeau, Eguilles, **Ventabren, Velaux, Coudoux, La Fare les oliviers, Berre l'Etang.**

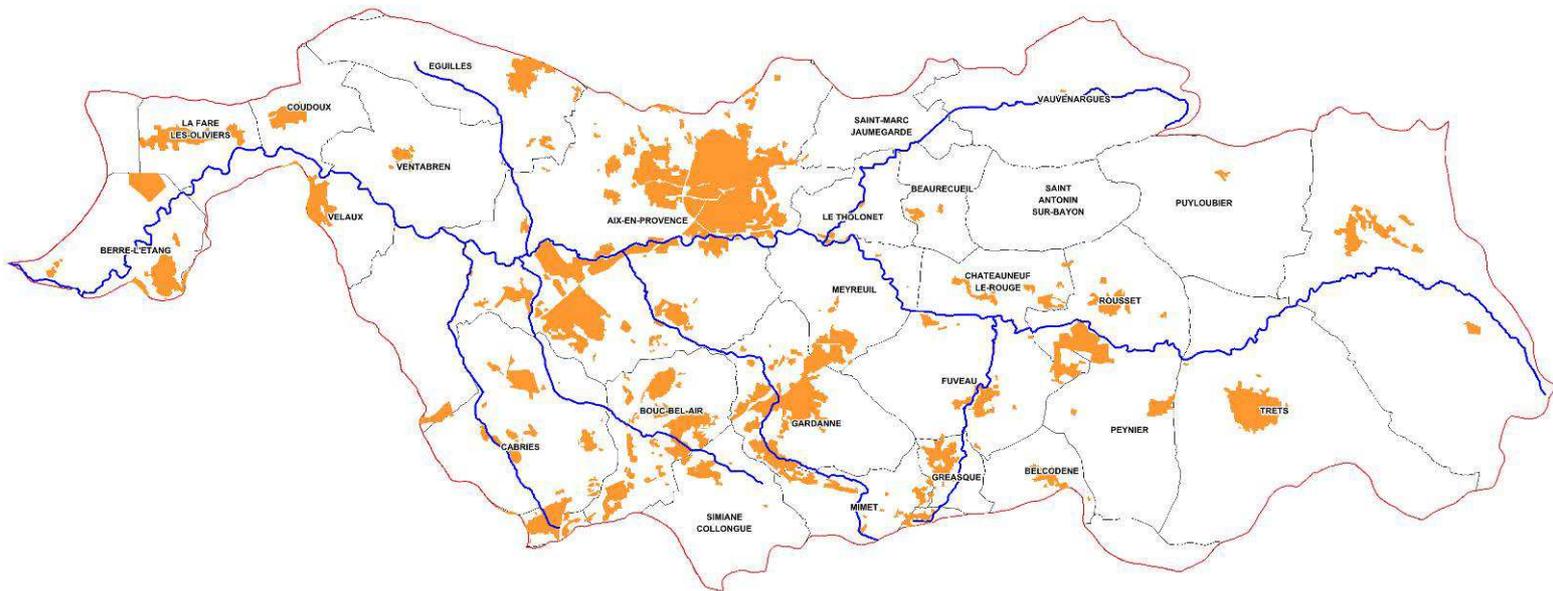


Figure 1 : L'Arc et ses principaux affluents : le Grand Vallat de Fuveau ; la Cause, la Luynes, le Vallat des Marseillais ; le Grand Torrent, le Grand Vallat de Cabriès.

2.1.2 Crues historiques

Sur le bassin versant de l'Arc, « il n'existe pas une crue qui soit la crue la plus forte, les crues historiques importantes connues ayant affecté de manière plus ou moins forte les différentes parties du bassin versant. On retiendra comme crue majeure récente sur le bassin versant de l'Arc les crues d'octobre 1972, octobre 1973, janvier 1978, septembre 1993, décembre 2003 et décembre 2008 :

- sur l'extrémité amont du bassin (Pourrières) la plus forte crue récente observée est celle d'octobre 1972 ;
- sur les secteurs de Pont de Bayeux (amont du bassin) et Pont Saint Estève (aval du bassin) la plus forte crue récente observée est celle de janvier 1978 ;
- sur la partie centrale du bassin (Roquefavour à Aix en Provence), c'est l'événement pluviométrique localisé de septembre 1993 qui a entraîné les débits de crue les plus importants. »

Extrait de « l'étude de mise en cohérence des études hydrologiques et hydrauliques sur le bassin versant de l'Arc » - GINGER – SABA - 2010

2.1.3 Données existantes sur les crues historiques

Les communes les plus concernées par les inondations de l'Arc ou de ses affluents, disposent généralement de quelques informations, archives ou photos sur les inondations passées. D'une manière générale les informations fournies restent peu précises et incomplètes, sûrement du fait de l'absence de crues majeures ses dernières années (la plus forte crue historique connue reste dans la plupart des communes celle de 1978).

Il existe sur le bassin versant de l'Arc environ 45 fiches de marques de crue répertoriées sur l'Arc pour 15 crues environ. Il ne s'agit pas forcément de fiches PHE (Plus Hautes Eaux) dans la mesure où un même lieu peut avoir plusieurs fiches correspondant à plusieurs crues. Ces fiches sont globalement assez peu exploitables (pour le calage d'un modèle hydraulique par exemple) car :

- beaucoup concernent des crues non débordantes (mesure sur les échelles limnimétriques au niveau des ponts) ;
- seules 17 sont nivelées en m NGF ;
- elles ne concernent que 4 communes et 22 lieux géographiques (pas de répartition homogène sur l'ensemble du bassin versant).

Toutes ces informations recueillies lors des visites de terrain, des rencontres auprès des communes et de l'analyse bibliographique ont été synthétisées dans des cartes communales au 1/10 000 ème lors de la phase 0 de l'étude.

2.1.4 Fonctionnement global du bassin versant

Deux formations géologiques de types « gorges » sont présentes sur le bassin versant de l'Arc : les gorges de Langesse en amont d'Aix en Provence, et les gorges de Roquefavour en aval d'Aix en Provence. Ces gorges constituent des points de contrôle et marque la séparation entre trois tronçons au fonctionnement hydraulique distincts :

- **Tronçon 1** : de la source jusqu'aux gorges de Langesse

Le **réseau hydrographique** de ce tronçon est **dense et pentu**. Il est constitué de nombreux vallons secs qui forment un chevelu autour de l'Arc. Les terrains sont essentiellement **agricoles**, ce qui favorise l'infiltration et la propagation lente des crues. L'enjeu principal de ce tronçon est la **zone industrielle de Rousset**. Les lits mineurs et moyens (fortement boisés) sont nettement marqués sur ce tronçon où les lits de l'Arc (mineur, moyen et majeur) sont d'une manière générale **peu artificialisés**. La configuration de cette première plaine de l'Arc favorise l'expansion des crues sur le linéaire situé au droit de Trets, entre l'aval du franchissement de l'A8 et la zone industrielle et en amont immédiat des gorges de Langesse;

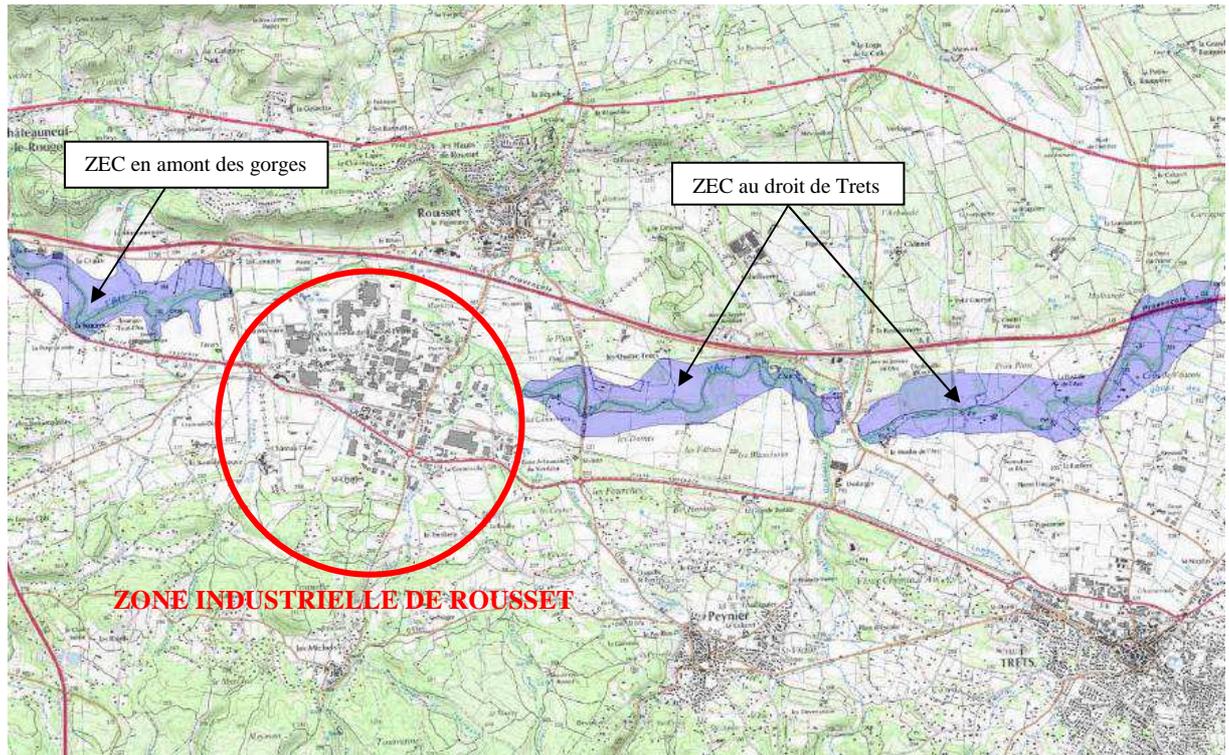


Figure 2 : Fonctionnement hydraulique de l'Arc : de Trets aux gorges de Langesse

- **Tronçon 2 :** entre les gorges de Langesse et les gorges de Roquefavour.

L'emprise hydrogéomorphologique de l'Arc y est relativement étroite. On note la présence de nombreux enjeux sur ce tronçon **très urbanisé**, dont l'urbanisation a pour conséquence une diminution des temps de propagation des crues. A l'amont des gorges de Roquefavour, la plaine des Milles constitue la seule zone d'expansion de crues du secteur. La ripisylve est beaucoup moins marquée que sur le tronçon amont, notamment du fait des **remblais et de l'urbanisation passés** qui ont contraint le lit mineur de l'Arc. Sur ce secteur l'Arc est alimenté en débit par ses plus **gros affluents** (Jouïne, Torse, Cause et Luynes).

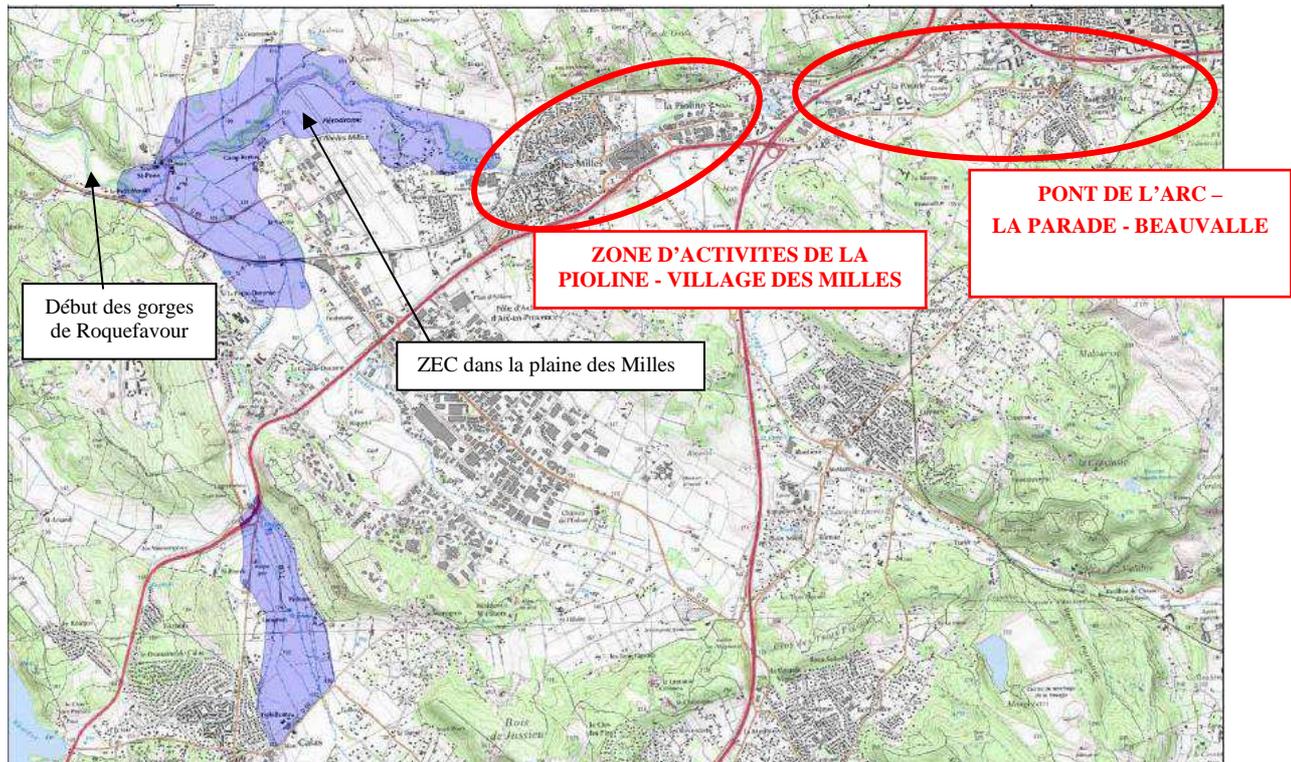


Figure 3 : Fonctionnement hydraulique de l'Arc- secteur d'Aix en Provence

- **Tronçon 3** : entre les gorges de Roquefavour et l'étang de Berre :

En sortie des gorges de Roquefavour, l'Arc s'étale dans la plaine jusqu'à son exutoire (étang de Berre). Du fait de l'absence de relief marqué sur ce secteur, **la largeur de l'écoulement peut atteindre plusieurs kilomètres et les apports en affluents sont quasi inexistantes**. Ce secteur est principalement **agricole**. On note toutefois la présence de la **ville de Berre**, un des enjeux les plus exposés sur le bassin versant de l'Arc. Le linéaire de l'Arc est très **méandré** sur ce secteur et son tracé se modifie au gré des crues morphogènes.

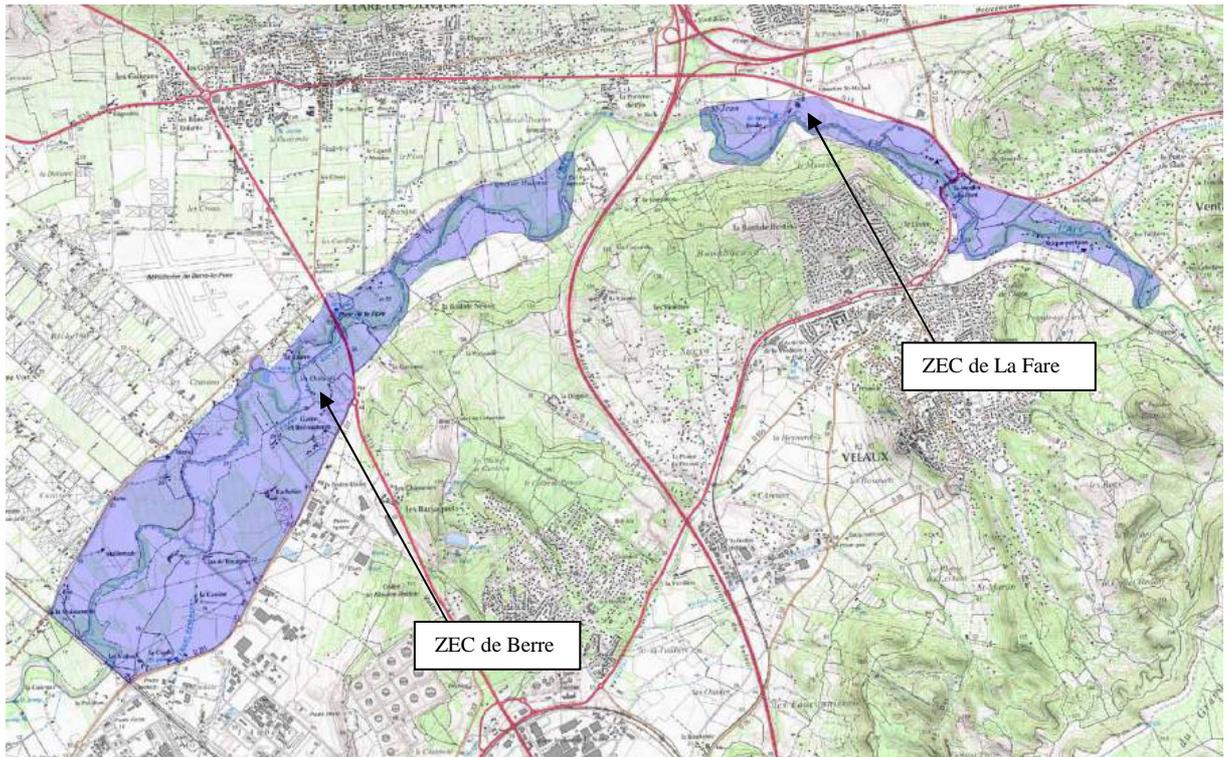


Figure 4 : Fonctionnement hydraulique de l'Arc – en aval des gorges de Roquefavour

2.1.5 Débits retenus pour la modélisation hydraulique

Les différentes sources de données hydrologiques existantes sur l'Arc sont récapitulées ci-dessous :

- Le SABA dispose d'une étude réalisée par GINGER en 2010 (« **étude de mise en cohérence des études hydrologiques et hydrauliques sur le bassin versant de l'Arc** ») dans laquelle 5 crues historiques (1972, 1973, 1978, 2003, 2008) de l'Arc ont été modélisées via un modèle pluie-débit. Cette étude ne fournit pas de données de crue statistique. La pluie qui s'est abattue dans le Var le 15 juin 2010 a également été appliquée sur le modèle pluie-débit du bassin versant de l'Arc ;
- les données de **débits SHYREG** fournies par l'IRSTEA à la DDTM des Bouches du Rhône en avril 2014. Les données fournies sont les suivantes : débits de période de retour 2 ans, 5 ans, 10 ans, 20 ans, 50 ans, 100 ans, 500 ans et 1000 ans en 16 points de calcul répartis le long du linéaire de l'Arc ;
- Les données du **SAGE de l'Arc** (issue de l'étude hydraulique et géomorphologique de l'Arc – SIEE – 1997) : le SAGE de l'Arc fournit des estimations de débits de crue centennale et décennale en 4 points de calcul qui correspondent aux stations hydrométriques de l'Arc.

- Données en provenance des multiples **études hydrauliques locales** recensées.

Les choix retenus par le cotech sont récapitulés au §3. « Données retenues pour l'hydrologie ».

2.2 PHASE 1 : TOPOGRAPHIE

2.2.1 Relevé lidar

Un relevé lidar a été réalisé en avril 2014 sur une superficie de 177 km² représentée sur la figure ci-dessous :

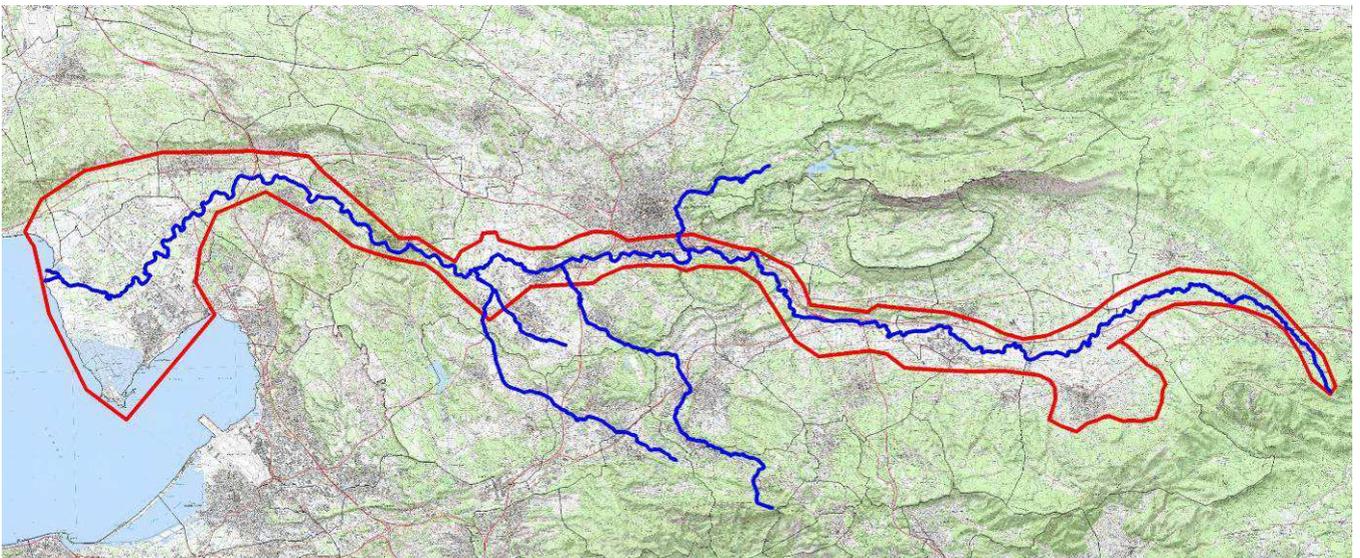


Figure 5 : Emprise du relevé LIDAR

Les données fournies sont un Modèle Numérique de Terrain (MNT) et un Modèle Numérique de Surface (MNS) avec **un point tous les mètres**. La précision altimétrique est de 10 cm, la précision planimétrique est de 25 cm.

2.2.2 Relevés terrestres

Les relevés suivants ont été réalisés sur l'ensemble du linéaire de l'Arc :

- environ 400 profils en travers sur l'Arc (l'écart entre deux profils est de l'ordre de 150/200 m – 5 profils ont été relevés sur la Luynes) ;
- environ 140 ouvrages hydrauliques (les ouvrages concernés sont ceux de l'Arc sur tout son linéaire, plusieurs ouvrages sur la Jouïne, la Luynes et la Torse ainsi que les ouvrages pouvant être inondés par l'Arc par l'aval -ouvrage de franchissement de l'A8 par exemple).

Ces relevés sont localisés en annexe 1.

3 DONNEES RETENUES POUR L'HYDROLOGIE

3.1 CRUES FREQUENTES

3.1.1 Crue décennale

Les débits retenus pour la crue fréquente seront les **débits décennaux du SAGE de l'Arc**.

En effet, le SAGE de l'Arc fournit des estimations de débits de crue centennale et décennale en 5 points correspondant aux stations hydrométriques de l'Arc :

Tableau 1 : Points de calcul des débits du SAGE

Localisation du point de calcul	Superficie drainée km ²
L'Arc à la station de Pourrières	49
L'Arc au Pont de Bayeux	303
L'Arc à Roquefavour	650
L'Arc au Pont de Saint Estève	728
La Luynes à la Pioline	55

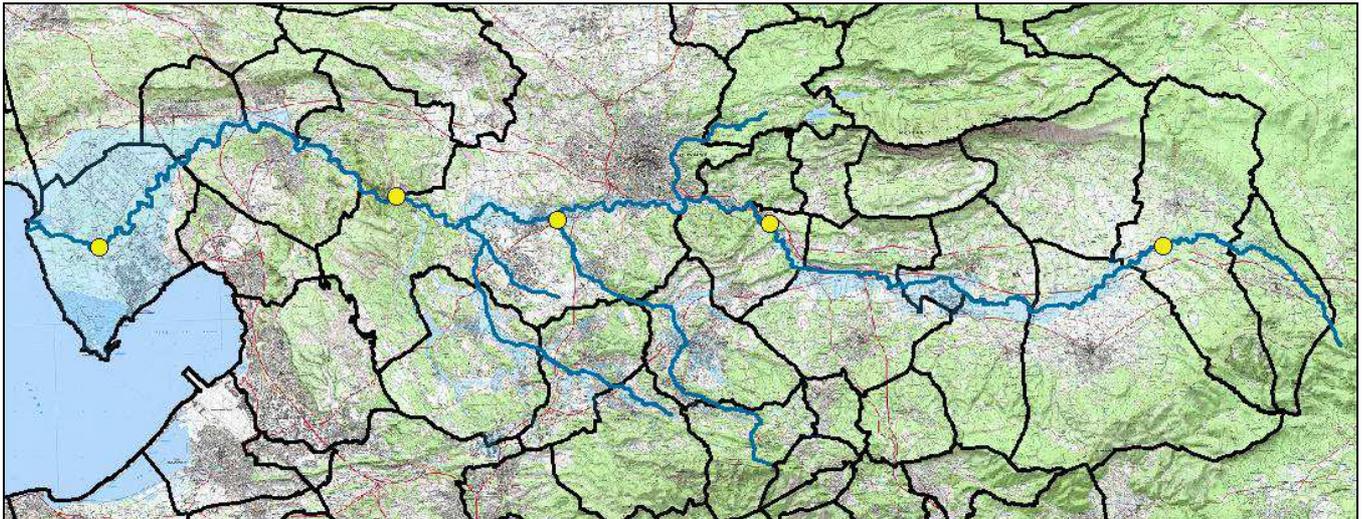


Figure 6 : Localisation des points de calcul des débits du SAGE de l'Arc

Les valeurs du SAGE de l'Arc sont présentées dans le tableau suivant :

Tableau 2 : Débit décennal du SAGE de l'Arc

Localisation du point de calcul	Débit de la crue fréquente m^3/s
L'Arc à Pourrières	45
L'Arc au pont de Bayeux	170
L'Arc à l'aqueduc de Roquefavour	260
L'Arc au pont de St Estève à Berre l'Étang	310

Les débits du SAGE n'étant fournis qu'en 4 points, des débits intermédiaires ont été calculés sur la base d'une variation linéaire du débit pseudo spécifique ($Q_{\text{pseudospé}} = Q / S_{BV}^{0.8}$) entre deux points de calcul du SAGE de l'Arc. Ils sont présentés dans le tableau ci-dessous :

Localisation du point de calcul	Superficie km ²	Q10 m ³ /s
L'Arc à Pourrières	53	45
L'Arc au niveau du franchissement de la D12	135.1	92
L'Arc à Trets, en aval de la confluence avec le Grenouillet	186.3	117
L'Arc à Rousset, en amont de la confluence avec le vallon de Favary	219	131
L'Arc en aval de la confluence avec le Grand Vallat de Fuveau	274.4	153
L'Arc au pont de Bayeux	320	170
L'Arc au Tholonet en aval de la confluence avec la Cause	379	190
L'Arc en aval de la confluence avec la Torse	401	197
L'Arc à la Pioline, en aval de la confluence avec la Luynes	494.9	224
L'Arc à la jonction Saint Pons	620	253
L'Arc à l'aqueduc de Roquefavour	652.2	260
L'Arc à Coudoux, en amont du pont de l'autoroute A7	711.7	287
L'Arc à son exutoire (avant la séparation de l'écoulement dans le delta)	752.3	305

Figure 7 : Débits décennaux retenus pour le TRI de l'Arc

Etant donné l'absence d'écrêtement attendu pour cette crue, la modélisation décennale a été réalisée en régime permanent.

En effet, l'analyse de l'écrêtement de la crue de 2008 (inférieure à la décennale jusqu'aux Milles et supérieure à l'aval des Milles) sur les deux secteurs potentiels d'écrêtement (ZEC des Milles et le secteur en amont de la voie ferrée à Berre) montre que l'écrêtement est négligeable pour ces ordres de grandeur de débit :

ZEC de la plaine des Milles :

Les hauteurs d'eau pour la crue de 2008 au niveau de la plaine des Milles sont présentées sur la figure ci-dessous :

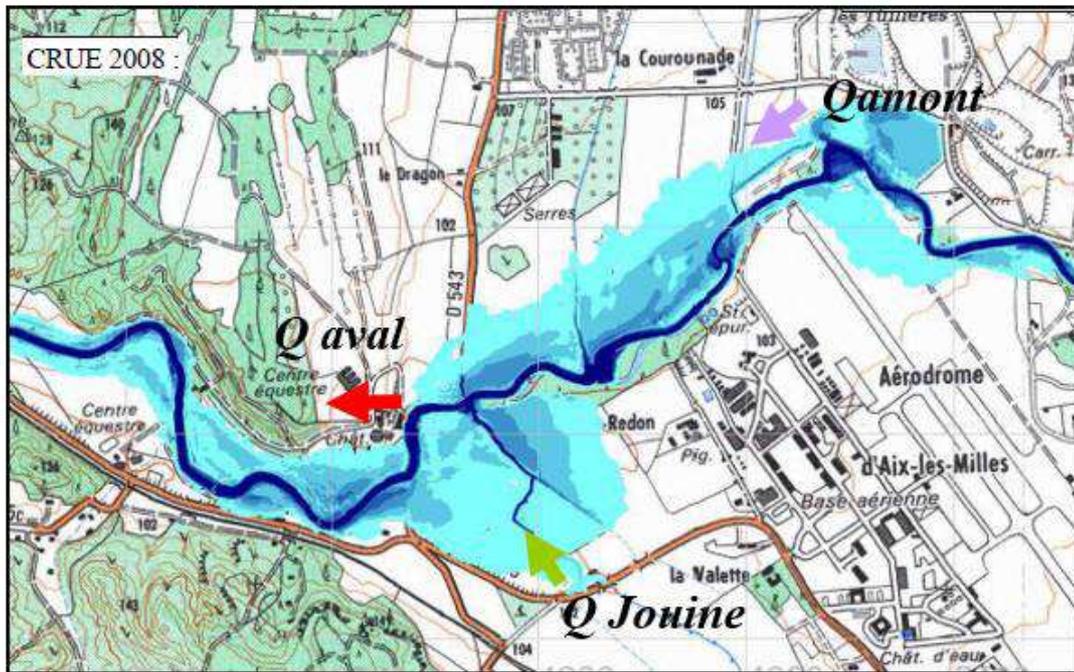


Figure 8 : Inondation de 2008 dans la ZEC des Milles

Les hydrogrammes correspondant aux apports amont (Qamont), aux apports de la Jouine (QJouine) et au débit aval (Qaval) sont présentés sur le graphique ci-dessous :

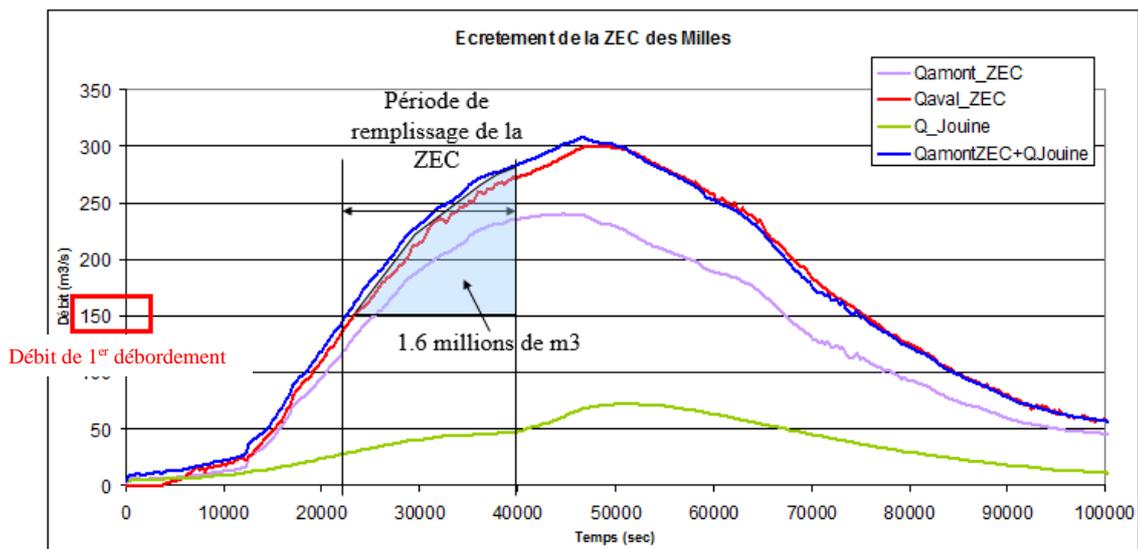


Figure 9 : Hydrogrammes de la crue de 2008 au niveau de la ZEC de Milles

En comparant les apports QamontZEC + QJouine avec le débit en sortie (QavalZEC) on remarque que l'écrêtement est négligeable. D'autre part, la période de remplissage de la zone d'expansion (dont le volume est de 1.6 millions de m³ environ) se situe avant le pic de crue. Ainsi, au moment du pic, la ZEC est transparente.

Secteur en amont de la voie ferrée à Berre :

Les hauteurs d'eau pour la crue de 2008 en amont de la voie ferrée à Berre sont présentées sur la figure ci-dessous :

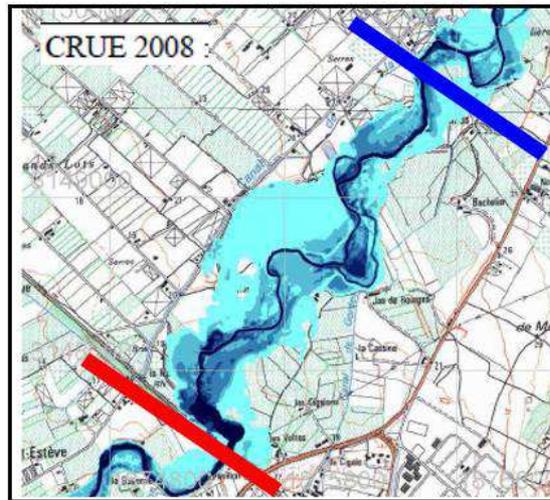


Figure 10 : Inondation de 2008 en amont de la Voie ferrée de Berre

Les hydrogrammes en amont et en aval de ce secteur sont présentés sur la figure ci-dessous :

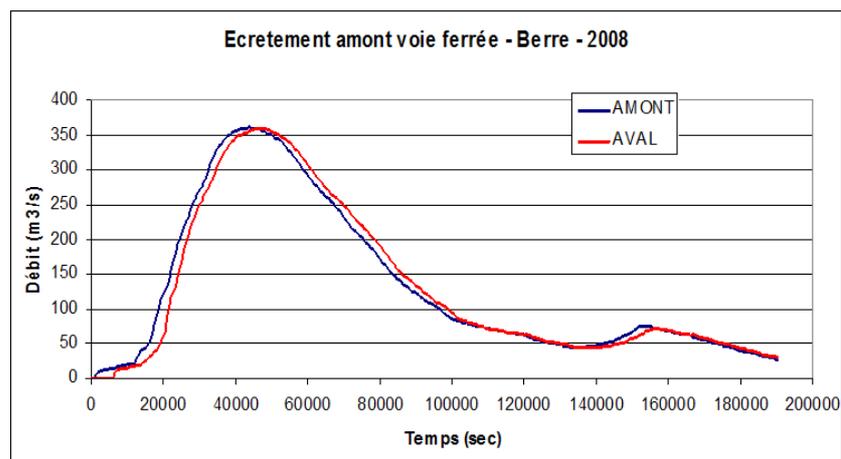


Figure 11 : Hydrogrammes de la crue de 2008 en amont de la voie ferrée de Berre

Sur ce secteur également l'écrêtement est négligeable.

3.1.2 Crue trentennale

Les débits retenus pour la crue trentennale sont déterminés par une interpolation de Gumbel entre les débits décennaux et les débits centennaux du SAGE de l'Arc. Comme pour les débits décennaux, les débits centennaux du SAGE de l'Arc aux points de calcul intermédiaires ont été déterminés en appliquant une variation linéaire du débit pseudo-spécifique.

Les résultats du calcul des débits trentennaux sont détaillés dans le tableau suivant :

Localisation du point de calcul	Superficie km ²	Q30 m ³ /s
L'Arc à Pourrières	53	86.0
L'Arc au niveau du franchissement de la D12	135.1	175.2
L'Arc à Trets, en aval de la confluence avec le Grenouillet	186.3	221.3
L'Arc à Rousset, en amont de la confluence avec le vallon de Favary	219	247.9
L'Arc en aval de la confluence avec le Grand Vallat de Fuveau	274.4	289.1
L'Arc au pont de Bayeux	320	319.6
L'Arc au Tholonet en aval de la confluence avec la Cause	379	353.1
L'Arc en aval de la confluence avec la Torse	401	364.3
L'Arc à la Pioline, en aval de la confluence avec la Luynes	494.9	405.8
L'Arc à la jonction Saint Pons	620	445.5
L'Arc à l'aqueduc de Roquefavour	652.2	453.0
L'Arc à Coudoux, en amont du pont de l'autoroute A7	711.7	481.6
L'Arc à son exutoire (avant la séparation de l'écoulement dans le delta)	752.3	500.4

Figure 12 : Débits trentennaux retenus pour le TRI de l'Arc

Comme pour la crue décennale, la modélisation se fera en régime permanent.

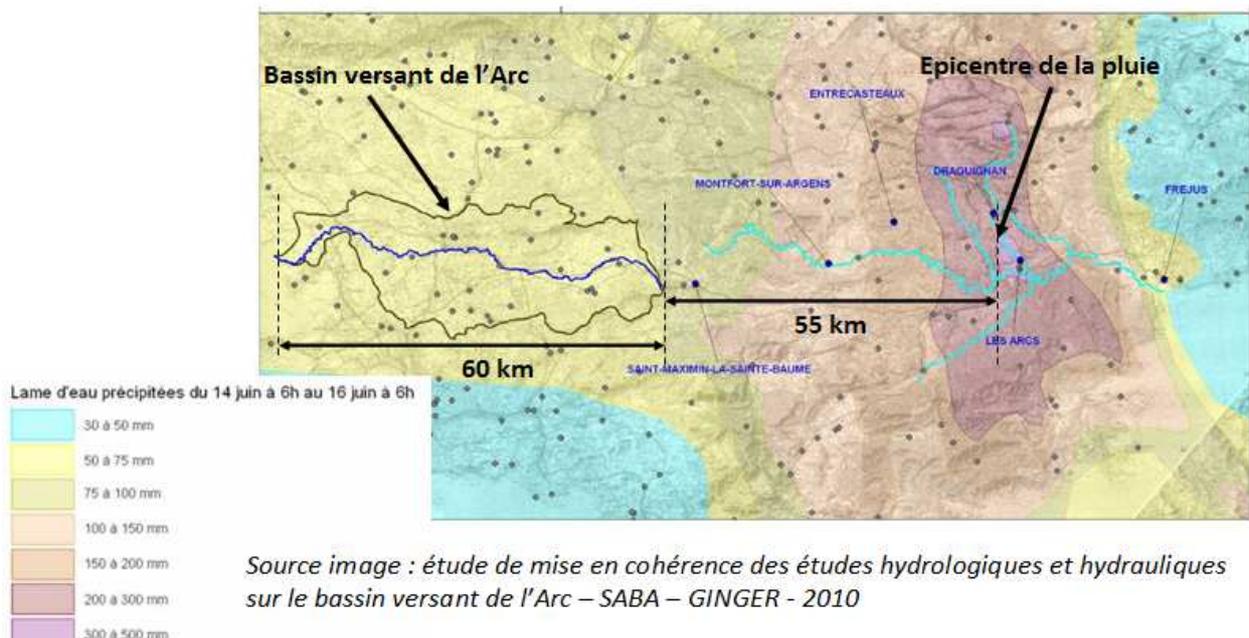
3.2 CRUE DE REFERENCE

Dans l'échelle d'occurrence introduite par le cadre de la Directive Inondation, la crue « moyenne » correspond à la **crue de référence**, définie comme étant « la plus forte crue connue, ou si cette crue est plus faible qu'une crue centennale, cette dernière ».

La phase 0 de la présente étude a conclu qu'aucune crue historique d'ampleur et généralisée ne pouvait servir de base à la définition de l'évènement de référence.

De plus, l'étude réalisée par le bureau d'étude GINGER en 2010 pour le compte du SABA (« Etude de mise en cohérence des études hydrologiques et hydrauliques sur le bassin versant de l'Arc ») s'est intéressée à définir, via l'application d'une modélisation pluie-débit détaillée, la réaction du bassin versant de l'Arc à une pluie du type de celle qui s'est abattue en juin 2010 sur le Var. Effectivement, d'après Météo France cet évènement d'une intensité remarquable aurait pu se produire n'importe où autour de la Méditerranée et « *il est donc possible d'imaginer un tel évènement sur le bassin de l'Arc, soit seulement 60 km à l'Ouest de l'épicentre de la pluie du 15 juin 2010* » (extrait du SAGE de l'Arc). Les résultats ayant montré que les débits résultants étaient très proches des débits centennaux affichés dans le SAGE de l'Arc, il a été décidé de les retenir pour définir l'évènement de référence.

La présente étude définit donc la **crue de référence** (Q_{REF}) comme **la réaction du cours d'eau principal de l'Arc à l'application de la pluie du Var de juin 2010**.

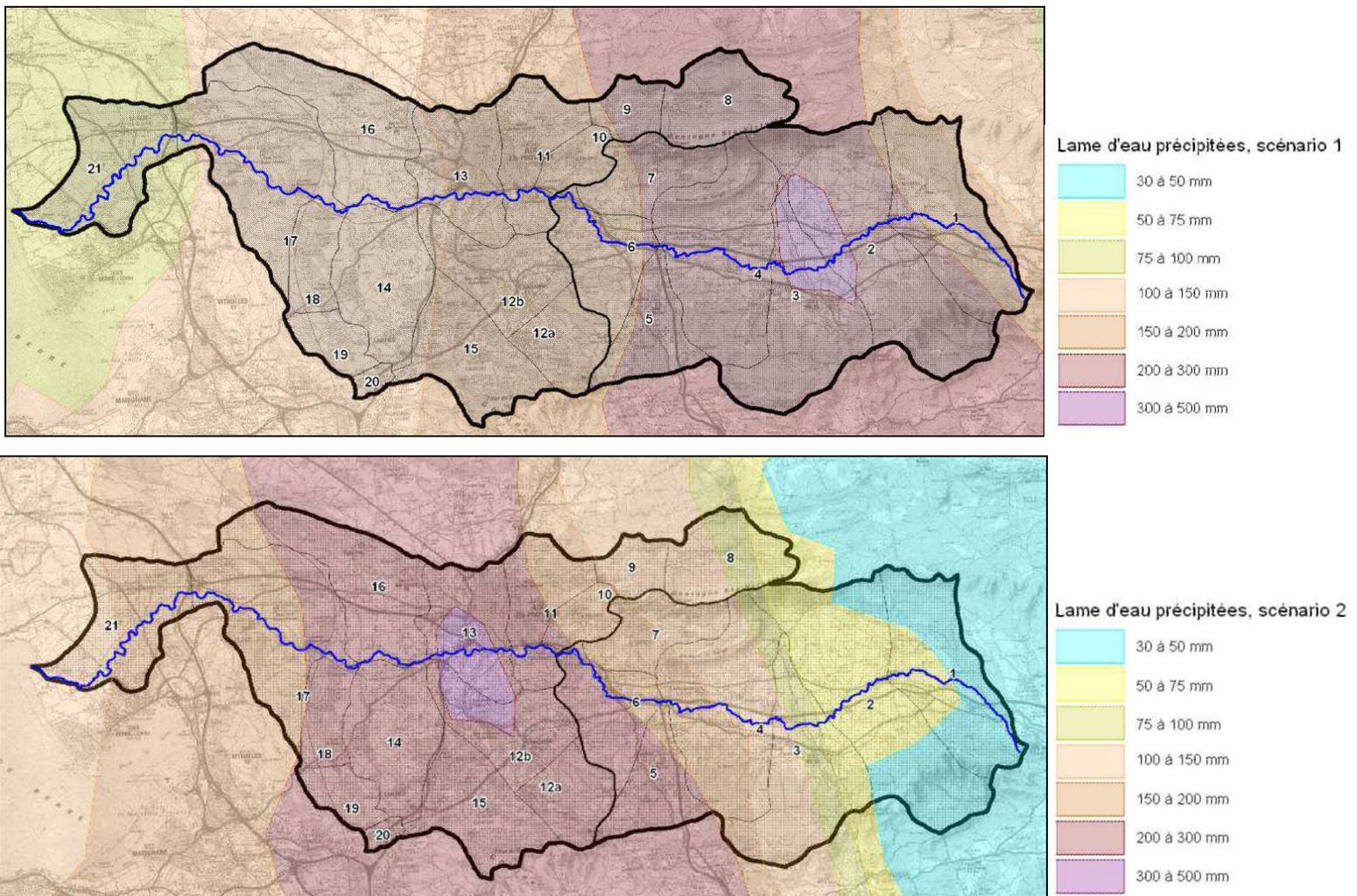


3.2.1 Modélisations hydrologiques réalisées dans l'étude du SABA

Dans cette étude, 3 scénarii sont étudiés :

1. l'épicentre de la pluie est situé sur la partie amont du bassin versant
2. l'épicentre de la pluie est situé sur la partie centrale du bassin versant
3. la pluie sur le bassin versant est uniforme et correspond aux valeurs observées au niveau de l'épicentre de la pluie du Var.

La lame d'eau précipitée pour les 3 scénarii retenus est présentée sur la figure ci-dessous :



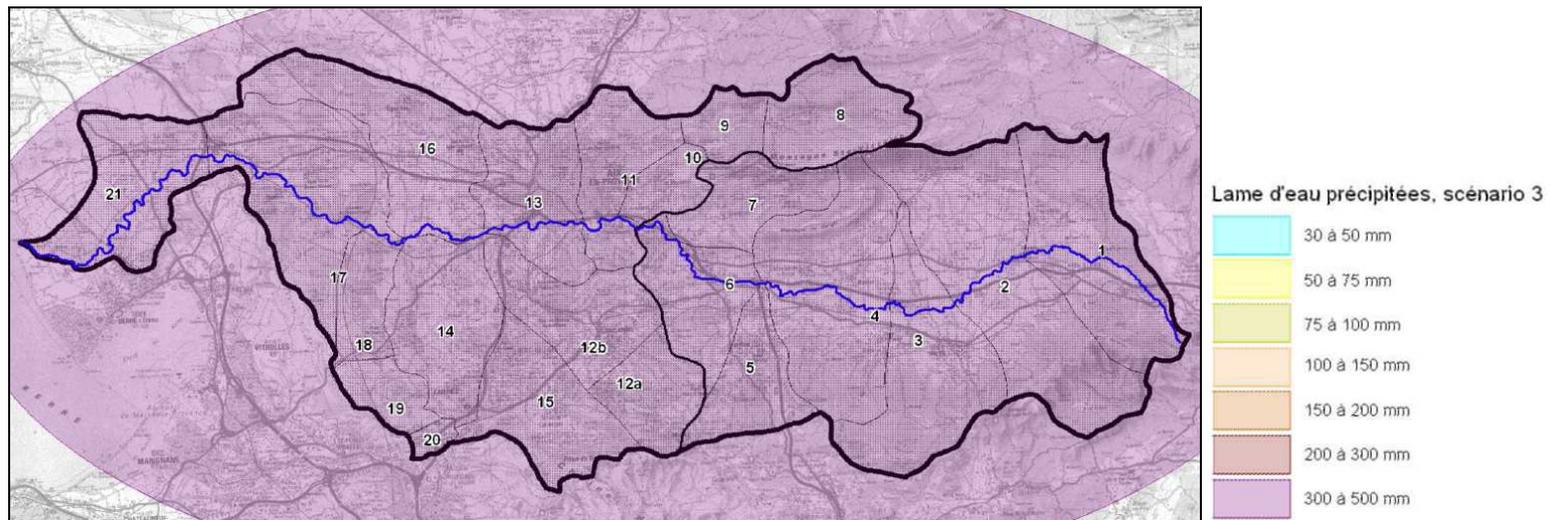


Figure 13 : Lamme d'eau précipitée pour les 3 scénarii – Extrait de « L'Évaluation de l'incidence hydrologique sur le bassin versant de l'Arc d'un épisode pluvieux tel que celui qui a affecté le var le 15 juin 2010 – GINGER – SABA – 2010 »

Remarques :

- L'étude du SABA ne prévoyait pas de modélisation d'un épisode pluviométrique centré sur l'aval du bassin versant car les débits de l'Arc sont générés principalement à l'amont et au centre, au niveau des principaux affluents ;
- Pour le scénario 3, la cellule orageuse principale est artificiellement étendue à l'ensemble du bassin versant. Cet évènement pénalisant n'a pas vocation à être exploité sur l'Arc mais permet de caractériser les débits aux exutoires de chacun des sous-bassins si ceux-ci recevaient la précipitation la plus intense.

3.2.2 Scénario 4 : épocentre de la pluie centré sur l'extrémité amont du bassin versant de l'Arc

Un scénario 4, centré sur l'extrémité amont, a été étudié dans le cadre de la présente étude. La localisation de l'épicentre de pluie du scénario 4 est présentée sur la figure ci-dessous :

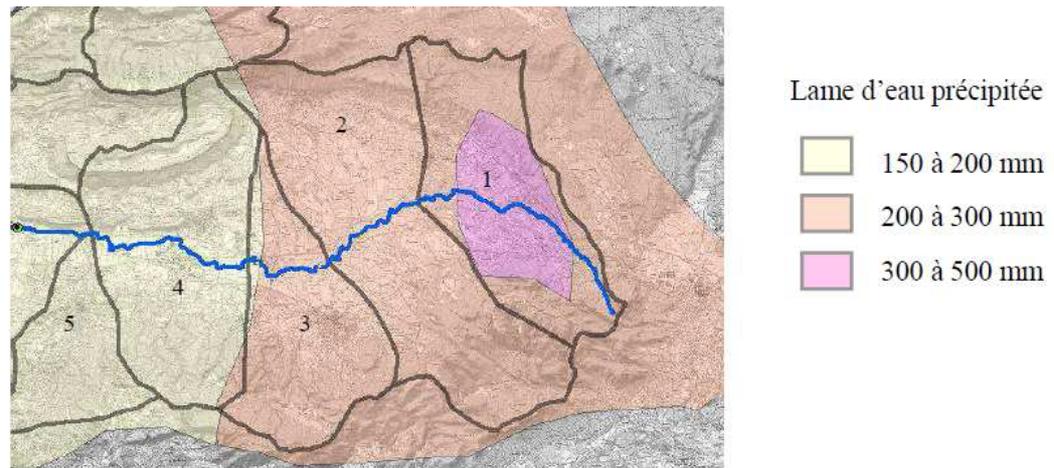


Figure 14 : Episode du 15 juin 2010 : Lamme d'eau précipitée pour le scénario 4

Ce nouveau scénario permettra de définir la crue de référence sur l'extrémité amont du bassin versant. En effet, les sous bassins versants 1 et 2 étant pour les scénarii 1 et 2 situés en amont de l'épicentre de la pluie, les débits générés par ces deux scénarii sont trop faibles pour être retenus comme débit de référence ($38 \text{ m}^3/\text{s}$ et $2.7 \text{ m}^3/\text{s}$ pour le sous bassin 1 – $148.9 \text{ m}^3/\text{s}$ et $2.7 \text{ m}^3/\text{s}$ pour le sous bassin 2). D'autre part, le scénario 3 est trop pessimiste, et trop peu physique, pour être retenu comme évènement de référence sur l'extrémité amont du bassin versant de l'Arc.

3.2.3 Débits de référence retenus

Les débits de chaque scénario sont récapitulés sur le graphique présenté ci-dessous. Les débits des crues de calages (événements de 2008 et de 1978) ont également été ajoutés au graphique :

Débits de pointe des 4 scénarios modélisés pour la crue de 2010

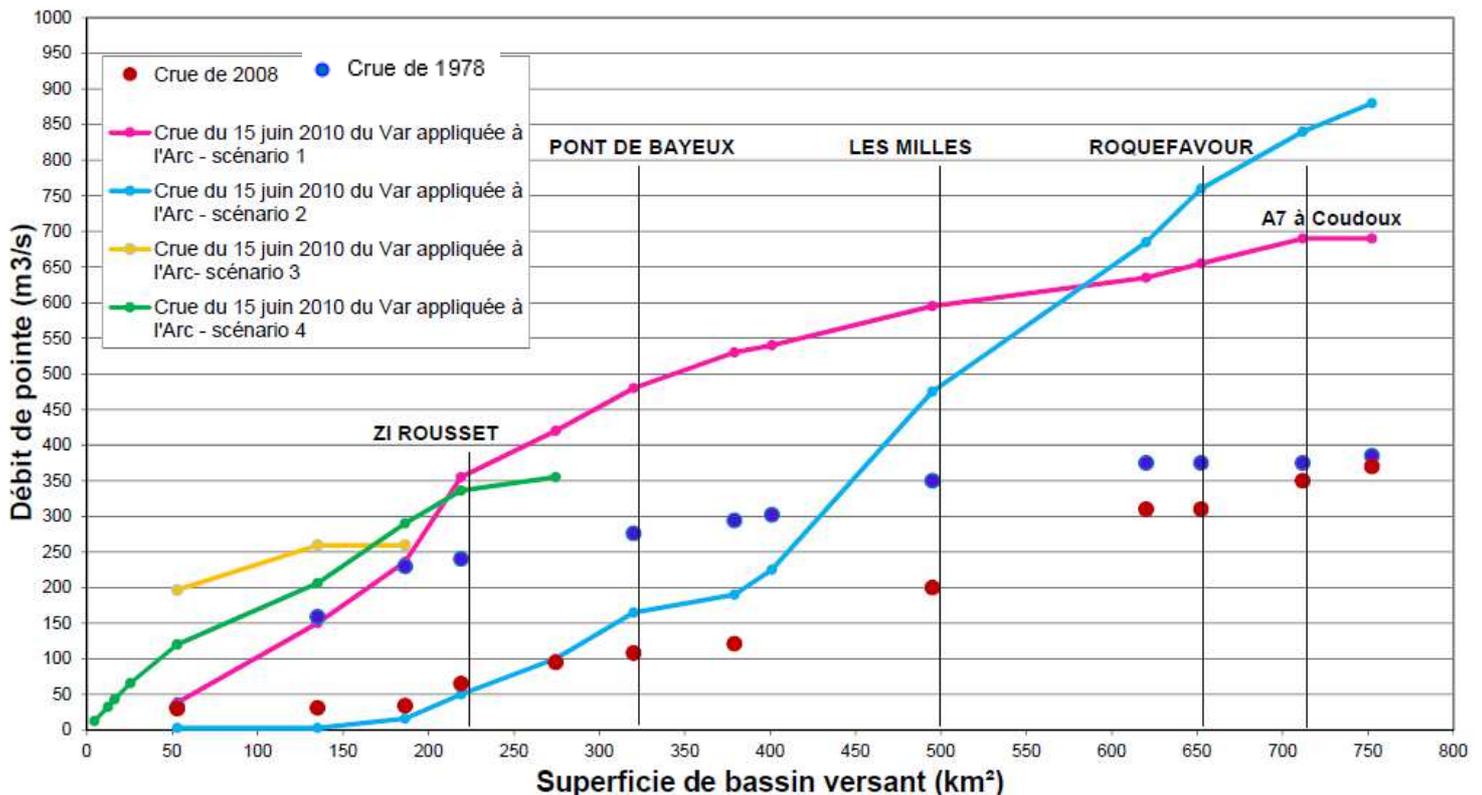


Figure 15 : Episode du 15 juin 2010 : graphique des débits des 4 scénarii modélisés

Remarques :

- Comme attendu d'après la localisation des épicentres de pluie, SC4 est plus fort sur l'amont du bassin versant (jusqu'à Rousset) – hormis SC3 -, SC1 est le plus fort sur la partie centrale du bassin versant (entre Rousset et Saint Pons) et SC2 est le plus fort sur la partie aval du bassin versant (entre Saint Pons et l'exutoire);
- Les débits du SC4 pour une superficie de bassin versant inférieure à 50 km² correspondent aux débits obtenus après sous-découpage du sous bassin versant 1 (cf § 4.2.1 « Injection des débits ») ;

- Le scénario SC3 est trop pessimiste puisqu'il considère une pluie uniforme dont l'intensité est égale au maximum observé pendant l'évènement du 15 juin 2010. Cet évènement n'a pas vocation à être exploité sur l'Arc mais permet de caractériser les débits aux exutoires de chacun des sous-bassins si ceux-ci recevaient la précipitation la plus intense. Il ne peut donc pas servir de base à l'établissement de la crue de référence sur l'Arc ;
- Les débits présentés sur le graphique ci-dessus ont été directement mesurés sur les résultats du modèle hydraulique. En effet, les résultats de la modélisation hydraulique mettent en évidence des écarts entre les débits du modèle pluie/débit et les hydrogrammes issus de la modélisation hydraulique, au niveau de la propagation de la crue.

La crue de référence correspond au maximum des scénarii 1, 2 et 4 de l'application de l'évènement du Var du 15 juin 2010 sur le bassin versant de l'Arc. La localisation, par tronçon, du scénario retenu est présentée sur la figure ci-dessous :

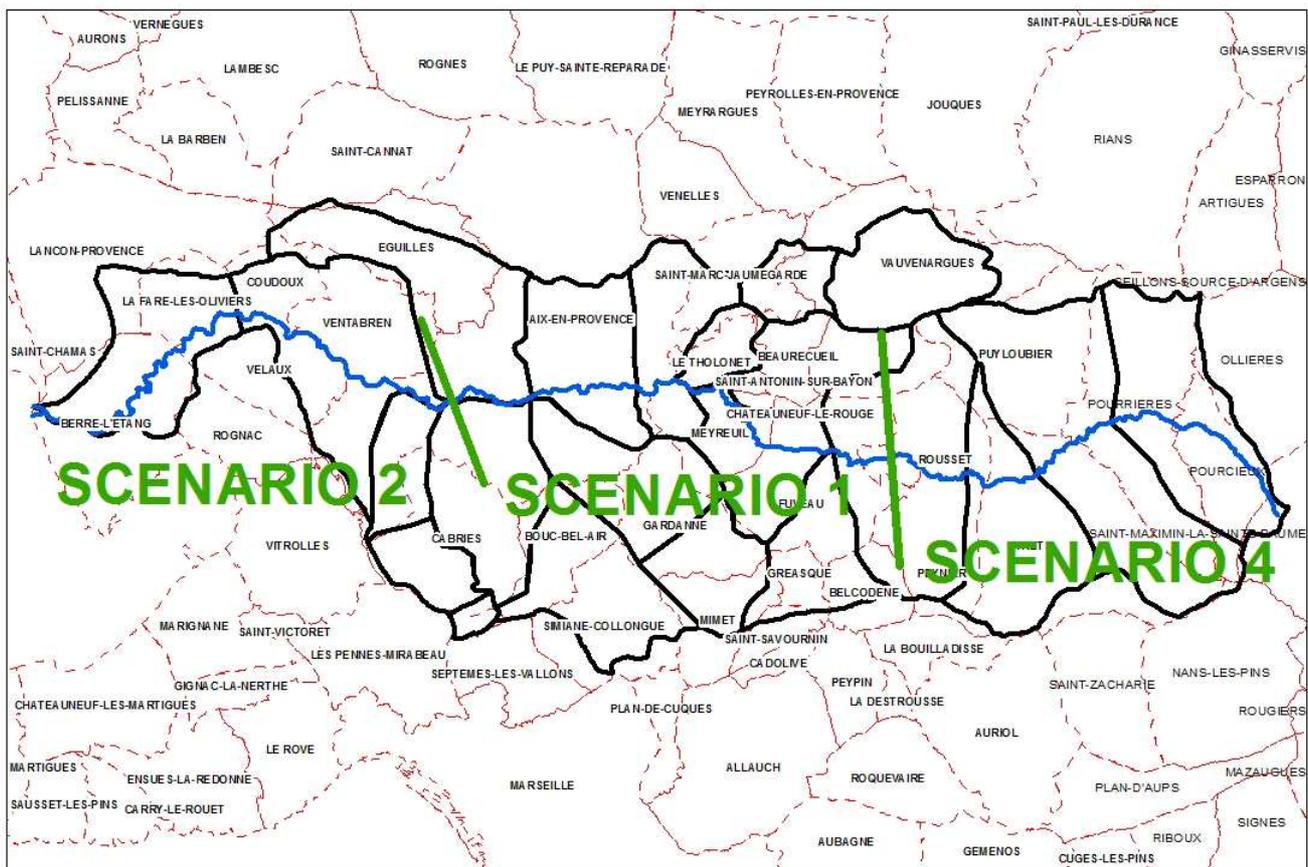


Figure 16 : Episode du 15 juin 2010 : scénario retenu par tronçon

Les débits de références, correspondant au maximum des scénarii 1, 2 et 4 sont récapitulés dans le tableau suivant :

Localisation du point de calcul	Superficie km ²	Q2010 SC1 m3/s	Q2010 SC2 m3/s	Q2010 SC4 m3/s	Debit de référence retenu m3/s
L'Arc à Pourrières	53	38.5	2.7	120	120
L'Arc au niveau du franchissement de la D12	135.1	150	2.7	206	206
L'Arc à Trets, en aval de la confluence avec le Grenouillet	186.3	236	16	290	290
L'Arc à Rousset, en amont de la confluence avec le vallon de Favary	219	355	50	336	355
L'Arc en aval de la confluence avec le Grand Vallat de Fuveau	274.4	420	100	355	420
L'Arc au pont de Bayeux	320	480	165		480
L'Arc au Tholonet en aval de la confluence avec la Cause	379	530	190		530
L'Arc en aval de la confluence avec la Torse	401	540	225		540
L'Arc à la Pioline, en aval de la confluence avec la Luynes	494.9	595	475		595
L'Arc à la jonction Saint Pons	620	635	685		685
L'Arc à l'aqueduc de Roquefavour	652.2	655	760		760
L'Arc à Coudoux, en amont du pont de l'autoroute A7	711.7	690	840		840
L'Arc à son exutoire (avant la séparation de l'écoulement dans le delta)	752.3	690	880		880

Figure 17 : Débits de référence retenus pour le TRI de l'Arc

Les débits de référence sont proches de ceux du SAGE de l'Arc jusqu'à Saint Pons environ. Plus en aval, les débits de références deviennent supérieurs aux débits centennaux :

Lieux	Q SAGE	Q REF
Pourrières	130	120
Pont de Bayeux	480	480
Roquefavour	660	760
Exutoire à Berre	710	880

Tableau 3 : Comparaison Q100 du SAGE de l'Arc et Qref

3.3 CRUE EXCEPTIONNELLE

Le débit de la crue exceptionnelle retenu est le **débit obtenu en multipliant par deux les apports hydrologiques de la crue de référence**. Les hydrogrammes retenus sont également ceux obtenus en multipliant les apports par deux.

Les débits aux points caractéristiques de l'Arc, lus dans le modèle hydraulique, sont les suivants :

Localisation du point de calcul	Superficie km ²	Debit exceptionnel retenu m ³ /s
L'Arc à Pourrières	53	240
L'Arc au niveau du franchissement de la D12	135.1	410
L'Arc à Trets, en aval de la confluence avec le Grenouillet	186.3	580
L'Arc à Rousset, en amont de la confluence avec le vallon de Favary	219	710
L'Arc en aval de la confluence avec le Grand Vallat de Fuveau	274.4	810
L'Arc au pont de Bayeux	320	930
L'Arc au Tholonet en aval de la confluence avec la Cause	379	950
L'Arc en aval de la confluence avec la Torse	401	970
L'Arc à la Pioline, en aval de la confluence avec la Luynes	494.9	1060
L'Arc à la jonction Saint Pons	620	1350
L'Arc à l'aqueduc de Roquefavour	652.2	1510
L'Arc à Coudoux, en amont du pont de l'autoroute A7	711.7	1660
L'Arc à son exutoire (avant la séparation de l'écoulement dans le delta)	752.3	1710

Figure 18 : Débits de la crue exceptionnelle retenus pour le TRI de l'Arc

3.4 CONCLUSION SUR L'HYDROLOGIE RETENUE

Les différents débits retenus sont récapitulés sur le graphique suivant :

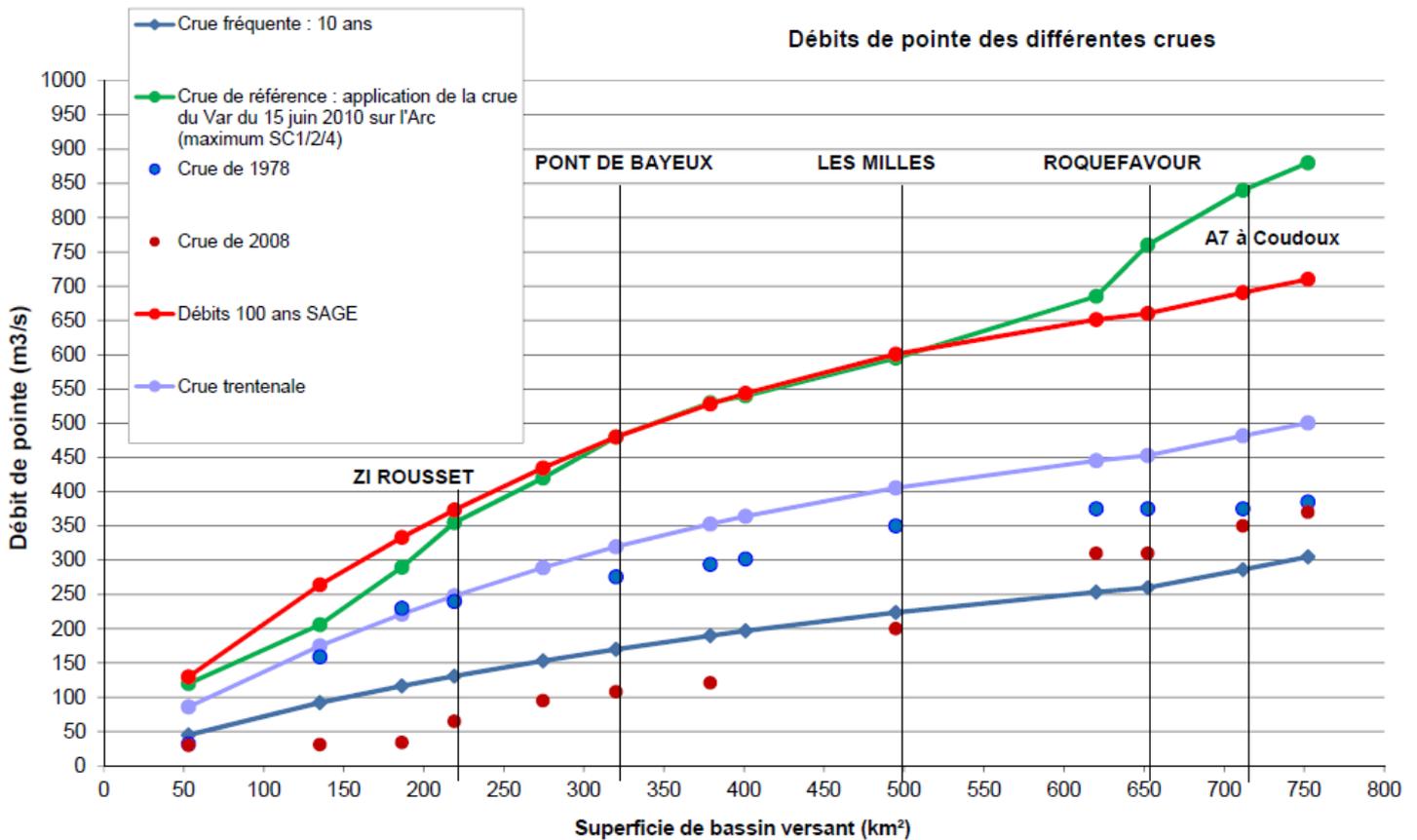


Figure 19 : Graphique des débits retenus pour le TRI de l'Arc

On remarque que :

- Jusqu'à la zone des Milles, les débits de la crue de référence sont proches de la crue centennale. Au-delà, les débits de la crue de référence sont supérieurs au débit centennaux
- Jusqu'à la zone des Milles, la crue de 2008 est inférieure à la décennale, au-delà, elle est légèrement supérieure ;
- La crue de 1978 est d'occurrence proche ou inférieure à la trentennale.

Notons qu'il n'est pas possible d'affecter une occurrence à l'évènement de référence puisqu'il s'agit d'un évènement qui ne s'est pas réellement produit sur le bassin versant de l'Arc et qu'il résulte de la combinaison d'un même épisode pluvieux s'abattant sur plusieurs secteur du bassin versant.



Ce qu'il faut retenir...

Pour la crue fréquente, les débits retenus seront les **débits décennaux du SAGE de l'Arc**. Pour la crue trentennale, les débits ont été déterminés par une interpolation de Gumbel entre les débits décennaux et centennaux du SAGE de l'Arc.

Pour la crue de référence sur l'Arc, l'évènement correspondant à **l'application de la pluie du Var du 15 juin 2010 sur le bassin versant de l'Arc** est retenu.

Le débit de la crue exceptionnelle est **obtenu en multipliant par deux les apports hydrologiques de référence**.

Les débits sont récapitulés dans le tableau ci-dessous :

Localisation du point de calcul	Superficie km ²	Q10 m ³ /s	Debit de référence retenu m ³ /s	Q30 m ³ /s	Debit exceptionnel retenu m ³ /s
L'Arc à Pourrières	53	45	120	86	240
L'Arc au niveau du franchissement de la D12	135	92	206	175	410
L'Arc à Trets, en aval de la confluence avec le Grenouillet	186	117	290	221	580
L'Arc à Rousset, en amont de la confluence avec le vallon de Favary	219	131	355	248	710
L'Arc en aval de la confluence avec le Grand Vallat de Fuveau	274	153	420	289	810
L'Arc au pont de Bayeux	320	170	480	320	930
L'Arc au Tholonet en aval de la confluence avec la Cause	379	190	530	353	950
L'Arc en aval de la confluence avec la Torse	401	197	540	364	970
L'Arc à la Pioline, en aval de la confluence avec la Luynes	495	224	595	406	1060
L'Arc à la jonction Saint Pons	620	253	685	445	1350
L'Arc à l'aqueduc de Roquefavour	652	260	760	453	1510
L'Arc à Coudoux, en amont du pont de l'autoroute A7	712	287	840	482	1660
L'Arc à son exutoire (avant la séparation de l'écoulement dans le delta)	752	305	880	500	1710

Figure 20 : Synthèse des débits retenus pour le TRI de l'Arc

4 MODELISATION HYDRAULIQUE

4.1 NOMBRE DE MODELE

Le linéaire de cours d'eau à modéliser est trop grand pour envisager la réalisation d'un seul et unique modèle avec une précision suffisante (temps de calcul trop important – traitement des données et des résultats trop lourd). C'est pourquoi le linéaire à modéliser est découpé en plusieurs tronçons.

4.1.1 Localisation des trois modèles

Le linéaire de l'Arc a été découpé en trois tronçons représentés sur la figure suivante:

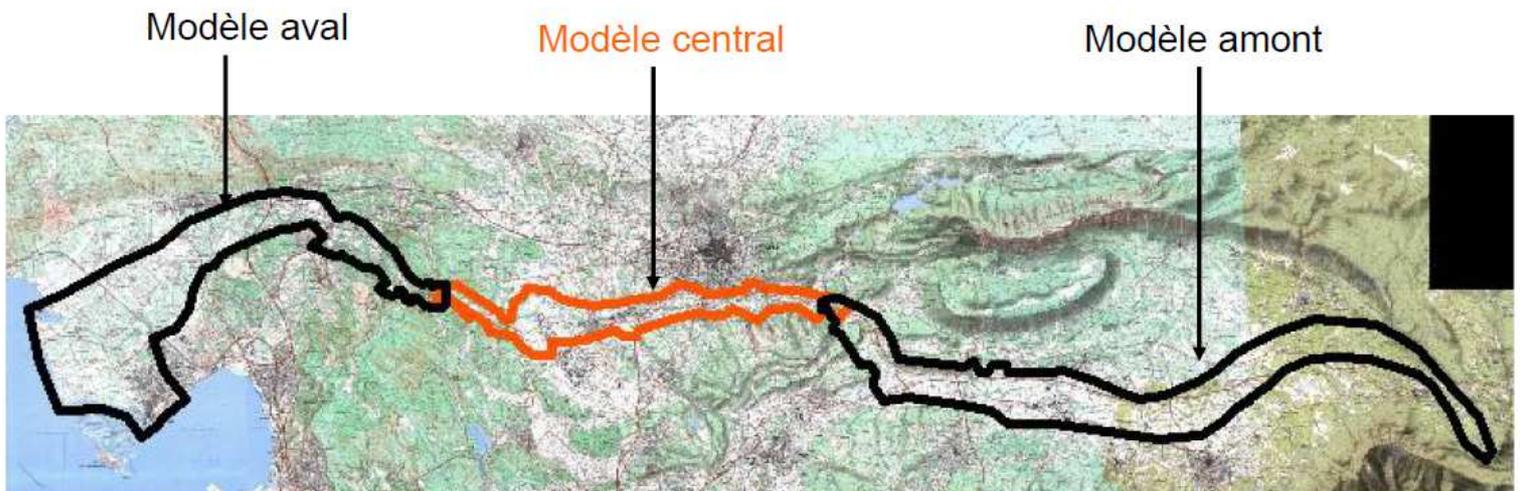


Figure 22 : Emprise des trois modèles hydrauliques

Les superficies sont les suivantes :

Tableau 4 : Linéaires et superficies des trois modèles hydrauliques

	Superficie (km ²)	Linéaire de cours d'eau (km)
Modèle amont (de Pourcieux aux gorges de Langesse)	49	36
Modèle centre (des gorges de Langesse aux gorges de Roquefavour)	18	20
Modèle aval (des gorges de Roquefavour à l'étang de Berre)	48	26

4.1.2 Zones de recouvrement des modèles hydrauliques

Les zones de recouvrement sont localisées sur la figure ci-dessous :

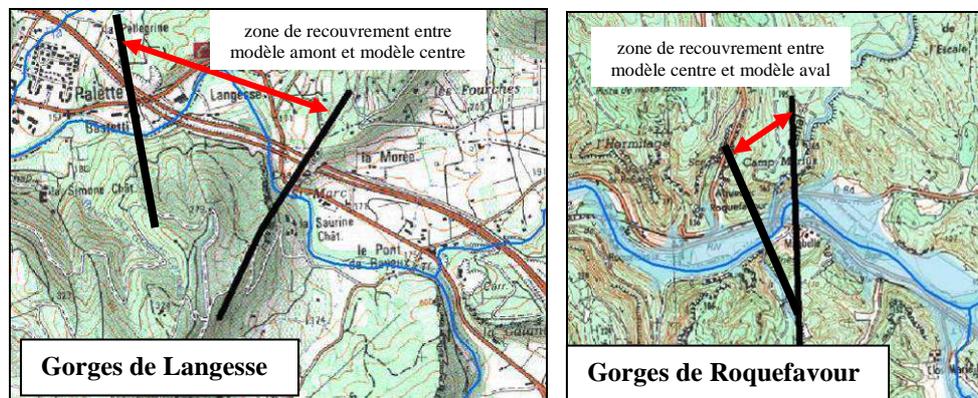


Figure 23 : zone de recouvrement des modèles hydrauliques

Ce découpage est en cohérence avec le fonctionnement hydraulique du bassin versant de l'Arc.

Pour connaître le débit injecté en amont du modèle aval, le modèle central aura dû être lancé préalablement. De même, pour connaître le débit injecté en amont du modèle central, le modèle amont aura dû être lancé préalablement. Ainsi, **le lancement des modèles se fera nécessairement de l'amont vers l'aval**. Pour avoir un raccord cohérent en débit et en hauteur entre les différents modèles, **deux séries de simulation devront être lancées** : en effet, dans une première série de simulation une condition limite aval « fictive » (par

exemple hauteur normale) sera imposée en aval du modèle amont. La condition limite aval « réelle » du modèle amont sera obtenue une fois que le modèle central aura été lancé (il s'agira de la loi hauteur/débit en amont du modèle central).

Le principe est récapitulé dans le tableau suivant :

Figure 24 : Raccord des modèles hydrauliques et nombre de simulations

	1 ère simulation (résultats temporaires)		2 ième simulation (résultats définitifs)	
	amont	aval	amont	aval
MODELE 1: AMONT	Qentrée_mod1	CL aval = hauteur normale	Qentrée_mod1	CLaval_mod1 = loi hauteur/débit issue de la 1 ^{ère} simu du modèle 2
MODELE 2 : CENTRAL	Qentrée_mod2 = Qsortie_mod1	CL aval = hauteur normale	Qentrée_mod2 = Qsortie_mod1	CLaval_mod2 = loi hauteur/débit issue de la 1 ^{ère} simu du modèle 3
MODELE 3 : AVAL	Qentrée_mod3 = Qsortie_mod2	CL étang de Berre	-	-

Pour pouvoir assurer cette cohérence entre modèles, une zone de recouvrement a été mise en place (cf 4.1.2.).

4.2 CONDITIONS AUX LIMITES

4.2.1 Injection des débits (conditions aux limites amont)

Les points d'injection des hydrogrammes et les sous bassins versants associés sont présentés ci-dessous :

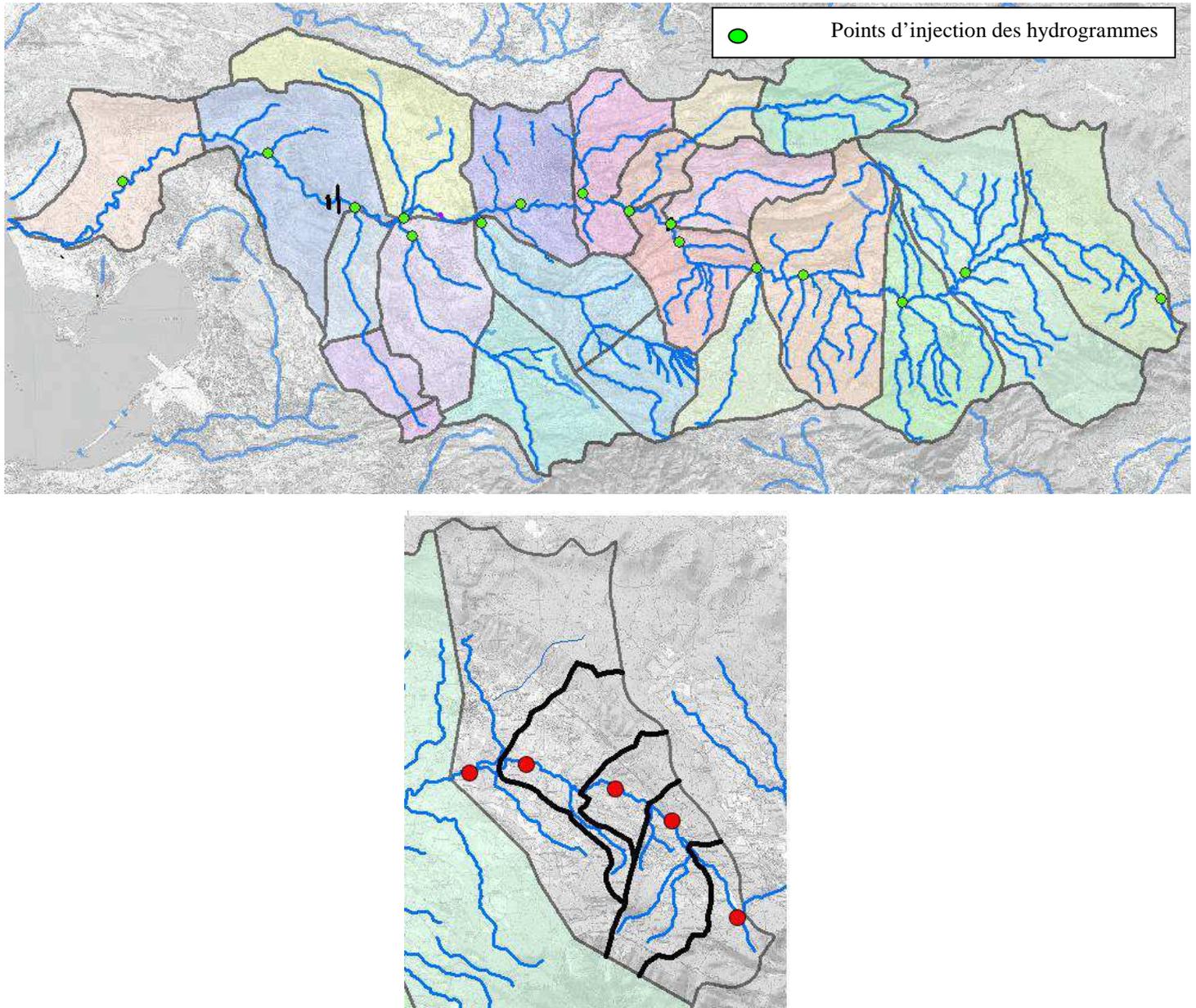


Figure 25 : Localisation des points d'injection des hydrogrammes

Ce découpage en sous bassins versant est celui de l'étude de mise en cohérence des études hydrologiques et hydrauliques sur le bassin versant de l'Arc (SABA-GINGER – 2010). Les points d'injections ont été localisés suivant les principes suivants :

- sur la Torse, la Jouine et la Luyne les injections d'hydrogrammes se font quelques dizaines de mètres avant la confluence, à partir de l'endroit où de la topographie est disponible ;
- dans les cas où le sous bassin versant ne correspond qu'à une seule arrivée dans l'Arc, le point d'injection de ce sous bassin versant est situé dans l'Arc, au niveau de la confluence ;
- dans le cas où le sous bassin versant regroupe à plusieurs arrivées dans l'Arc le point d'injection est situé dans l'Arc au tiers inférieur du linéaire ;
- le premier sous-bassin versant a été sous-découpé par Safege afin d'éviter que les résultats de la modélisation soient trop pessimistes sur ce tronçon. Pour calculer des débits intermédiaires le débit pseudo-spécifique a été conservé ($Q_{\text{pseudospé}} = Q / S_{\text{BV}}^{0.8}$).

Notons que les hydrogrammes injectés sont directement extraits du modèle pluie-débit de l'étude de GINGER pour les crues historiques et la crue de référence. Ainsi, la temporalité d'injection des hydrogrammes est celle du modèle pluie débit qui prend en compte à la fois les différences de vitesses de propagation entre les différents affluents de l'Arc (dus aux caractéristiques physiques des sous bassins versants) et la variabilité temporelle de la pluie.

Dans le cas du premier sous bassin versant, l'injection se fait à l'extrémité amont de l'Arc. Les emprises de zone inondable sur ce secteur (sans enjeux) sont donc pessimistes. Étant donné les faibles débits de pointe sur ce premier bassin la modification de la chronologie de la crue du fait de cette injection amont, est négligeable.

4.2.2 Conditions limite aval

La commune de Berre l'Étang et le GIPREB (Syndicat mixte : Gestion intégrée, prospective et restauration de l'étang de Berre) ne disposant pas d'éléments quant aux niveaux maximums atteints par l'Étang de Berre les 2 conditions aux limites suivantes ont été testées:

- cote de 1 m NGF qui correspond à l'ordre de grandeur du niveau larin décennal au droit de Marseille (pour mémoire, l'Étang de Berre communique avec la mer) ;
- cote de 0.4 m NGF qui correspond à la surcote observée au droit du débouché de l'Arc dans les conditions de vent est/sud-est qui entraîne un effet de bascule.

Les hypothèses suivantes ont été retenues pour les modélisations :

- crue de 1978 ; crue de référence ; crue exceptionnelle : Zaval = 1 m NGF ;
- crue de 2008 ; crue décennale ; crue trentennale : Zaval = 0.4 m NGF.

4.3 LE MAILLAGE

Le maillage d'un modèle hydraulique est la discrétisation spatiale du territoire étudié en un ensemble de triangles contigus appelés maille.

4.3.1 Généralités

Les maillages ont été construits sur la base suivante :

- les lignes de structure en lit mineur et majeur (remblai routier, digue ..ect..) ont été intégrés ;
- le maillage est densifié dans les zones à enjeu ;
- une partie du bâti est extrudé (cf §3.4);
- en lit mineur la topographie terrestre est utilisée pour l'interpolation du maillage ;
- en lit moyen et majeur la topographie lidar est utilisée pour l'interpolation du maillage.

Les principales caractéristiques des trois maillages sont récapitulées dans le tableau suivant :

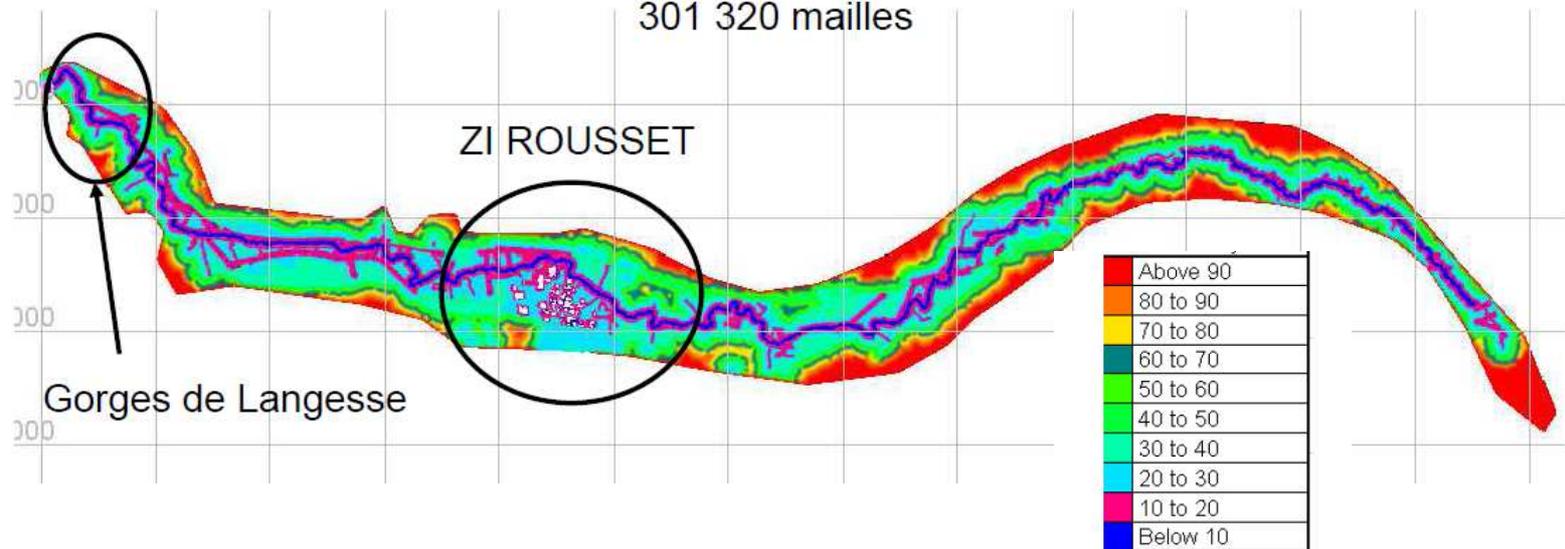
Tableau 5 : Caractéristiques des maillages

	Densité en lit mineur (m)	Densité dans les secteurs à enjeux (actuels et futurs) (m)	Densité des mailles au niveau des lignes de structures (axe routier, remblai, digue..ect..) (m)	Densité aux frontières de modèle (m)	Nombre de mailles
Modèle amont	longueur de 5 m – 6 mailles en largeur	25 m	10 à 15 m	120 m	301 320
Modèle central	longueur de 5 m – 6 mailles en largeur	15 m	5 à 8 m	100 m	269 839
Modèle aval	longueur de 5 m – 6 mailles en largeur	15 m	2 à 25 m	100 m	274 161

4.3.2 Maillage amont

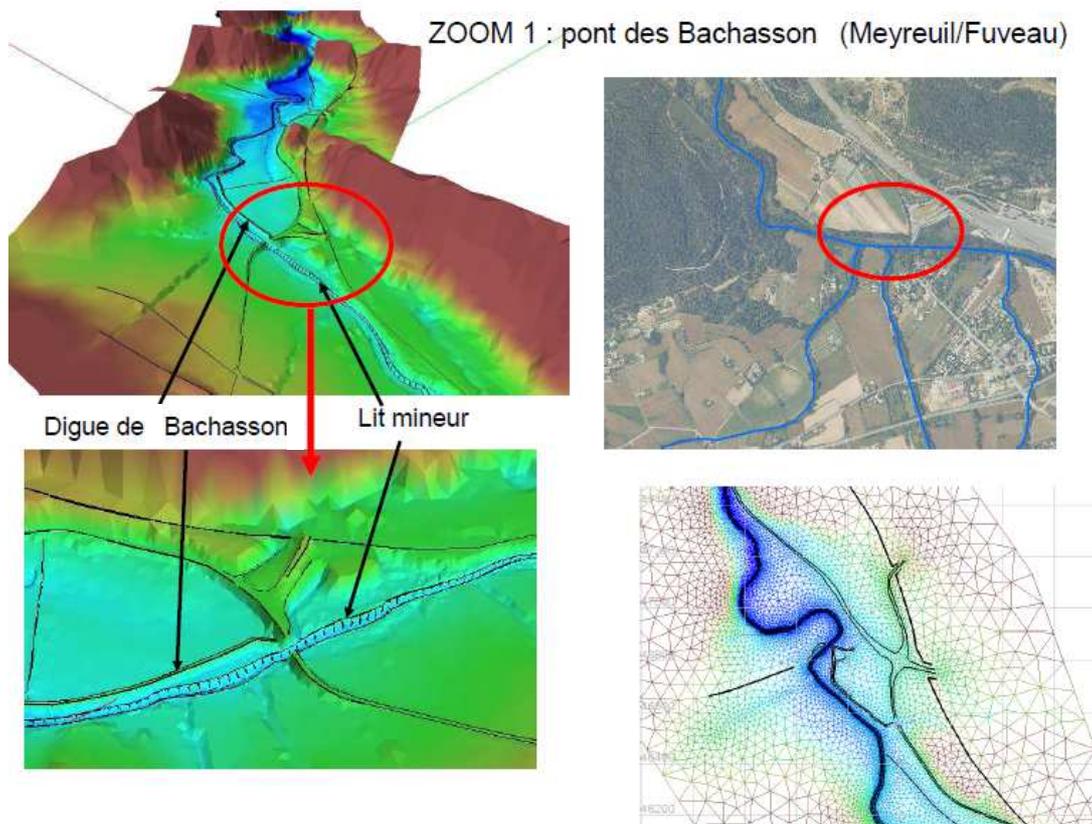
Le maillage amont est présenté dans sa globalité sur la figure ci-dessous :

MAILLAGE AMONT : de l'extrémité amont aux gorges de Langesse
301 320 mailles



Des zooms ont été réalisés sur les secteurs suivants :

Densité des mailles



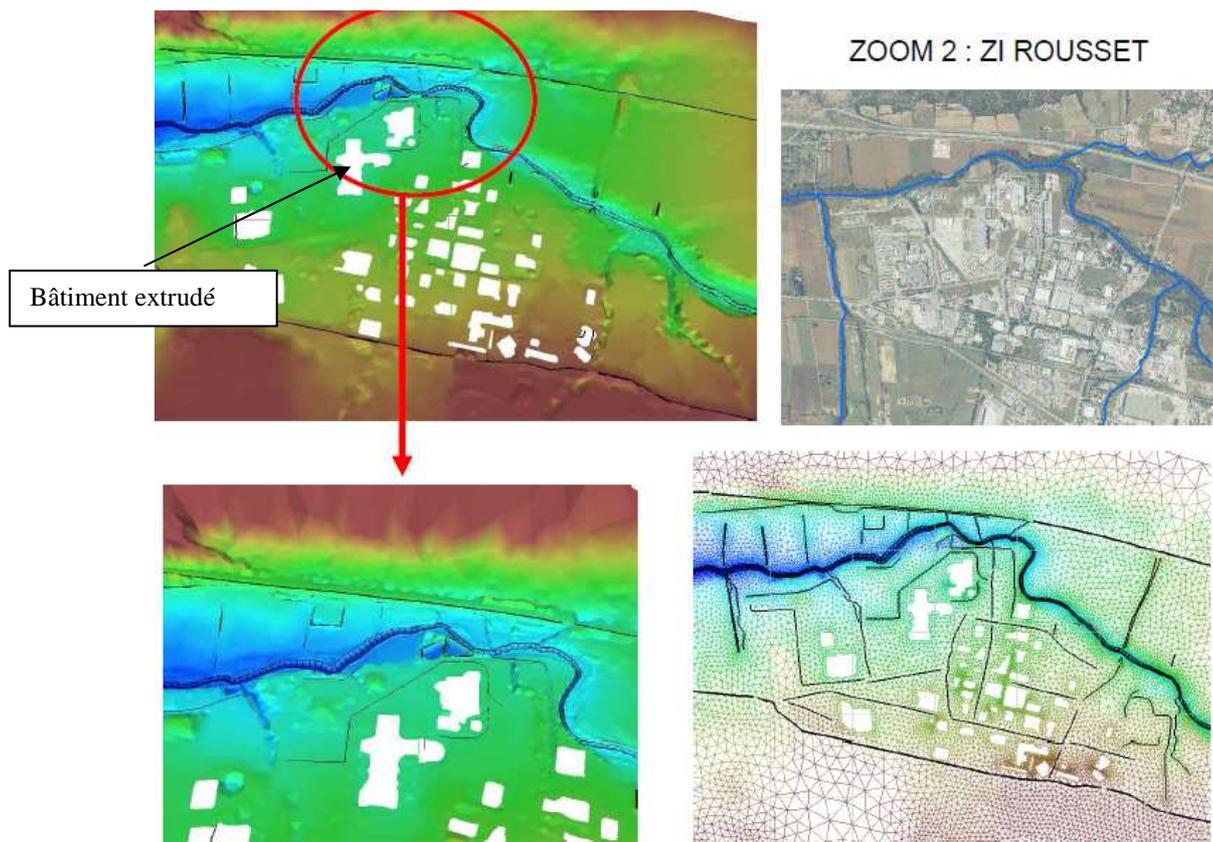
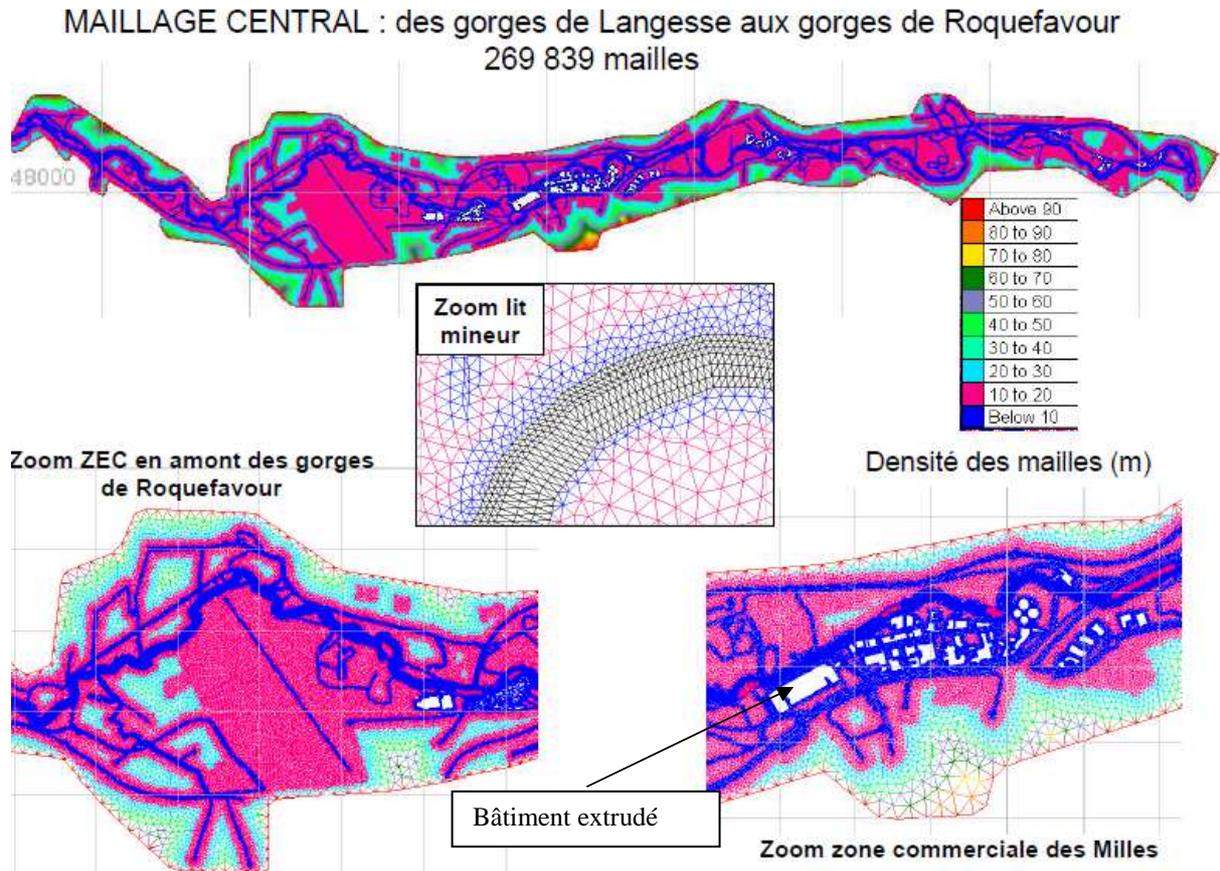


Figure 26 : maillage amont

4.3.3 Maillage centre

Le maillage centre est présenté dans sa globalité sur la figure ci-dessous :



Des zooms ont été réalisés sur les secteurs suivants :

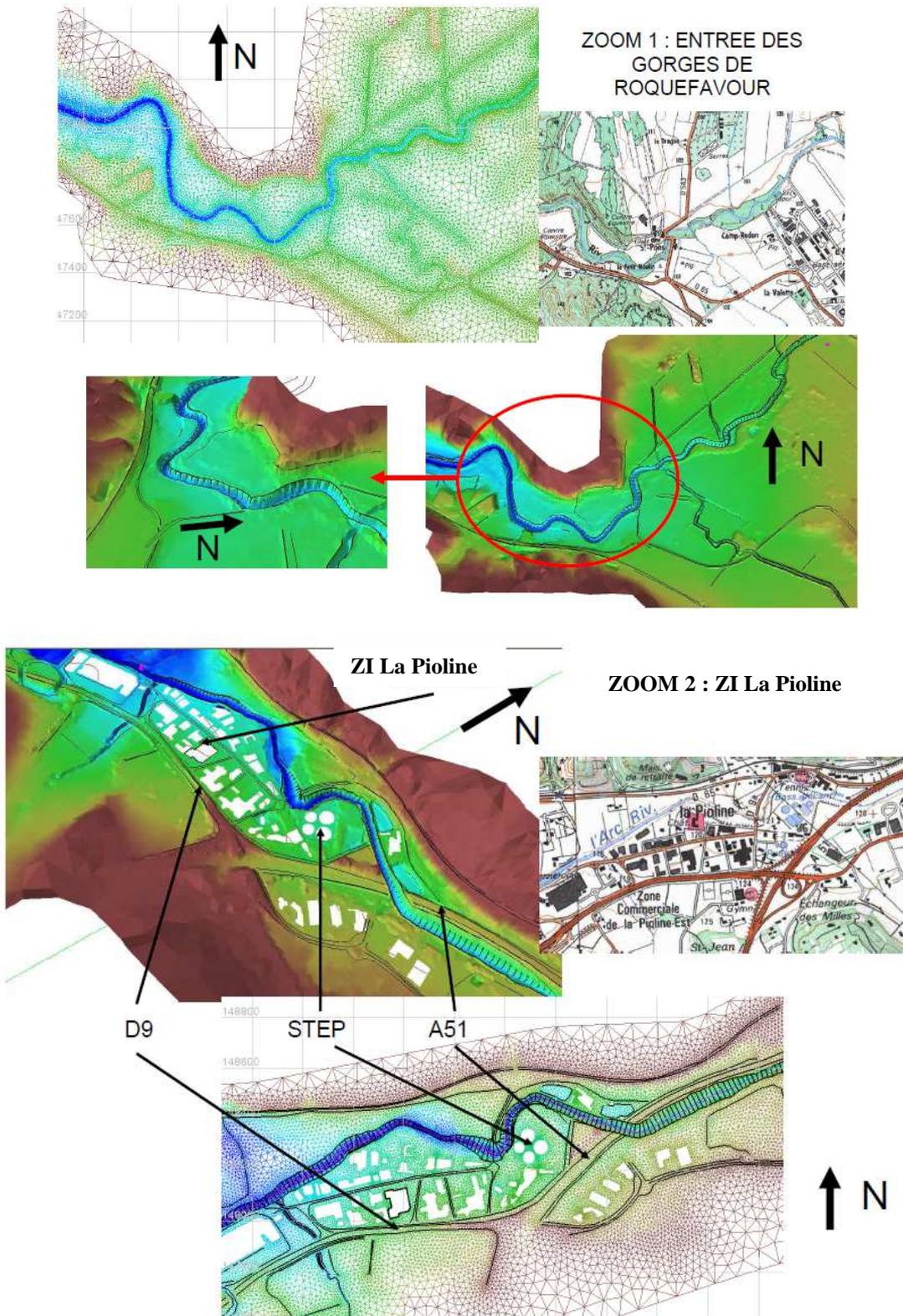
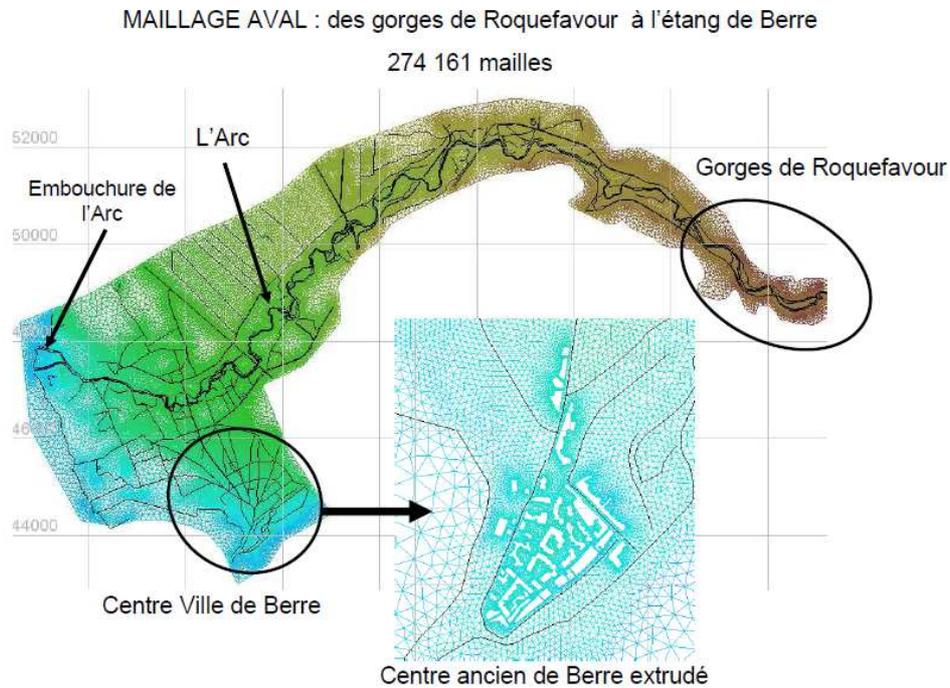


Figure 27 : maillage centre

4.3.4 Maillage aval

Le maillage aval est présenté dans sa globalité sur la figure ci-dessous :



Le maillage du modèle aval a dû être agrandi pour la modélisation de la crue exceptionnelle. L'agrandissement du maillage est présenté sur la figure ci-dessous :

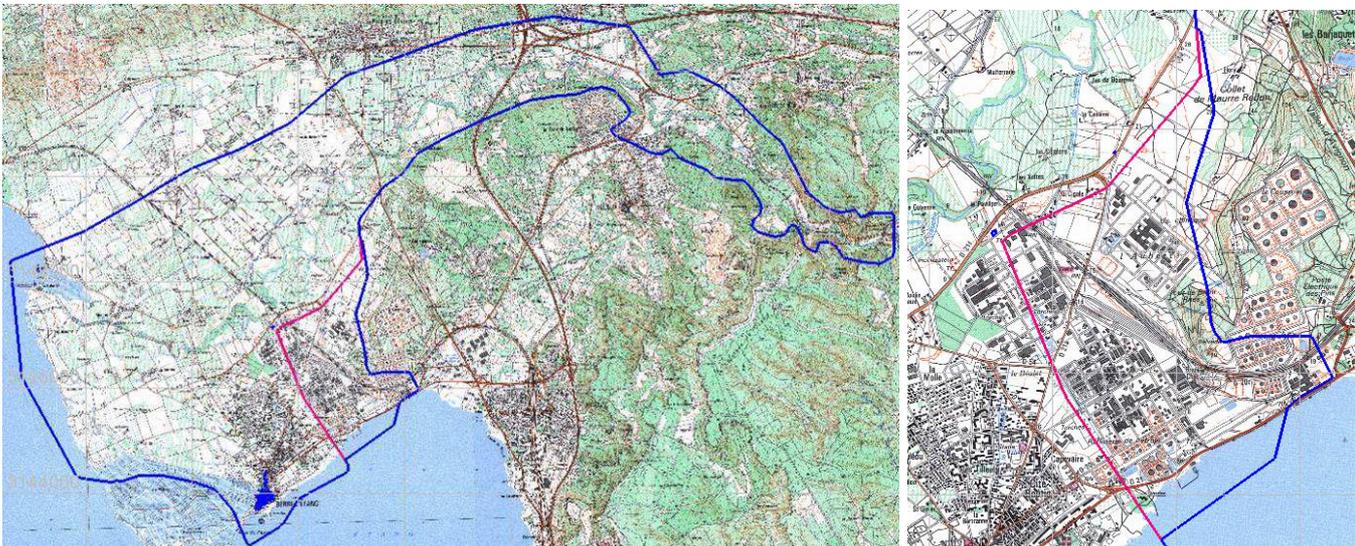
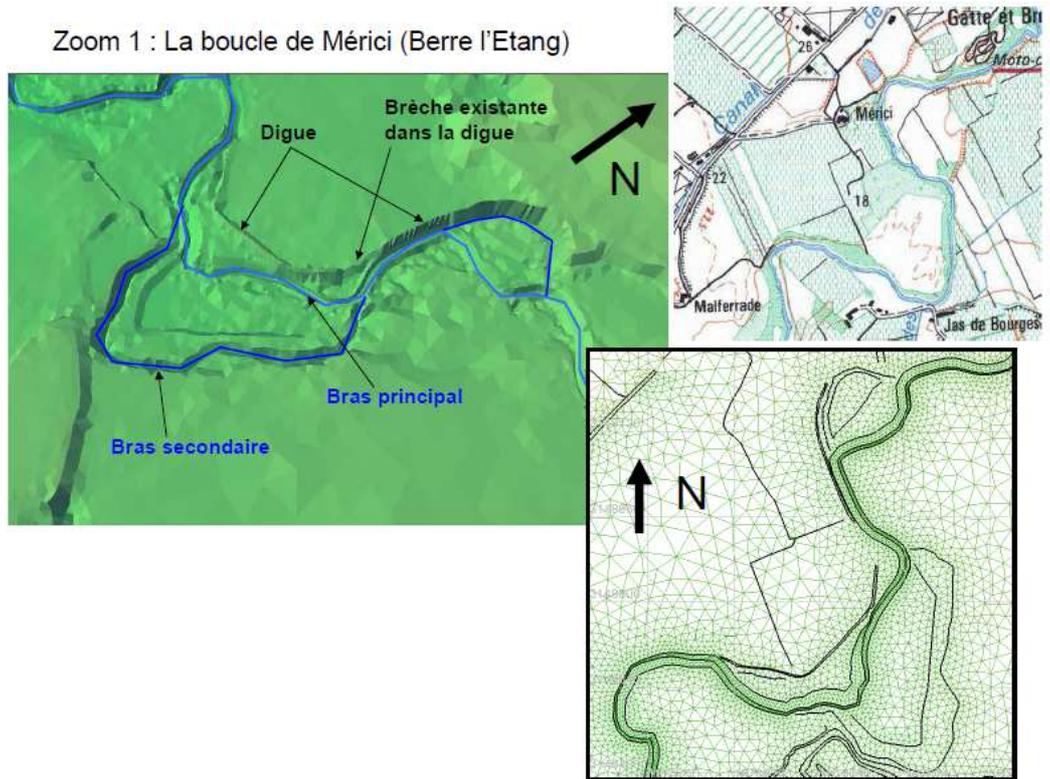


Figure 28 : Maillage aval agrandi

Le nombre de mailles du maillage aval est de 323 669.

Des zooms ont été réalisés sur les secteurs suivants :



Zoom 2 : Embouchure de l'Arc (Berre l'Etang)

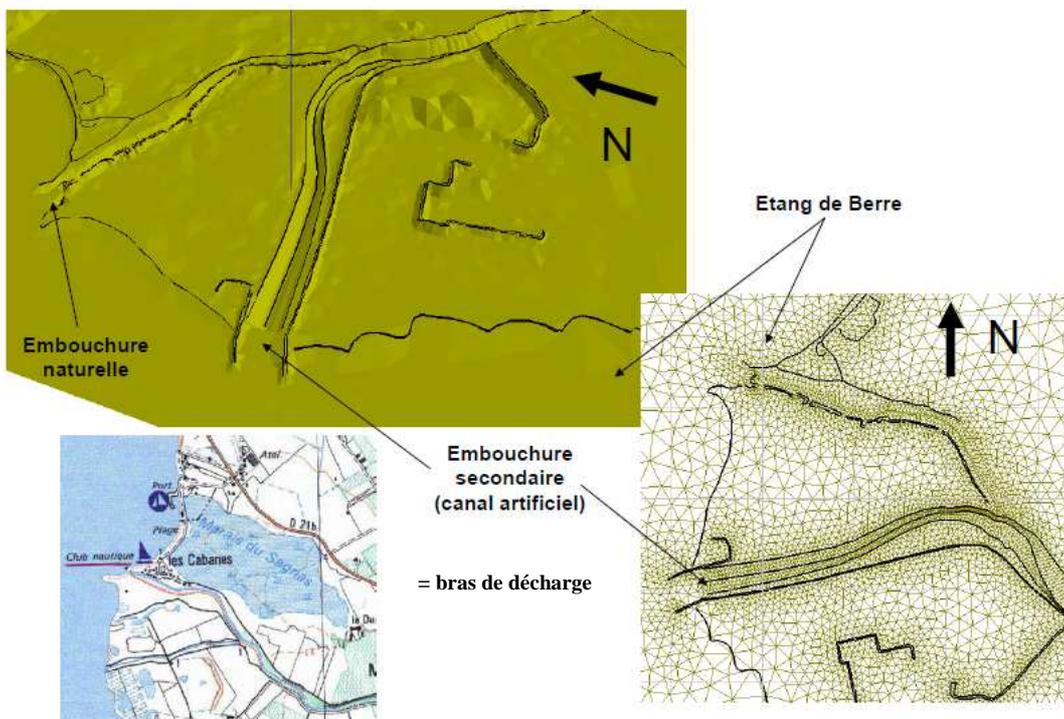


Figure 29 : maillage aval

4.4 TRAITEMENT DU BATI

Deux traitements possibles du bâti sont envisageables :

- extrusion (le bâti est supprimé du maillage) ;
- une rugosité très forte (et donc un coefficient de Strickler très faible) est appliquée au bâti ($K = 1$ ou 2).

Dans le modèle hydraulique :

- si le bâti est traité par une rugosité forte, l'eau peut traverser ce bâti mais, du fait de la rugosité très forte, les vitesses d'écoulement à travers le bâti seront faibles.
- si le bâti est traité par extrusion, le modèle ne met pas d'eau dans l'emprise du bâtiment (puisque'il n'y a pas de mailles) et l'eau vient « buter » contre le bâtiment. Il est possible par la suite, par traitement cartographique, de définir un niveau d'eau sous l'emprise du bâtiment par interpolation des niveaux autour du bâtiment.

L'extrusion du bâti est adaptée quand l'écoulement est fortement contraint par le bâti (exemple : centre-ville ancien où l'habitat est dense ou bâtiment de dimension suffisamment grande pour modifier le sens d'un axe d'écoulement). Dans les autres cas, (zones d'habitat diffus par exemple), l'application d'une rugosité forte est suffisante.

Notons également qu'il n'est pas judicieux d'extruder des bâtis de trop petite taille puisque le nombre d'éléments du maillage augmente en conséquence.

Sur la base de ces critères, les bâtis suivants ont été extrudés du maillage :

- centre ancien de Berre, centre ancien du village des Milles, habitat continu à Palette ;
- les bâtiments de taille importante des zones industrielles ou commerciales suivantes : zone commerciale des Milles, zone industrielle de Rousset.

Les secteurs extrudés sont entourés en rouge sur les plans ci-dessous. L'ensemble des autres bâtis n'a pas été extrudé.

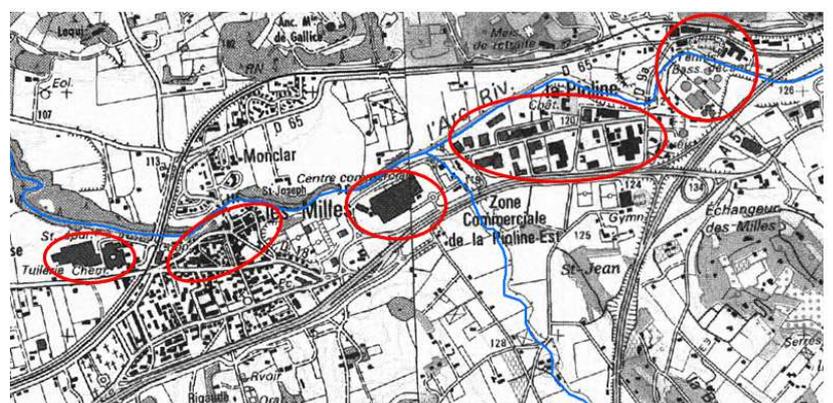




Figure 30 : Localisation des bâtis extrudés

4.5 EXEMPLE DE LA TRANSFORMATION DU MNT AU MAILLAGE

La figure ci-dessous présente les différentes étapes de la transformation du MNT en maillage :

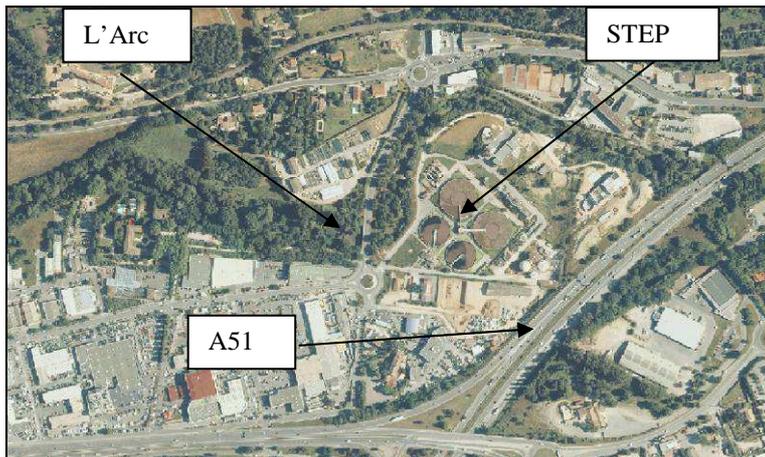
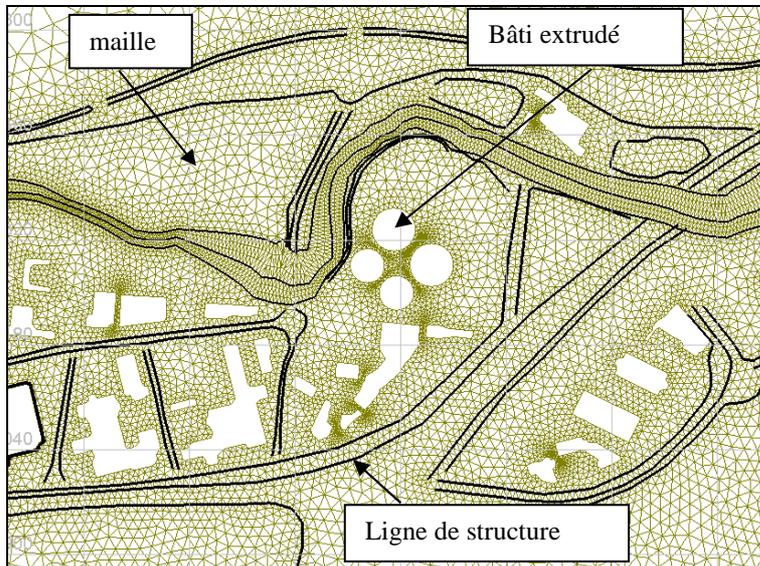


Photo aérienne



Vue lidar du MNT (modèle numérique de terrain) : 1 point tous les mètres –relevé par avion



Création du maillage avec :
extrusion des bâtiments ;
intégration des lignes de structure.



Vue 3 D du maillage créé par interpolation (= affectation d'une valeur altimétrique à chaque nœud du maillage) sur la base du MNT

Figure 31 : Transformation du MNT en maillage



Ce qu'il faut retenir...

Trois modèles hydrauliques seront nécessaires pour mesurer l'Arc sur tout son linéaire. Le découpage retenu est en cohérence avec le fonctionnement hydraulique général du bassin versant :

- modèle amont : de l'extrémité amont aux gorges de Langesse ;
- modèle centre : des gorges de Langesse aux gorges de Roquefavour ;
- modèle aval : des gorges de Roquefavour à l'étang de Berre.

Pour les crues historiques, la crue de référence et la crue exceptionnelle, les hydrogrammes injectés en conditions limites amont des modèles sont issus des modélisations pluie-débit réalisées par GINGER l'étude de mise en cohérence des études hydrologiques et hydrauliques sur le bassin versant de l'Arc (SABA-2010). A l'aval, deux conditions sont testées : 0.4 m NGF et 1 m NGF.

5 CALAGE DU MODELE HYDRAULIQUE

5.1 GENERALITES SUR LE CALAGE

Une modélisation hydraulique constitue une **représentation numérique d'un phénomène physique**. Pour s'assurer que le modèle numérique représente correctement la réalité un **calage du modèle hydraulique** doit être réalisé: le principe est de modéliser une ou plusieurs crues historiques connues et suffisamment documentées et **d'ajuster les différents paramètres du modèle** de façon à ce que **les résultats du modèle** (emprise de l'inondation, hauteurs d'eau, niveau d'eau, vitesses d'écoulement... ect..) **représentent la réalité observée lors de la crue**.

Il est d'usage de réaliser le calage d'un modèle sur une crue et de le vérifier sur une autre :

- une crue non débordante pour caler les paramètres en lit mineur,
- une crue largement débordante pour caler les paramètres en lit majeur.

Les différents paramètres de calage sont les suivants :

- le coefficient de Strickler qui traduit la rugosité des surfaces d'écoulement (lit mineur et lit majeur) ;
- la débitance des ouvrages hydrauliques

5.2 CHOIX DES CRUES DE CALAGE

5.2.1 Données existantes sur les crues historiques

Les crues historiques récentes sont les suivantes : octobre 1972, octobre 1973, janvier 1978, septembre 1993, décembre 2003 et décembre 2008.

Le bassin versant de l'Arc est équipé de 5 stations hydrométriques (4 sur l'Arc, 1 sur la Luynes). Les débits des principales crues historiques récentes aux stations issus du SAGE de l'Arc sont présentés dans le tableau ci-dessous :

	Crue des 11 et 13 oct. 1972	Crue du 3 oct. 1973	Crue du 17 janvier 1978	Crue du 22 sept. 1993	Crue du 2 déc. 2003	Crue du 14 déc. 2008
Pourrières	44,2 m ³ /s	27,5 m ³ /s	30,10 m ³ /s	24 m ³ /s	22,10 m ³ /s	30,3 m ³ /s
Banque HYDRO						
Pont de Bayeux (Meyreuil)	120 m ³ /s	71,2 m ³ /s	265 m ³ /s	40,5 m ³ /s	43,9 m ³ /s	96,8 m ³ /s
Banque HYDRO		Données issues de la modélisation pluie-débit		Banque HYDRO		
Roquefavour (Aix-en-Pce)	179,5 m ³ /s	129,6 m ³ /s	271,3 m ³ /s	320,8 m ³ /s	183 m ³ /s	215 m ³ /s
Données issues de la modélisation pluie-débit effectuée dans le cadre de l'étude des crues historiques (GINGER, 2010).				Banque HYDRO		
Pont de Saint-Estève (Berre l'Étang)	135,6 m ³ /s	178,3 m ³ /s	248,9 m ³ /s	205 m ³ /s	166 m ³ /s	311 m ³ /s
Données issues de la modélisation pluie-débit effectuée dans le cadre de l'étude des crues historiques						Banque HYDRO
Banque HYDRO						Données issues de la modélisation pluie-débit

Figure 32 : Débits des crues historiques (source : SAGE de l'Arc)

- octobre 1972 :

« L'événement d'octobre 1972 est semblable à l'événement de 1973 : il résulte d'une longue période pluvieuse qui va déclencher deux crues successives le 11 et le 13 octobre. **La journée du 11 octobre est marquée par un maximum de précipitation au centre du bassin versant (Aix et Cabriès) alors que la journée du 13 voit la partie amont du bassin versant recevoir les plus fortes précipitations.** La partie aval du bassin versant, au-delà de Roquefavour n'a pas été affectée par ces pluies exceptionnelles ». (Extrait de « l'étude de mise en cohérence des études hydrologiques et hydrauliques sur le bassin versant de l'Arc » - GINGER - SABA - 2010)

C'est pour cette crue que les débits les plus forts ont été enregistrés à la station de Pourrières (extrémité amont du bassin versant).

Peu d'informations sont disponibles sur cette crue : nous disposons uniquement d'une emprise sur la commune de Berre. Aucune PHE n'est disponible.

- octobre 1973 :

« La crue du mois d'octobre 1973 est générée par un événement pluvieux très intense qui a frappé **l'ensemble du bassin versant** au cours de la journée du 2 octobre. La partie urbaine est moins touchée par ces pluies intenses, la station d'Aix enregistre un cumul largement inférieur aux précipitations cumulées à Trets ou Cabriès. La partie aval du bassin versant a également subi de fortes averses ». (Extrait de « l'étude de mise en cohérence des études hydrologiques et hydrauliques sur le bassin versant de l'Arc » - GINGER – SABA – 2010)

L'emprise de la crue de 1973 est disponible uniquement à Aix en Provence. Il existe pour cette crue 7 PHE nivelées ainsi qu'une PHE non nivelée. D'autre part, quelques témoignages sont disponibles sur les communes d'Aix et de Meyreuil.

- janvier 1978 :

« Les précipitations journalières de la crue de 1978 décrivent une longue période pluvieuse avec des cumuls très importants notamment du la partie amont du bassin versant. Ces cumuls journaliers sont deux fois plus faibles sur la partie centrale du bassin versant. Quant à l'aval, les précipitations sont encore plus faibles. » (Extrait de « l'étude de mise en cohérence des études hydrologiques et hydrauliques sur le bassin versant de l'Arc » - GINGER – SABA – 2010)

Nous disposons d'une emprise de crue sur tout le linéaire de l'Arc ainsi que de plusieurs témoignages. D'autre part, trois PHE nivelées sont disponibles, ainsi qu'une PHE non nivelée.

D'après les débits enregistrés aux stations, cette crue est la plus forte connue sur 2 des 4 stations disponibles (Pont de Bayeux à Meyreuil et Pont St Estève à Berre). Par ailleurs, à Roquefavour, le débit de 1978 (271 m³/s) est proche de celui de 1993 (320m³/s) qui est le plus fort enregistré.

Par ailleurs, les enquêtes communales ont montré que c'est cette crue qui est restée en mémoire.

- septembre 1993 :

« Le caractère exceptionnel de l'événement du 22 septembre 1993 en fait l'une des crues majeures ayant affectée l'Arc dans l'histoire contemporaine. L'ensemble du bassin versant est touché par un orage principal. L'averse va débiter en premier sur la partie aval. Les pluies les plus importantes sont concentrées sur la partie centrale du bassin versant où simultanément de forts cumuls vont s'abattre à Aix en Provence et à Cabriès. La partie amont du bassin est touchée en dernier et dans une moindre mesure. » (Extrait de « l'étude de mise en cohérence des études hydrologiques et hydrauliques sur le bassin versant de l'Arc » - GINGER – SABA – 2010)

Pour cette crue une seule PHE est disponible sur l'Arc (à Saint Pons) et peu d'informations sont disponibles sur les zones de débordement (seules quelques informations à Aix et à Berre). En revanche beaucoup de données sont disponibles sur les affluents de l'Arc pour cette crue.

- décembre 2003 :

« Sur l'ensemble du bassin versant, l'événement de décembre 2003 est constitué de trois principales averses. La première averse a été importante pour les zones de Mimet et Vauvenargues, par contre les secteurs d'Aix, de Trets, de Meyreuil et de Vauvenargues ont connu des cumuls nettement moins forts. La seconde averse est pour la grande majorité des stations l'événement principal ». (Extrait de « l'étude de mise en cohérence des études hydrologiques et hydrauliques sur le bassin versant de l'Arc » - GINGER – SABA – 2010)

Nous disposons pour la crue de 2003 de deux PHE non nivelées à des ponts. Aucune emprise ou témoignage n'est disponible pour cette crue sur l'Arc. En revanche des données sont disponibles sur les affluents.

- décembre 2008 :

« L'essentiel des précipitations a lieu le 14 décembre entre 6h du matin et 9h du soir. Ces précipitations ont touché fortement les secteurs d'Aix en Provence et de Mimet au cours de la mi-journée avec des cumuls respectifs de 60 et 88 mm en 6h. Sur la partie amont et aval, l'averse, moins intense totalise moins de 40 mm. » (Extrait de « l'étude de mise en cohérence des études hydrologiques et hydrauliques sur le bassin versant de l'Arc » - GINGER – SABA – 2010)

Nous ne disposons que deux témoignages sur l'Arc (au niveau de Bachassons et de Berre) et d'aucune emprise. Plusieurs informations sont disponibles sur les affluents. Il n'existe pas de PHE pour cette crue.

5.2.2 Conclusion

Au regard des débits :

- « sur l'extrémité amont du bassin (Pourrières) la plus forte crue récente observée est celle d'octobre 1972 ;
- sur les secteurs de Pont de Bayeux (amont du bassin) et Pont Saint Estève (aval du bassin) la plus forte crue récente observée est celle de janvier 1978 ;
- sur la partie centrale du bassin (Roquefavour à Aix en Provence), c'est l'événement pluviométrique localisé de septembre 1993 qui a entraîné les débits de crue les plus importants. »

Ainsi, il n'existe pas, sur le bassin versant de l'Arc, une crue majeure supérieure à toutes les autres. Toutefois, la crue de 1978 reste la plus forte connue sur une proportion importante du bassin versant et est restée en mémoire des riverains comme une crue majeure. De plus, c'est la seule crue pour laquelle nous disposons d'une emprise sur l'ensemble du linéaire de l'Arc. Notons cependant que le nombre de PHE disponibles pour cette crue est faible (3 PHE).

Le modèle hydraulique de l'Arc sera calé en lit majeur sur la crue de 1978.

La crue de 2008 (crue limite-débordante) a été retenue comme crue de calage en lit mineur.

5.3 LA CRUE DE 1978 ET LES DONNEES DE CALAGE DISPONIBLES

5.3.1 PHE nivelées

Les PHE existantes pour cette crue sont situées :

- à Rousset (amont du bassin versant), en amont d'un pont. Cette PHE n'est pas nivelée, seule une hauteur d'eau est indiquée. Ne connaissant pas le niveau altimétrique du zéro de l'échelle, cette PHE n'est pas exploitable ;
- à Meyreuil, en amont et en aval du Pont de Bayeux ;
- à Roquevaour, en aval du pont de la D65.

Le nombre de PHE disponibles est faible (3). De plus, elles sont situées au niveau des ponts où des phénomènes hydrauliques localisés peuvent se produire (écoulement venant buter contre un obstacle) où les niveaux atteints ne reflètent pas forcément le niveau général de la crue.

Les fiches PHE sont présentées en annexe.

5.3.2 Autres données disponibles

L'« étude de mise en cohérence des études hydrologiques et hydrauliques sur le bassin versant de l'Arc » - GINGER - SABA - 2010 comporte les informations suivantes :

- emprise de la crue de 1978 sur la totalité du linéaire (cette emprise est basée sur des données de la DDTM (à l'époque DDE) ainsi que sur des témoignages recueillis par GINGER auprès des riverains et des mairies ;
- nombreux témoignages sur tout le linéaire de l'Arc. Ces témoignages sont soit assez généraux (exemple : présence de beaucoup de débris, secteur inondé) soit quantifiés en terme de hauteur. Souvent, ces données quantifiées sont trop peu précises (géographiquement) pour être considérées comme fiables. Elles restent toutefois utiles au calage puisqu'elles mettent en avant l'inondation observée en 1978 sur certains secteurs.

Ces informations sont présentées en annexe 3 sur une carte extraite de l'étude de mise en cohérence des études hydrologiques et hydrauliques sur le bassin versant de l'Arc.

Par ailleurs, des données de débits sont disponibles pour trois stations : Pourrières, Pont de Bayeux et Saint Pons. Rappelons que c'est sur ces données en station qu'est calé le modèle pluie-débit de GINGER d'où sont extraits les débits injectés dans le modèle hydraulique.

5.3.3 Adaptation du maillage à la topographie de 1978

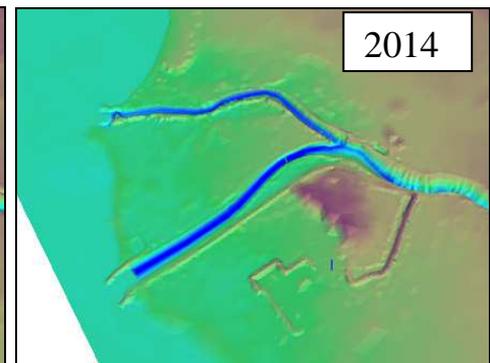
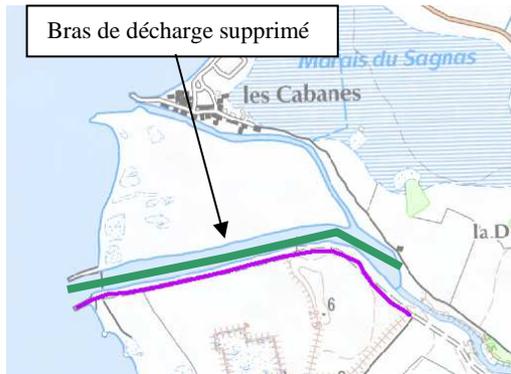
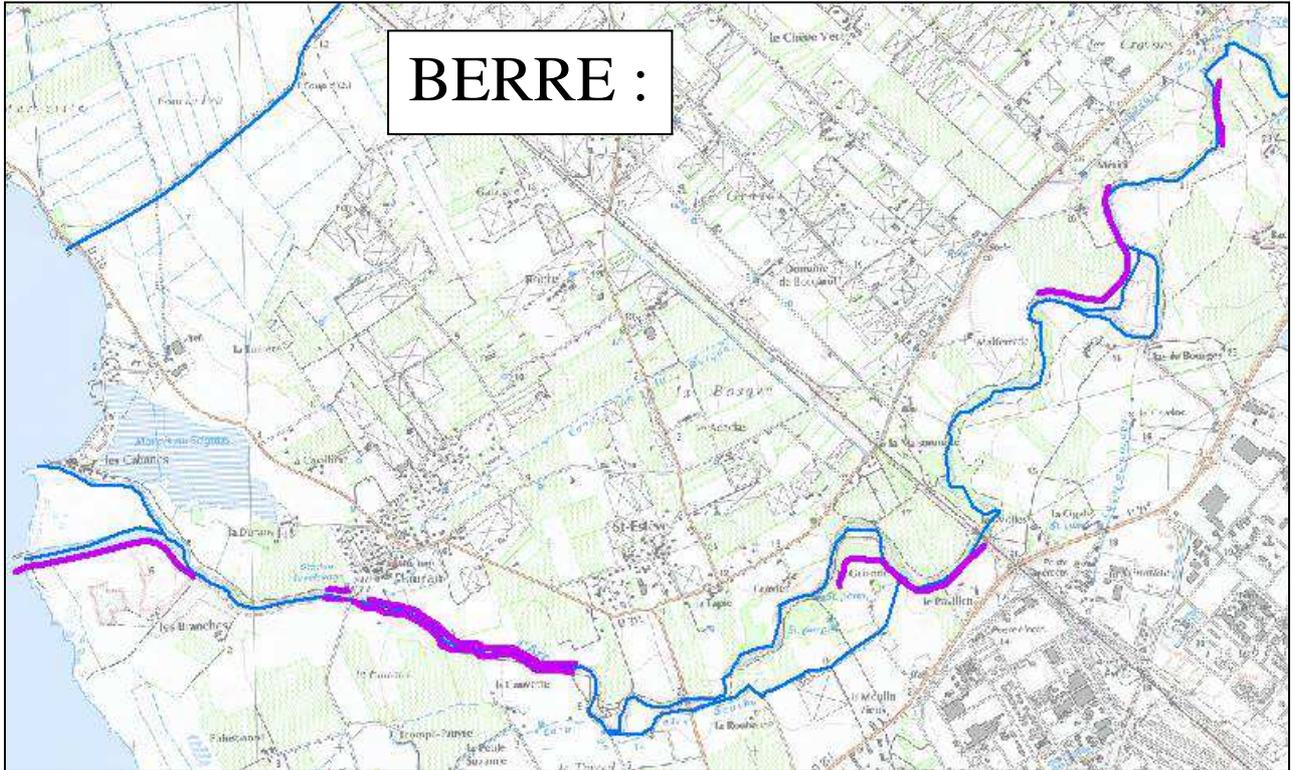
Afin de représenter au mieux la crue de 1978, le maillage du modèle hydraulique a été modifié de façon à refléter autant que possible le terrain tel qu'il était en 1978. Les modifications ont été réalisées sur la base des documents du contrat de rivière de l'Arc de 1984 qui prévoit un certain nombre d'aménagements localisés sur plans (de type restauration du lit, digue de protection, élargissement de section, rectification de courbure du lit...). Ces aménagements ayant été réfléchis en 1984, ils étaient donc inexistantes en 1978. Cependant, tous n'ont pas été réalisés.

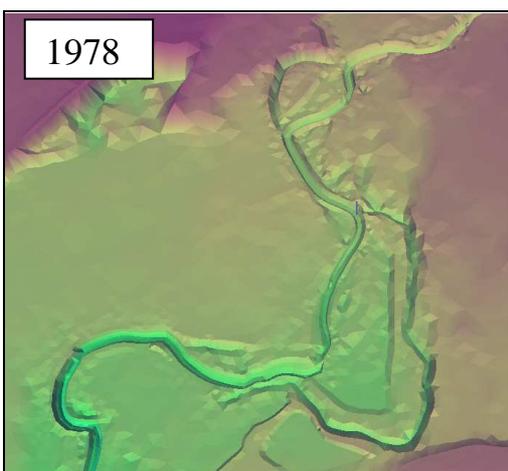
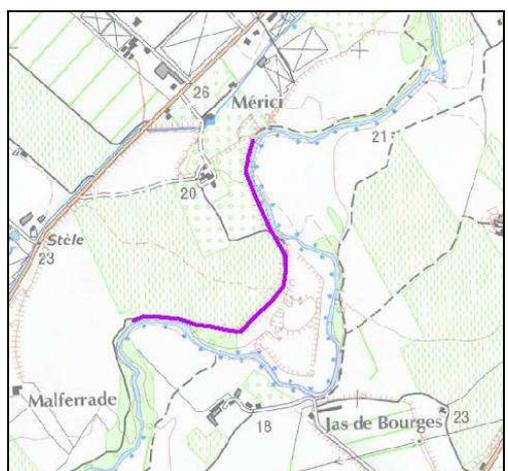
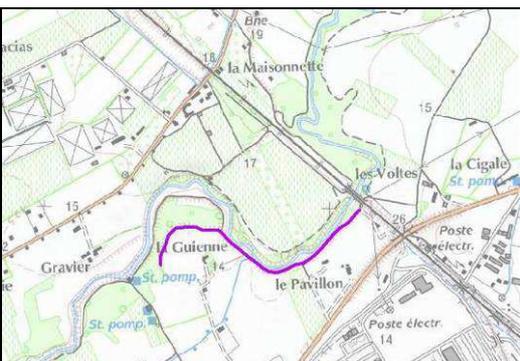
Ainsi nous avons procédé de la façon suivante :

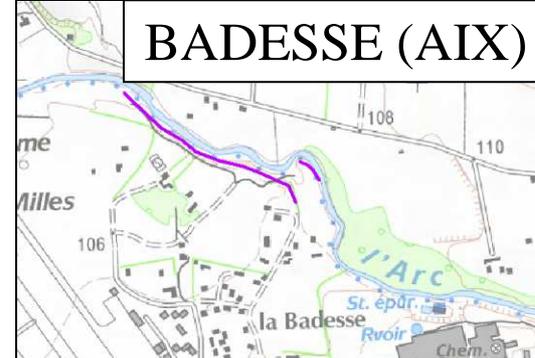
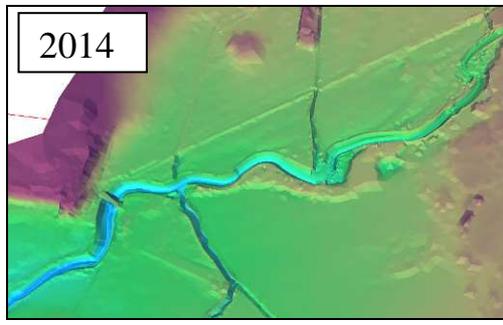
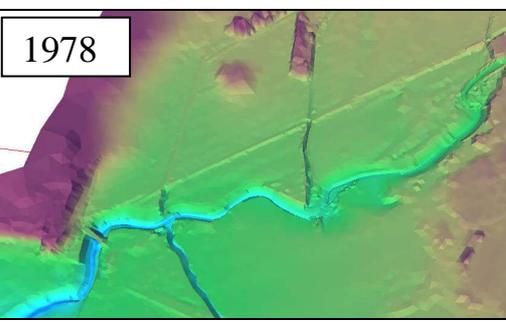
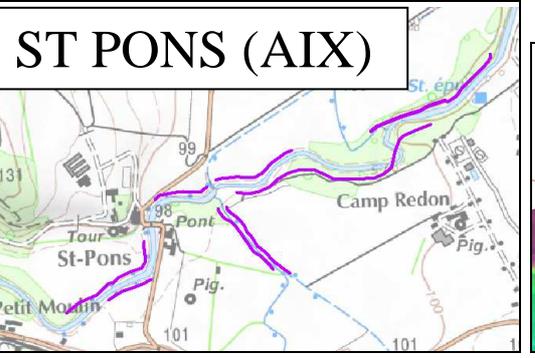
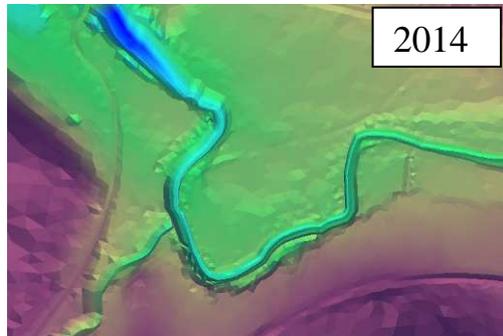
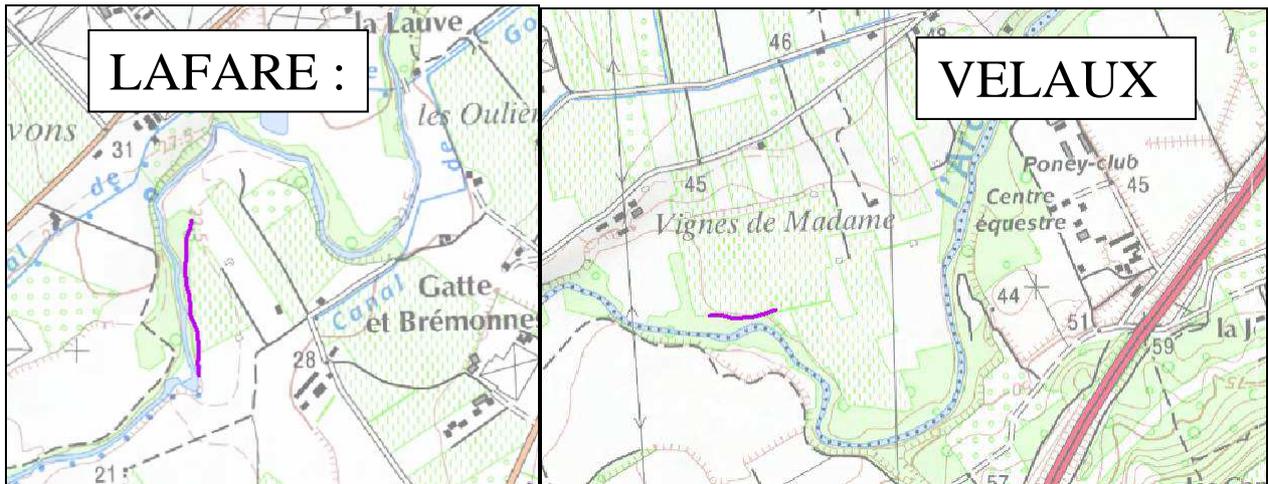
- **digue de protection** : les digues de protection (ou merlons) représentées sur le contrat de rivière et visibles sur le lidar ont été supprimées du maillage ;
- **recalibrage** : nous disposons de données en lit mineur datant de 1991, cependant rien ne permet de savoir si les sections de 1991 étaient celles de 1978. Le lit mineur de l'Arc n'a donc pas été modifié dans le maillage.
- **restauration du lit** : les travaux de restauration du lit n'ont qu'un effet négligeable sur les lignes d'eau. Aucune modification à ce sujet n'a donc été apportée au maillage du modèle hydraulique de 1978.
- **rectification de la courbure du lit** : ces rectifications concernent l'Arc sur quelques mètres sur 4 secteurs de Berre l'étang (coupure de méandre principalement). Ne connaissant pas la topographie du lit avant rectification, ces modifications n'ont pas été intégrées au maillage. On peut supposer que pour la crue largement débordante à Berre que représente 1978 la prise en compte de ces rectifications n'a qu'un impact négligeable.
- **bras de décharge de l'Arc à Berre** : le bras de décharge de l'Arc, inexistant en 1978, ainsi que la digue rive gauche qui le longe, ont été supprimés du maillage.

Les modifications apportées concernent principalement 3 secteurs : Berre, Aix en Provence (des Milles à Saint Pons), et la digue de Bachasson à Meyreuil.

Les digues (ou merlons) supprimés sont localisés sur les figures ci-dessous :







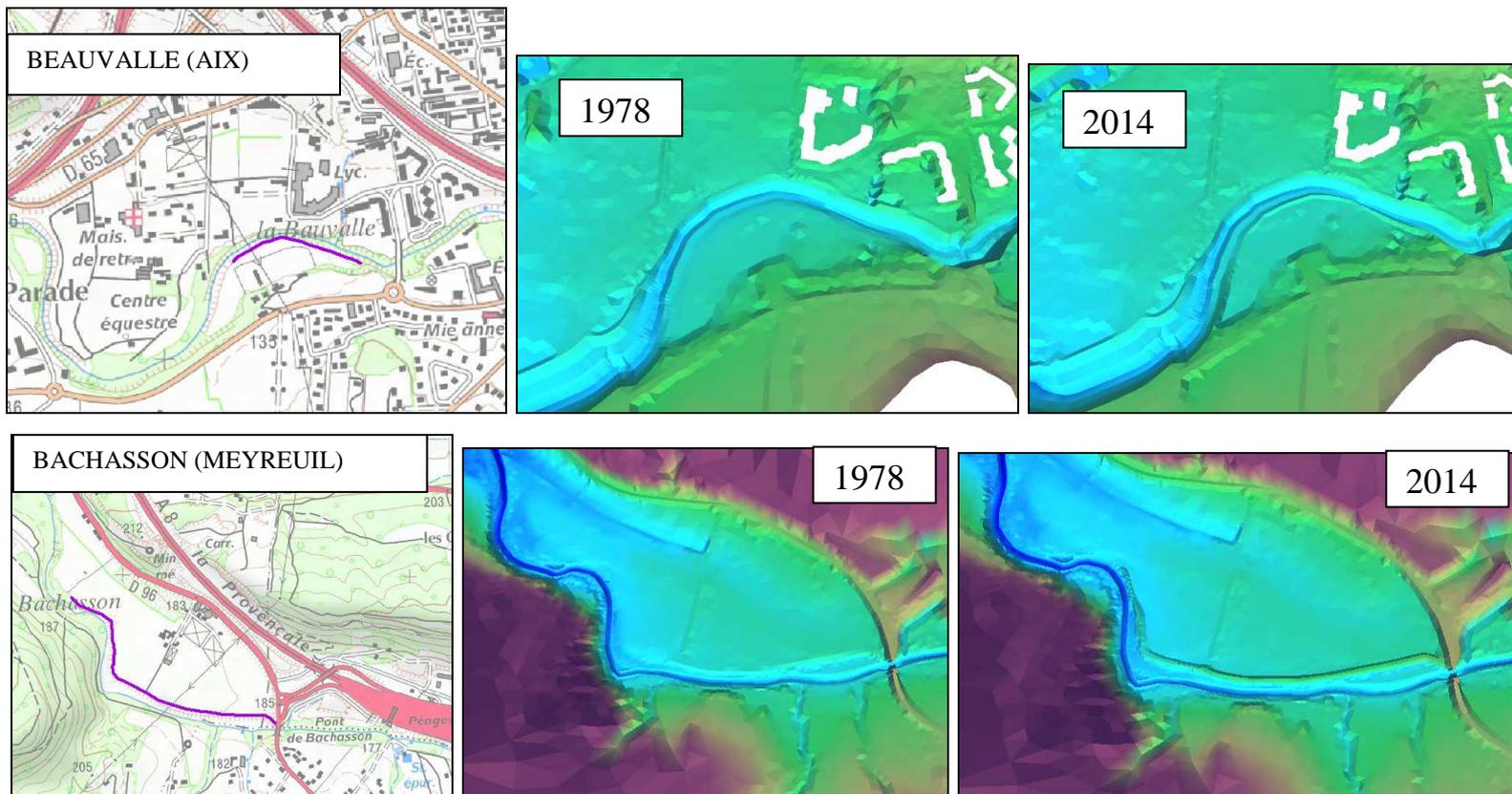


Figure 33 : Localisation des modifications apportées au maillage pour modélisation de la crue de 1978

(la digue de Bachasson n'apparaît pas comme un aménagement prévu dans le contrat de rivière. Cependant l'enquête auprès des communes nous a appris que cette digue avait été réalisée après 1978, nous l'avons donc supprimée du maillage).

Remarques :

- les autres digues ou merlons existants actuellement (visibles sur le lidar) mais non mentionnés dans le contrat de rivière de 1984 n'ont pas été modifiés. En effet, rien ne permet de savoir s'ils étaient présents ou non en 1978 ;
- l'urbanisation très forte du bassin versant de l'Arc entre 1978 et aujourd'hui s'est accompagnée de la mise en oeuvre de très nombreux remblais en lit majeur. Ne disposant pas de données topographiques anciennes (1978 ou avant) il n'est pas possible de dresser un bilan exhaustif de ces remblais. D'autre part, même quand certains remblais sont localisés, il n'est pas possible de connaître la topographie des terrains avant remblaiement. Pour cette raison, les remblais ont été laissés tels quel dans le maillage du modèle hydraulique de 1978. La présence de ces remblais pourra expliquer des différences entre l'emprise de 1978 modélisée et l'emprise de 1978 historique.

- Les témoignages de 1978 laissent penser que de nombreux embâcles étaient présents dans l'Arc lors de la crue de 1978 (« un camion est emporté par l'Arc à Meyreuil », « à Langesse l'obstruction du lit entraîne l'écoulement parallèle en bordure des champs », « à Aix en Provence, aux trois sautets, des arbres sont arrachés », « une cuve de gaz emportée par l'eau bute contre le pont de l'Arc », « à l'Arc de Meyran, une passerelle est emportée, les clôtures et portails sont arrachés, les arbres déracinés », « amas impressionnants d'arbres, de débris et de décombres au lieudit la Marie Thérèse, Roquepertuse et le moulin du Pont (secteur Velaux/Ventabren) »). Ces débris peuvent avoir des conséquences importantes sur le fonctionnement hydraulique de la crue (au niveau des ouvrages, mais également en lit mineur : obstruction de section). Ils ont été traduits dans le modèle par des rugosités fortes (coefficient de Strickler faibles) en lit mineur localement et par des rétrécissements de section au droit de certains ponts, ceci afin de se caler sur l'emprise de 1978 existante (cf § 5.6.2).

Conclusion : l'évolution importante de l'urbanisation en 36 ans et le peu d'archives disponibles font qu'il n'est pas aisé de définir la topographie telle qu'elle était en 1978.



Ce qu'il faut retenir...

Le calage en lit majeur se fera sur la crue majeure de 1978. Pour cette crue, la principale information de calage disponible est une emprise de la crue sur l'ensemble du linéaire. Seules trois PHE nivelées existent pour cette crue. On note également l'existence de nombreux témoignages de riverains ou de communes sur l'inondation de janvier 1978.

La topographie du maillage a été adaptée de façon à se rapprocher au plus près de la topographie de 1978. Cependant étant donné l'urbanisation importante du bassin versant entre 1978 et aujourd'hui, les modifications apportées ne peuvent être exhaustives.

5.4 LA CRUE DE 2008 ET LES DONNEES DE CALAGE DISPONIBLES

Les données sur la crue de 2008 sont peu nombreuses. On sait que cette crue a été d'une manière générale peu débordante.

L'étude de mise en cohérence des études hydrologiques et hydrauliques sur le bassin versant de l'Arc réalisée pour le SABA par GINGER en 2010 fournit les indications suivantes :

« Crue d'ampleur modérée, générée par des pluies de longue durée, et provoquant quelques débordements ponctuels de l'Arc, surtout en amont d'Aix, ainsi que sur quelques vallats. Nombreux problèmes de ruissellement pluvial en parallèle.

- Pourrières** Entre le 14 et le 15 décembre, **l'Arc** est sorti de son lit au niveau du pont près de la station d'épuration au Sud du lieu-dit des Toués. Il est passé sur le pont et la route (chemin communal parallèle entre la D23 et la D423) a été coupée au Nord du pont, au niveau du croisement.
- Rousset** L'Arc a débordé sur le parcours de santé longeant la zone industrielle, sur une largeur de moins de 100 m. La hauteur d'eau fut comprise entre 10 et 20 cm sur le parcours. Un portique en bois a été emporté sur 200 mètres. Une partie du terrain de foot (la moitié sur la longueur) longeant l'Arc a été inondée (trace de limons et de sables) et un grillage a été couché. Au niveau de Favary, l'eau est arrivée au niveau des tables de pique-nique installées près de l'Arc. Le courant était fort, charriant de nombreux débris. Un embâcle s'est formé au niveau du terrain de foot.
- Aix-en-Provence** D'après les témoignages, **l'Arc** n'aurait débordé que dans quelques secteurs, notamment à La Badesse et Saint Pons inondés. La RD 543 fut inondée au niveau de la BA 114 le 14 décembre vers 17h 15.
- Berre l'Etang** L'Arc est sorti de son lit « dimanche après-midi, le club hippique de la Sabretache a été menacé, des dégâts amplifiés par le chantier Iter dont le passage à gué des futurs convois a supprimé un barrage naturel entre le cours d'eau et les pâturages, rendant le terrain inondable. A 10h07, le lundi 15/12, le système automatique de téléalerte en cas de risque majeurs, pour prévenir les riverains de l'Arc a été déclenché. **L'Arc** roulait des flots boueux avec un courant assez fort, inondant les terrains situés à proximité du pont situé sur la D21 et menaçant le hameau de Mauran. Vers 12h, la situation commençait à se stabiliser ».

Les données recueillies lors de l'enquête communale sont listées ci-dessous :

« Les dégâts de 2008 sont listés ci-dessous :

- Ouvrages publics :
 - digue de Mauran
 - Route barrée au sud de Mauran
- Biens privés :
 - Inondation d'une maison à Mauran (20 cm d'eau)
 - 4,5 ha de céréales et 1 ha de légumes noyé + dégâts matériels voie Jean Pierre Lyon

La figure ci-dessous localise l'avenue Jean Pierre Lyon :

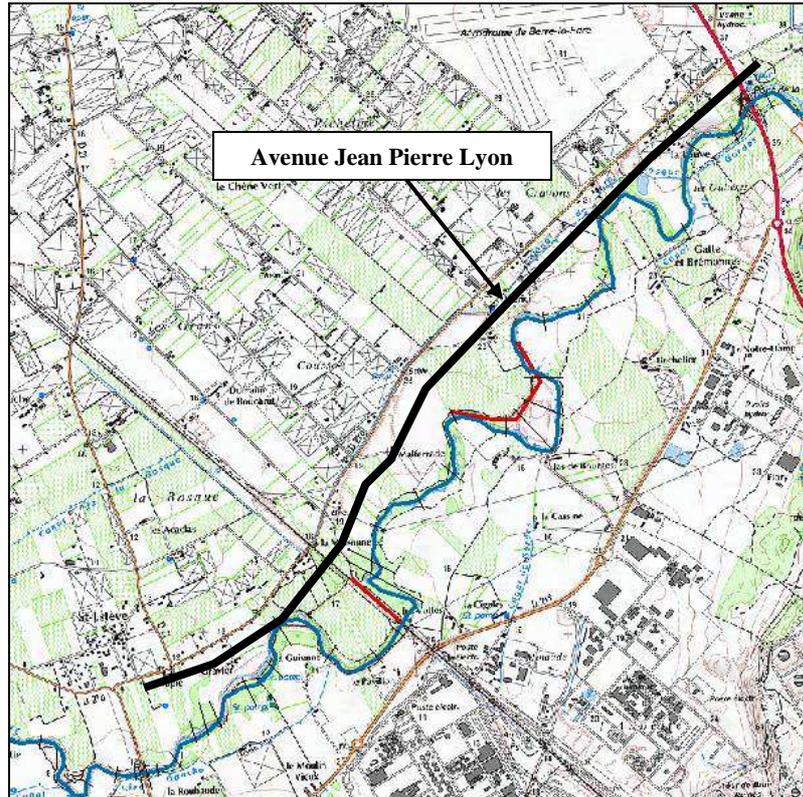


Figure 34 : Localisation de l'avenue Jean Pierre Lyon à Berre

Les photos suivantes ont été recueillies lors de l'enquête auprès des communes. Elles ont été prises à Berre l'étang, pendant la crue de 2008, du pont de Saint Estève :

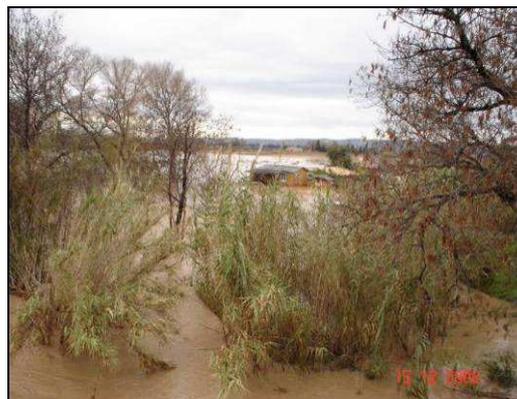


Figure 35 : photos de la crue de 2008 au pont Saint Estève (Berre l'Etang)

La topographie de 2008 est considérée comme identique à celle de 2014. Ainsi, les données topographiques relevées en 2014 ont été utilisées dans le modèle hydraulique de 2008, sans modifications.



Ce qu'il faut retenir...

Le calage en lit mineur se fera sur la crue de 2008. Peu d'informations sont disponibles pour cette crue (pas d'emprise, pas de relevés PHE). On sait que cette crue a été globalement peu débordante, sauf sur les secteurs à débordements récurrents.

La topographie de 2008 est considérée comme identique à la topographie actuelle.

5.5 CONDITIONS AUX LIMITES DES MODELES DE CALAGE

5.5.1 Conditions limites amont

Les hydrogrammes injectés pour les deux crues historiques de calage sont directement issus du modèle pluie-débit de Ginger. Le découpage en sous bassins versant est celui de l'étude de mise en cohérence des études hydrologiques et hydrauliques sur le bassin versant de l'Arc (SABA-GINGER – 2010). cf § 4.2.1. Les hydrogrammes injectés dans le modèle sont présentés en annexe 4.

5.5.2 Condition limite aval

Les conditions limite aval suivantes ont été retenues :

- crue de 1978 ; crue de référence, crue exceptionnelle : 1 m NGF (un test de sensibilité a été mené avec Z aval = 0.4 m NGF pour la crue de 1978 – voir §5.9.3) ;
- crue de 2008 ; crue décennale, crue trentennale : 0.4 m NGF

5.6 PARAMETRES DE CALAGE RETENU

5.6.1 Coefficients de strickler

Les coefficients de Strickler retenus dans les modélisations sont présentés dans le tableau ci-dessous :

Tableau 6 : Coefficients de Strickler utilisés dans les modèles hydrauliques

	Rugosité lit mineur	Rugosité lit majeur naturel	Rugosité lit majeur urbanisé
MODELE AMONT	25	15	10
MODELE CENTRE	20	10	5
MODELE AVAL	20 (baissé à 15 pour la crue de 1978 : embâcles)	10	5

Les valeurs testées par défaut étaient les suivantes :

- 5 en lit majeur urbanisé
- 10 en lit majeur naturel
- 20 en lit mineur.

Des ajustements ont été réalisés sur certains tronçons du modèle afin de caler le modèle sur les crues historiques. Ils se justifient de la façon suivante :

- le secteur amont de l'Arc est considéré comme moins rugueux (plaine agricole, lit mineur peu végétalisé) que le reste du bassin versant, d'où les valeurs légèrement fortes du coefficient de Strickler sur le modèle amont (+ 5 sur les valeurs de base) ;
- le lit mineur de l'Arc sur la partie aval a été très encombré en 1978 (cf annexe 3 où les témoignages de la présence de débris, arbres...ect dans l'Arc sont nombreux), cela se traduit, dans le modèle de 1978 spécifiquement, par un coefficient de Strickler faible (rugosité forte) en lit mineur.

La localisation des différentes valeurs de coefficient est présentée sur les cartes ci-dessous :

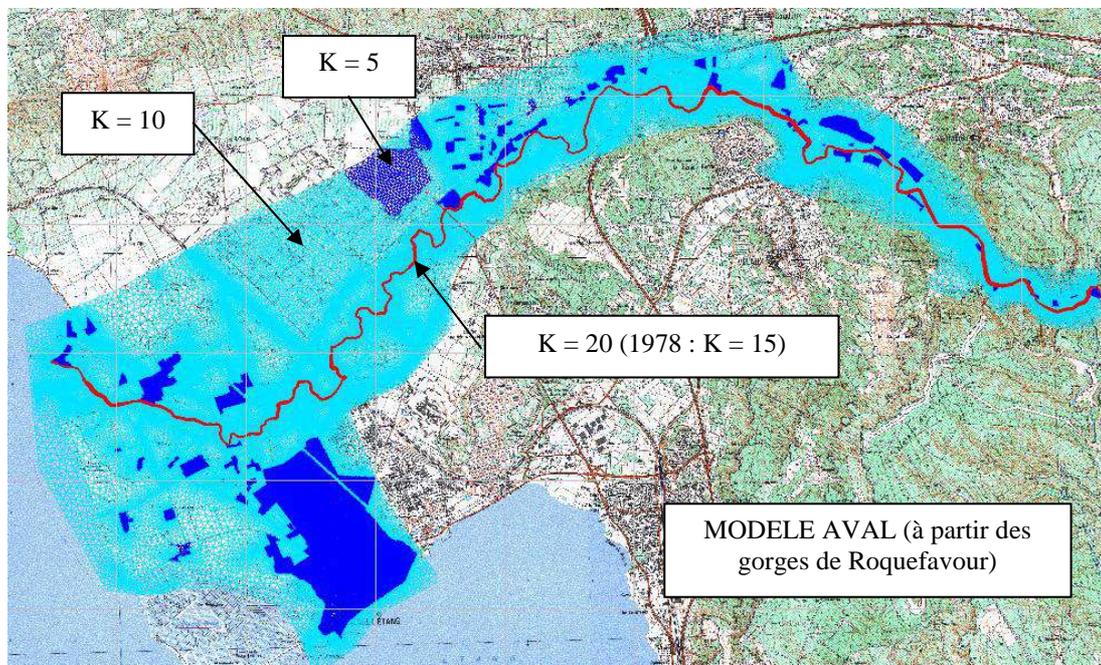
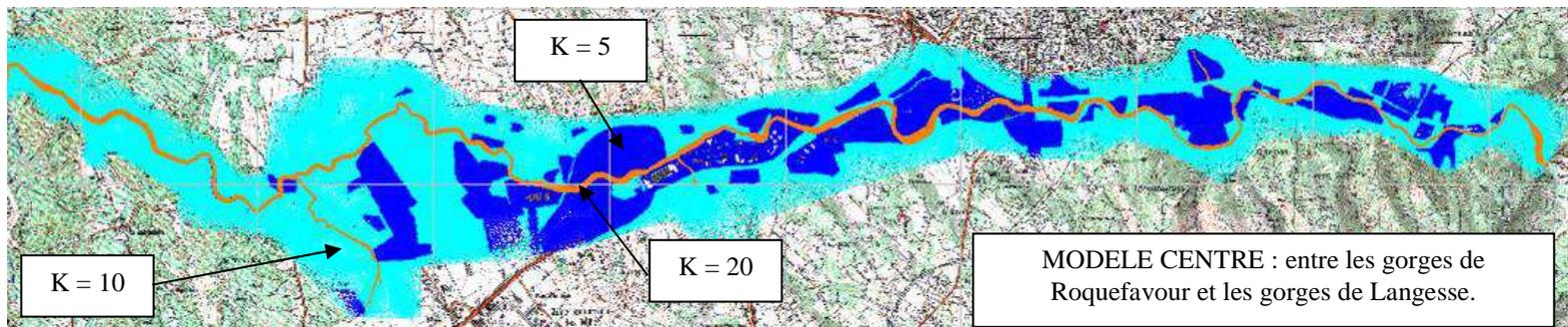
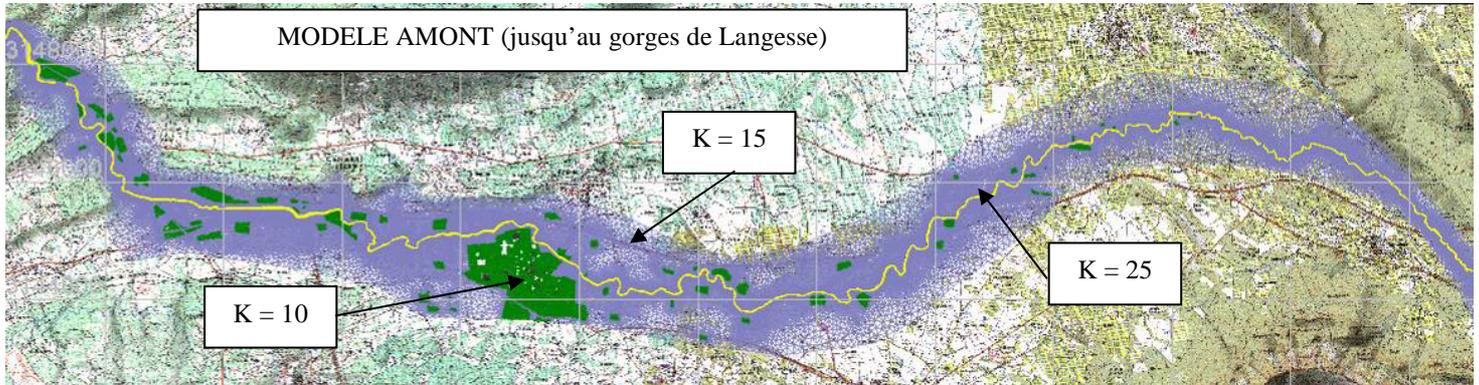


Figure 36 : localisation des différentes rugosités appliquées dans le modèle hydraulique

Une fois le modèle calé, des tests de sensibilité de +/- 20 % des coefficients retenus ont été menés (cf § 5.9.2).

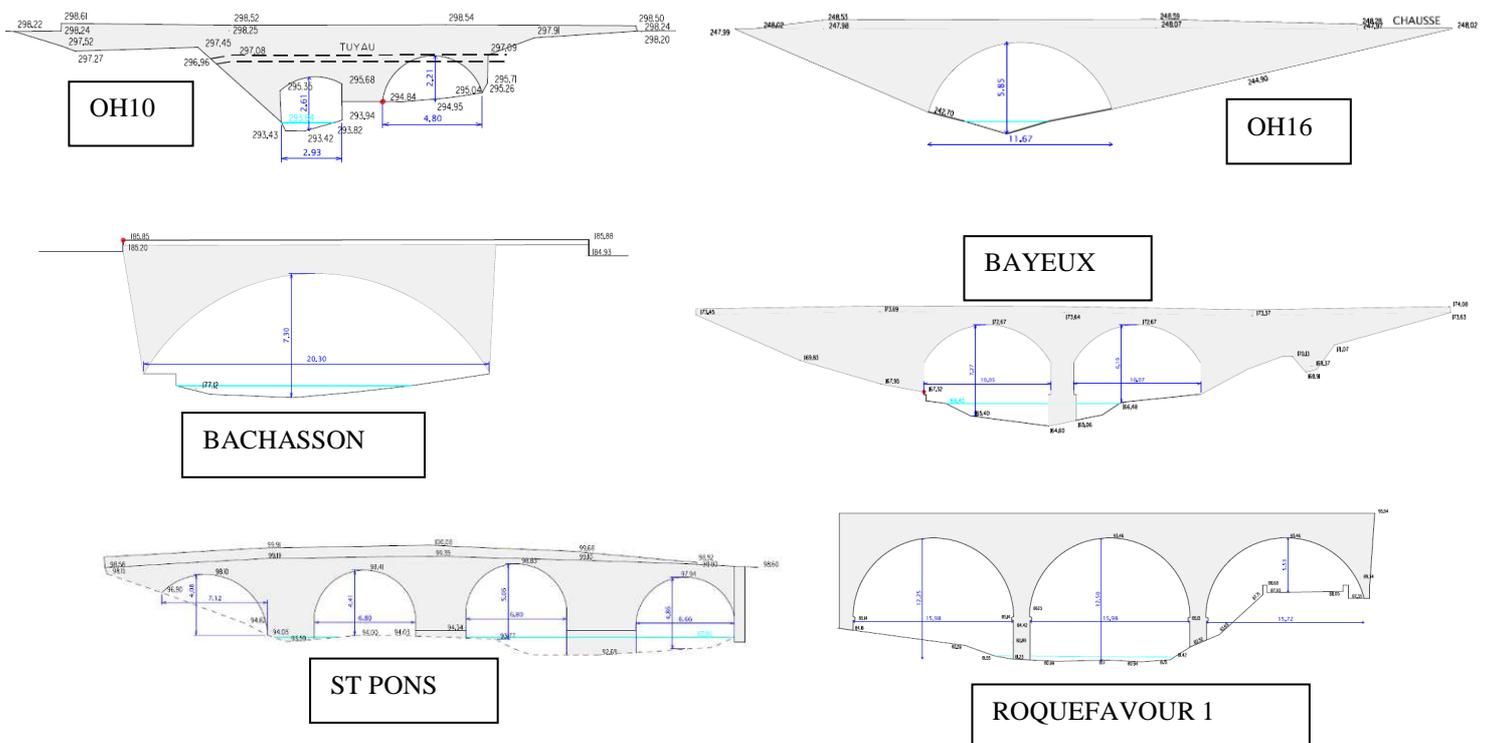
5.6.2 Calage au niveau des ouvrages

Pour caler le modèle de 1978 sur l'emprise historique disponible la débitance des ouvrages suivants a été modifiée (réduction de la largeur de l'ouvrage de l'ordre de 10%) :

- OH10 (Pourcieux)
- OH16 (Pourcieux)
- pont de Bachasson (Meyreuil/Fuveau)
- pont de Bayeux (Meyreuil)
- pont de Saint Pons (Aix)
- ponts de Roquefavour (Aix)
- pont de la voie ferrée (Berre)
- pont de Saint esteve (Berre)
- pont de Mauran (Berre)

Cette baisse de la débitance permet de retranscrire la présence d'embâcles, nombreux lors de la crue de 1978. Pour la crue de 2008, aucune réduction de section n'a été prise en compte.

Les ouvrages concernés sont présentés sur les figures ci-dessous :



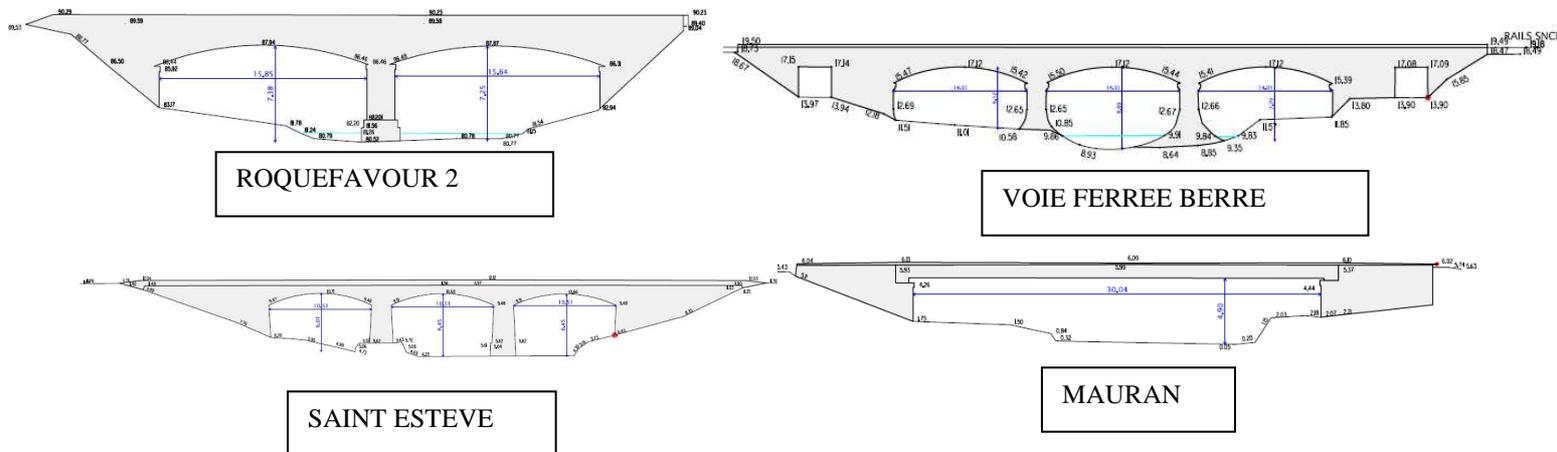


Figure 37 : Coupes des ouvrages à débitance limitée



Ce qu'il faut retenir...

On distingue deux paramètres de calage :

la rugosité en lit mineur et majeur (calage global). Les valeurs par défaut sont : 20 en lit mineur, 10 en lit majeur naturel, 5 en lit majeur urbanisé;

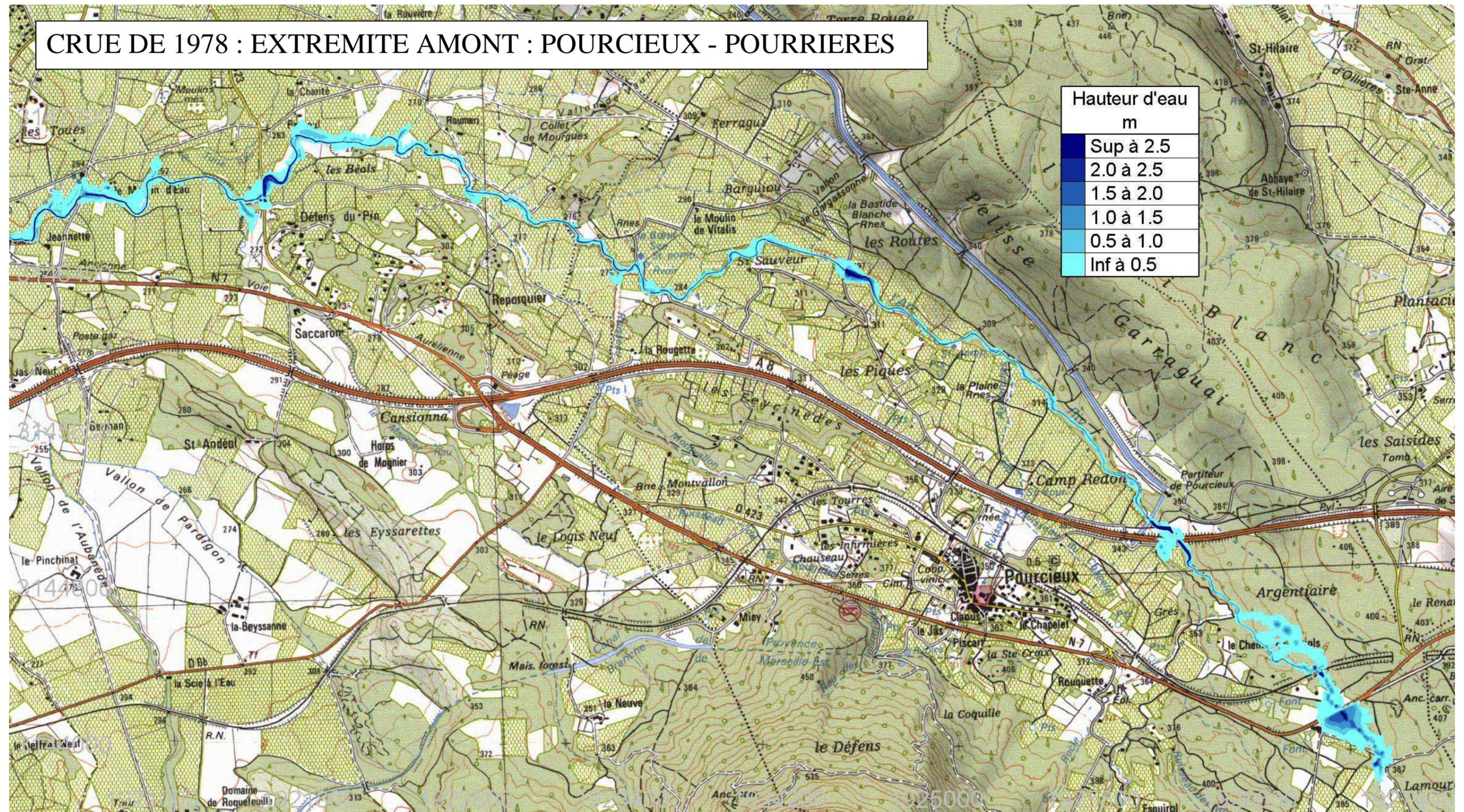
la diminution de la débitance de certains ouvrages pour représenter la présence d'embâcles pour la crue de 1978 (calage local).

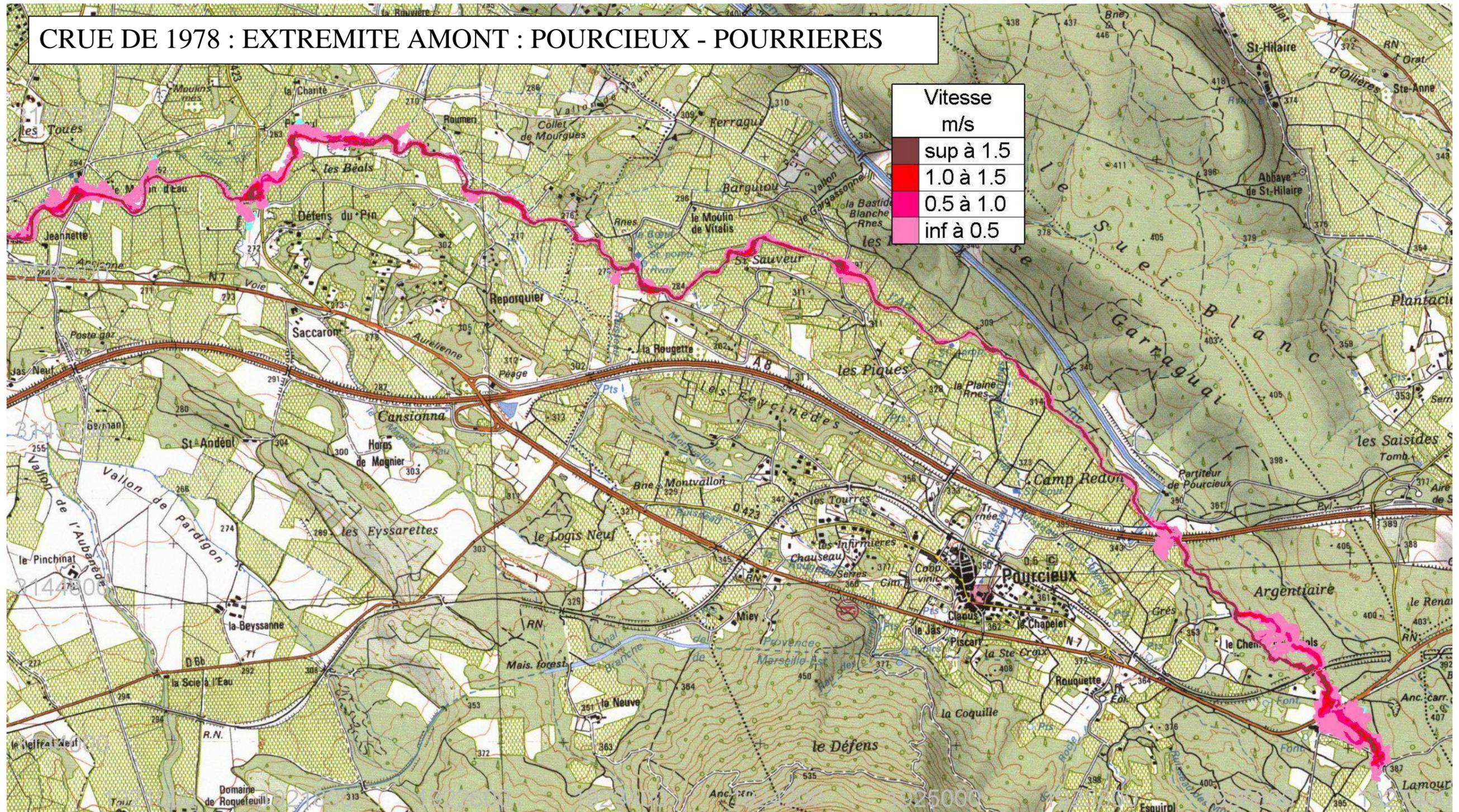
5.7 RESULTATS DE LA MODELISATION DE LA CRUE DE 1978

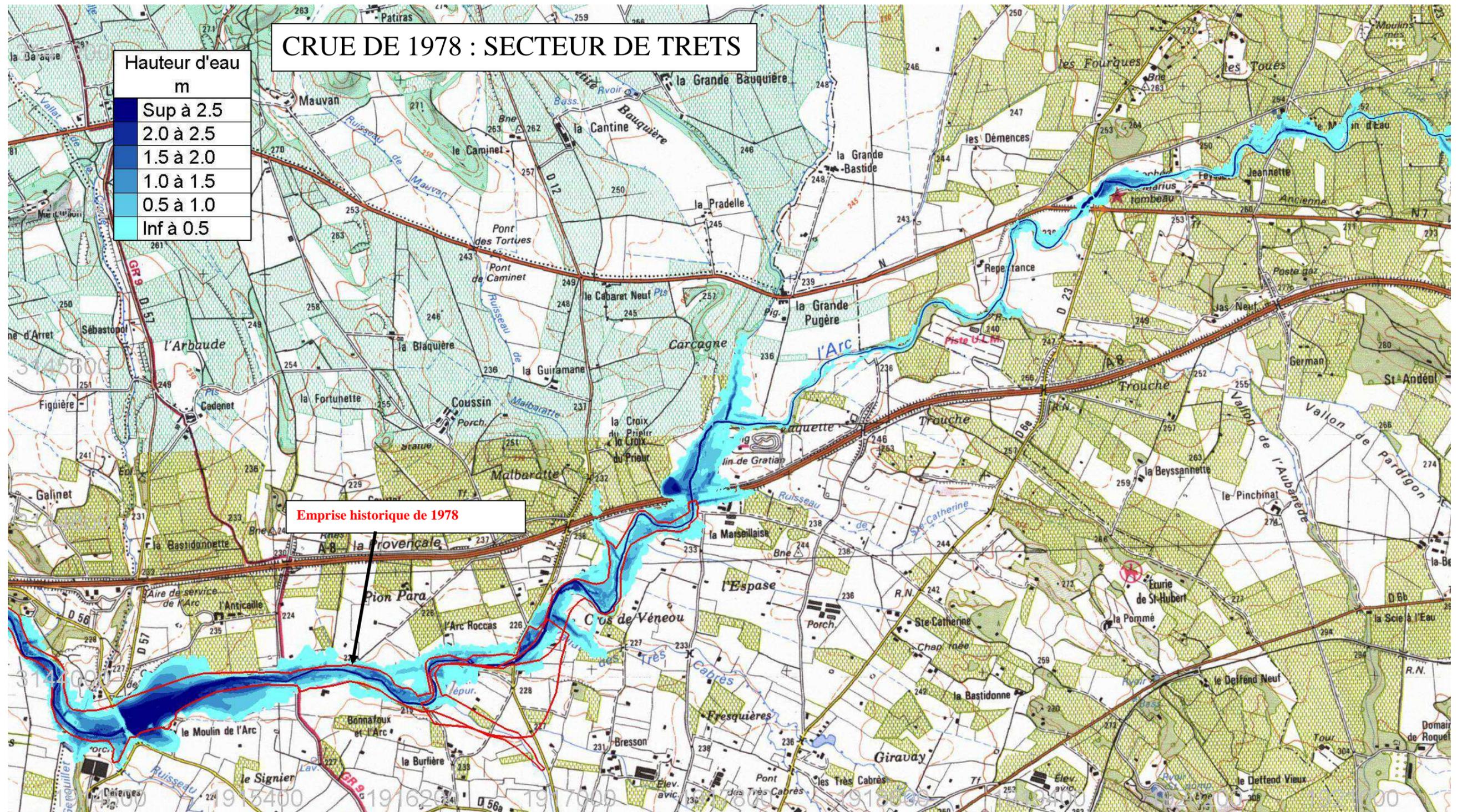
5.7.1 Modèle amont (de l'amont du bassin versant aux gorges de Langesse)

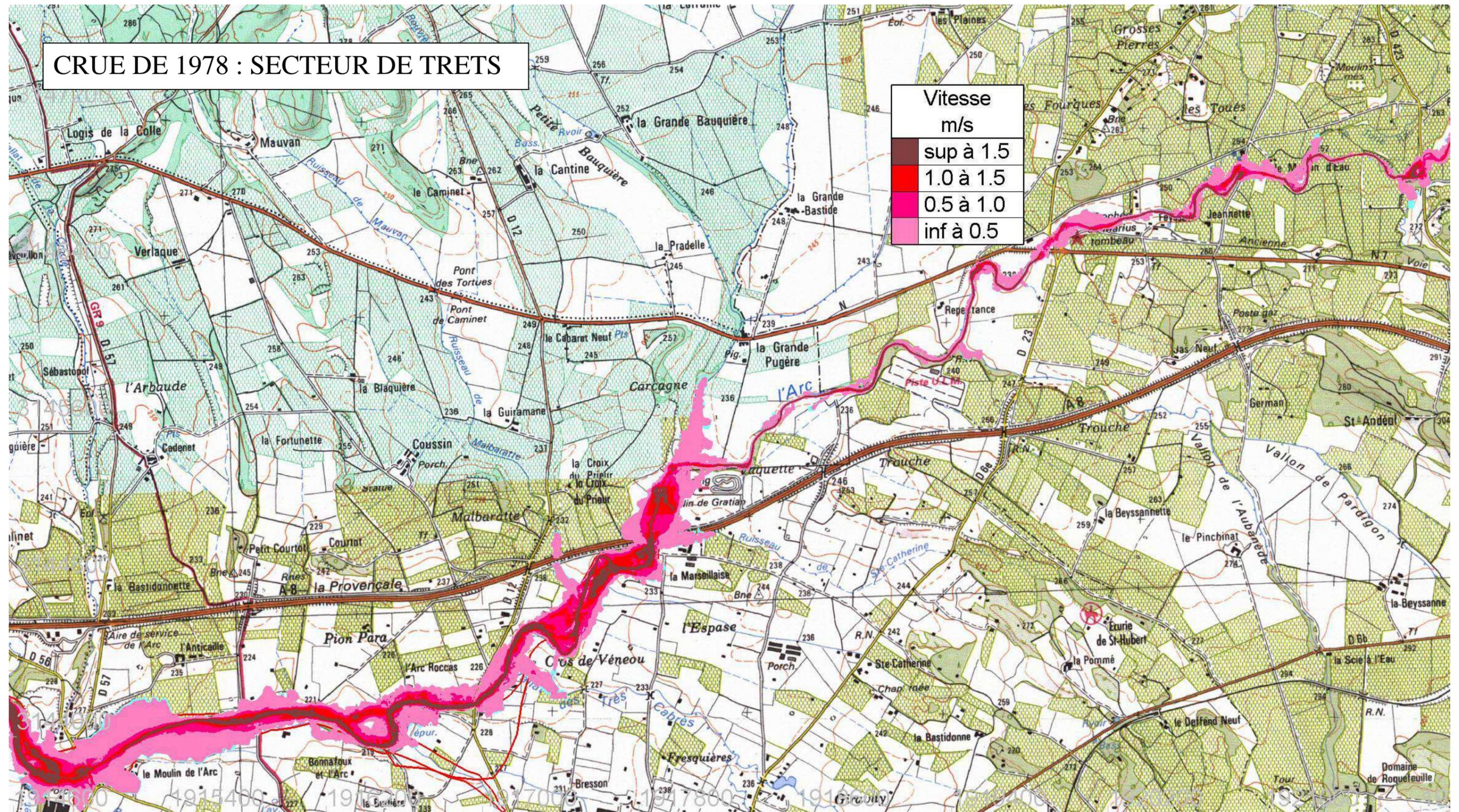
Les résultats du modèle amont (hauteur et vitesse maximales) sont présentés sur les plans ci-dessous. En rouge est représentée l'emprise de la crue de 1978.

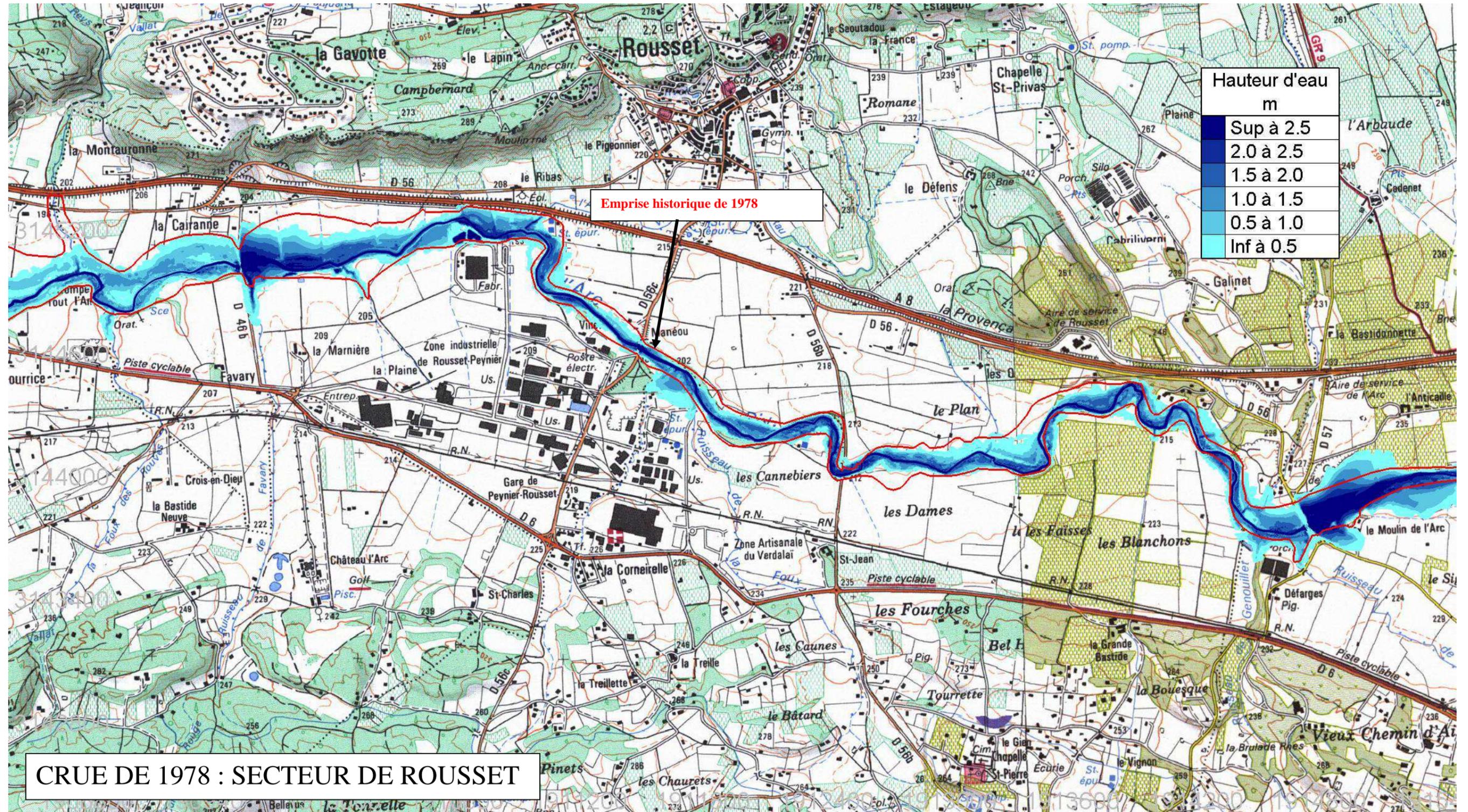
Figure 38 : Cartes des hauteurs et vitesses maximales pour la crue de 1978 (secteur amont du bassin versant – Gorges de Langesse)

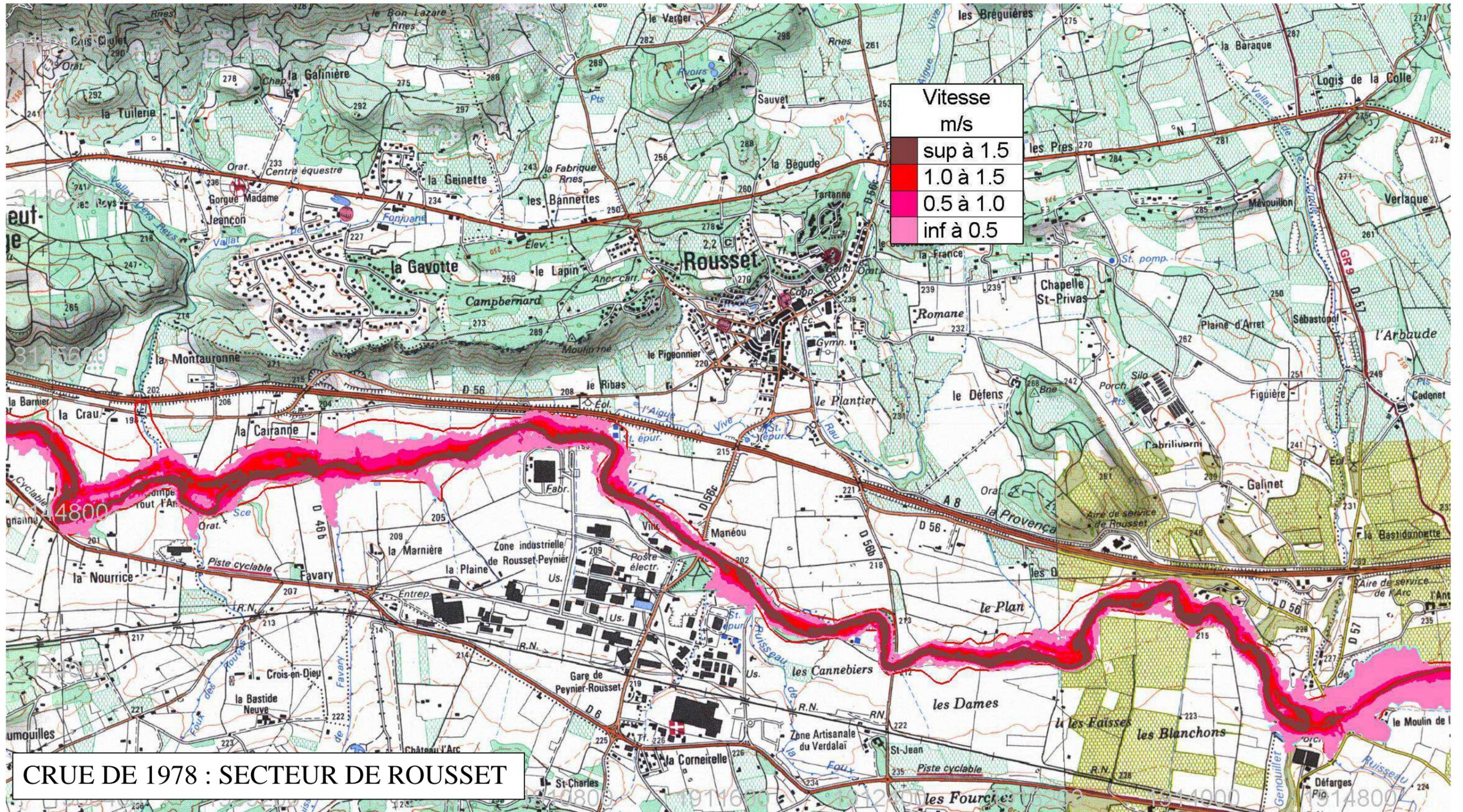


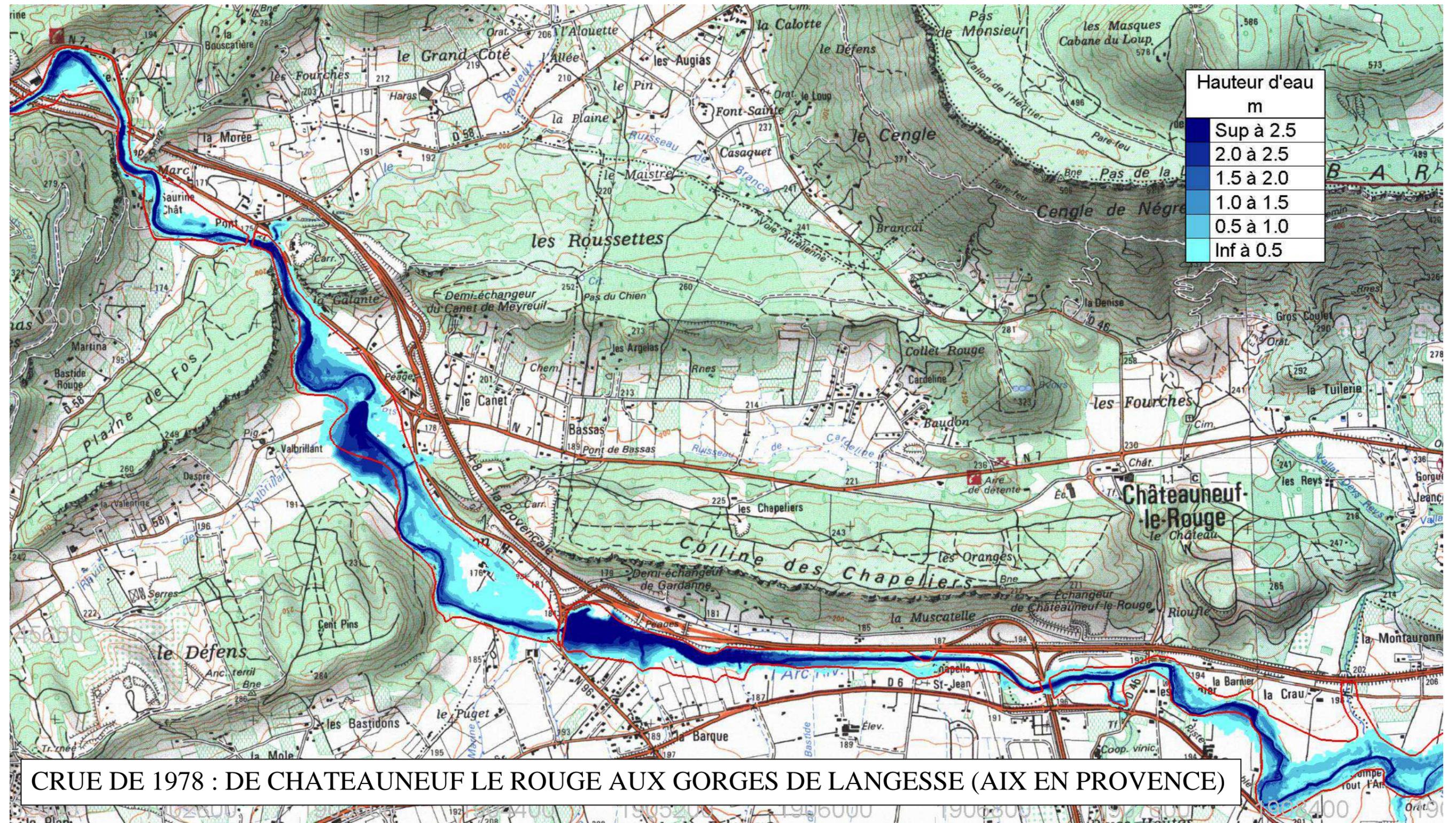


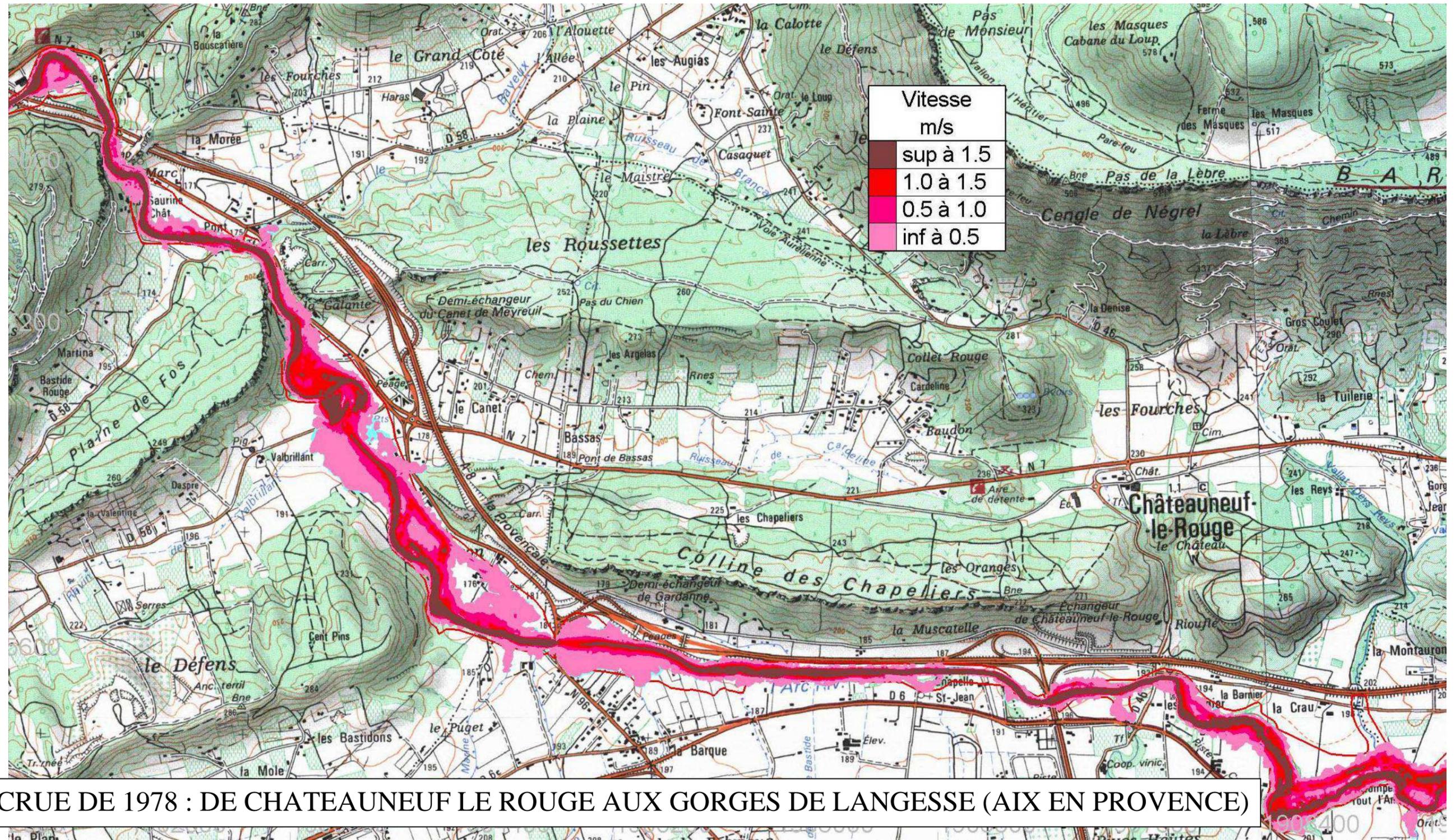












Les résultats ont été analysés secteurs par secteurs. Les témoignages existants (source : étude GINGER) sont reportés sur les figures ci-dessous. Même si la plupart de ces témoignages ne donnent pas de données quantifiées, ils donnent des indications quant au déroulement de la crue et sont une aide pour le calage du modèle.

Les points de calculs de GINGER sont indiqués sur les schémas (cercle jaune) et les débits de GINGER sont comparés au débit de la modélisation. La comparaison de ces deux données permet de vérifier la cohérence entre les données de propagation et d'écroulement du modèle pluie débit de GINGER et la modélisation hydraulique.

L'emprise disponible de la crue de 1978 est superposée avec les résultats de la modélisation. Les secteurs où les écarts sont importants sont justifiés (remblai qui n'existait probablement pas en 1978 ; incohérence dans le tracé de l'emprise, inondation par un affluent de l'Arc et non pas par l'Arc...). Des zooms ont été réalisés sur ces secteurs :

TRETS – SECTEUR DE PION PARA

L'Arc, 2 m d'eau sont observés près de la campagne de M. Robbiglio, le courant y est fort, 2 camions de pompier sont emportés dans la nuit du 17 au 18 janvier 1978

Q GINGER = 154.1 m³/s
Q SAFEGE = 160 m³/s

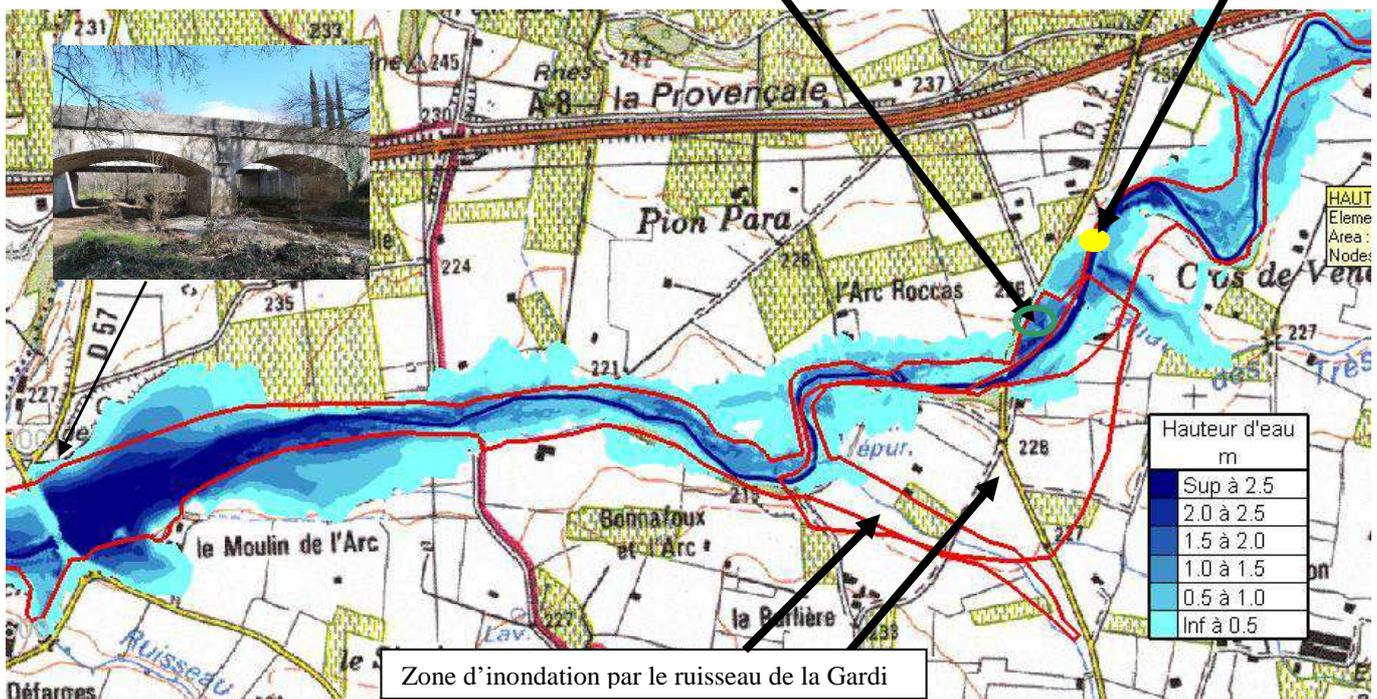


Figure 39 : zoom 1978 : secteur de Pion Para à Trets

La campagne de M. Robbiglio n'est pas précisément localisée. Toutefois en rive droite de l'Arc, les hauteurs varient entre 1.25 et 2.6 m.

AMONT DE LA ZONE INDUSTRIELLE DE ROUSSET :

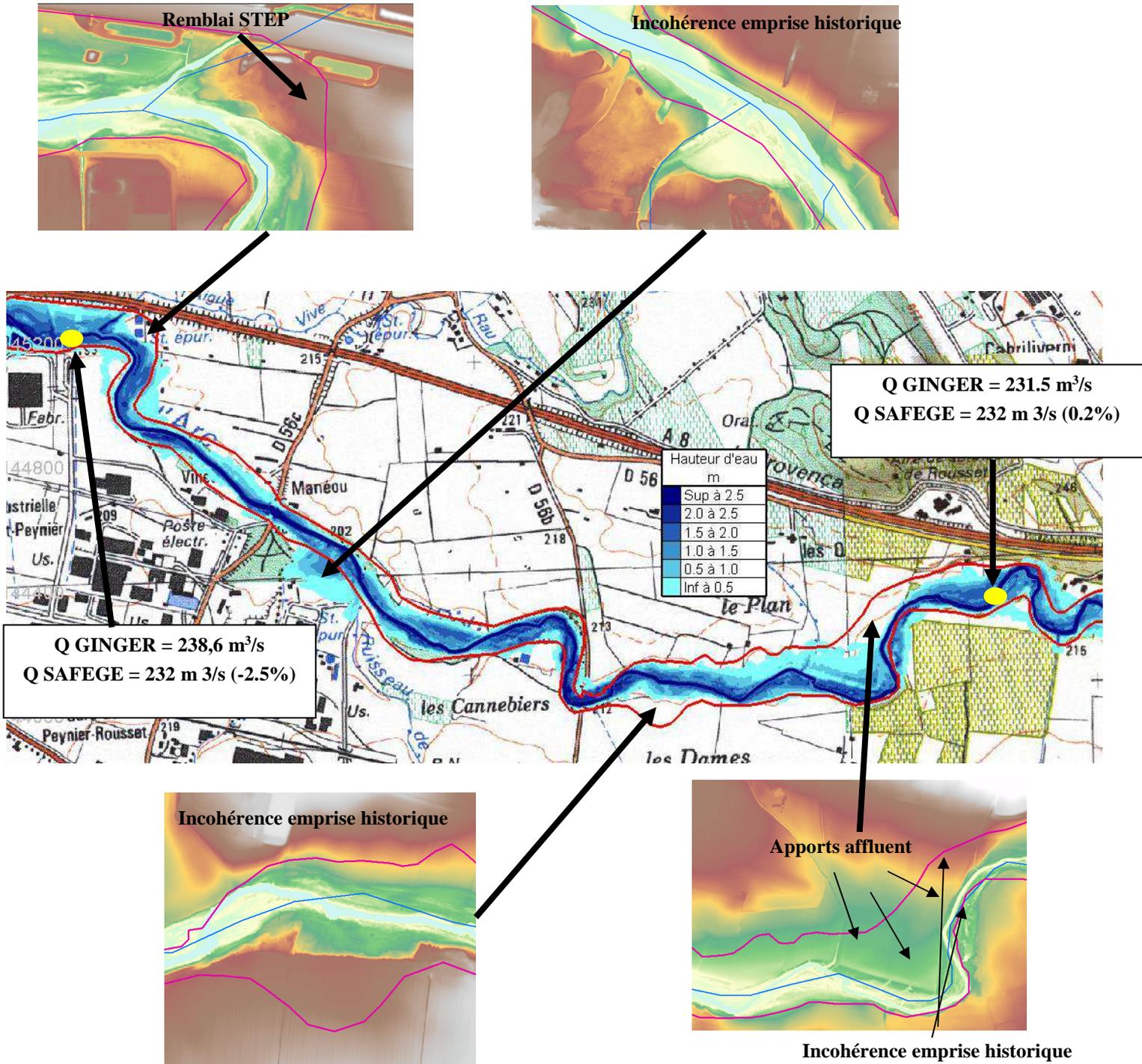


Figure 40 : zoom 1978 : amont de la zone industrielle de Rousset

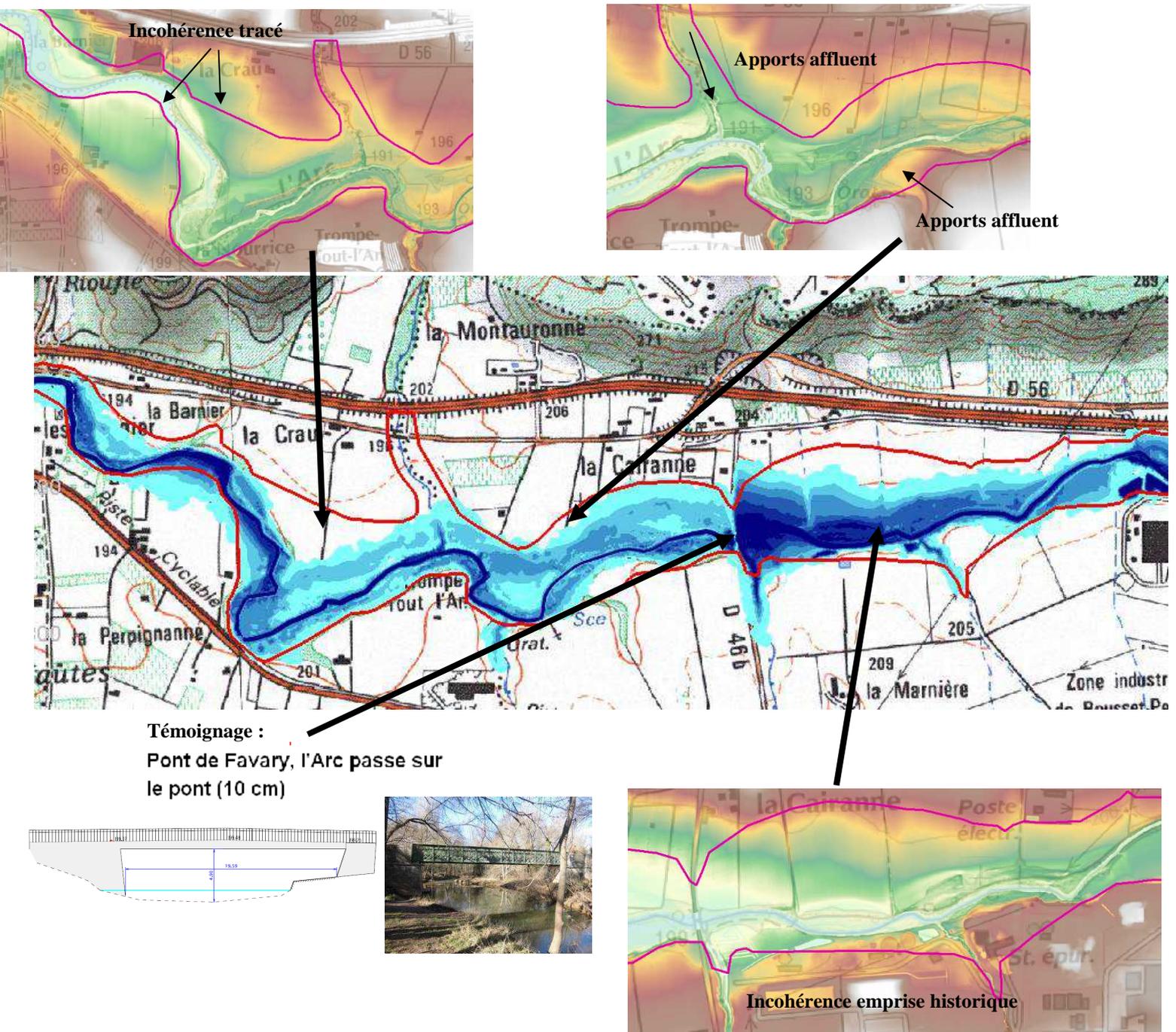
AVAL DE LA ZONE INDUSTRIELLE DE ROUSSET – SECTEUR DE FAVARY :

Figure 41 : zoom 1978 : secteur de Favary (Rousset)

Au niveau du pont de Favary, le modèle représente bien sur le pont un débordement de l'ordre de 10 cm ($Z_{eau} = 199.50$ m NGF – point haut du tablier = 199.48 m NGF), ce qui est du bon ordre de grandeur par rapport à ce qui a été observé.

SECTEUR DE BACHASSON :

Témoignage :

L'eau passe pratiquement par-dessus le pont, un camion est emporté par l'Arc

Témoignage :

L'eau remonte par le canal du moulin jusqu'au ras des maisons

Témoignage :

A l'aval du Pont de Bachasson un nouvel écoulement s'établit au travers de la plaine court-circuitant une longue section à faible capacité

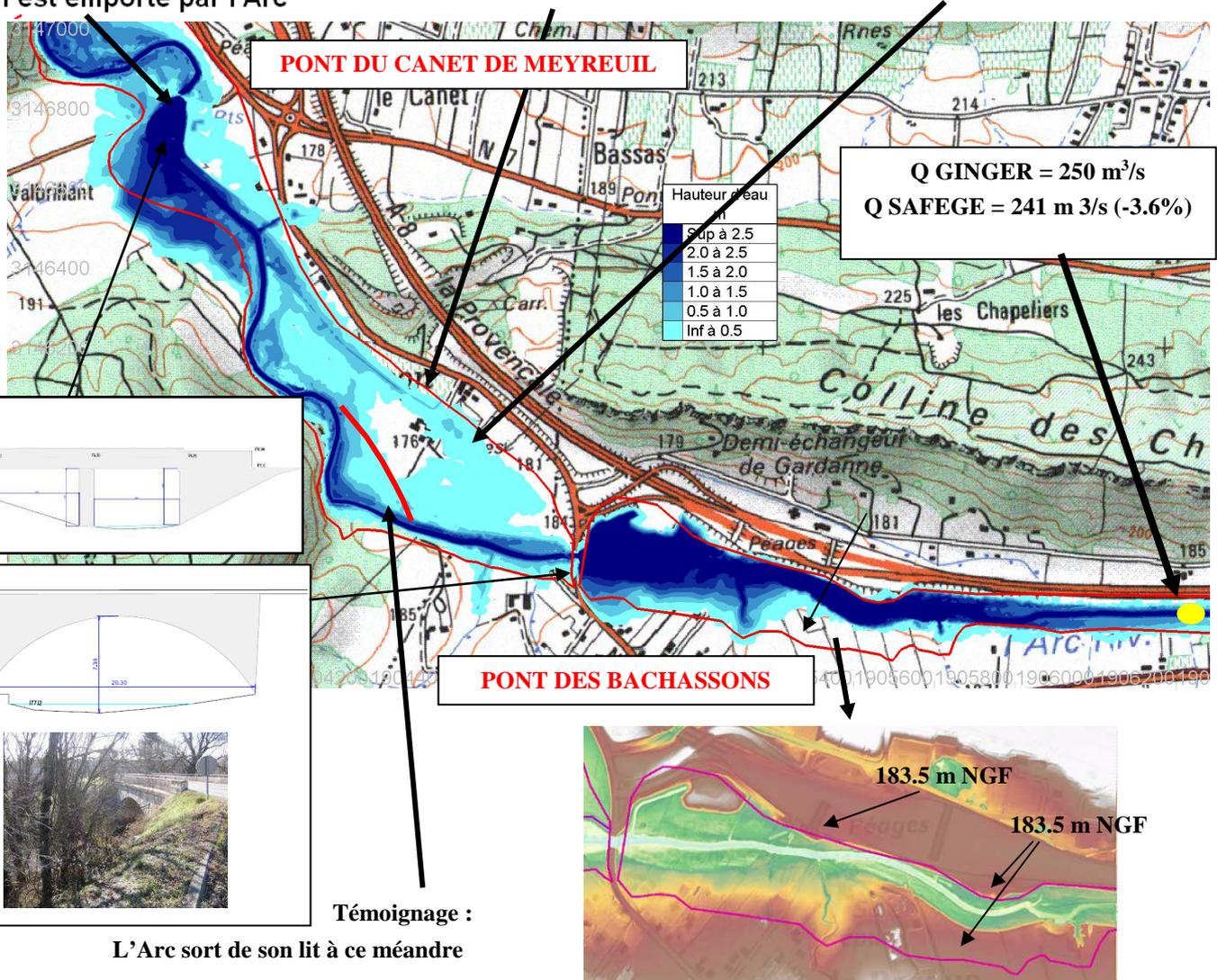


Figure 42 : zoom 1978 : secteur Bachasson

La description de la crue en aval du pont de Bachasson est bien représentée par le modèle (coupure du méandre, écoulement à travers la plaine, inondation du canal du Moulin) et le modèle est fidèle à l'emprise de crue.

De même, au niveau du pont du Canet de Meyreuil, le pont ne surverse pas mais le niveau est haut ($Z_{\text{eau}} = 175,8 - Z_{\text{parapet}} = 177,30$) et le pont est en charge.

En amont du pont de Bachasson, l'emprise modèle est plus étroite que l'emprise historique. Toutefois comme le montre la vue lidar si l'emprise historique est atteinte, des débordements se produisent nécessairement sur l'autoroute. Or

aucun témoignage ne relate cet événement. L'emprise historique paraît donc sur ce secteur légèrement surestimée.

SECTEUR PONT DE BAYEUX :

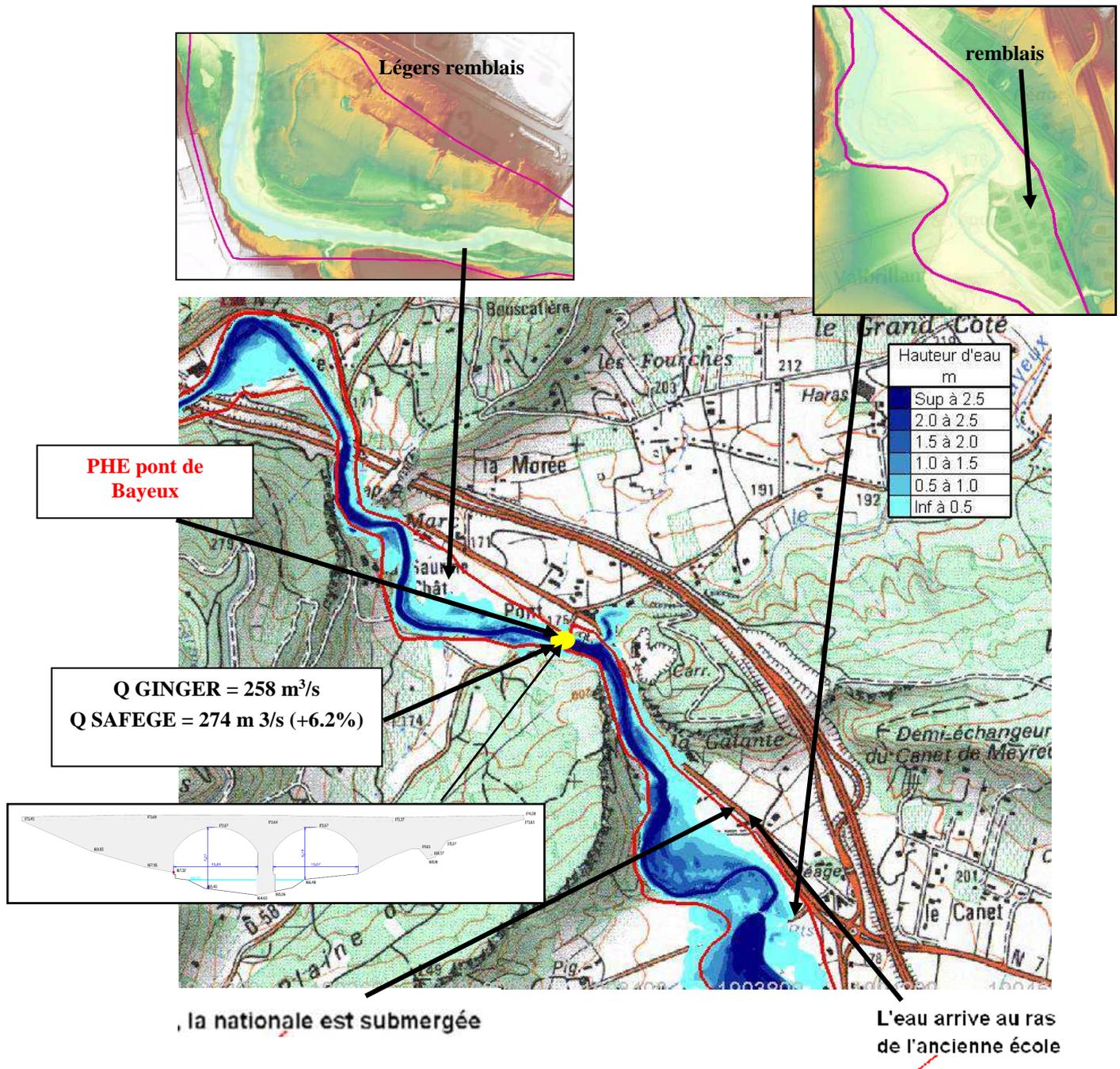


Figure 43 : zoom 1978 : secteur de Pont de Bayeux

Le modèle ne fait pas apparaître d'eau sur un secteur où la nationale a été submergée en 1978. On peut penser que le remblai (logements) implanté en amont de cette zone modifie le fonctionnement hydraulique du secteur.

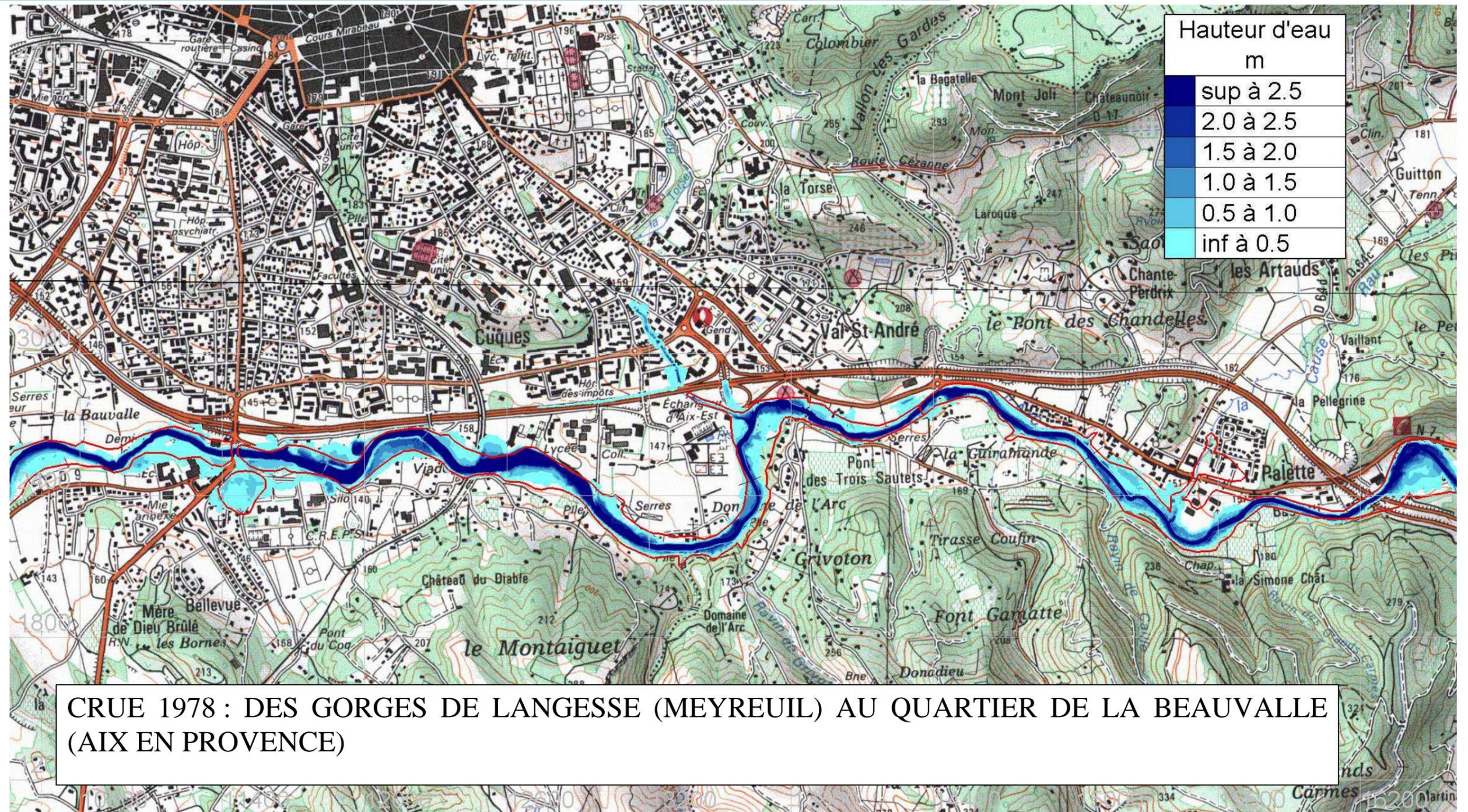
Deux PHE sont disponibles au Pont de Bayeux, en amont et en aval du pont :

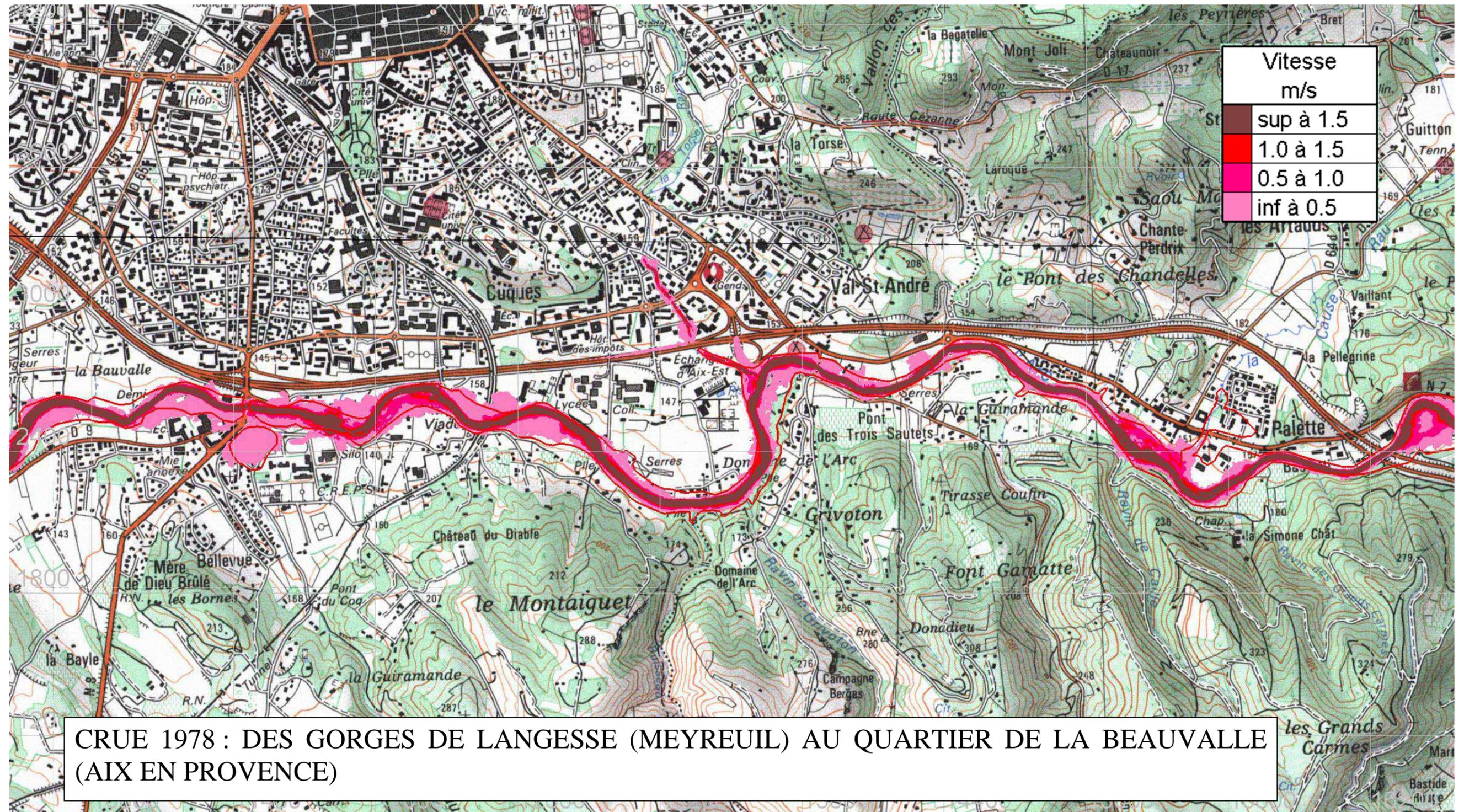
ZPHE amont = 171.34 m NGF - Z modèle = 171.45 m NGF

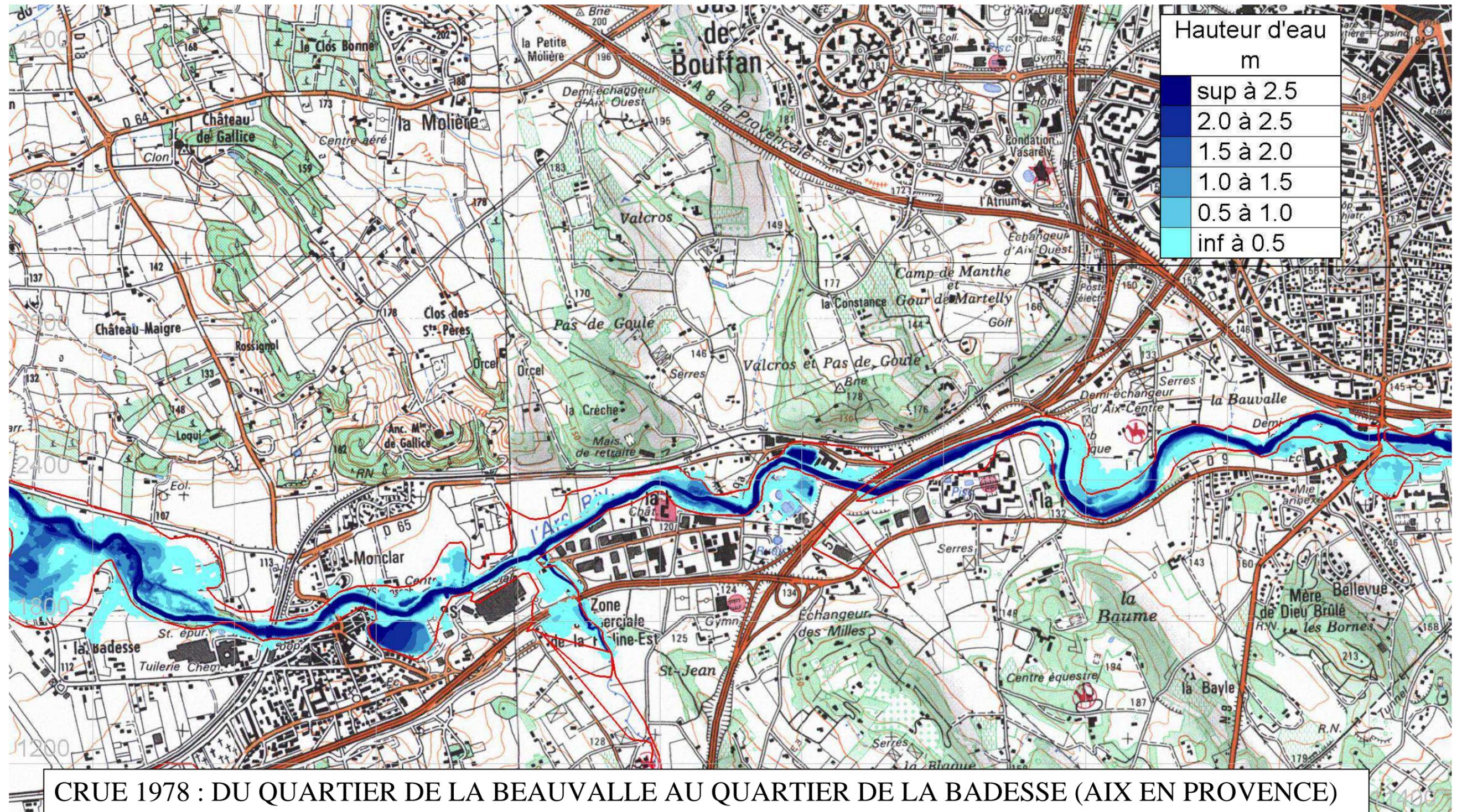
Z PHE aval = 170.27 m NGF - Z modèle = 169.20 m NGF

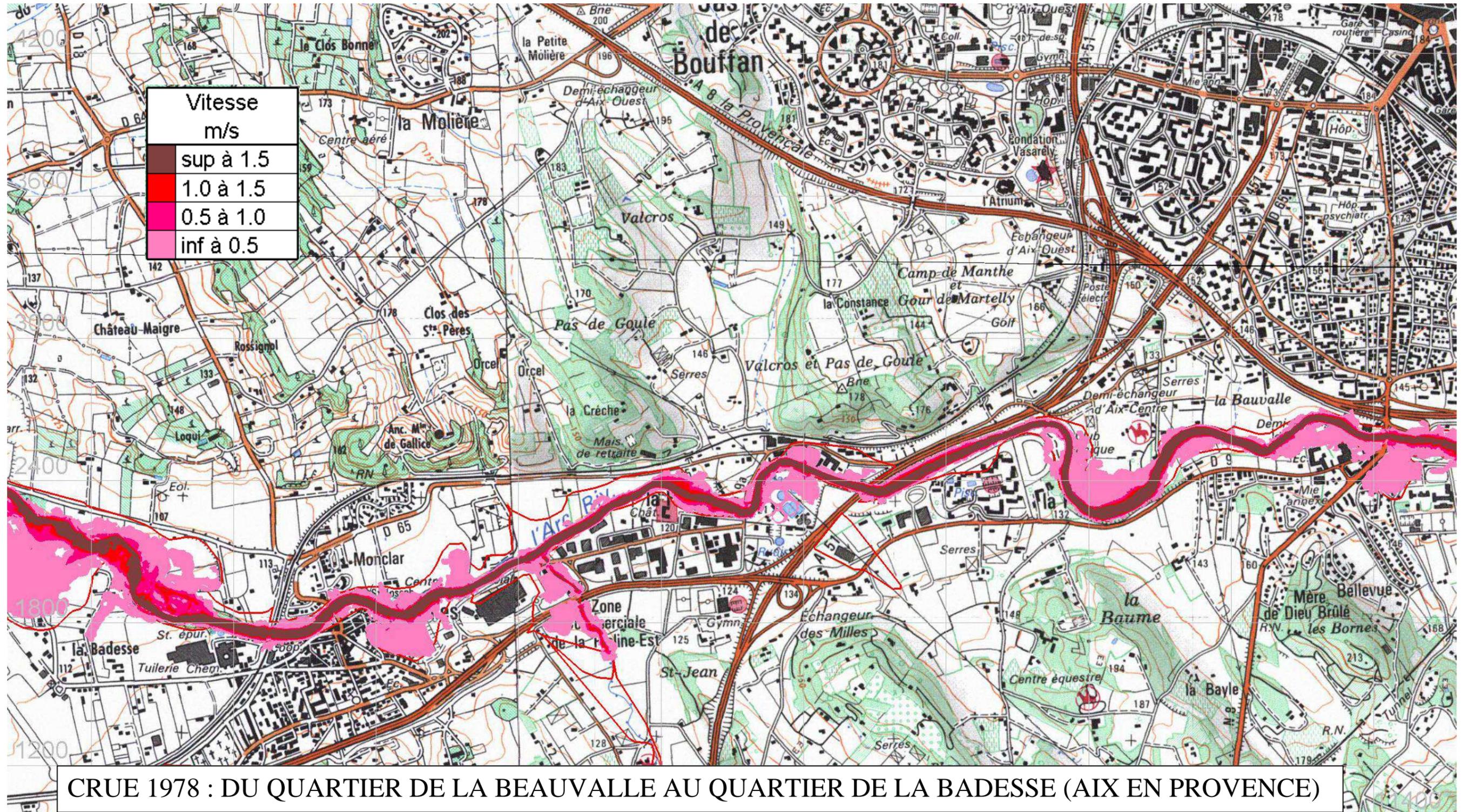
5.7.2 Modèle centre : des gorges de Langesse aux gorges de Roquefavour :

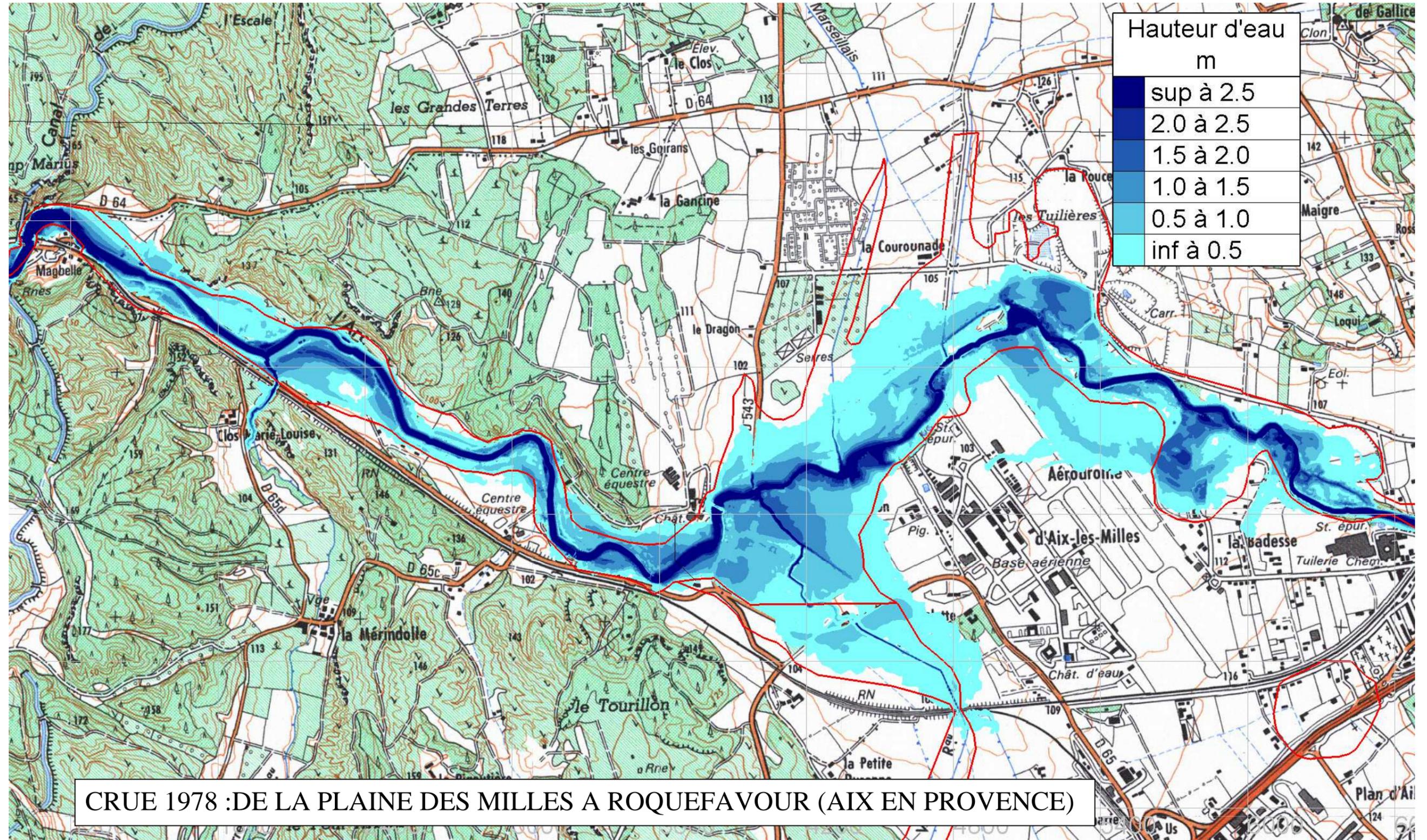
Figure 44 : Cartes de hauteurs et vitesses maximale pour la crue de 1978 (secteur des gorges de Langesse aux gorges de Roquefavour)

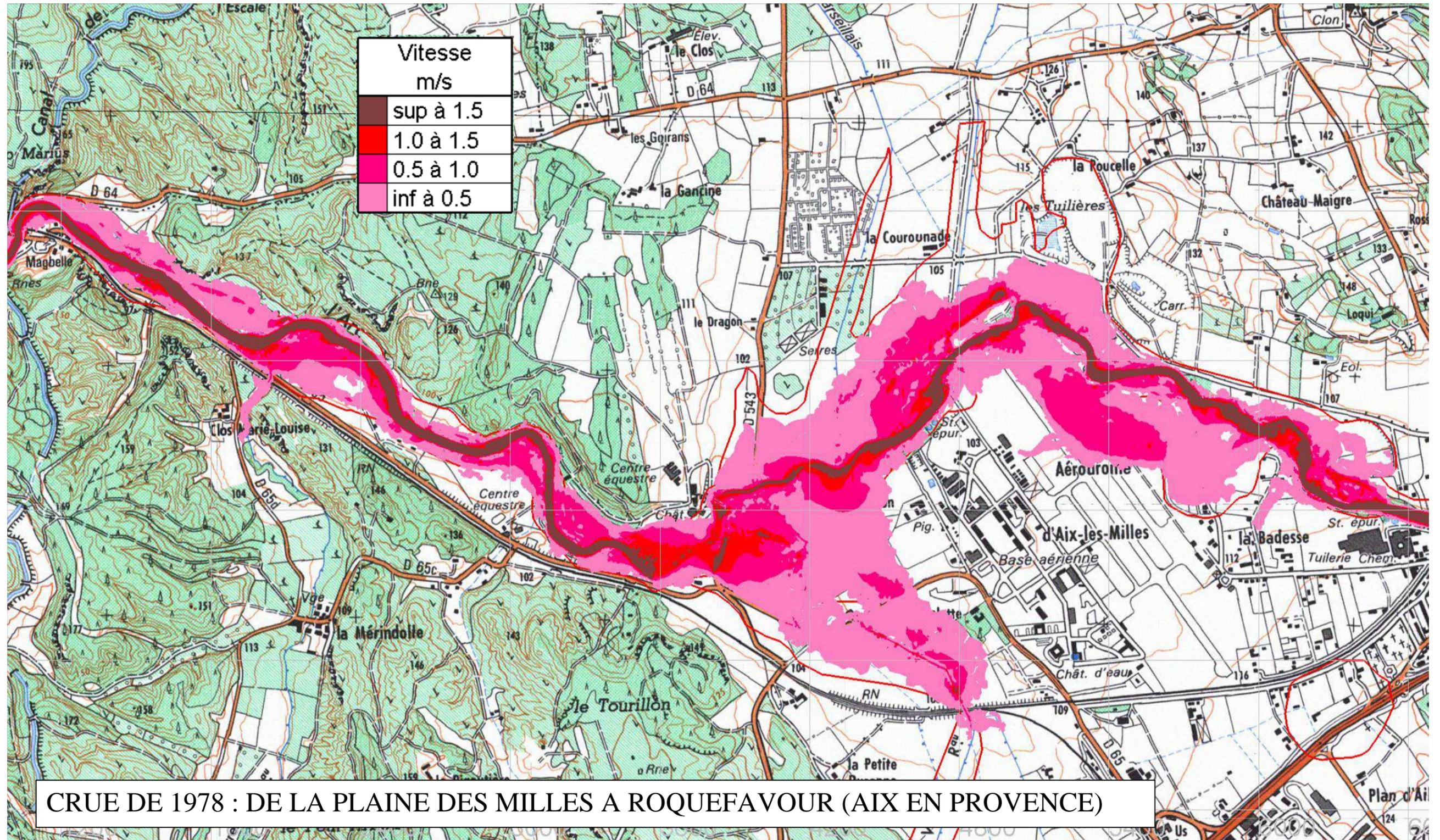












Des zooms ont été réalisés sur les secteurs suivants, où les écarts entre emprise modélisée et emprise historique sont importants :

SECTEUR DE PALETTE (LE THOLONET) :

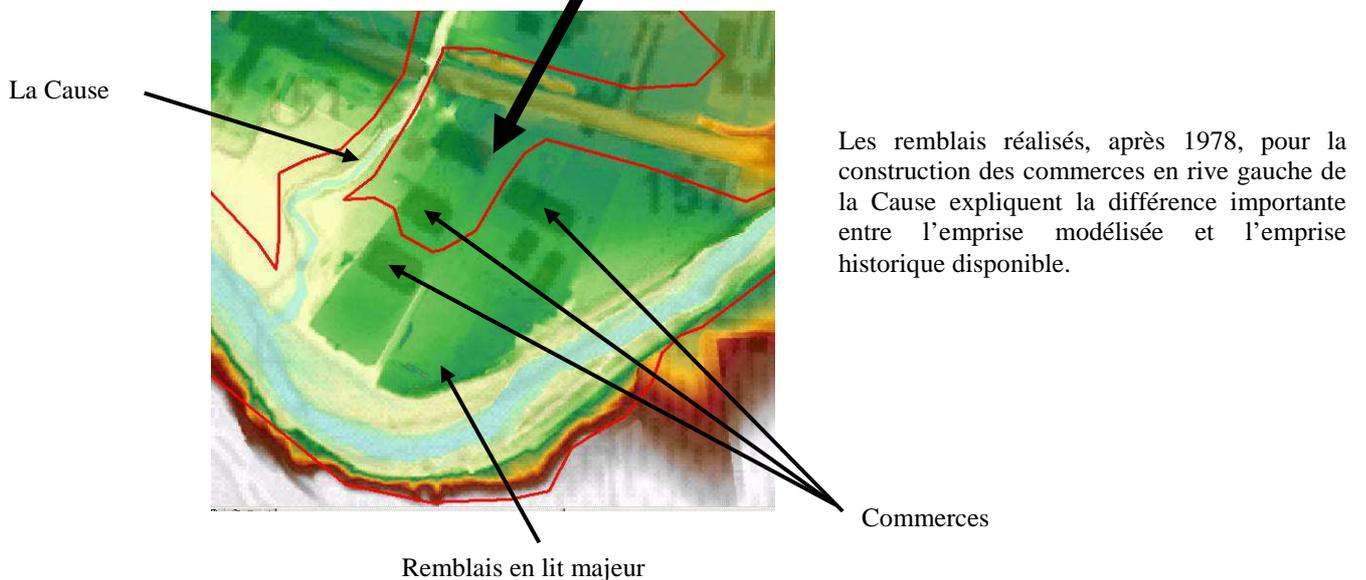
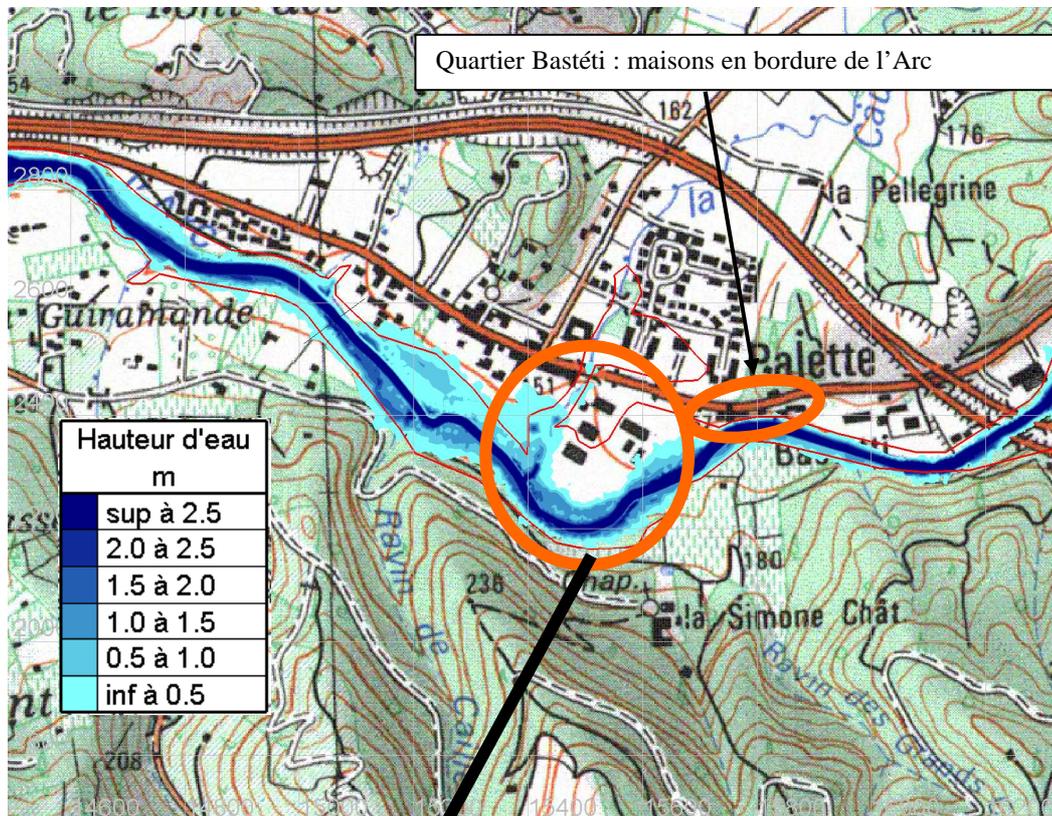


Figure 45 : zoom 1978 : secteur de Palette (Le Tholonet)

SECTEUR DE LA STATION D'ÉPURATION DE LA PIOLINE (AIX EN PROVENCE) :

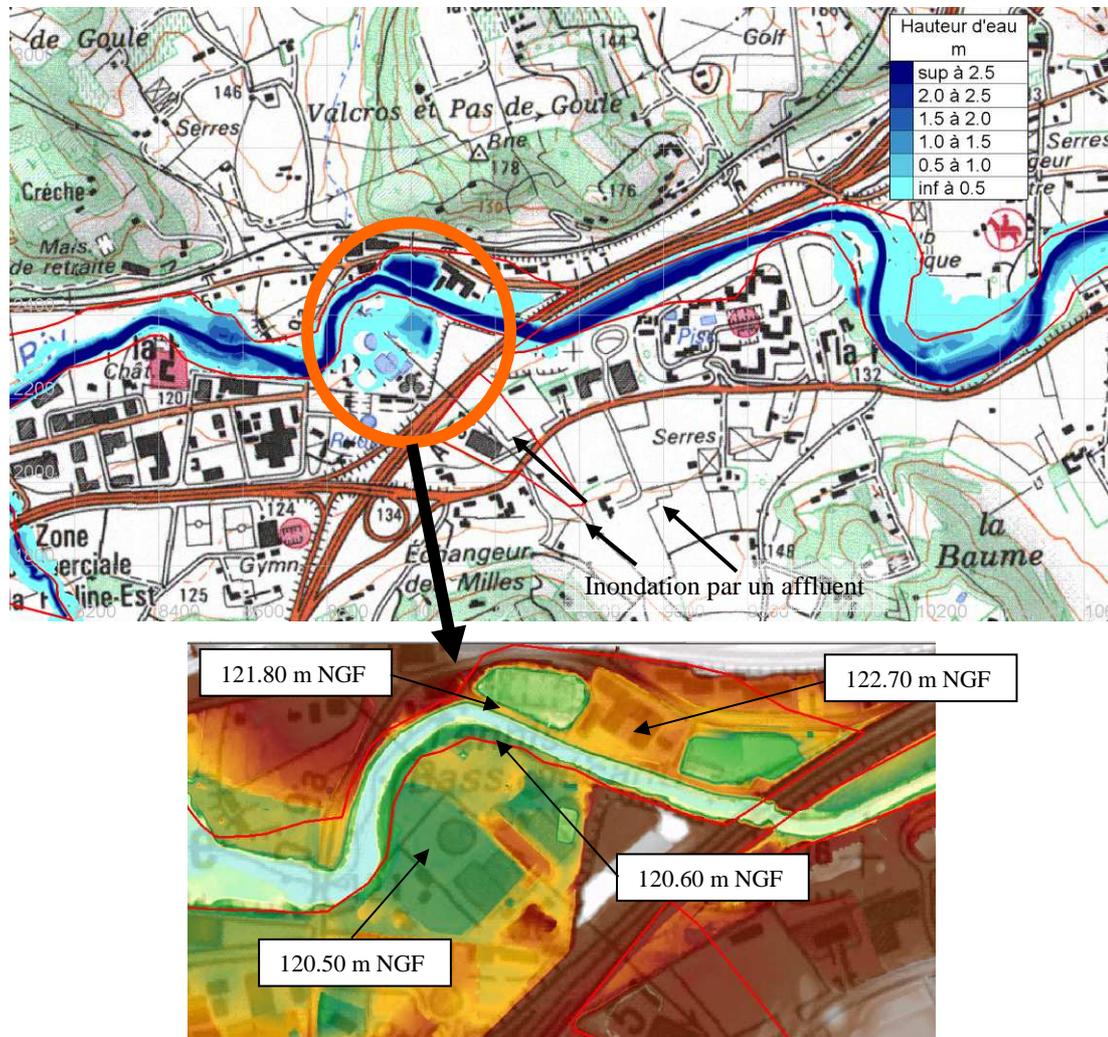
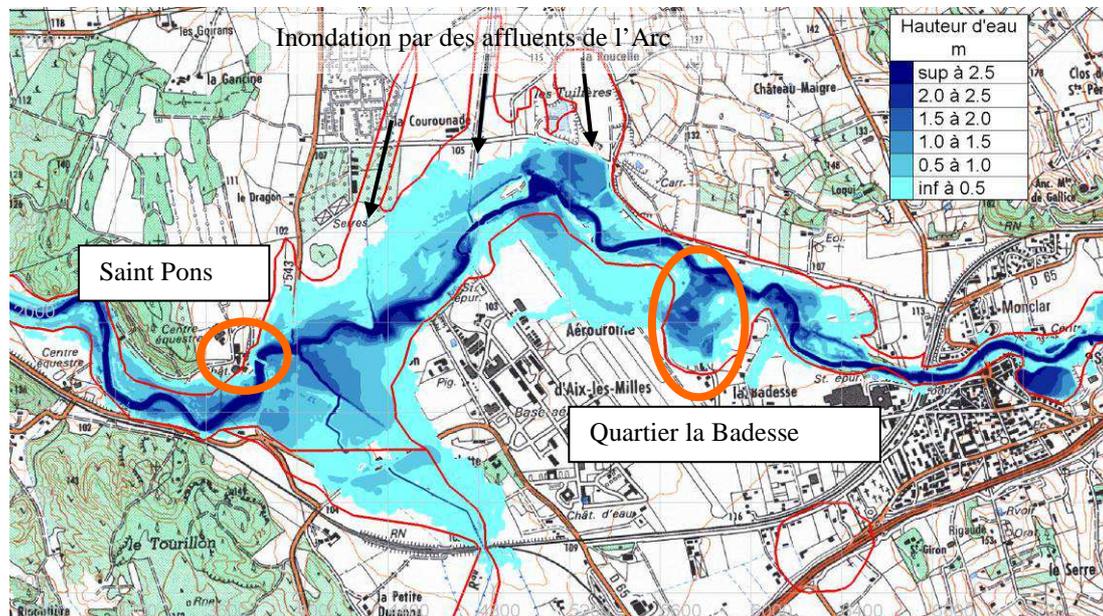


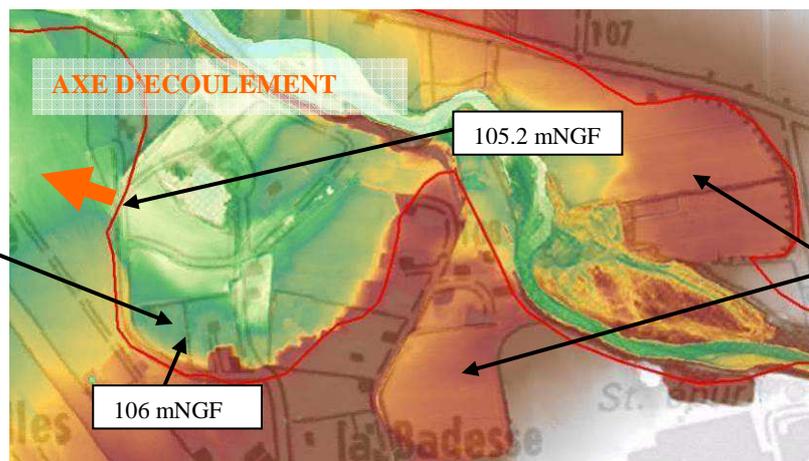
Figure 46 : zoom 1978 : secteur de la Pioline (Aix en Provence)

La topographie lidar dont nous disposons montre qu'il n'est pas possible, sur ce secteur, d'inonder la rive droite sans inonder la rive gauche (station d'épuration). Ainsi, soit l'emprise dont nous disposons pour la crue de 1978 n'est pas assez forte, soit la topographie des lieux a été modifiée depuis 1978.

SECTEUR DE LA ZONE D'EXPANSION DES CRUES DE LA PLAINE DES MILLES (AIX EN PROVENCE) :



L'étude de la topographie montre que si ce secteur est inondé, un axe d'écoulement se crée nécessairement vers l'ouest



Les cotes rive gauche et rive droite sont semblables mais l'emprise historique ne relate pas d'inondation en rive gauche : incohérence de l'emprise historique sur ce secteur.

Figure 47 : zoom 1978 : ZEC plaine des Milles

Les témoignages de 1978 sur le secteur du modèle centre relatent les inondations des lieux suivants :

- quartier Bastéti
- camping « Arc en Ciel » aux Trois Sautets
- Arc de Meyran
- Pont de l'Arc
- La Badesse

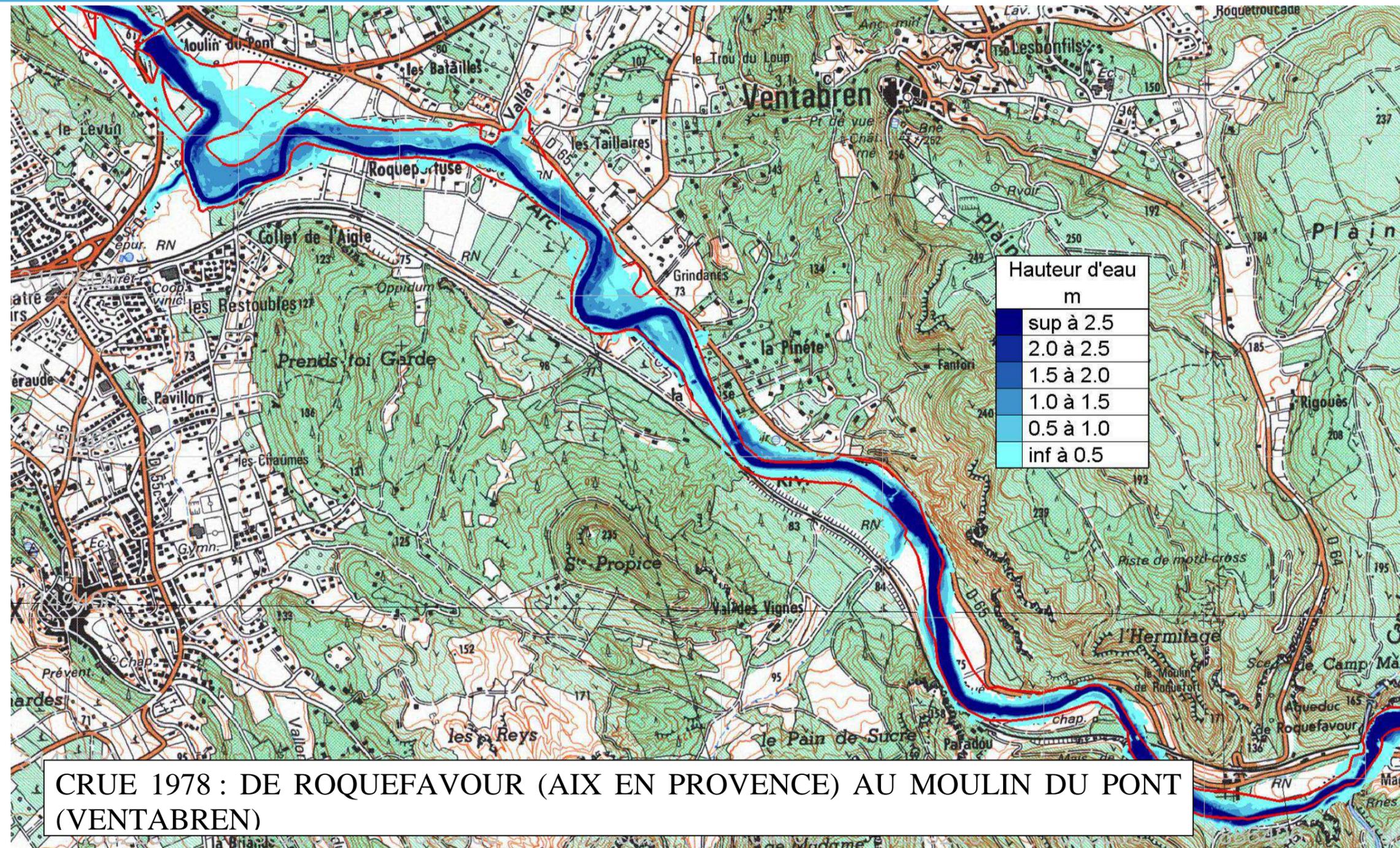
- Saint Pons
- Hotel Arquier à Roquefavour

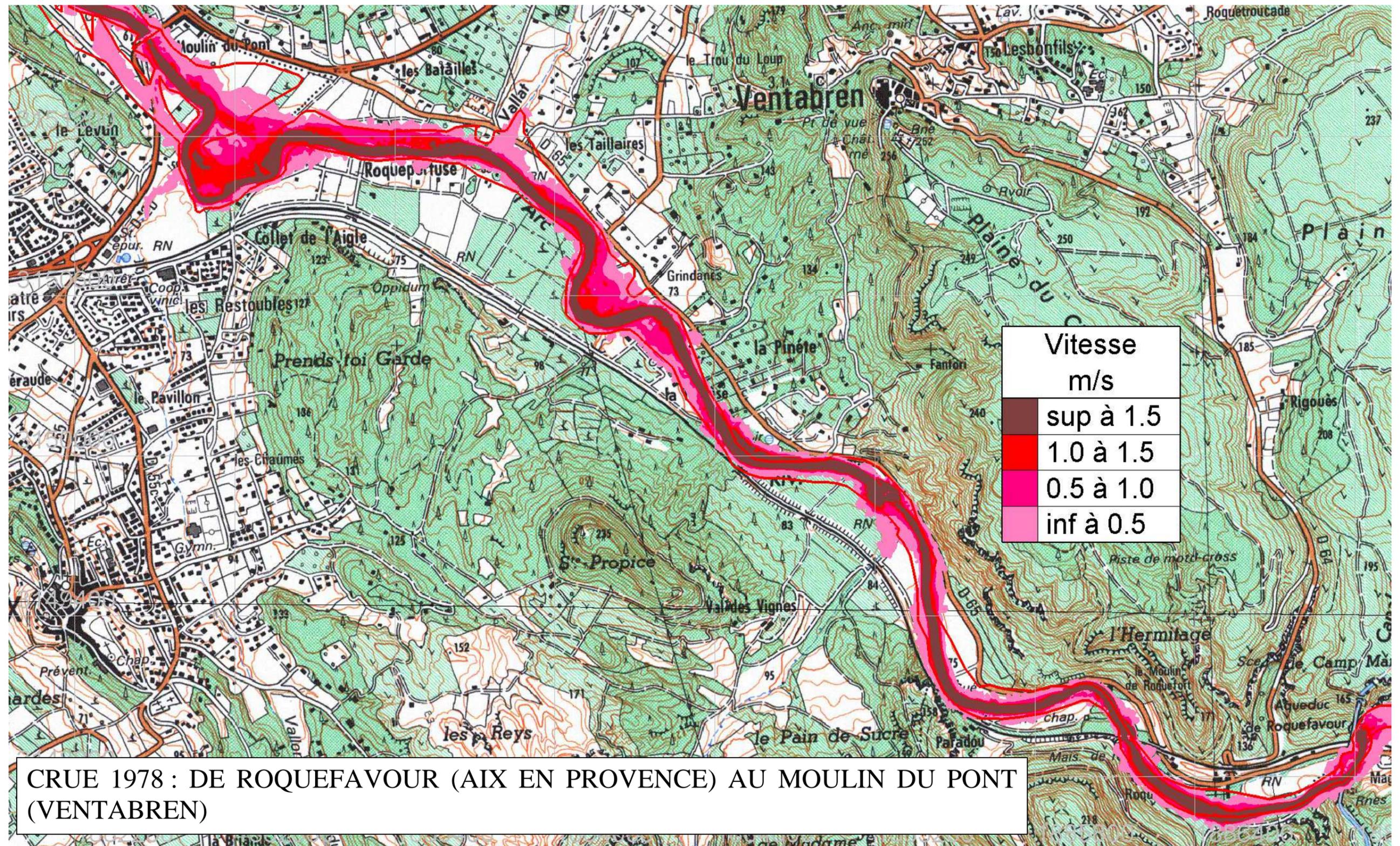
Tous ces secteurs sont effectivement inondés par le modèle hydraulique de 1978.

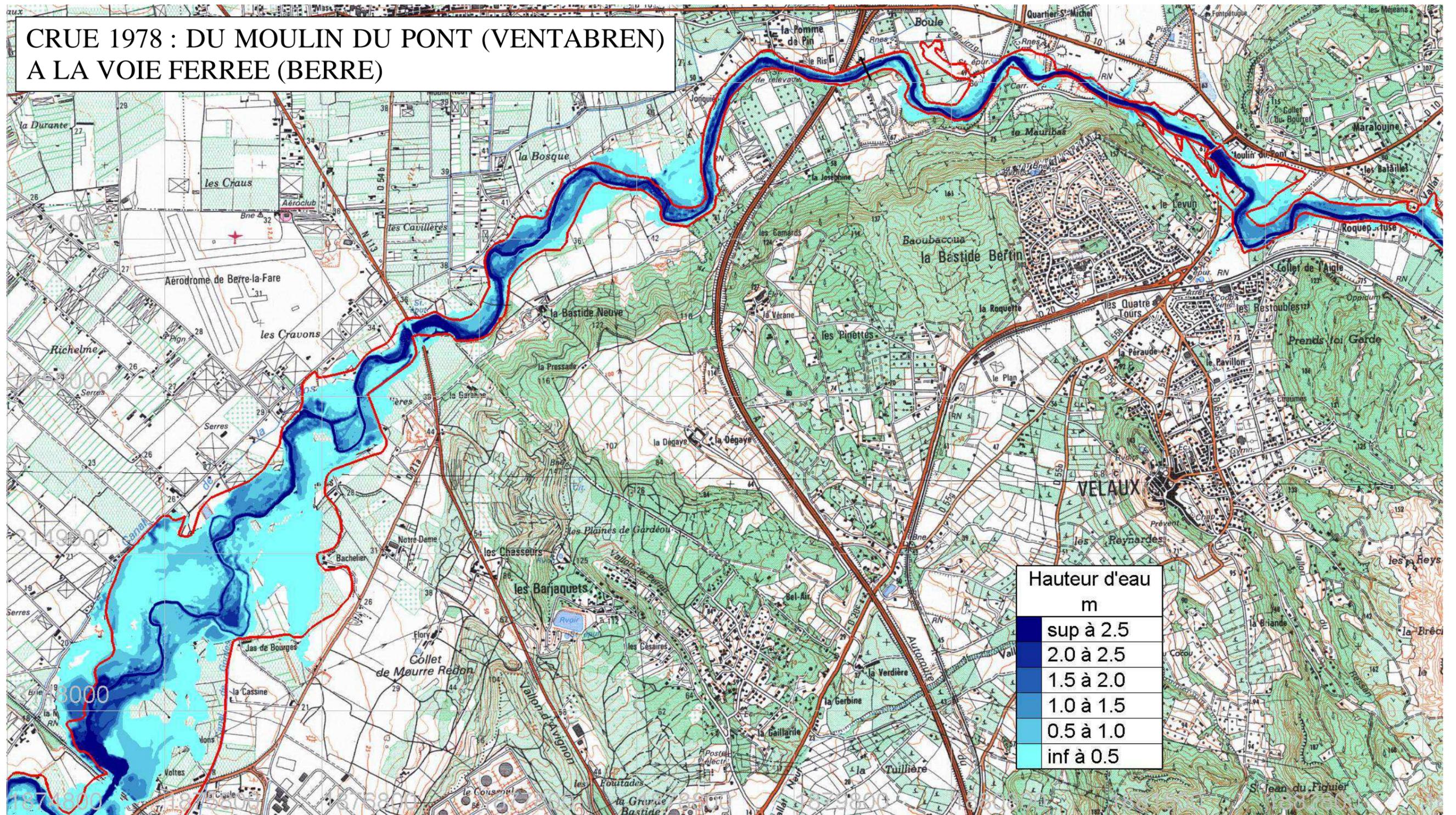
D'une manière générale on observe sur le secteur du modèle centre une emprise de zone inondable peu large jusqu'à la zone d'expansion de la plaine des Milles où la crue s'étale avant l'entrée dans les gorges de Roquefavour.

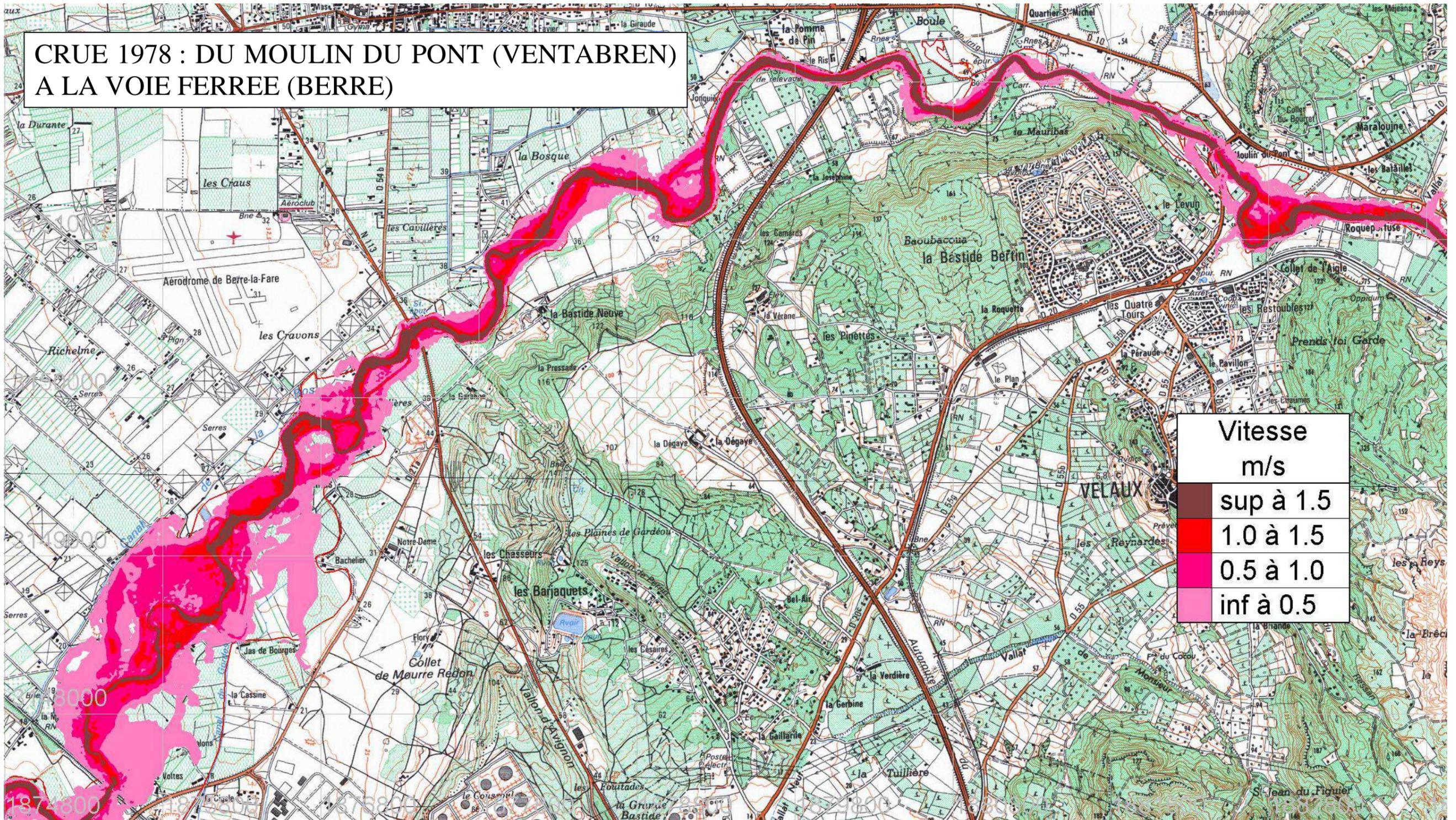
5.7.3 Modèle aval : des Gorges de Roquefavour à l'étang de Berre (avec niveau étang de Berre = 1 m NGF)

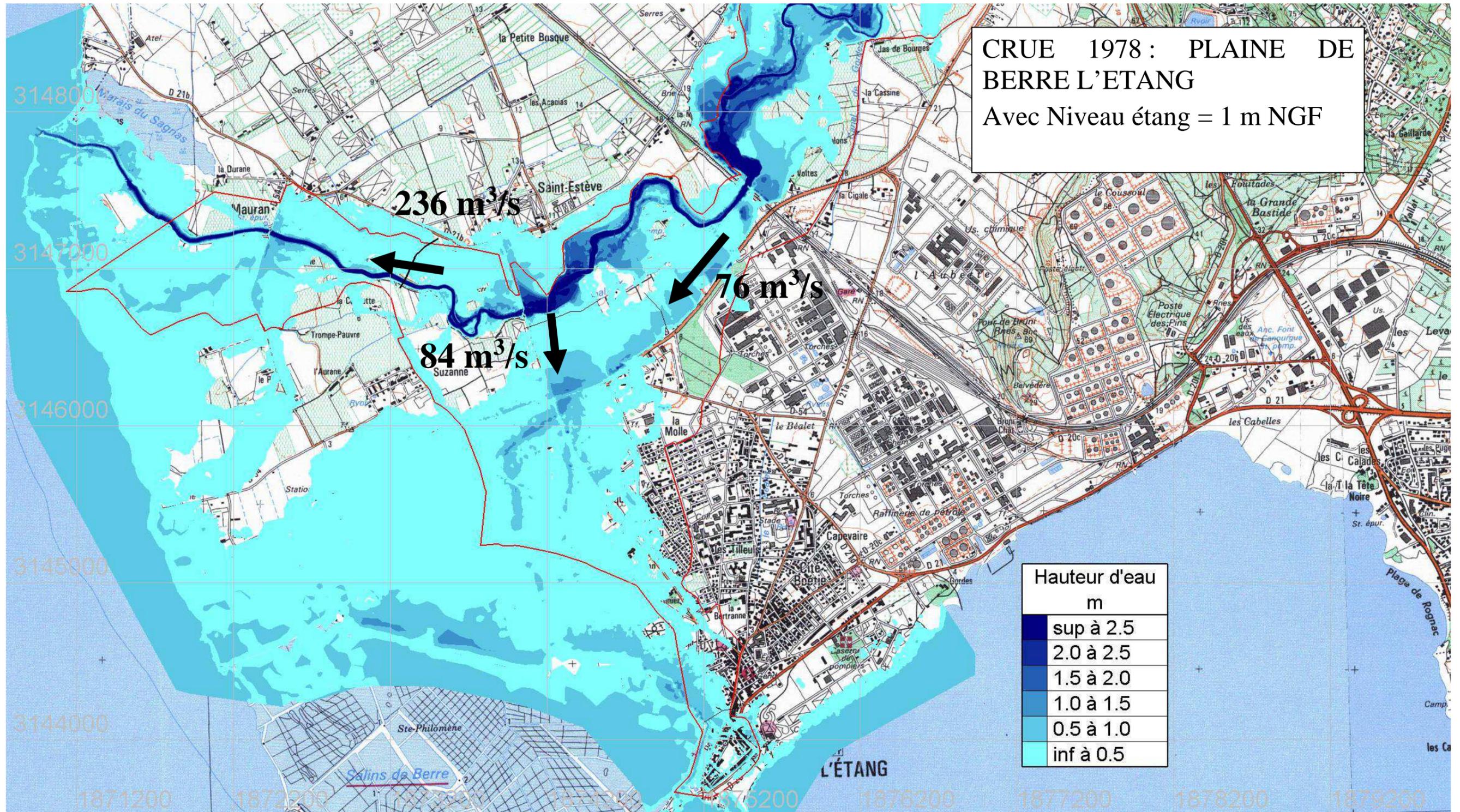
Figure 48 : Cartes des hauteurs et vitesses maximales pour la crue de 1978 – secteur Gorges de Roquefavour / Étang de Berre

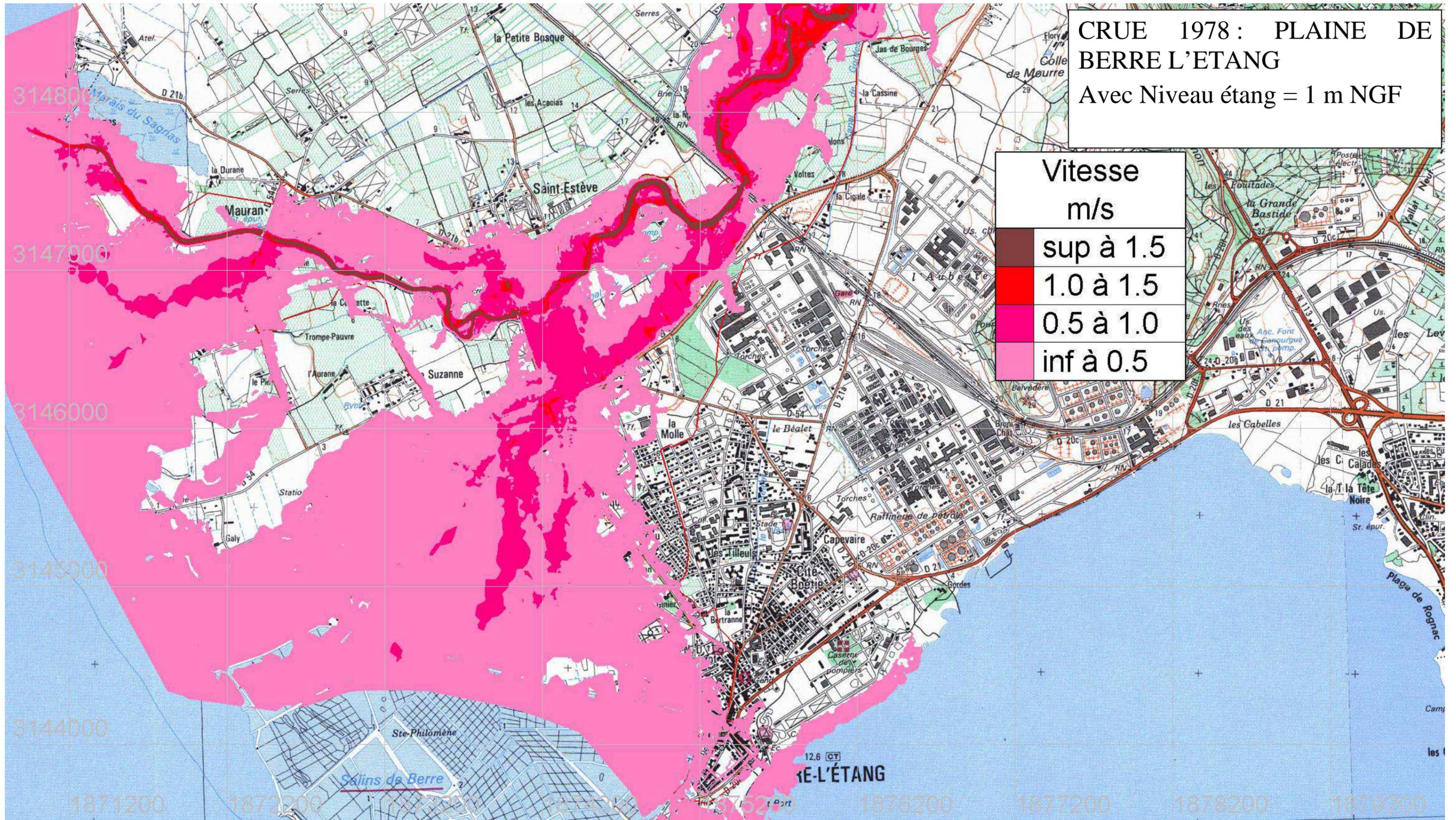






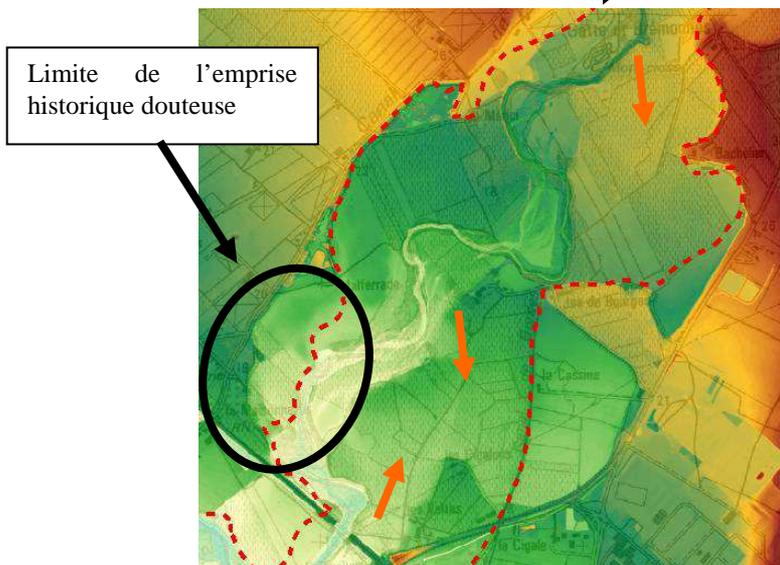
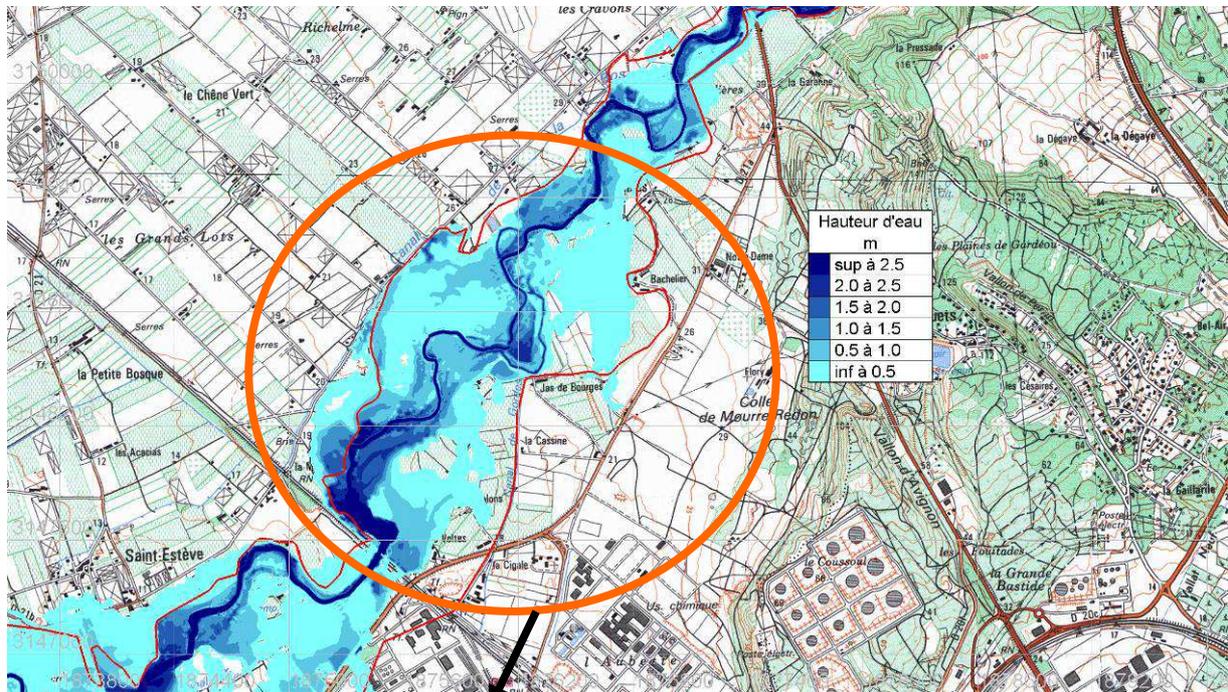






Des zooms ont été réalisés sur les secteurs suivants :

AMONT DE LA VOIE FERREE :



Sur ce secteur, le modèle hydraulique inonde les deux zones d'expansion visibles sur la topographie, mais pas de manière aussi importante que ce qu'indique l'emprise historique.

En amont du pont de la voie ferrée, l'eau bute contre la voie ferrée en remblai, ce qui crée une zone d'accumulation et une légère remontée aval des écoulements

Figure 49 : zoom 1978 : secteur amont de la voie ferrée à Berre

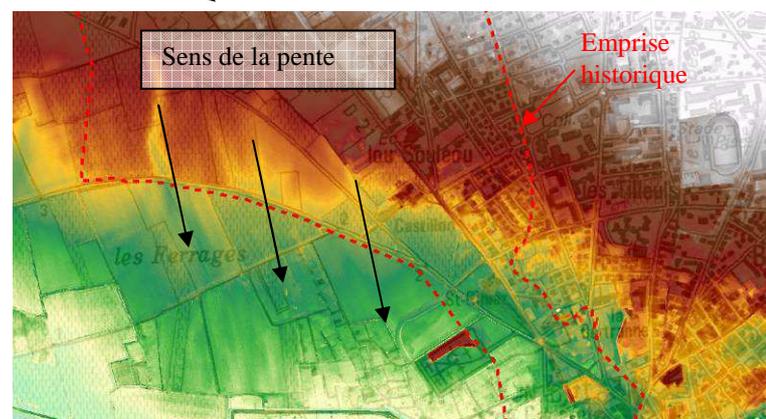
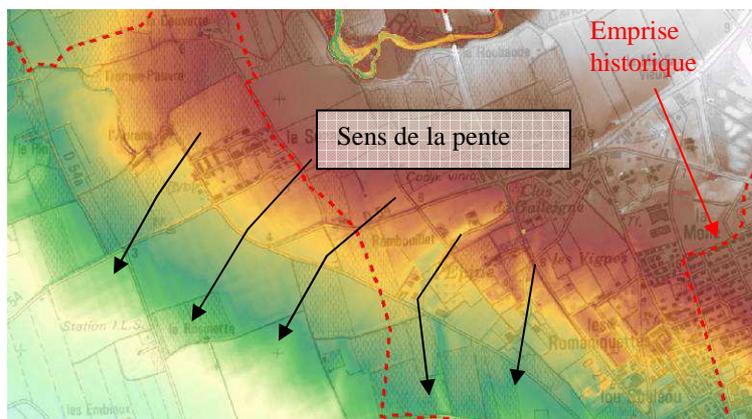
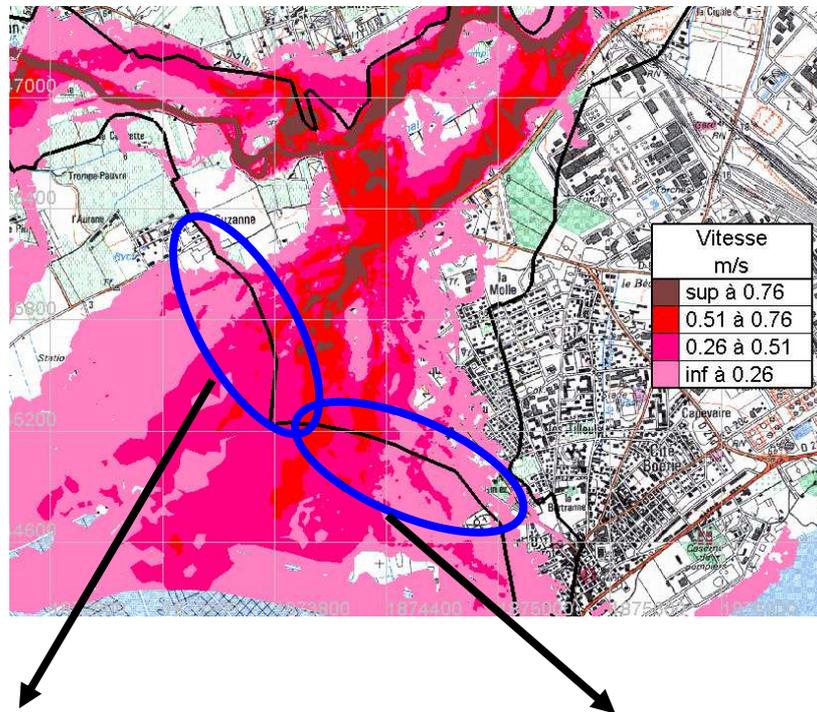
AXE DE DEBORDEMENT VERS LE CENTRE VILLE DE BERRE :

Figure 50 : zoom 1978 : débordements vers le centre de Berre

Les limites indiquées sur l'emprise historique dont nous disposons ne sont pas cohérentes avec la topographie lidar : d'après la topographie, seule une partie de l'écoulement issu du débordement rive gauche de l'Arc rejoint le centre de Berre. L'autre partie s'écoule en suivant la topographie naturelle, suivant un axe sud – sud/ouest. L'emprise de 1978 n'est donc pas en cohérence avec le modèle hydraulique et la topographie sur ce secteur.

D'autre part, sur plusieurs secteurs, la limite en rive gauche est incohérente avec la limite en rive droite et paraît trop haute :

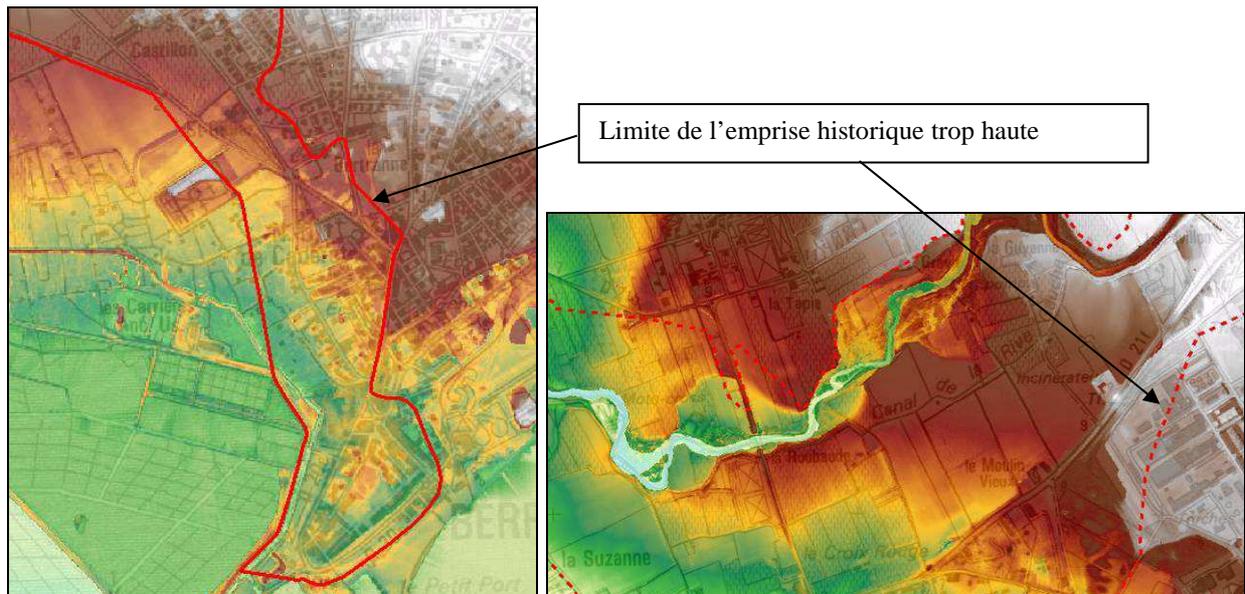


Figure 51 : comparaison LIDAR et emprise historique de 1978 à Berre l'Étang

CENTRE VILLE DE BERRE :

Un témoignage relate « 1,35 m d'eau sur la place de la mairie de Berre, l'eau arrive au milieu de la seconde marche ». Le modèle hydraulique fait apparaître des hauteurs d'eau bien plus faibles sur la place de la mairie et dans le centre ville de Berre :

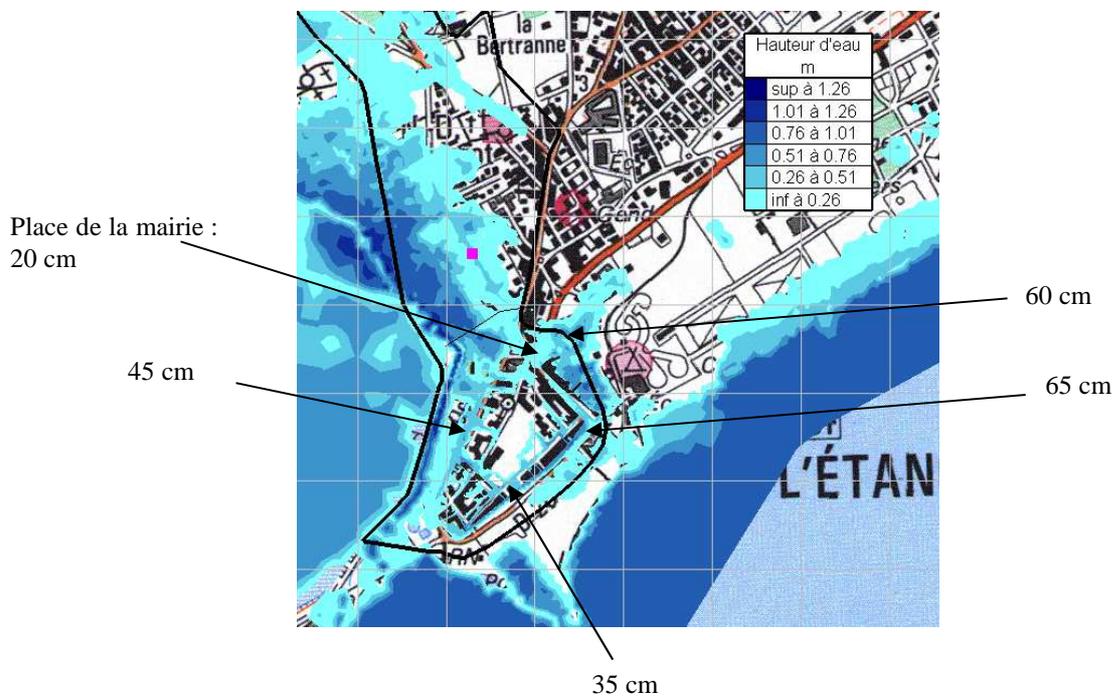


Figure 52 : zoom 1978 : centre ancien de Berre

Cependant, les photos disponibles pour la crue de 1978 à Berre montrent des hauteurs de crue de l'ordre de 50/60 cm plutôt que des hauteurs de plus de 1 m :



Figure 53 : Photos de la crue de 1978 à Berre l'Étang

D'autre part, les photos actuelles de la mairie de Berre montre que la deuxième marche est située à une hauteur bien plus faible que 1,35 m/ TN :



Figure 54 : La mairie de Berre l'Étang

Ainsi, ces éléments nous font conclure que le témoignage selon lequel 1,35 m d'eau a été observé en 1978 sur la place de la mairie n'est pas fiable.

Ainsi, la différence entre l'emprise modélisée à Berre et l'emprise historique est importante. En effet, la réalisation du modèle hydraulique et l'analyse de la topographie montre que les débordements en rive gauche au niveau du secteur de la Guyenne se dirigent pour partie vers le centre de Berre mais pas la totalité.

Sur la partie amont du modèle aval, à Roquefavour, le niveau à l'aval du pont de la RD issu du modèle est de 87,4 m NGF. Notons que pour prendre en compte la quantité importante de végétaux/débris/arbres dans ce secteur, la section du lit mineur a été localement rétrécie. La valeur PHE mesurée en 1978 est de 87,59 m NGF. L'écart est jugé faible.

Au niveau de l'hôtel Arquier, nous ne disposons pas de PHE mais le niveau atteint en 1978 était de 1,20 m au-dessus du 1^{er} étage, soit de l'ordre de 3/4 m de hauteur. Le modèle donne une cote d'eau de 88,4 m NGF pour une cote TN à environ 84.6 m NGF, soit 3.8 m de hauteur d'eau.

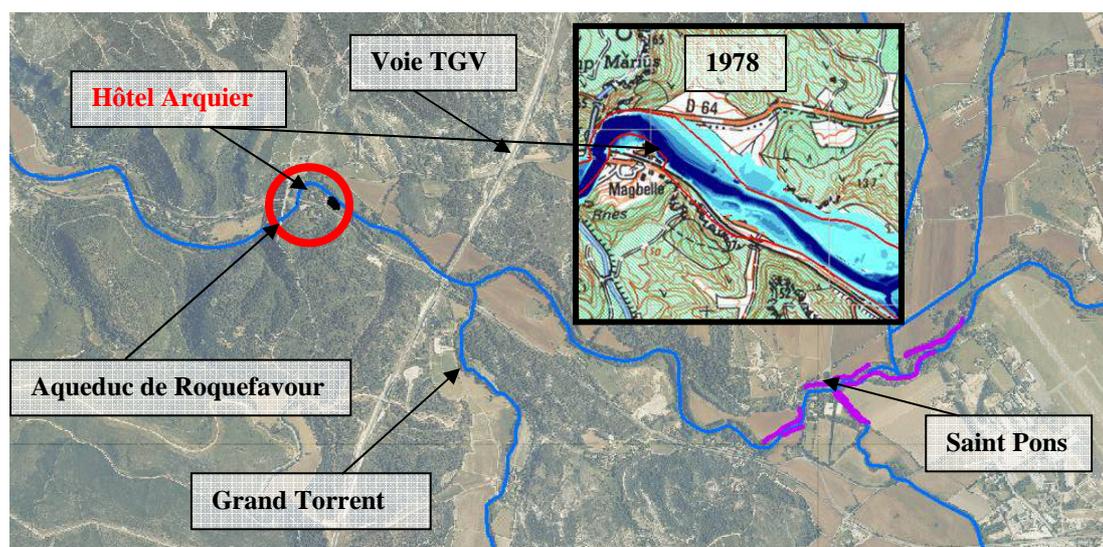




Figure 55 : Localisation et photos de l'hôtel Arquier



Ce qu'il faut retenir...

On retiendra, pour la crue de 1978, que **le modèle est calé sur l'emprise historique disponible**. Les écarts observés localement s'explique par :

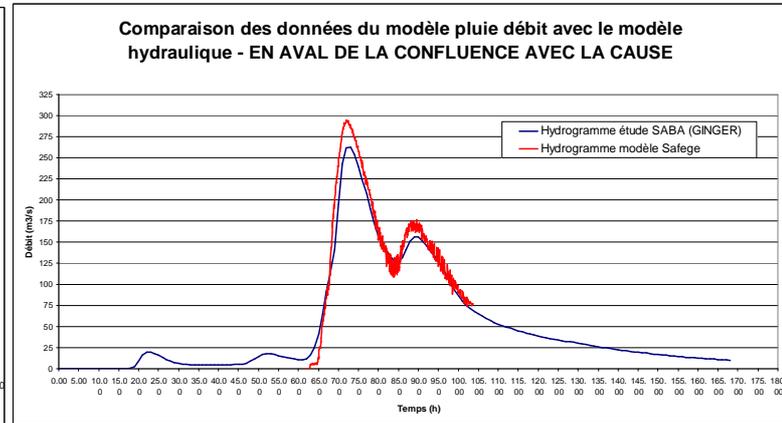
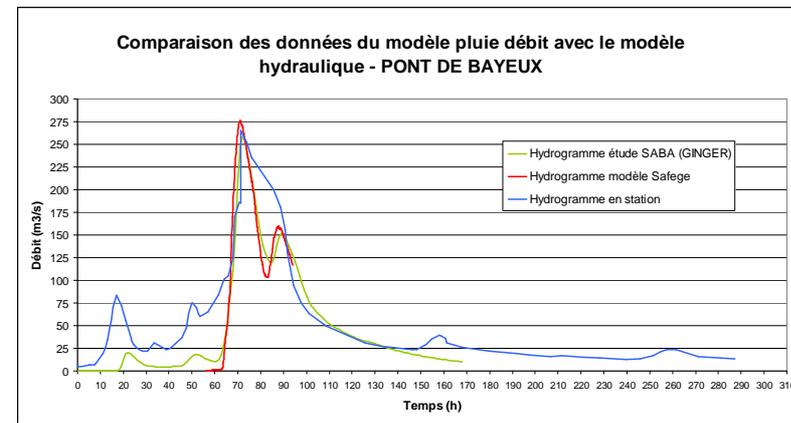
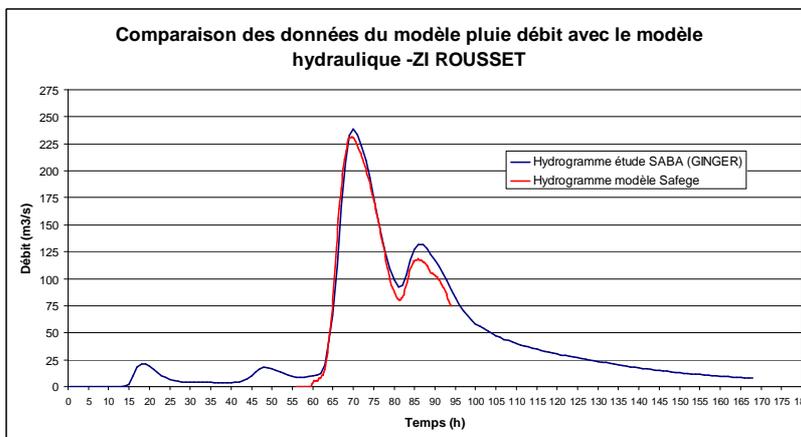
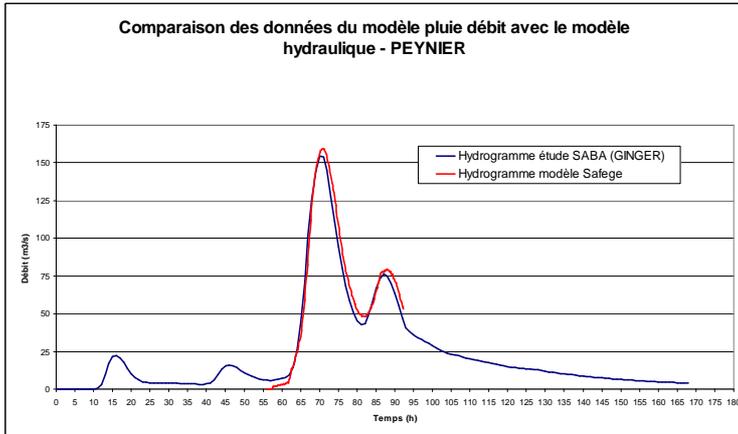
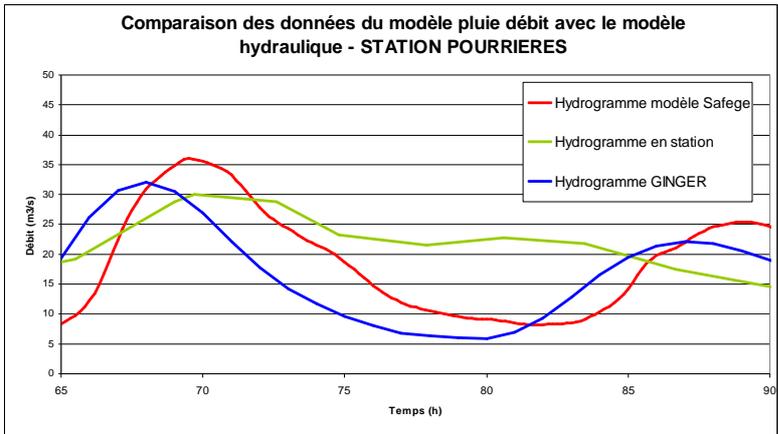
- les remblais en lit majeur (inexistant en 1978 mais présent sur la topographie de 2014) ;
- l'incohérence du tracé de l'emprise historique (par rapport aux données lidar – cas de Berre par exemple) ;
- les emprises dues aux affluents de l'Arc et non à l'Arc.

5.7.4 Comparaison des hydrogrammes du modèle pluie-débit du SABA (Ginger) avec les hydrogrammes extraits du modèle hydraulique

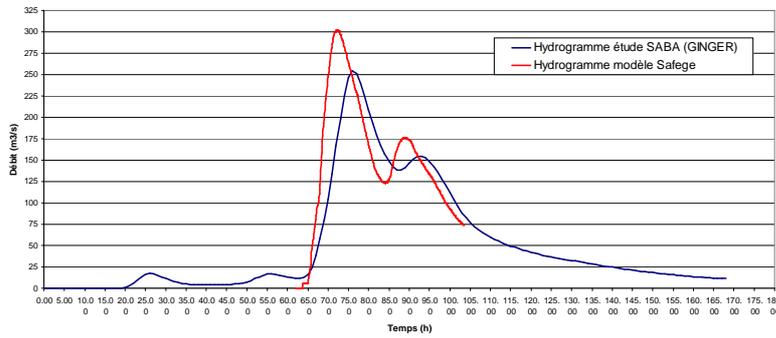
Les hydrogrammes issus du modèle pluie-débit de l'étude de Ginger ont été comparés aux hydrogrammes extraits du modèle hydraulique. Rappelons que le modèle HEC HMS de Ginger est calé sur les hydrogrammes mesurés en station lors de la crue de 1978. Pour mémoire en 1978 :

- trois stations étaient en fonctionnement lors de la crue de 1978 : la station de Pourrières, la station de Pont de Bayeux (Meyreuil) et la station de St Pons (Aix en Provence) ;
- d'après l'étude récente du CEREMA « Assitance à l'extrapolation de courbes de tarage », les débits à la station de Meyreuil ont été « validés bons » alors que les débits à la station de Saint Pons ont été « validés douteux ». Nous n'avons pas d'informations sur la validation des débits à la station de Pourrières.

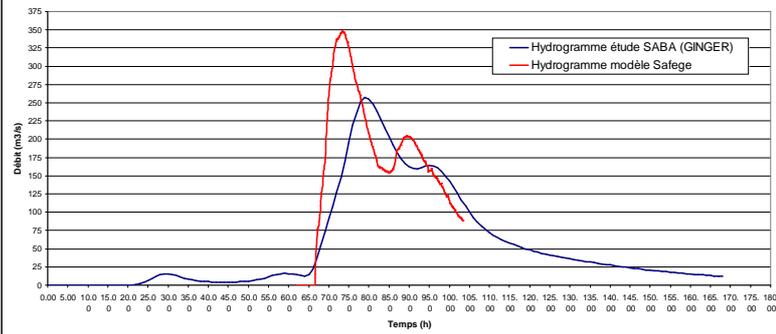
La comparaison de hydrogrammes est présentée ci-dessous, d'amont en aval :



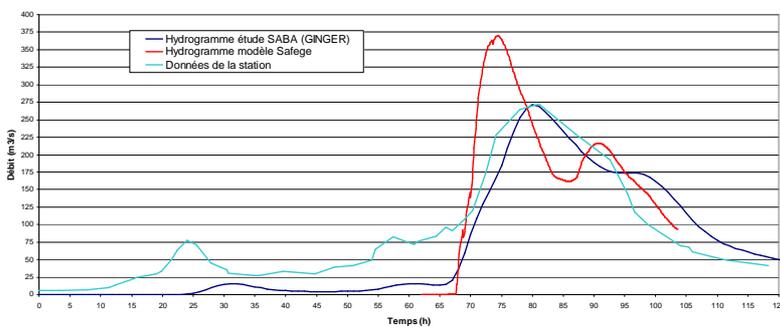
Comparaison des données du modèle pluie débit avec le modèle hydraulique - EN AVAL DE LA CONFLUENCE AVEC LA TORSE



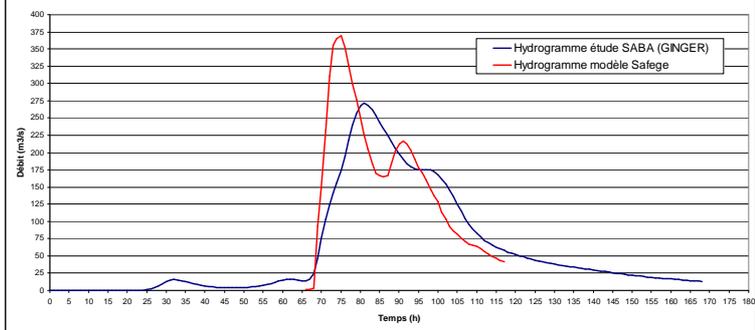
Comparaison des données du modèle pluie débit avec le modèle hydraulique - EN AVAL DE LA CONFLUENCE AVEC LA LUYNES



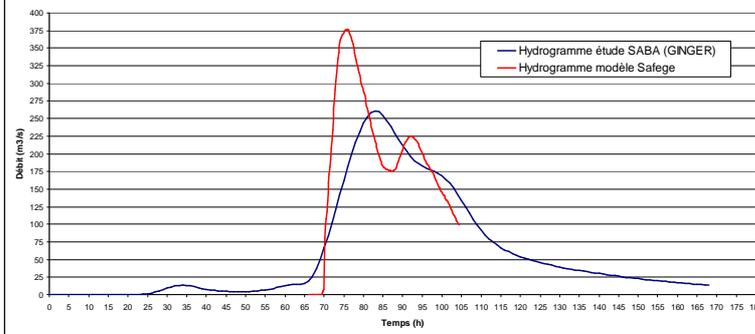
Comparaison des données du modèle pluie débit avec le modèle hydraulique - SAINT PONS



Comparaison des données du modèle pluie débit avec le modèle hydraulique - ROQUEFAVOUR



Comparaison des données du modèle pluie débit avec le modèle hydraulique - au niveau de l'A7 à Berre



Comparaison des données du modèle pluie débit avec le modèle hydraulique - au niveau de Mauran (BERRE)

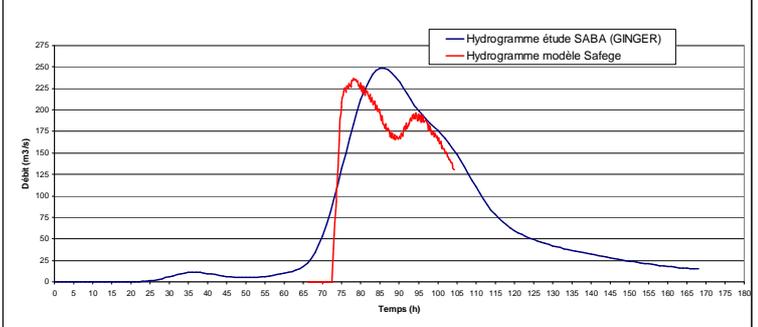


Figure 56 : Crue de 1978 : comparaison des hydrographes du modèle hydraulique, des stations hydrométriques et du modèle pluie débit

Les points de comparaison des débits sont localisés sur la figure suivante. Les vitesses de propagation de la pointe de crue issues du modèle hydraulique sont également indiquées sur la figure :

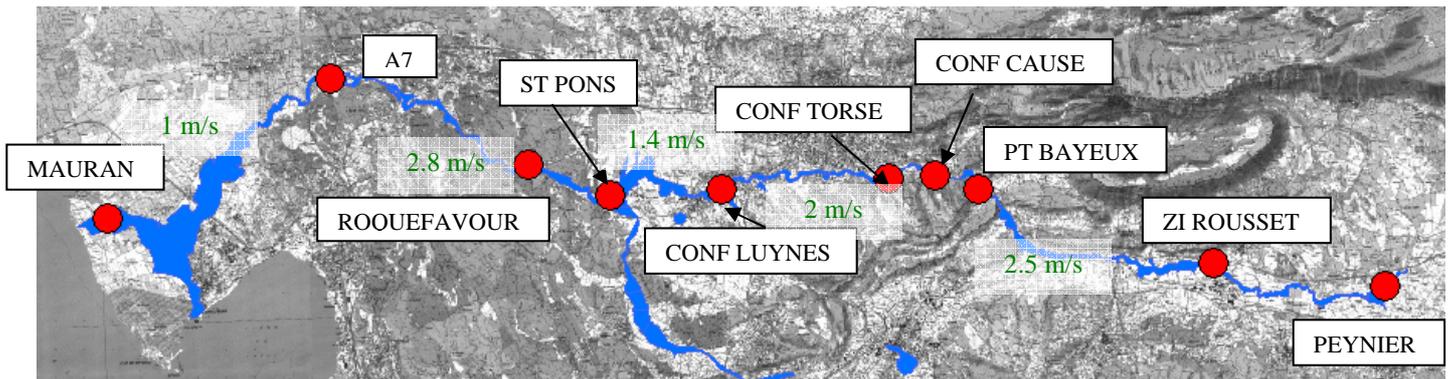


Figure 57 : Localisation des points de comparaison des hydrogrammes et vitesses de propagation issues du modèle hydraulique.

De l'amont du bassin versant jusqu'à la confluence avec la Cause (le Tholonet), la cohérence débits aux stations/débit issu du modèle pluie débit/ débit du modèle hydraulique est jugée bonne.

A partir de ce secteur des écarts importants à la fois en termes de débit de pointe et de chronologie apparaissent. Ainsi, à Roquefavour (verrou hydraulique du bassin versant) : le débit issu du modèle hydraulique est de $369 \text{ m}^3/\text{s}$ alors qu'il est de $271 \text{ m}^3/\text{s}$ dans le modèle pluie. De plus, un décalage de 6 h des pointes est mis en avant par cette comparaison.

Le graphique du secteur de Saint Pons montre que le modèle pluie débit (GINGER) est bien calé sur les débits enregistrés à la station hydrométrique. Toutefois, **cette station a été validée douteuse sur l'année 1978**. De plus, un témoignage de 1978 nous dit : « à Saint Pons, l'érosion de la rive occasionnée par la crue endommage la taille de jaugeage ». D'autre part l'analyse des temps de propagation laisse supposer que les débits enregistrés sont effectivement douteux :

- **le temps de propagation estimé du pic de crue entre Meyreuil (Pont de Bayeux) et Saint Pons est de 9h en 1978, pour un linéaire de 17 km environ, soit une vitesse de propagation de 0.5 m/s qui paraît anormalement basse, le secteur concerné étant globalement peu débordant ; Avec le modèle hydraulique, le temps de propagation est de 3,6 h, ce qui correspond à une vitesse moyenne de 1.3 m/s ;**
- d'autre part, avec le calage du modèle de GINGER, le tronçon Pont de Bayeux – confluence avec la Cause (3 km) est parcouru en 1 h, alors que le tronçon confluence avec la Cause – pont de l'Arc (4 km) est parcouru en 6h. La localisation des tronçons est présentée ci-dessous :

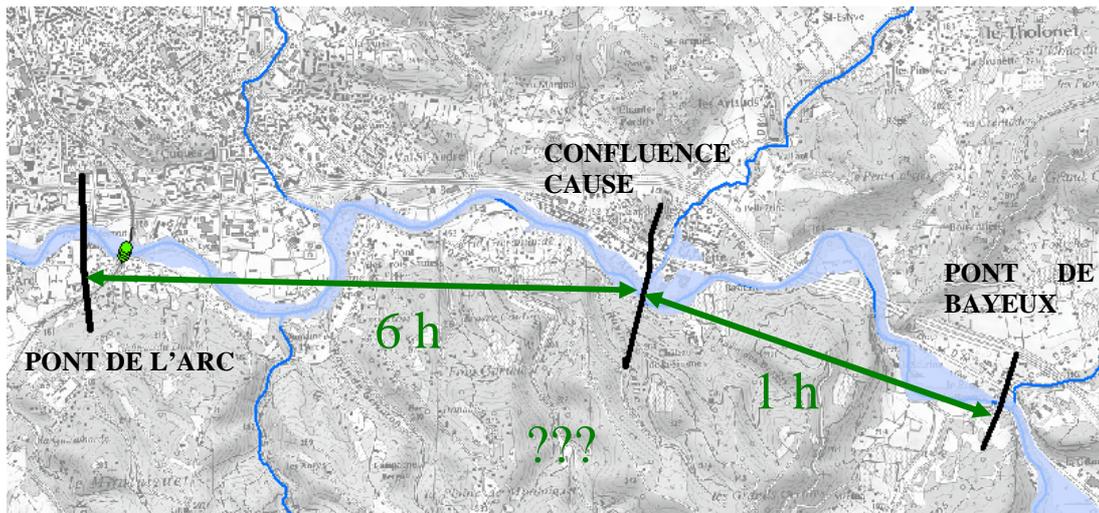


Figure 58 : vitesses de propagation sur le tronçon Pont de Bayeux – Pont de l'Arc d'après de modèle pluie-débit

Concernant, la valeur des débits de pointe, l'écart entre les deux modèles est important (271 m³/s et 369 m³/s). Notons que c'est entre pont de Bayeux et Saint Pons que se trouvent les plus gros affluents de l'Arc (la Cause, la Torse, La Luynes, La jouïne). Tous ont produit des débits importants pendant la crue de 1978 (les valeurs ci-dessous sont celles extraites des hydrogrammes du modèle pluie-débit de l'étude de mise en cohérence des études hydrologiques et hydrauliques sur le bassin versant de l'Arc – GINGER – SABA- 2010 – dans le modèle hydraulique, les injections des affluents sont traités de la même manière que dans le modèle pluie débit – cf § 3.2.1):

- Torse : 13.6 m³/s
- Cause : 12.3 m³/s
- Luynes : 22.4 m³/s
- Ensemble Petite Jouïne/Grand Vallat : 18.3 m³/s
- Vallons du centre d'Aix en Provence : 29 m³/s
- La Thumine : 11.9 m/s

Ainsi, si on en croit les mesures aux stations, les 107,5 m³/s générés par les affluents n'ont entraînés aucune hausse de débit dans l'Arc. Seule la présence de nombreux embâcles de taille importante pourrait expliquer un tel écrêtement. L'emprise de la crue de 1978 dont nous disposons ne laisse pas supposer la présence d'embâcles majeurs.

Le secteur de l'aérodrome des Milles constitue une zone d'écrêtement des débits de l'Arc : sur ce secteur l'emprise de zone inondable issue de la modélisation hydraulique est proche de l'emprise dont nous disposons pour la crue de 1978, ce qui laisse penser que le modèle représente correctement le phénomène qui s'est déroulé en 1978. Toutefois l'écrêtement mesuré n'est pas à la hauteur de ce qui est mesuré entre les stations de pont de Bayeux et de Saint Pons (voir également § 4.7.5). L'emprise est représentée sur la figure suivante :

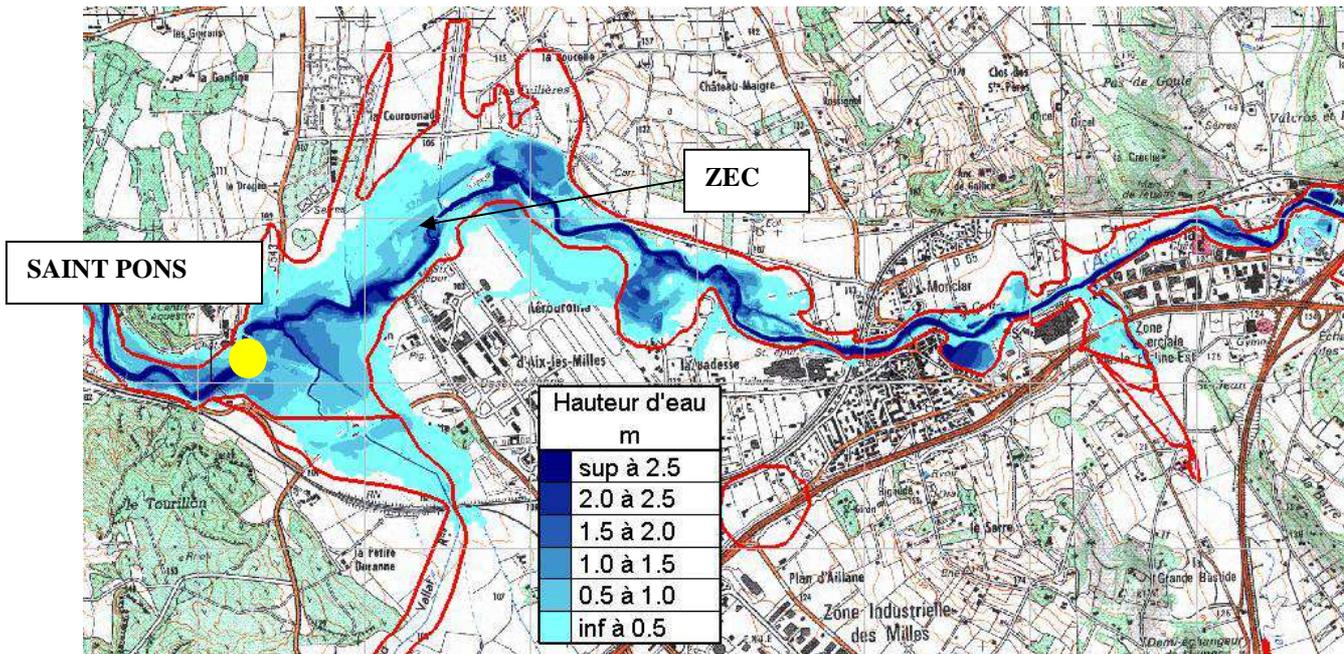


Figure 59 : Hauteur d'eau en 1978 dans la ZEC plaine des Milles

Ci-dessous est détaillé un extrait du rapport de GINGER qui traite du temps de propagation élevé entre les deux stations :

« Les hydrogrammes de Pont de Bayeux et de St Pons sont comparables ce qui indique une production faible des sous bassins versants du secteur d'Aix. Toutefois, les précipitations du 16 janvier 1978 sur Aix-en-Provence présentent un cumul de 93.3 mm et les jours précédents un cumul total de 42.8 mm. Ces valeurs sont pratiquement similaires aux précipitations de l'événement de décembre 2003. Lors de celui-ci, la partie intermédiaire produisait un débit de pointe à Roquefavour de 181.3 m³/s. Il convient de comprendre la raison pour laquelle ce débit n'a pas été répercuté lors de cette crue. On note également que le temps de transfert de la pointe de crue est de 9 heures ce qui est supérieur à la valeur observée en 2003 ainsi qu'aux valeurs répertoriées dans la bibliographie. [...] Les pluies d'Aix ont vraisemblablement produit des débits qui ont été écrêtés du fait du ralentissement du temps de transfert entre Pont de Bayeux et St Pons. Les raisons de ce ralentissement sont à chercher dans la configuration du lit majeur, et la présence d'embâcles (l'étude historique indique entre autres la formation d'un embâcle au Pont-de l'Arc due à l'encadrement d'une cuve à gaz dans un ouvrage de franchissement, *témoignage recueilli lors de l'entretien avec la commune de Beaucueil*). »

Ainsi, la réalisation du modèle hydraulique met en avant l'incohérence des données de la station de Saint Pons sur laquelle GINGER a calé son modèle hydrologique. **Ainsi, dès l'entrée sur Aix en Provence, les différences entre les hydrogrammes issus du modèle pluie débit et les hydrogrammes de propagation de la crue dans le modèle hydraulique sont importantes, à la fois en terme de débit de pointe et de chronologie.**

La réalisation du modèle hydraulique « aval » (de Roquefavour à l'exutoire) montre qu'un débit de 271 m³/s à St Pons (débit mesuré par la station

hydrométrique) ne permet pas d'inonder Berre à la hauteur de ce que la commune a été inondée en 1978. Ceci conforte l'idée que la mesure à la station de Saint Pons est fautive pour la crue de 1978.

La carte ci-dessous superpose les résultats de la crue de 1978 sur Berre issus de la simulation retenue (débit amont = 370 m³/s - en orange) et de la simulation avec les débits Ginger (débit amont = 270 m³/s - en bleu). En rouge est affichée l'emprise historique de la crue de 1978.

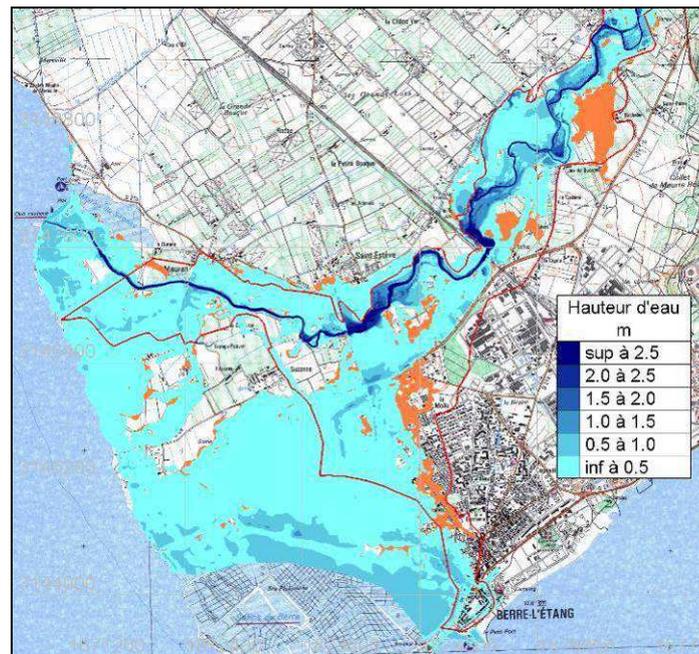


Figure 60 : Crue de 1978 : comparaison de la zone inondable de Berre avec les débits GINGER et avec les débits « modèle hydraulique ».

On remarque que les résultats de la modélisation avec le débit le plus élevé (370 m³/s) sont plus proches de l'emprise historique que les résultats de la modélisation avec le débit le plus faible.

5.7.5 Analyse des volumes sur le tronçon central (des gorges de Langesse à Saint Pons)

A. Principe de la démarche

Le raisonnement mené est le suivant :

- l'emprise de crue de 1978 est connue. De fait, nous connaissons le volume d'eau mobilisé sur le tronçon étudié (Gorges de Langesse – Gorges de Roquefavour) pour cette crue (en nous basant sur la seule donnée topographique); Cette donnée est considérée comme fiable;

- L'analyse des hydrogrammes issus du modèle pluie-débit Ginger et des stations hydrométriques permet de calculer le volume mobilisé sur ce tronçon d'après ces données en station;

- **La comparaison de ces deux données (volume mobilisé sur le tronçon d'après les données en station et volume mobilisé d'après les emprises de crues connues) permettra de déterminer si l'écrêtement mesuré en station est réaliste ou pas. Ainsi l'objectif de cette analyse n'est pas de montrer si le calage du modèle hydraulique est juste ou faux mais plutôt d'analyser la cohérence de ce qui ressort des enregistrements aux stations hydrométriques.**

B. Résultats

Ci-dessous sont présentées les courbes de cumulées en entrée et sortie du tronçon étudié pour le modèle pluie-débit (gauche) et le modèle hydraulique (droite) :

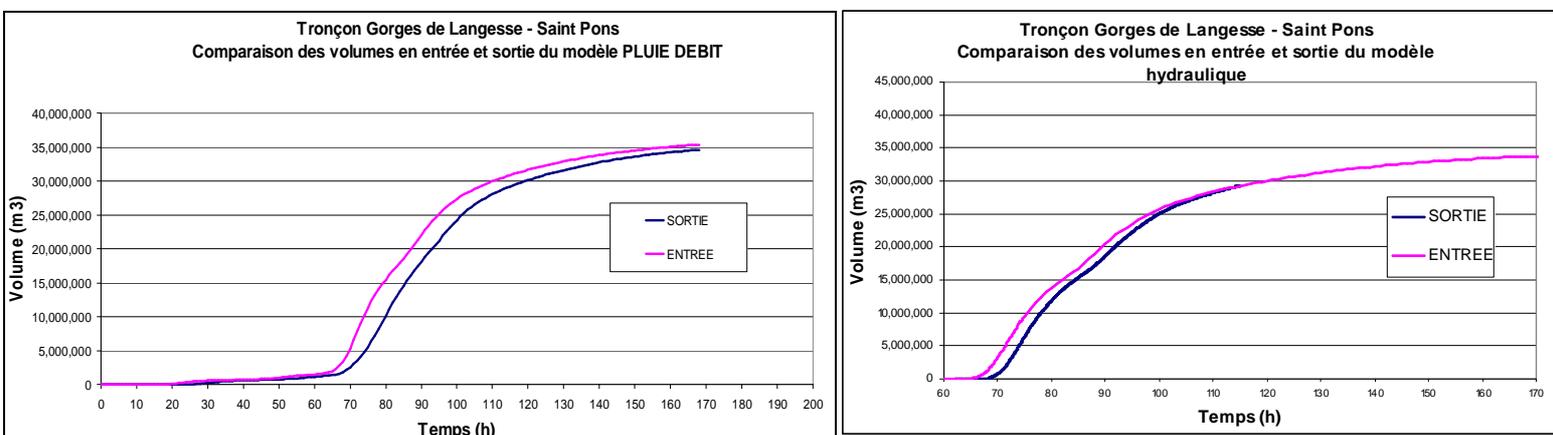


Figure 61 : Volumes cumulés pour la crue de 1978 pour le modèle pluie-débit et le modèle hydraulique – tronçon Gorges de Langesse/ Saint Pons

L'écart entre les courbes d'entrée et sortie correspond au volume d'eau qui se trouve entre l'entrée et la sortie du tronçon étudié à un instant donné (ce qui comprend à la fois volume en lit mineur et en lit majeur (dont la ZEC de la plaine des Milles)). L'écart entre ces deux courbes en fonction du temps est présenté sur les figures ci-dessous (modèle pluie-débit à gauche et le modèle hydraulique à droite) :

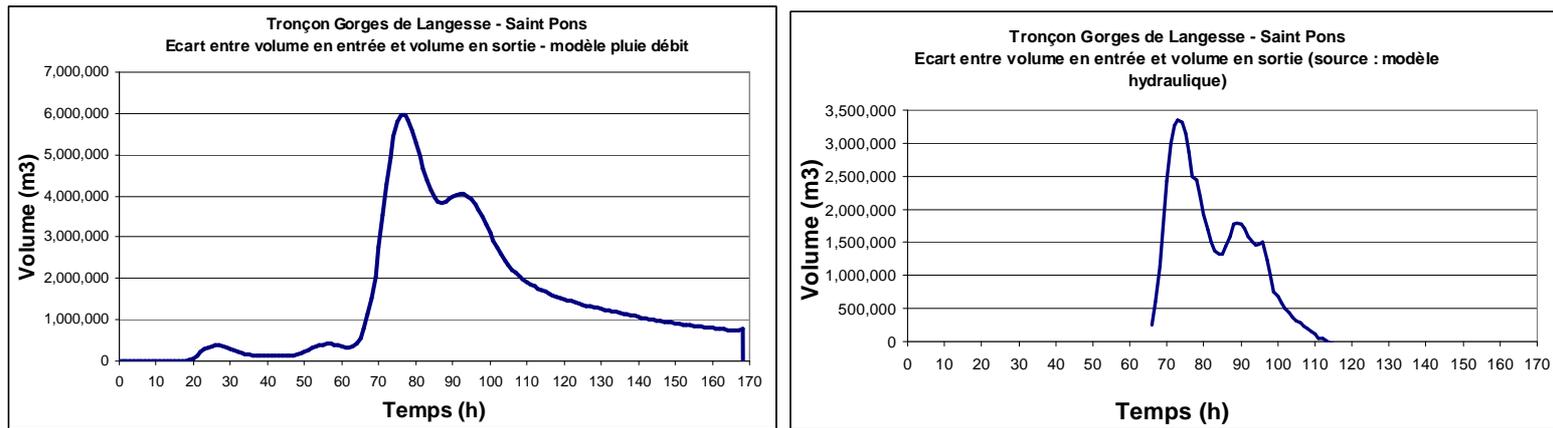


Figure 62 : Écart au cours du temps entre le volume en entrée et le volume en sortie sur le tronçon Gorges de Langesse/ Saint Pons pour le modèle pluie débit et le modèle hydraulique

Au pic de la crue, le volume sur le tronçon Gorges de Langesse-Saint Pons est de 6 millions de m³ selon le modèle pluie débit calé sur les stations hydrométriques et de 3,3 millions de m³ selon le modèle hydraulique.

La connaissance de l'emprise de la crue de 1978 et de la topographie du tronçon permet de déterminer quel a été réellement le volume entre les gorges de Langesse et la station de Saint Pons :

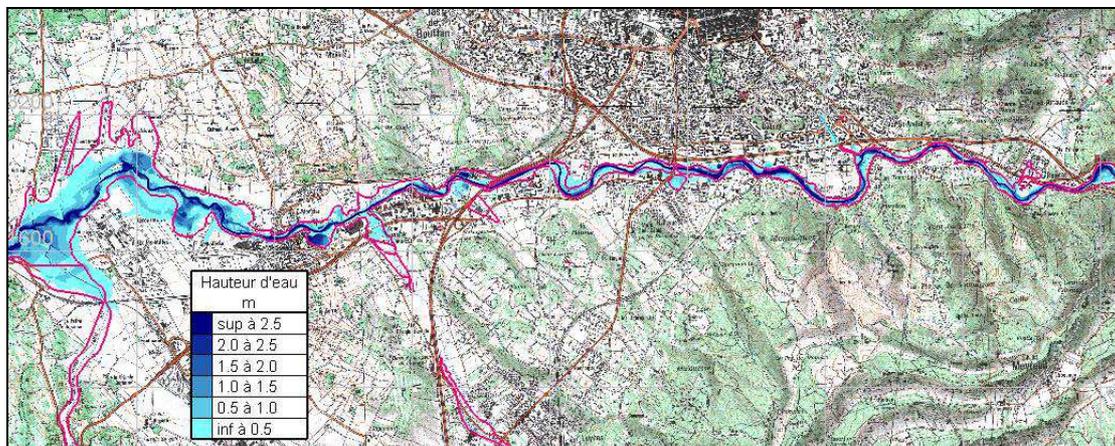


Figure 63 : Hauteurs d'eau issues du modèle hydraulique de la crue de 1978 et emprise historique de la crue sur le secteur Gorges de Langesse/Saint Pons

Le modèle hydraulique étant calé sur l'emprise historique de 1978, nous avons déterminé le volume sur le tronçon en multipliant pour chaque maille en eau, la hauteur par la surface de la maille. Le volume obtenu est de 3,4 millions de m³ (dont 1,6 millions de m³ dans la ZEC de la plaine des Milles). Le modèle étant calé sur l'emprise de crue, ce calcul revient à calculer le volume sur la seule base de la donnée topographique.

Notons qu'il est normal de trouver une cohérence entre le volume sur le tronçon et le volume déterminé par l'analyse des hydrogrammes modèles puisque les deux calculs issus du modèle hydraulique sont nécessairement concordants. L'objectif de cette analyse est de comparer le volume réellement observé pendant la crue entre les deux stations avec le volume issu de l'analyse des données en station.

Ainsi, pour que l'écrêtement de la crue de 1978 sur le tronçon soit celui enregistré par les stations hydrométriques, il aurait fallu qu'un volume de 6 millions de m³ soit « stocké » entre les gorges de Langesse et Saint Pons. Or ce volume n'était que de l'ordre de 3,5 millions de m³ en 1978. **Cette analyse conforte l'idée que le débit de pointe de Saint Pons a été largement sous-estimé par la station hydrométrique en 1978.**



Ce qu'il faut retenir...

La comparaison des hydrogrammes du modèle hydraulique avec les hydrogrammes issus des stations hydrométriques met en évidence des **écarts importants à la station de Saint Pons, à la fois en termes de débit de pointe mais aussi d'arrivée du pic de crue (pour la crue de 1978 uniquement concernant ce dernier point).**

En station, le temps de parcours du pic de crue entre Pont de Bayeux et Saint Pons est de 9 h (0.5 m/s), alors qu'il est de 3h30 (1.3 m/s) dans le modèle hydraulique. Le débit de pointe mesuré en station à Saint Pons est de 265 m³/s alors qu'il est de 370 m³/s dans le modèle hydraulique.

La **station hydrométrique de Saint Pons a été validée douteuse sur l'année 1978** et un témoignage de 1978 nous dit : « à Saint Pons, l'érosion de la rive occasionnée par la crue endommage la taille de jaugeage ».

L'analyse des volumes sur le tronçon Gorges de Langesse/Saint Pons montre que **l'écrêtement mis en avant pas le modèle pluie débit** (calé sur les stations hydrométriques) **n'est pas réaliste**, au regard des apports importants des affluents (Torse, Cause, Jouïne.. ect..).

5.7.6 Conclusion de la modélisation de la crue de 1978

Le modèle est calé sur la crue de 1978. On retiendra comme paramètre de calage :

- réduction de section au droit de certains ouvrages pour représenter la présence importante d'embâcles lors de cette crue ;
- rugosité en lit mineur augmentée (coefficient de Strickler diminué) sur la partie aval du linéaire de l'Arc pour représenter la présence d'une quantité importante de débris dans l'Arc.

A Saint Pons, des écarts importants en termes de débit de pointe et d'arrivée du pic de crue sont observés entre les données modèles et les données stations. La valeur du débit de pointe en station est considérée comme peu fiable (retour d'expérience du SPC).

En revanche, même si elle est possible, l'erreur de chronologie en station est plus difficile à expliquer. La modélisation de la crue de calage lit mineur (2008) permettra de valider le calage du modèle via l'étude de la propagation entre Pont de Bayeux et Saint Pons pour cette crue.

5.8 RESULTATS DE LA MODELISATION DE LA CRUE DE 2008

5.8.1 Généralités

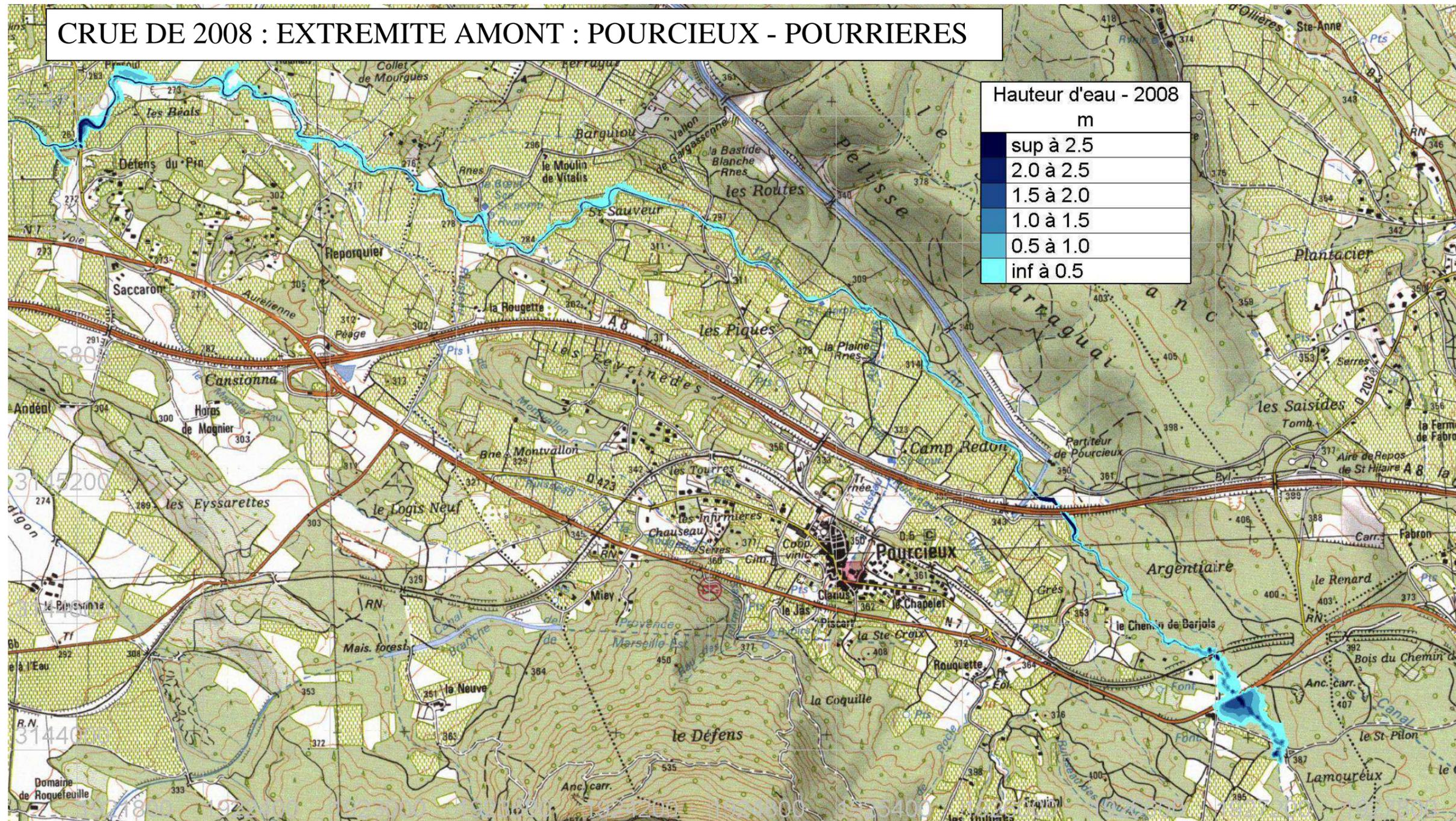
L'objectif de cette modélisation est double :

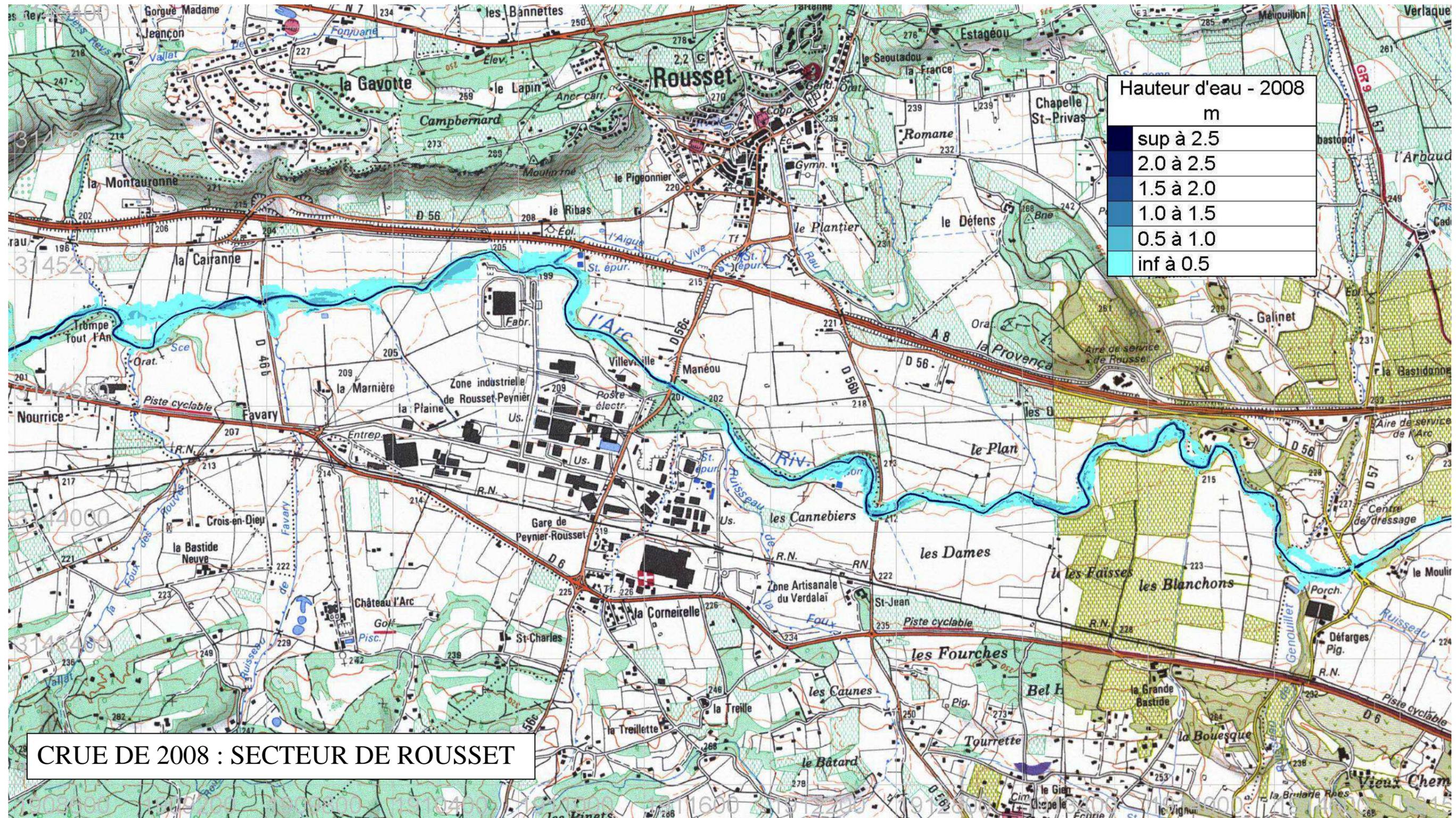
- vérifier le calage en lit mineur du modèle ;
- vérifier que le modèle est cohérent au niveau de la chronologie entre pont de Bayeux et Roquefavour.

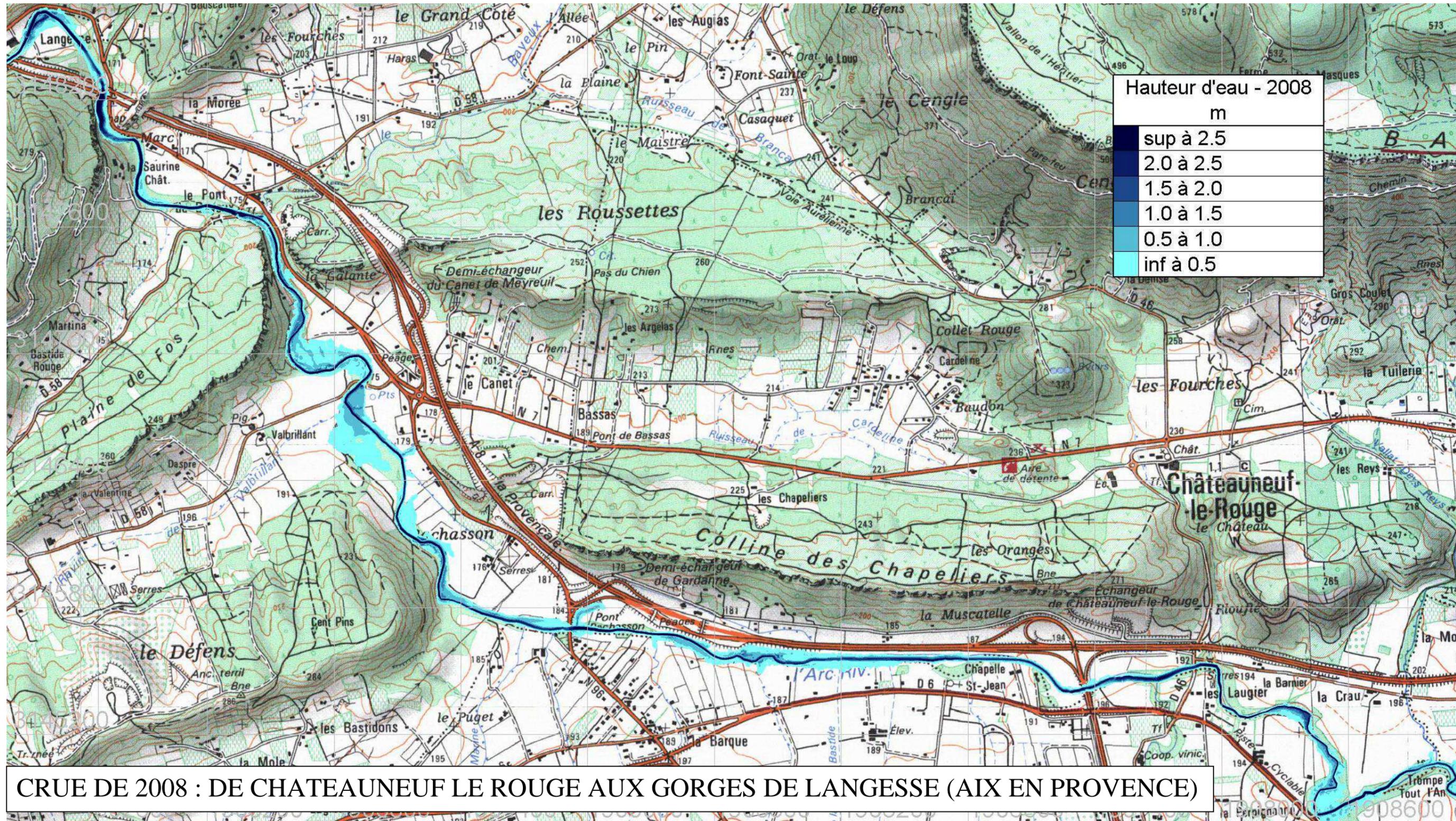
Notons que la station de « Saint Pons » qui était en fonctionnement en 1978 ne fournissait pas d'enregistrement lors de la crue de 2008. En effet, elle a été remplacée par la station de Roquefavour, située environ 4 km en aval. Entre Saint Pons et Roquefavour, l'Arc traverse un secteur encaissé où l'expansion est faible.

5.8.2 Modèle amont (de l'amont du bassin versant aux gorges de Langesse)

Figure 64 : Cartes des hauteurs d'eau pour la crue de 2008 –modèle amont

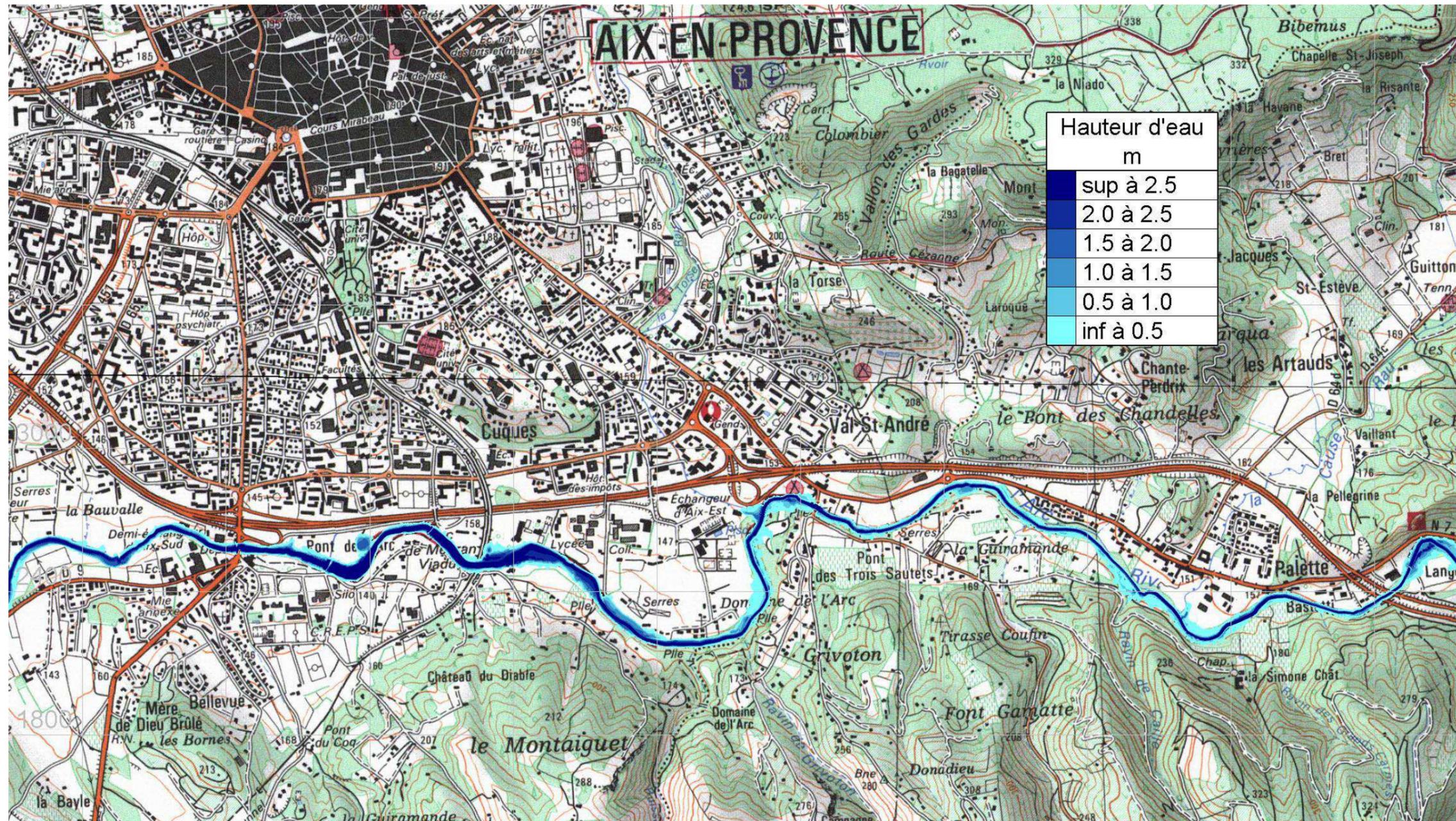






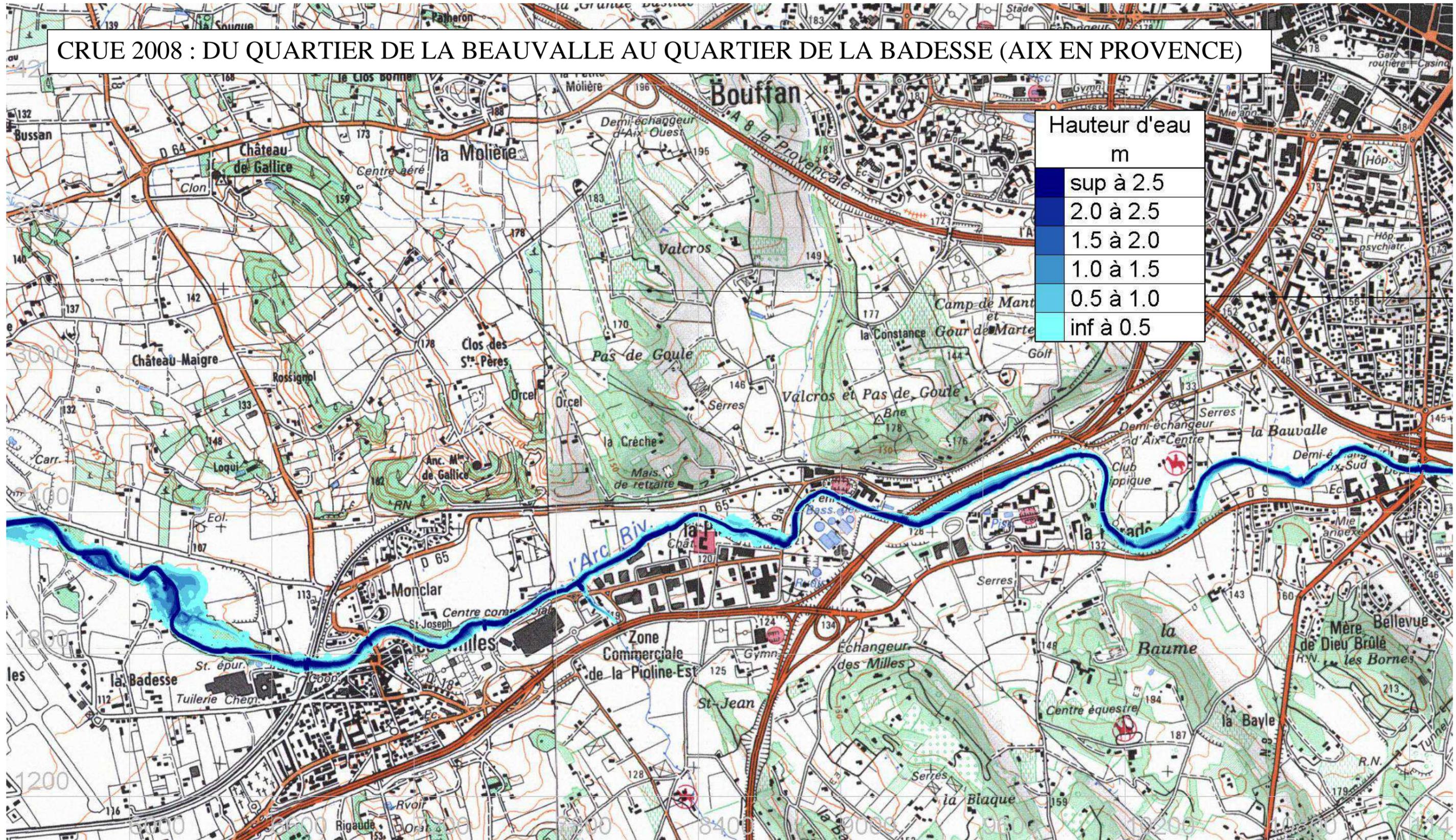
5.8.3 Modèle centre (des gorges de Langesse aux gorges de Roquefavour)

Figure 65 : Cartes des hauteurs d'eau pour la crue de 2008 – modèle centre

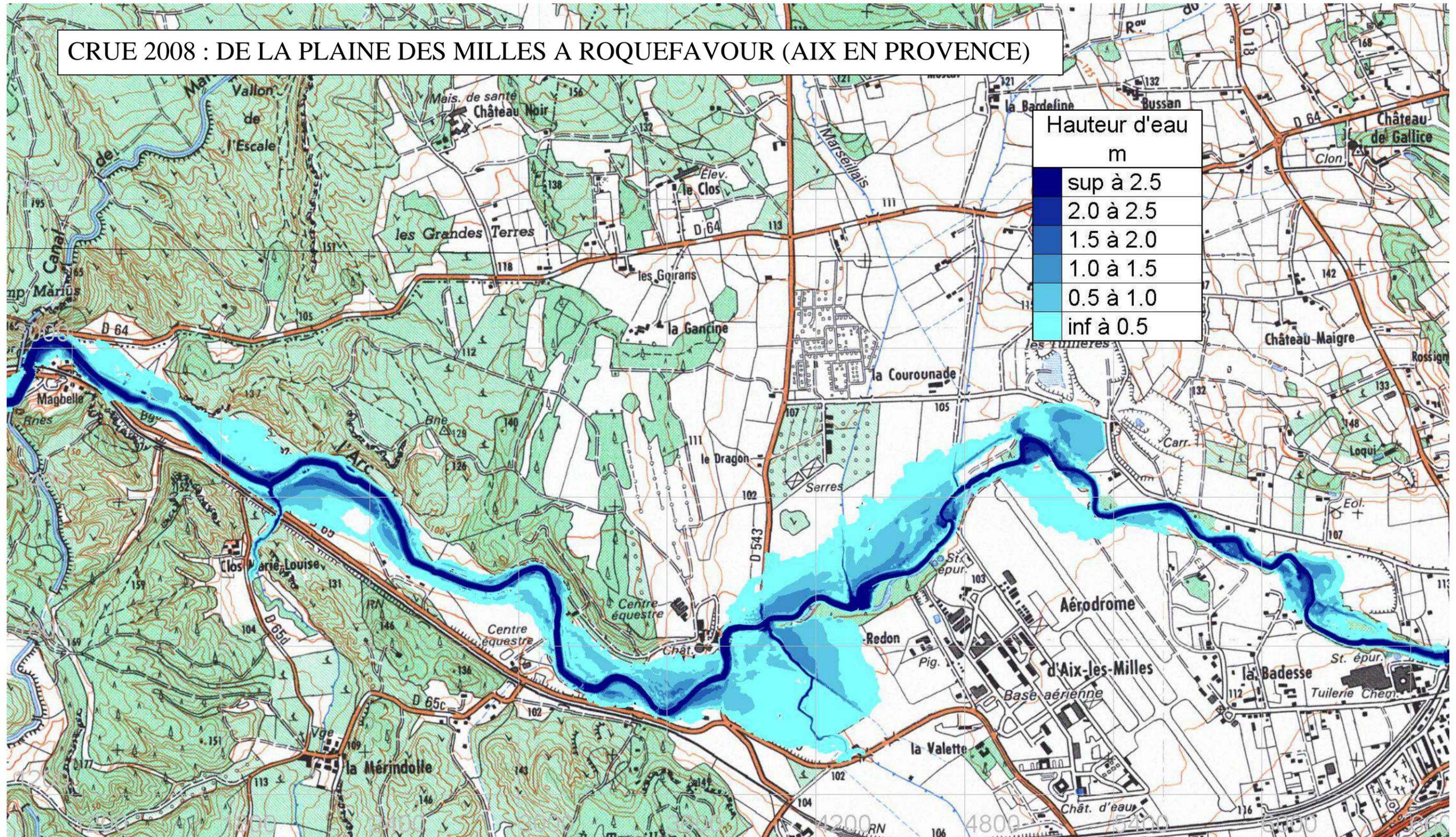


CRUE 2008 : DES GORGES DE LANGESSE (MEYREUIL) AU QUARTIER DE LA BEAUVALLE (AIX EN PROVENCE)

CRUE 2008 : DU QUARTIER DE LA BEAUVALLE AU QUARTIER DE LA BADESSE (AIX EN PROVENCE)

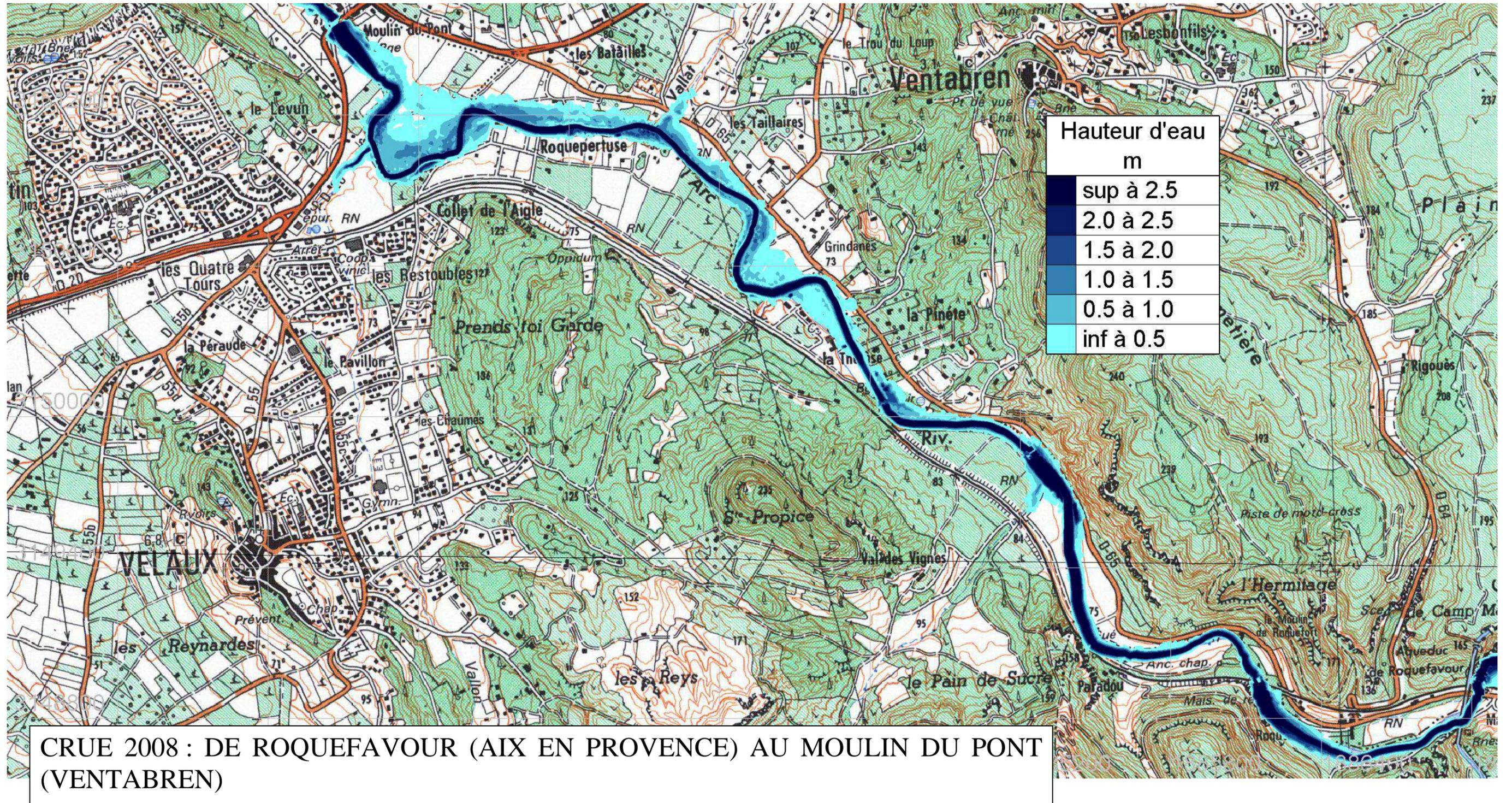


CRUE 2008 : DE LA PLAINE DES MILLES A ROQUEFAVOUR (AIX EN PROVENCE)

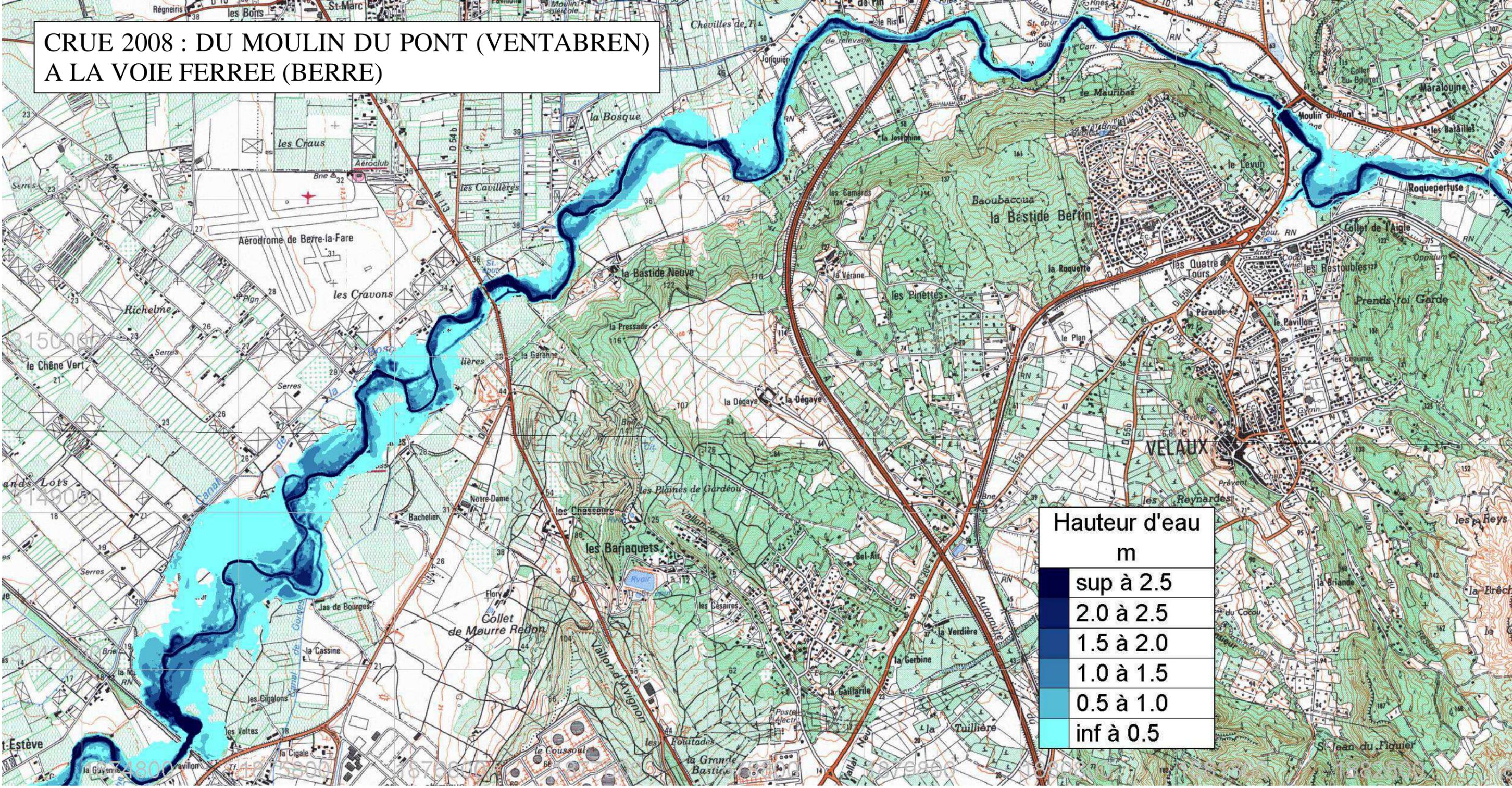


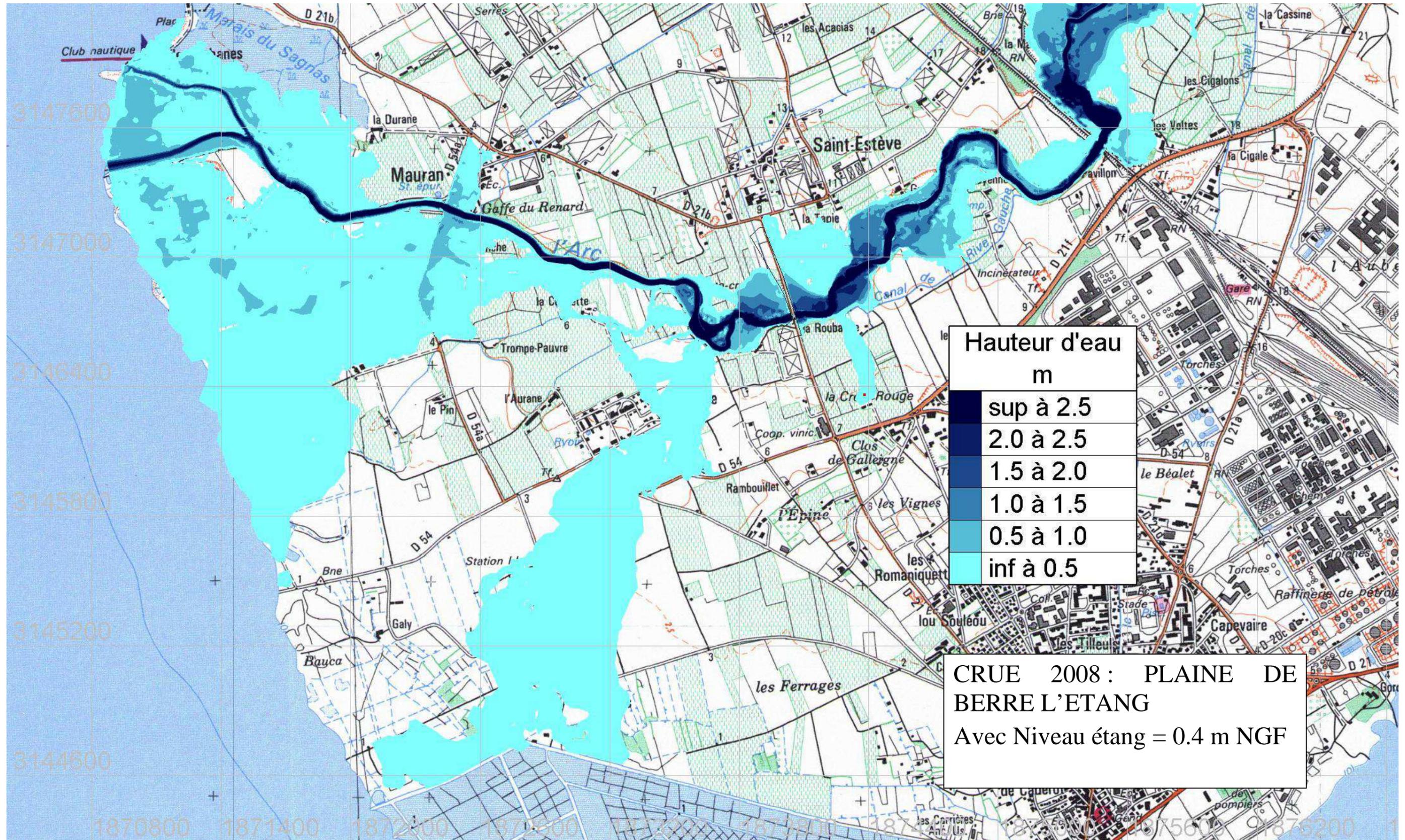
5.8.4 Modèle aval (des gorges de Roquefavour à l'étang de Berre)

Figure 66 : Cartes des hauteurs d'eau pour la crue de 2008 – modèle aval



CRUE 2008 : DU MOULIN DU PONT (VENTABREN) A LA VOIE FERREE (BERRE)





5.8.5 Analyse des résultats de la modélisation de la crue de 2008

5.8.5.1 Analyse de la chronologie

Les graphiques ci-dessous représentent la comparaison des hydrogrammes issus du modèle hydraulique avec les hydrogrammes issus des stations hydrométriques sur le tronçon Pont de Bayeux, Roquefavour :

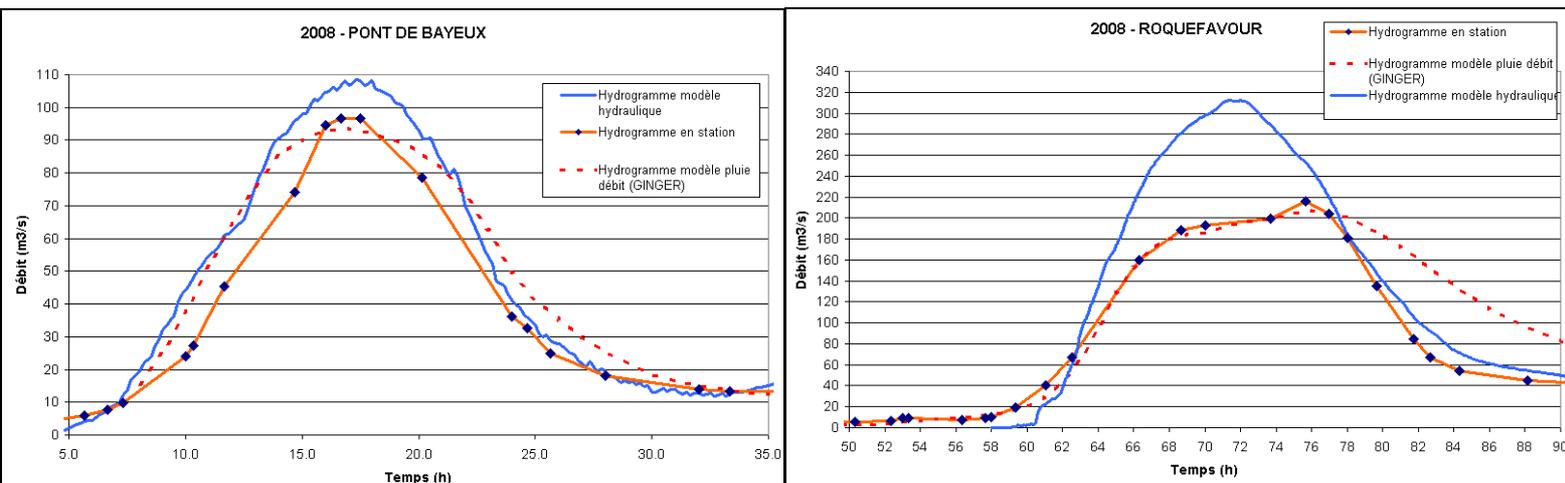


Figure 67 : Comparaison des différents hydrogrammes pour la crue de 2008

On remarque :

- que les hydrogrammes modèles sont cohérents, du point de vue de la chronologie, avec les hydrogrammes en station ;
- que les débits de pointe des hydrogrammes issus du modèle hydraulique sont supérieurs aux débits de pointe mesurés en station, **de la même façon que pour la crue de 1978.**



Ce qu'il faut retenir...

La cohérence temporelle entre la crue observée en station hydrométrique et la crue modélisée est vérifiée sur le tronçon Pont de Bayeux – Roquefavour, tronçon où des différences importantes ont été observées lors de la modélisation de la crue de 1978. Nous expliquons les écarts importants de la crue de 1978 par une défaillance de la station hydrométrique de Saint Pons, remplacée depuis par celle de Roquefavour

5.8.5.2 Analyse des volumes

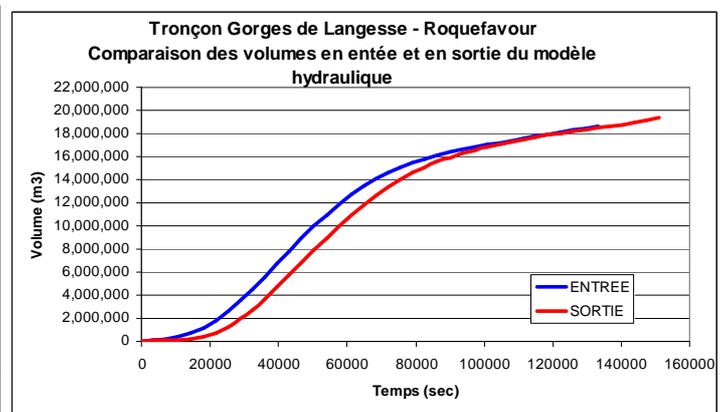
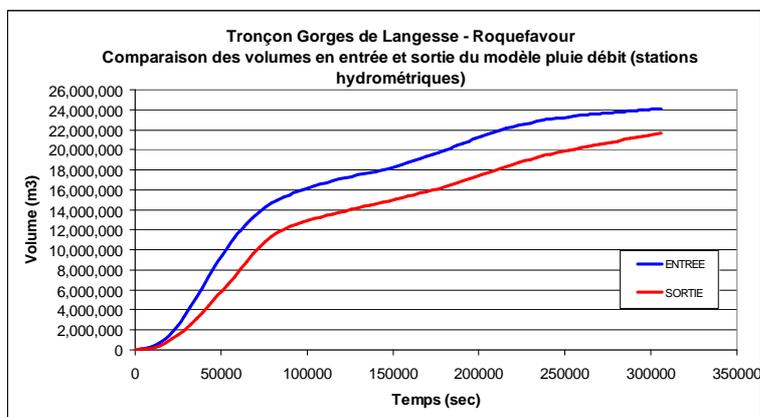
A. Principe de la démarche

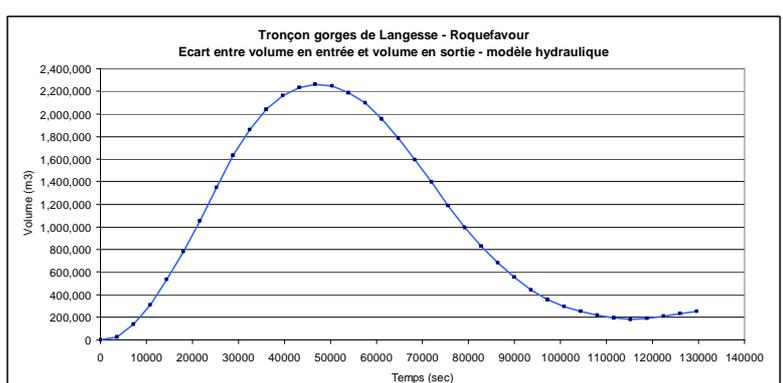
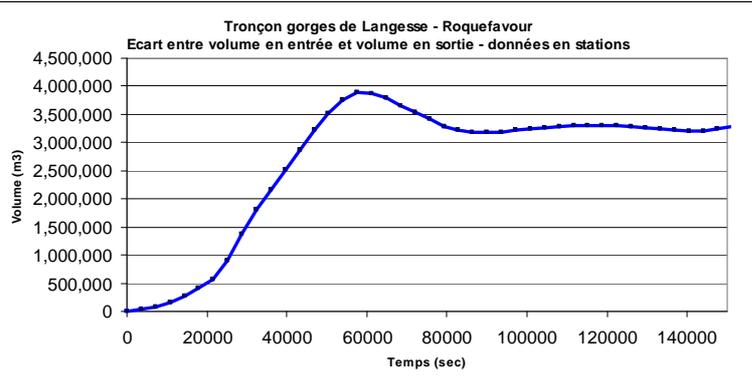
Le raisonnement mené dans le paragraphe qui suit est le suivant :

- Nous savons que la crue de 2008 a été limite débordante. De fait, nous pouvons estimer le volume d'eau mobilisé sur le tronçon étudié (Gorges de Langesse – Gorges de Roquefavour) pour cette crue (en nous basant sur la seule donnée topographique); Cette donnée est considérée comme fiable;
- L'analyse des hydrogrammes issus du modèle pluie-débit Ginger et des stations hydrométriques permet de calculer le volume mobilisé sur ce tronçon d'après ces données en station;
- **La comparaison de ces deux données (volume mobilisé sur le tronçon d'après les données en station et volume mobilisé d'après les emprises de crues connues) permettra de déterminer si l'écrêtement mesuré en station est réaliste ou pas. Ainsi l'objectif de cette analyse n'est pas de montrer si le calage du modèle hydraulique est juste ou faux mais plutôt d'analyser la cohérence de ce qui ressort des enregistrements aux stations hydrométriques.**

B. Résultats

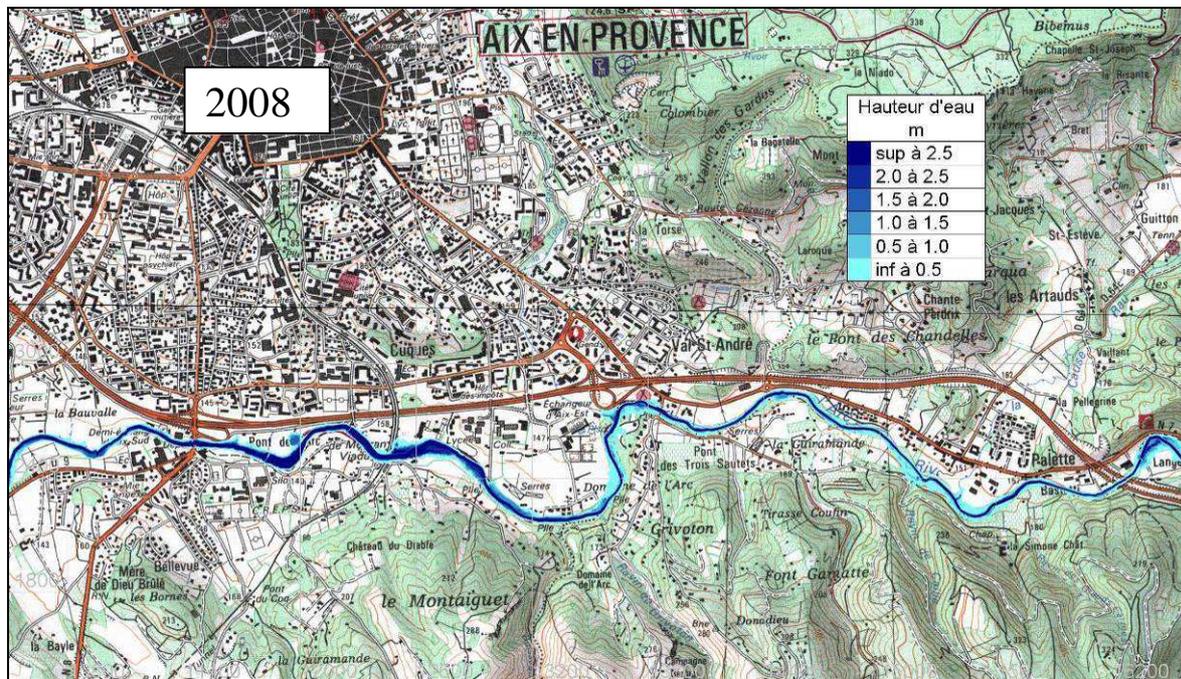
Nous avons mené cette même analyse pour la crue 2008 (comparaison volume en station – volume modèle hydraulique). Les résultats sont présentés ci-dessous :

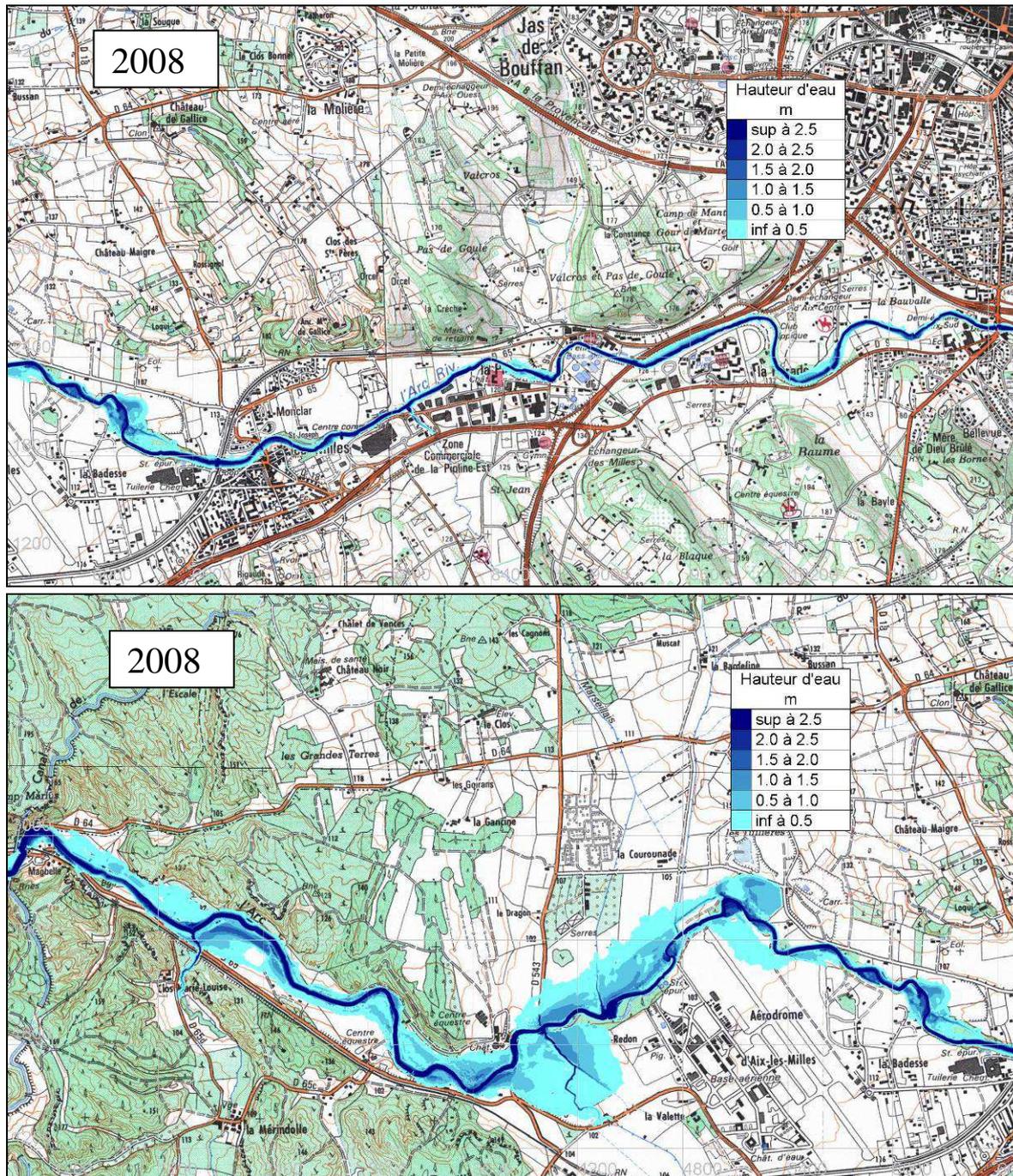




Ainsi, si l'écrêtement mesuré en station a été réellement observé, le volume maximal à un instant donné sur le tronçon étudié doit être de l'ordre de 3.9 millions de m³.

L'analyse des résultats du modèle hydraulique permet de déterminer le volume d'eau sur le tronçon pour l'emprise inondée suivante :





Le volume d'eau de l'emprise inondée des figures ci-dessus est de **2,6 millions de m³**.

Ainsi, ce sont 1.3 millions de m³ (soit 51 % d'erreur) qui sont perdus entre les deux stations hydrométriques.

Notons qu'il est normal de trouver une cohérence entre le volume sur le tronçon et le volume déterminé par l'analyse des hydrogrammes modèles puisque les deux calculs issus du modèle hydraulique sont nécessairement concordants. L'objectif de cette analyse est de comparer le volume réellement observé pendant la crue entre les deux stations avec le volume issu de l'analyse des données en station.

De même que pour 1978, l'analyse des volumes montre que l'écroulement mesuré entre les deux stations n'est pas physiquement possible.

C. Inondation à Berre

Il est avéré que l'inondation de la commune de Berre (située en sortie des gorges de Roquefavour) a été nettement moins importante en 2008 qu'en 1978.

Les valeurs de débits de pointe et volume issues du modèle hydrauliques pour les deux crues, à Roquefavour, sont présentés ci-dessous :

	Débit de pointe (m³/s)	Volume d'eau de l'hydrogramme (m³)
Crue de 1978	370	29 500 000
Crue de 2008	310	17 000 000
Ecart par rapport à 1978 (en %)	- 16 %	- 40 %

L'écart entre les deux débits de pointe des deux crues est faible. En revanche, l'écart des volumes en jeu (sur le pic de crue générant l'inondation) est considérable. C'est là l'explication des différences d'inondations subies à ces deux dates.

D. Résultats

Les codes de calcul des modèles (pluie-débit ou hydraulique) respectent la conservation des volumes. Le fait que ni le modèle pluie-débit, ni le modèle hydraulique ne puissent se caler en volume sur l'hydrogramme mesuré en station appuie l'hypothèse qu'il manque du débit (et donc du volume) sur l'hydrogramme en station :

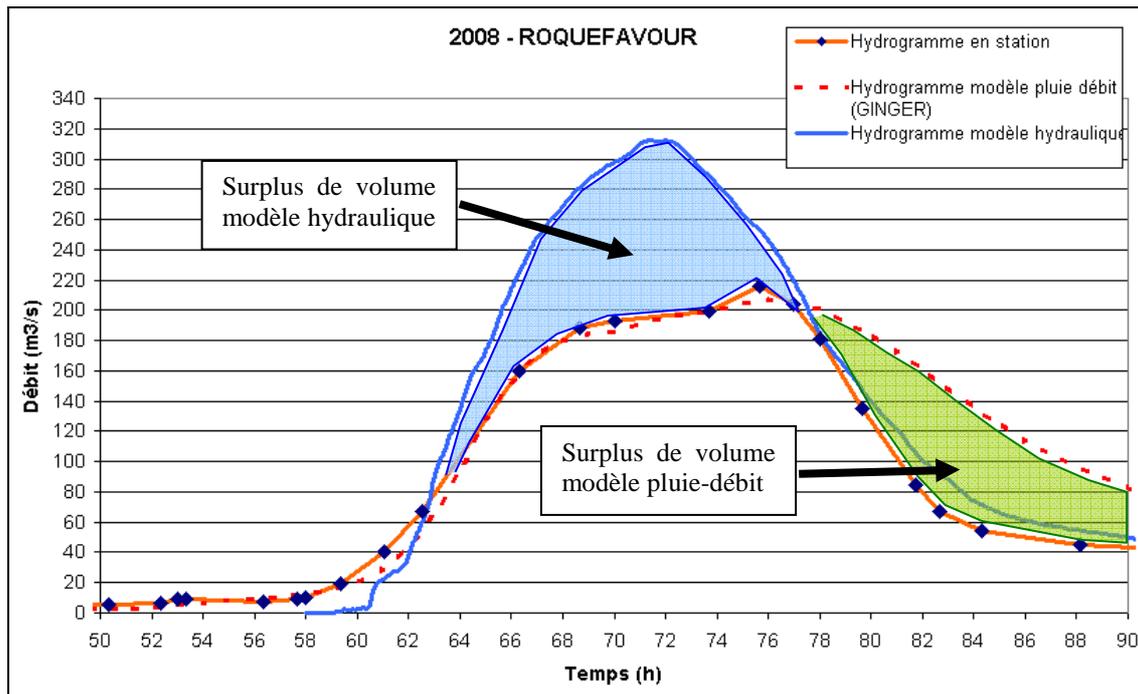


Figure 68 : Hydrogramme à Roquefavour en 2008

Ainsi, quelque soit les paramètres utilisés dans le modèle hydraulique, il ne pourra pas se caler sur l'hydrogramme en station :

- soit le débit de pointe est bien plus fort mais la chronologie est respectée (SAFEGE);
- soit le débit de pointe est calé sur la station mais la chronologie n'est pas bonne (GINGER).

Notons qu'il serait difficile, même en jouant sur les paramètres de calage du modèle hydraulique (coefficient de Strickler - débitance des ouvrages), de retrouver l'hydrogramme de Ginger (calé sur la pointe mais pas sur la chronologie).

5.8.5.3 Analyse des zones inondables de 2008

Sur la partie amont (de Pourrières aux gorges de Langesse) l'Arc remplit son lit mineur et son lit moyen mais ne déborde pas en lit mineur.

Quelques méandres sont coupés sur ce tronçon

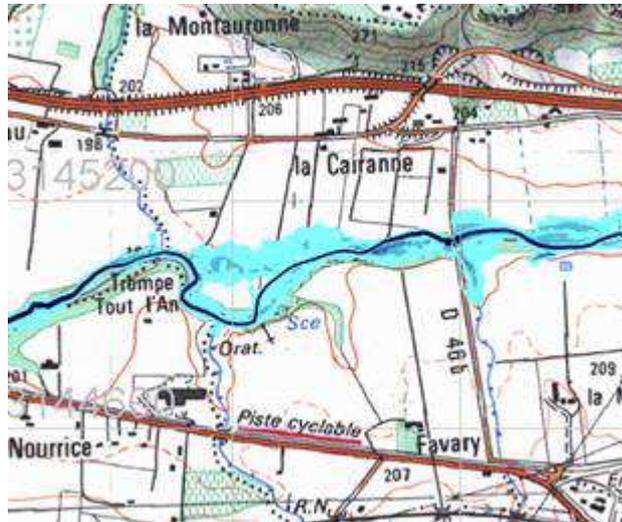


Figure 69 : Exemple de méandre coupé en aval de la ZI de Rousset

En amont du pont de Bachasson les habitations ne sont pas inondées. En aval, l'Arc ne surverse pas par-dessus la digue.

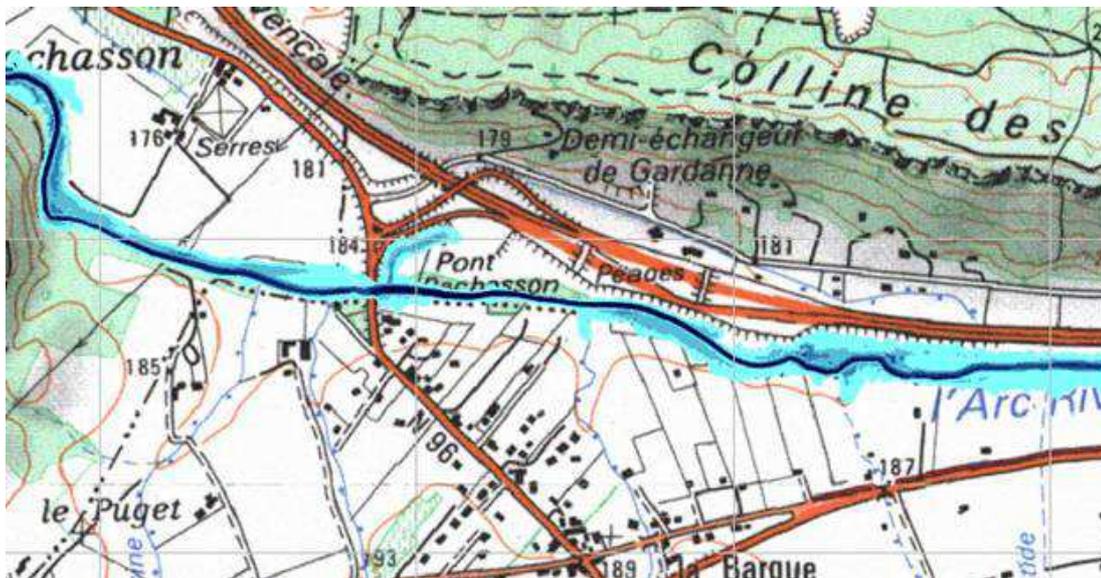


Figure 70 : Crue de 2008 sur le secteur de Bachasson (Meyreuil)

On note une légère zone d'étalement en amont immédiat des gorges de Langesse, mais qui ne touche aucun bâti :

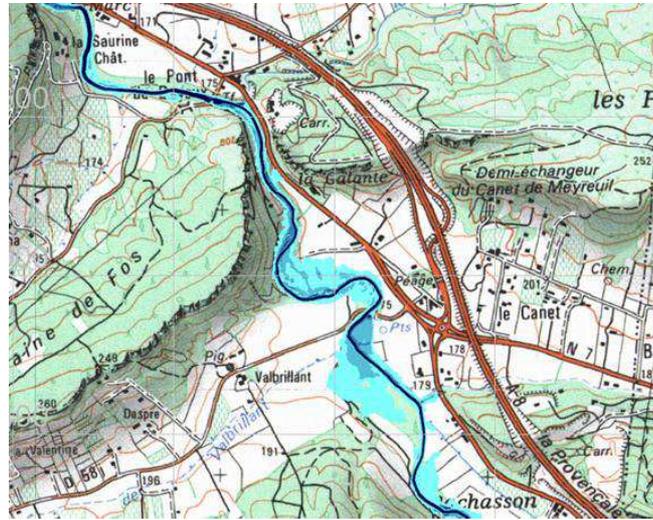


Figure 71 : Crue de 2008 en amont immédiat des gorges de Langesse

La partie basse du haras de la Buissonne est inondée. Au Tholonet l'Arc ne déborde pas.

Au droit d'Aix centre, les débordements restent limités à la promenade de l'Arc :

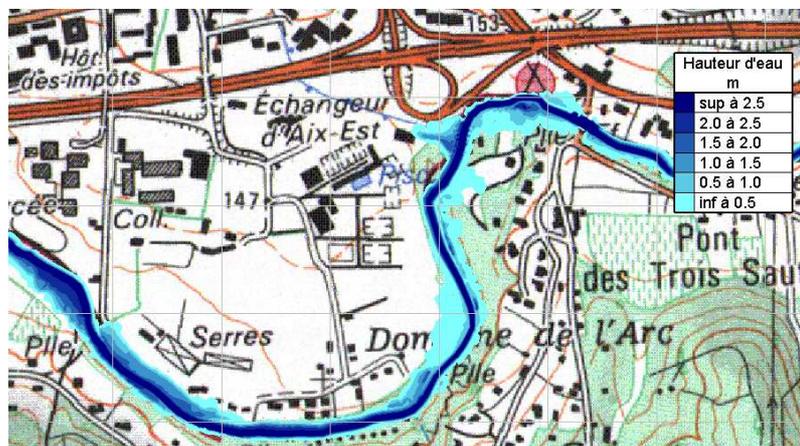


Figure 72 : Promenade de l'Arc à Aix – crue de 2005

Sur le secteur Les Milles/La Pioline l'Arc ne déborde pas :

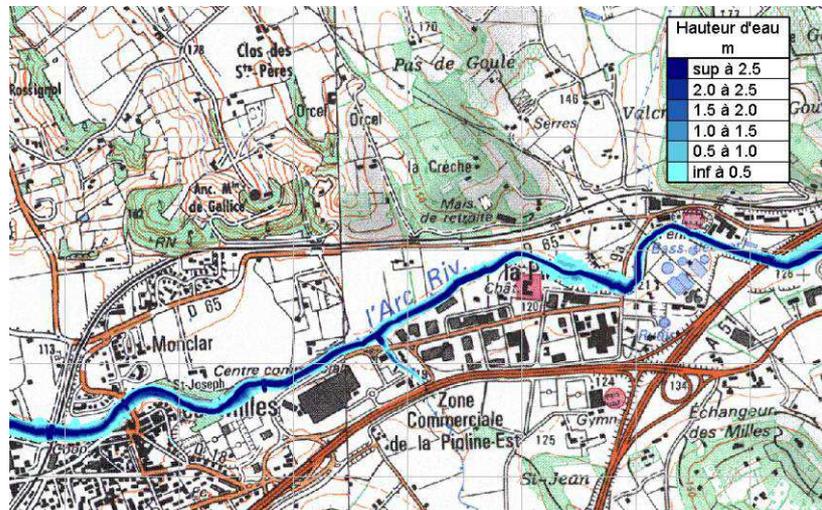


Figure 73 : L'Arc aux milles et à la Pioline en 2008

Au niveau de Saint Pons des débordements se produisent dans la plaine (ce qui est conforme au témoignage recueilli (cf p48 – qui indique notamment que la RD543 a été inondée). Le pont n'est pas submergé :

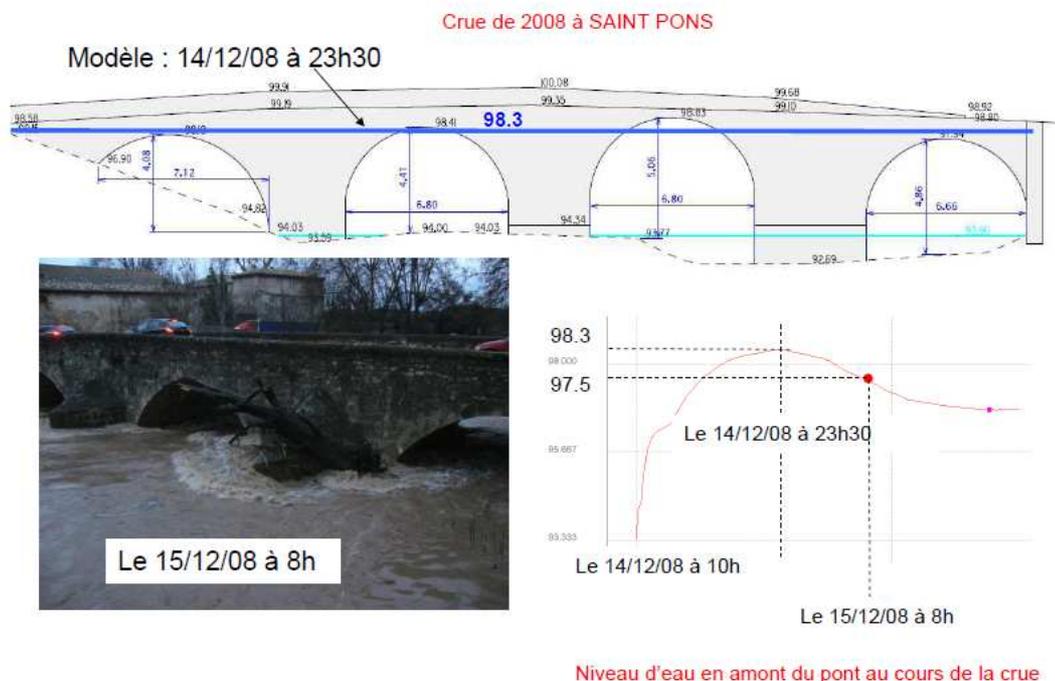


Figure 74 : Le pont de Saint Pons en 2008

Jusqu'à la sortie du village des Milles la crue est très peu débordante. En revanche, à partir de la ZEC de la plaine des Milles plusieurs débordements sont observés :

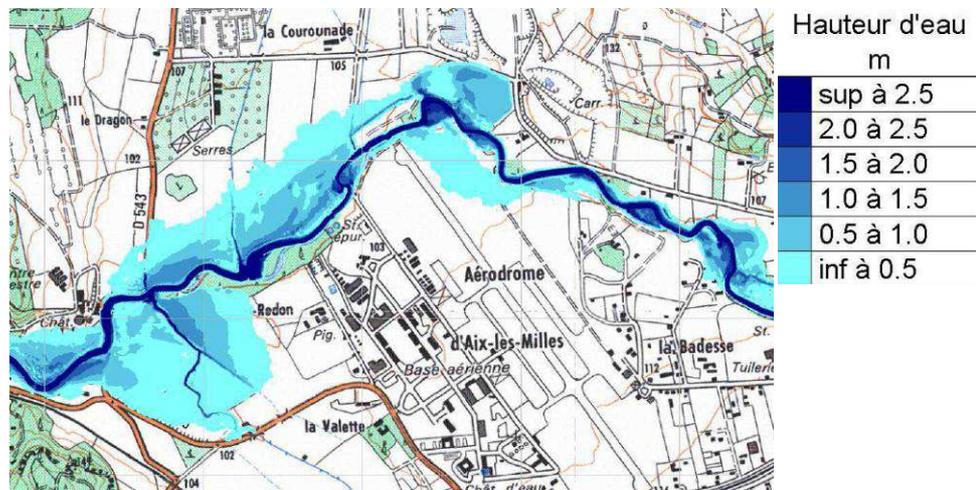


Figure 75 : Premiers débordements sur la partie centrale du bassin pour la crue 2008

Au Pont de Saint Estève, les photos dont nous disposons montrent une inondation en aval rive droite du pont, ce qui est bien retranscrit par le modèle hydraulique :



Figure 76 : Aval du pont de Saint Estève à Berre – crue de 2008

Au niveau du Club de la Sabretache ; comme l'indiquent les témoignages, le club est menacé mais pas inondé :

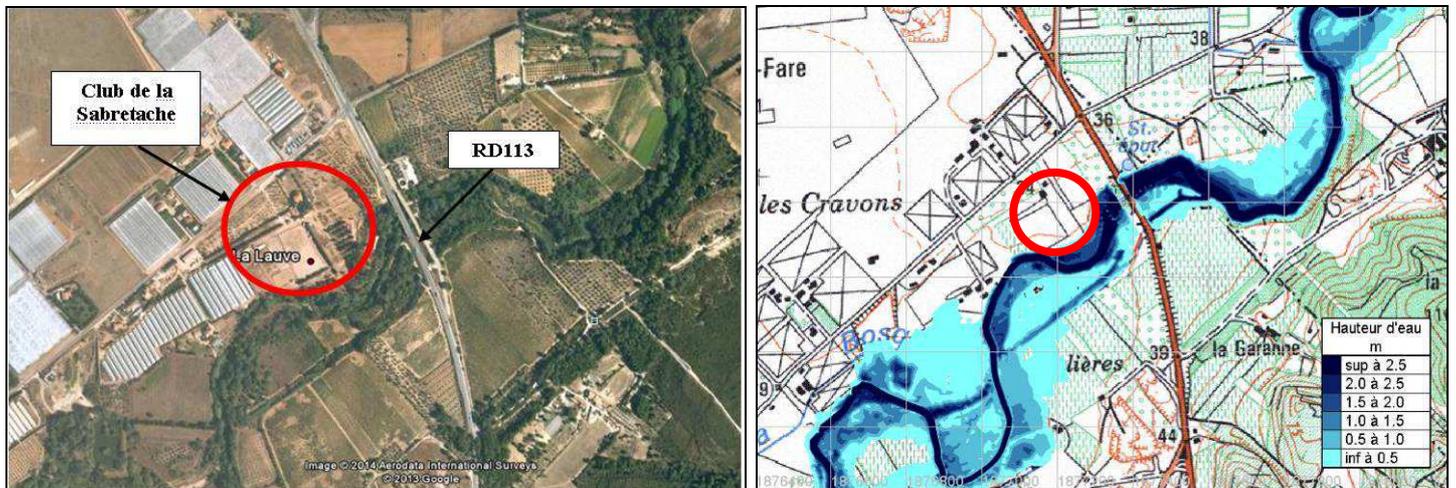


Figure 77 : Le Club de la Sabretache à Berre, en 2008

A Mauran (Berre) plusieurs bâtis sont dans l'emprise de la zone inondable, avec des hauteurs de l'ordre de 25 cm. En rive gauche, la route est submergée :

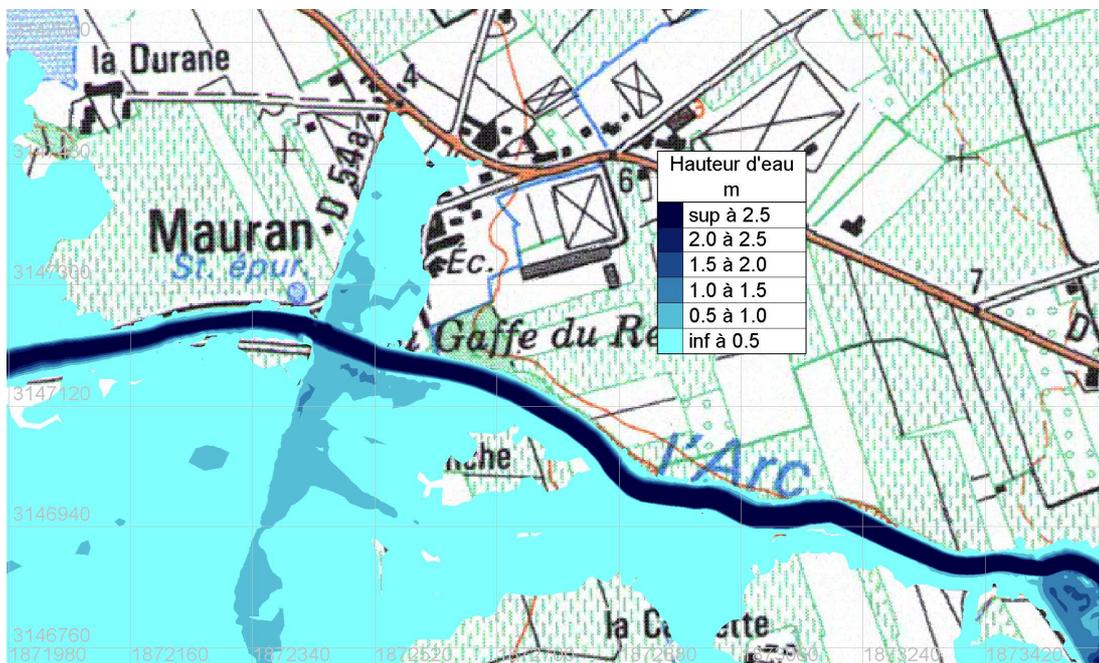


Figure 78 : Crue de 2008 au hameau de Mauran (Berre)

5.8.6 Analyse des temps de propagation

Concernant les temps de propagation des pics de crue, il n'est pas possible pour la crue de 2008 de parler un temps de propagation de la pointe de crue entre Pont de Bayeux et Roquefavour, puisque les précipitations se sont abattues principalement sur la partie centrale du bassin versant, ainsi, ce sont les affluents principaux qui sont à l'origine du pic de crue.

Le SABA nous fournit les informations suivantes pour les crues peu ou pas débordants :

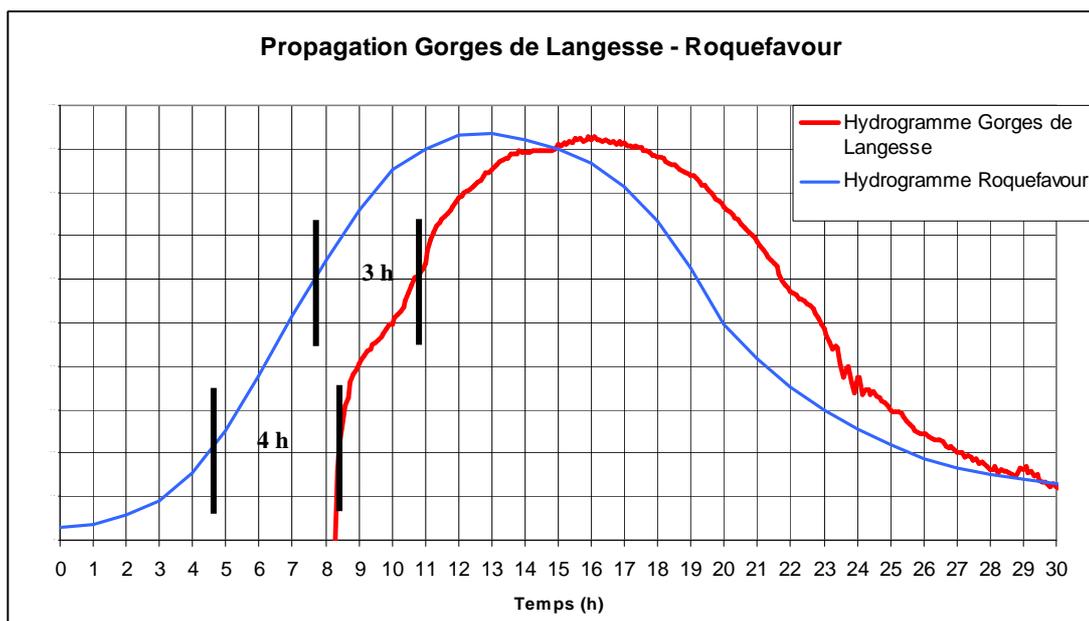
- Environ 4.5 / 5 h entre Pont de Bayeux et Roquefavour ;
- Environ 5/6 h entre Roquefavour et Saint Estève.

Le SPC fournit les indications suivantes pour les crues non débordantes :

- 3,5 h en moyenne entre Pont de Bayeux et Roquefavour ;
- 4,5 h en moyenne entre Roquefavour et Saint Estève.

Nous avons donc regardé, en injectant un hydrogramme qui n'entraîne pas de débordements majeurs de l'Arc quels étaient les temps de propagation sur ces deux tronçons.

Les résultats sont présentés ci-dessous :



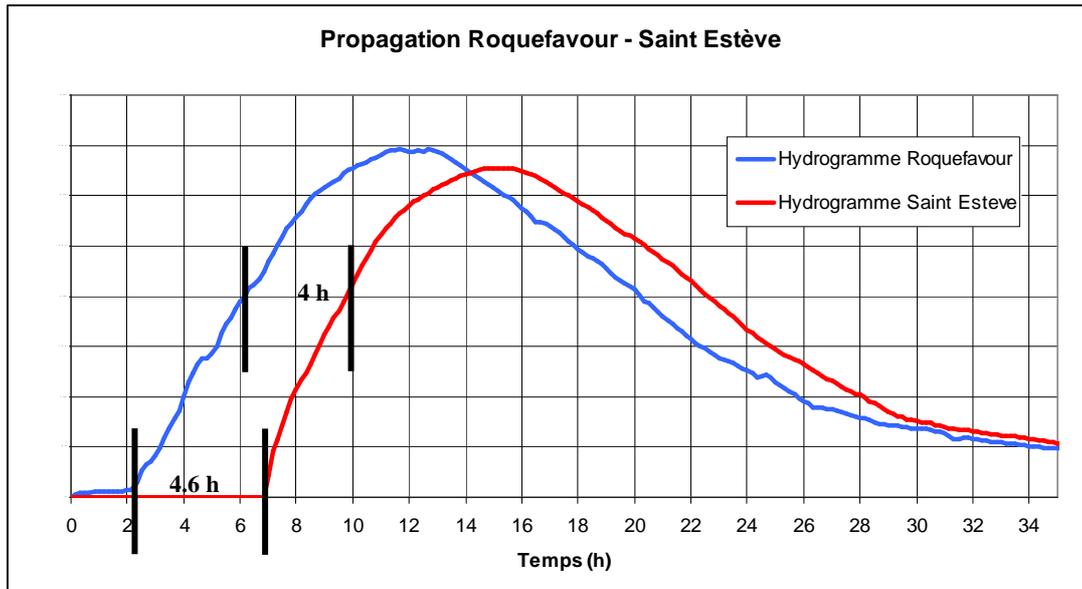


Figure 79 : Propagation des hydrogrammes d'après le modèle hydraulique

Sur le tronçon Gorges de Langesse (pont de Bayeux) – Roquefavour, la durée de propagation est de l'ordre de **3 à 4 h**. Sur le tronçon Roquefavour-Saint Estève la durée de propagation est de l'ordre de **4h/4h30**.

Ces données sont du même ordre de grandeur que celles communiquées par le SABA et le SPC.

5.9 TEST DE SENSIBILITE

5.9.1 Généralités

L'objectif des tests de sensibilité est de voir dans quelles mesures la variation des paramètres de calage ou de conditions aux limites impacte les résultats de la modélisation hydraulique.

5.9.2 Test de sensibilité sur la rugosité

5.9.2.1 Modèle amont

Les coefficients de Strickler suivants ont été testés :

Tableau 7 : Test de sensibilité sur les coefficients de Strickler – modèle amont

	Rugosité lit mineur	Rugosité lit majeur naturel	Rugosité lit majeur urbanisé
BASE	25	15	10
+ 20 % sur le coefficient de Strickler	30	18	12
- 20 % sur le coefficient de Strickler	20	12	8

Cas où le Strickler est abaissé de 20 % : l'impact est très peu marqué : - de 5 cm de rehaussement en amont des ponts et de l'ordre de 10/15 cm ailleurs. La variation d'emprise de zone inondable est négligeable. Sur la figure ci-dessous sont représentées, sur un secteur particulier, les hauteurs d'eau du modèle de base, ainsi que les isohauteurs (ligne noire) pour le modèle K-20% pour la même grille de hauteur :

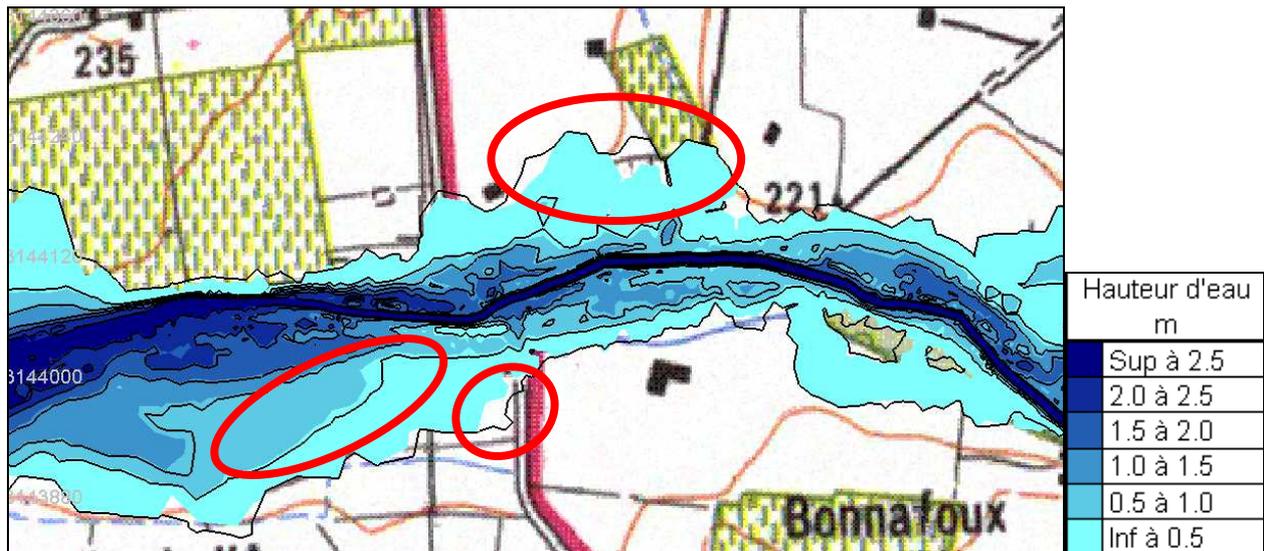


Figure 80 : Comparaison modèle de base – modèle Strickler -20%

Cas où le Strickler est augmenté de 20 % : L'impact est de -5 à -10 cm sur l'ensemble du linéaire, hormis en amont des ouvrages où il est inférieur à -5 cm. Dans ce cas également, l'emprise est inchangée. Sur la figure ci-dessous sont représentées, sur un secteur particulier, les hauteurs d'eau du modèle de base, ainsi que les isohauteurs (ligne noire) pour le modèle K+20% pour la même grille de hauteur :

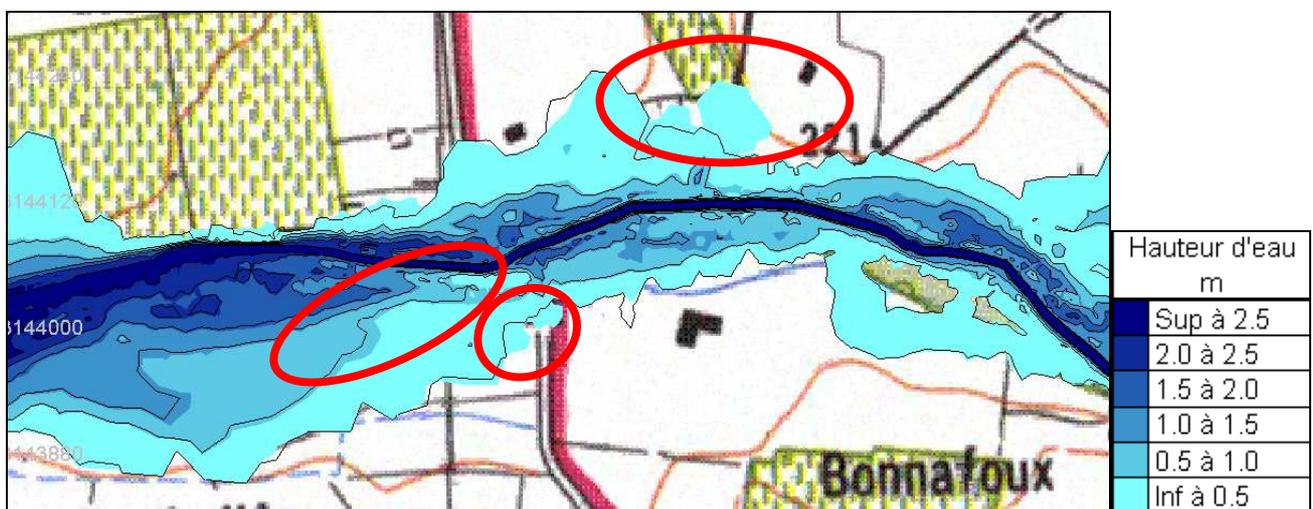


Figure 81 : Comparaison modèle de base – modèle Strickler +20%

5.9.2.2 Modèle centre

Les coefficients de Strickler suivants ont été testés :

Tableau 8 : Test de sensibilité sur les coefficients de Strickler – modèle centre

	Rugosité lit mineur	Rugosité lit majeur naturel	Rugosité lit majeur urbanisé
BASE	20	10	5
+ 20 % sur le coefficient de Strickler	24	12	6
- 20 % sur le coefficient de Strickler	16	8	4

Cas où le coefficient de Strickler est augmenté (la rugosité baisse, la ligne d'eau diminue) :

- au niveau des zones de débordement de la Jouïne, l'impact est de -1/2 cm ;
- au niveau de la zone d'expansion de crue de la plaine des Milles, l'impact est compris entre -5 et -10 cm ;
- en lit mineur, l'impact est - 10/15 cm en moyenne sur les secteurs non influencés par les ouvrages, en amont des ouvrages, l'impact ne dépasse pas - 10 cm. Sur certains tronçons localisés non débordants, en lit mineur l'impact va jusqu'à - 40 cm maximum ;
- entre Saint Pons et Roquefavour, l'impact est de l'ordre de -10 cm.

L'impact est très peu visible en termes d'emprise de zone inondable. L'exemple le plus marqué (mais qui reste peu visible) est situé au niveau de la plaine des Milles. Il est présenté ci-dessous :

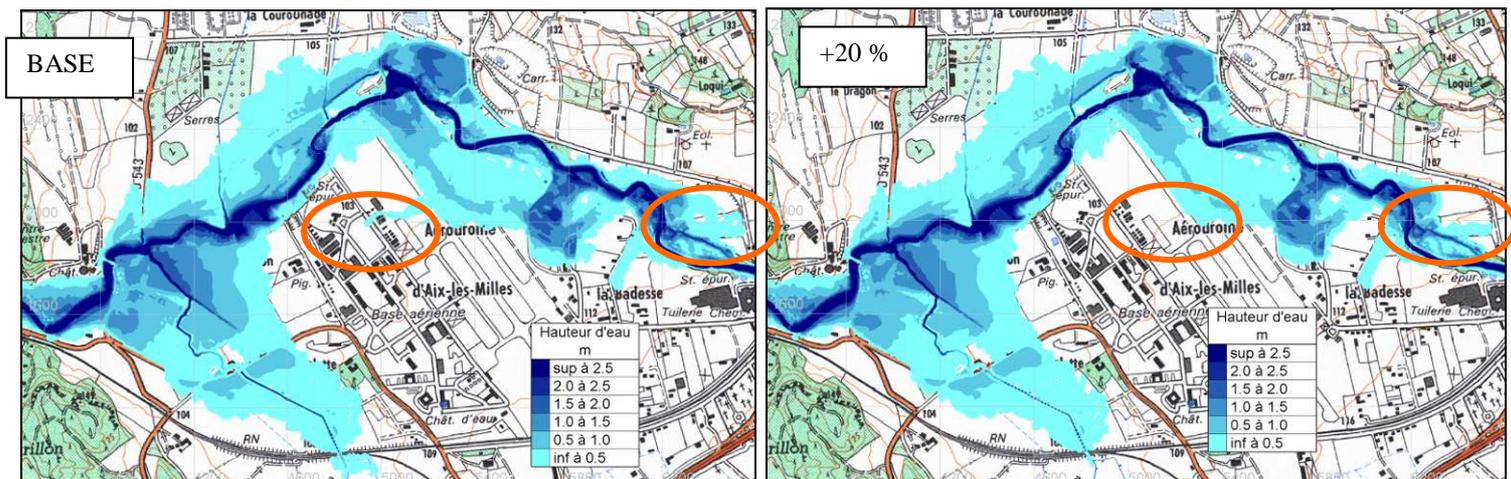


Figure 82 : Comparaison modèle de base – modèle Strickler +20% - plaine des Milles

Cas où le coefficient de Strickler est abaissé (la rugosité augmente, la ligne d'eau augmente) :

- au niveau des zones de débordement de la Jouïne, l'impact est de +1/2 cm ;
- au niveau de la zone d'expansion de crue de la plaine des Milles, l'impact est de l'ordre de +10 cm ;
- en lit mineur, l'impact est + 15/20 cm en moyenne sur les secteurs non influencés par les ouvrages. Sur certains tronçons localisés non débordant, en lit mineur l'impact va jusqu'à +30/35 cm maximum ;
- entre Saint Pons et Roquefavour, l'impact est de l'ordre de +10 cm.

Là encore, l'impact est très peu visible en termes d'emprise de zone inondable. L'exemple le plus marqué (mais qui reste peu visible) est situé au niveau de la plaine des Milles. Il est présenté ci-dessous :

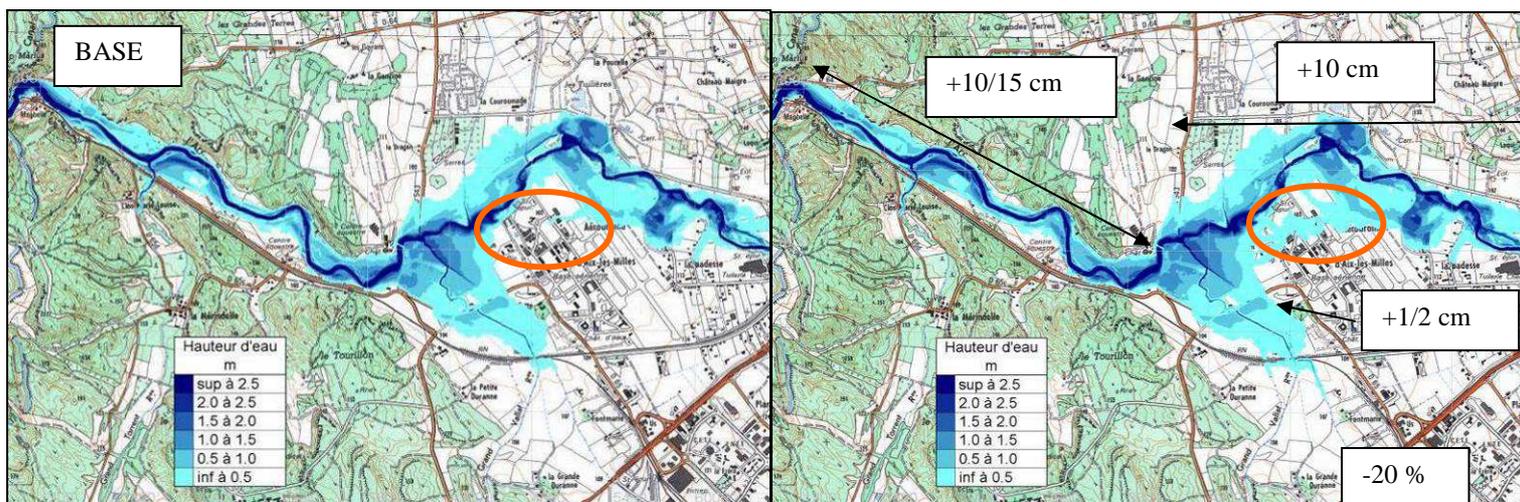


Figure 83 : Comparaison modèle de base – modèle Strickler -20% - ZEC plaine des Milles

5.9.2.3 Modèle aval

Les coefficients de Strickler suivants ont été testés :

Tableau 9 : Test de sensibilité sur les coefficients de Strickler – modèle aval

	Rugosité lit mineur	Rugosité lit majeur naturel	Rugosité lit majeur urbanisé
BASE	15	10	5
+ 20 % sur le coefficient de Strickler	18	12	6
- 20 % sur le coefficient de Strickler	12	8	4

Pour le modèle de base, le coefficient en lit mineur a été pris plutôt faible pour retraduire la présence de branchages, débris et embâcles observés sur ce secteur en 1978.

Les impacts, tronçon par tronçon sont détaillés ci-dessous :

- Des gorges de Roquefavour jusqu'à la RN113 :

Les impacts sur la ligne d'eau sont plutôt élevés. Cependant, le secteur étant très encaissé, **la variation en terme d'emprise de zone inondable est quasi-nulle**. On retiendra :

- lorsque le coefficient de Strickler est abaissé de 20 % (la rugosité augmente), l'impact sur la ligne d'eau est de **+ 30 cm dans les secteurs éloignés de l'influence des ouvrages**, de **+ 15 cm dans les secteurs où l'écoulement s'étale** et de **+ 10 cm en amont des ouvrages** ;
- lorsque le coefficient de Strickler est augmenté de 20 % (la rugosité diminue), l'impact sur la ligne d'eau est de **-15/20 cm dans les secteurs éloignés de l'influence des ouvrages**, de **- 10 cm dans les secteurs où l'écoulement s'étale** et de **- 5 cm en amont des ouvrages**.
- **secteur d'accumulation en amont de la VF :**

Les impacts sur la ligne d'eau sont plutôt faibles (inférieurs à 15 cm). On retiendra :

- lorsque le coefficient de Strickler est abaissé de 20 % (la rugosité augmente), l'impact en amont de la voie ferrée est de +15 cm environ en amont de l'ouvrage. Dans la zone d'étalement en rive gauche (voir schéma ci-dessous) l'impact est de +2/3 cm ;
- lorsque le coefficient de Strickler est augmenté de 20 % (la rugosité diminue), l'impact en amont de l'ouvrage est de -2/3 cm ; Ailleurs, l'impact est de l'ordre de - 6/7 cm.

La seule zone où l'impact est visible en terme d'emprise est présentée ci-dessous (cercle orange) :

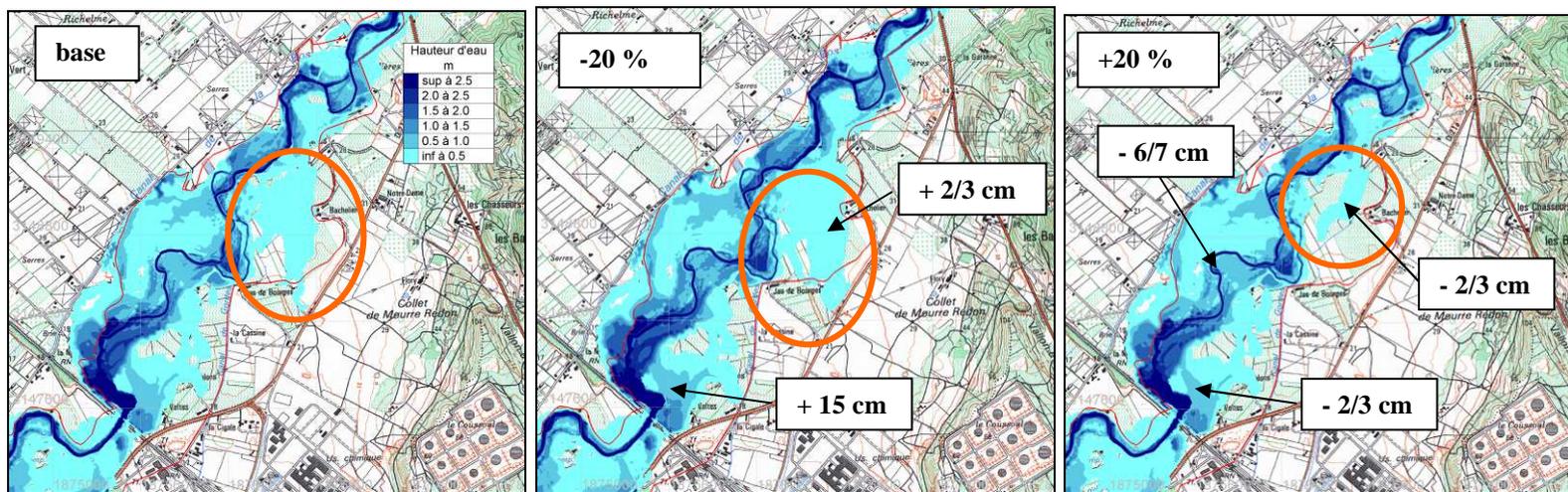


Figure 84 : Comparaison modèle de base – modèle Strickler +/- 20% - Amont de la voie ferrée à Berre l'étang

- aval de la voie ferrée (zone d'étalement dans la plaine de Berre) :

Contre la D111 (eau issue des débordements au lieu-dit la Guyenne), l'impact est de l'ordre de 10/15 cm (en moins lorsque la rugosité diminue, en plus lorsque la rugosité augmente).

En amont du pont de Saint Estève, l'impact est de 2/3 cm.

Dans l'axe d'écoulement qui se dirige axe vers Berre, l'impact est de 3 à 7 cm et dans le centre-ville de Berre l'impact est de 1 cm environ.

En lit mineur, l'impact est de l'ordre de +/- 15 cm sur les secteurs non influencés, et de l'ordre de quelques centimètres en amont des ouvrages.

Les secteurs où les emprises diffèrent sont présentés ci- dessous

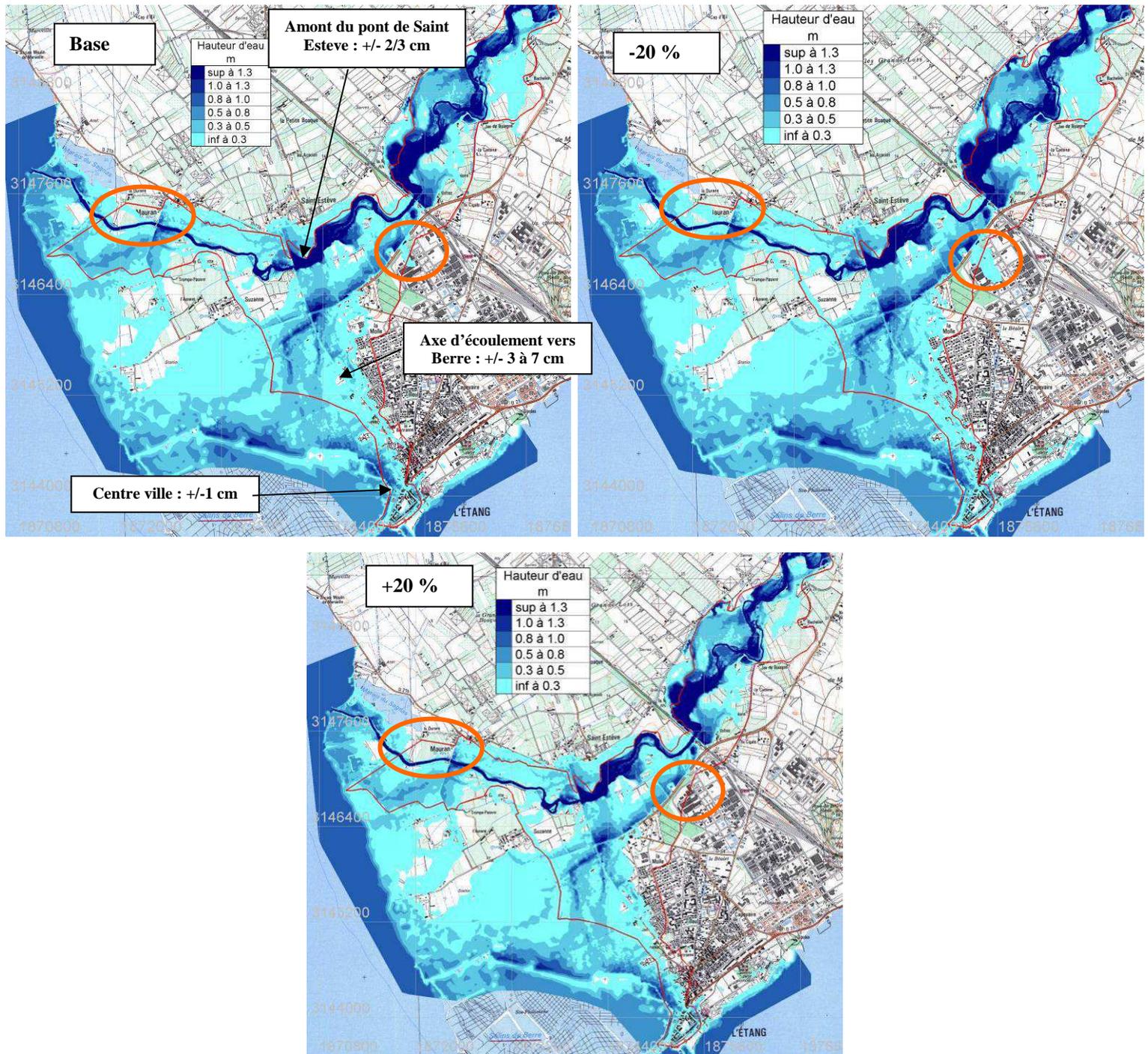


Figure 85 : Comparaison modèle de base – modèle Strickler +/- 20% - Plaine de Berre l'étang

5.9.2.4 Conclusion

On retiendra les impacts suivants pour une variation de +/-20 % du coefficient de Strickler :

- impact faible en amont des ouvrages (de l'ordre de +/- 10 cm maximum) ;
- impact de l'ordre de +/- 15/20 cm en lit mineur sur des secteurs non influencés, jusqu'à +/- 40 cm maximum en lit mineur sur des secteurs non débordants ;
- impact de l'ordre de +/- 10/15 sur les secteurs d'étalements des crues (zone d'expansion des Milles par exemple).

Ces hausses ou baisses de niveau ont un impact très faible sur les emprises de crue. En effet, sur les secteurs fortement débordants, comme Berre, la crue occupe l'ensemble du lit majeur, quelle que soit la rugosité, et sur les secteurs peu débordants (Aix avant l'autoroute A51 par exemple), les hausses de niveau (dans le cas d'une augmentation de la rugosité) ne suffisent pas à générer de nouvelles zones de débordements.

5.9.3 Test de sensibilité sur la condition limite aval au niveau de l'étang de Berre

Les résultats présentés précédemment correspondent aux résultats avec une condition limite aval à l'étang de Berre de 1 m NGF. Un test de sensibilité a été réalisé sur la condition limite aval avec Zétang de Berre = 0.4 m NGF. L'écart sur le niveau d'eau est présenté sur la figure ci-dessous. Le seul secteur concerné par l'impact est situé à proximité de l'embouchure (pas d'impact au niveau du centre-ville de Berre). Sur ce secteur, l'impact est faible :

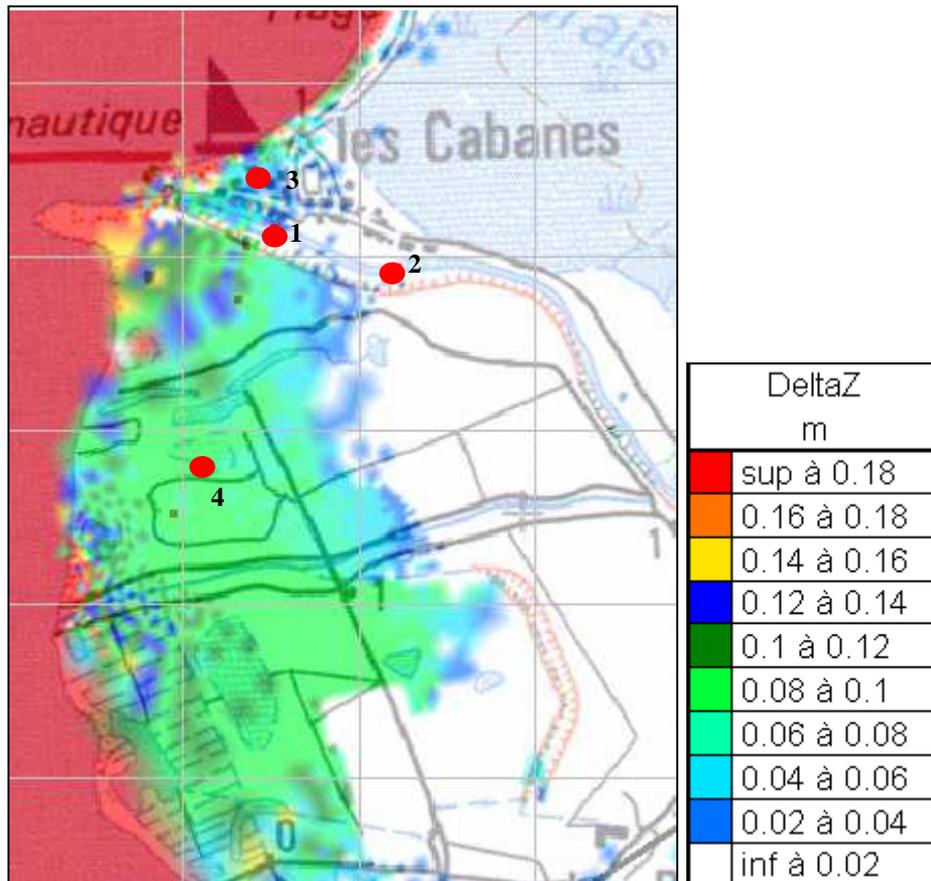
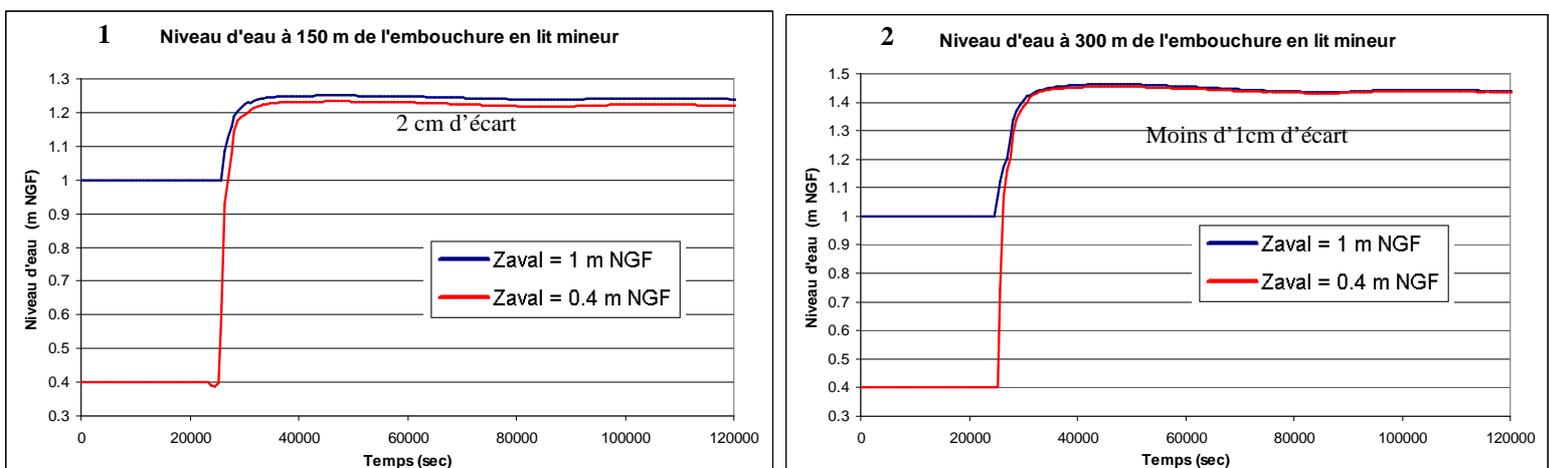


Figure 86 : Impact du choix de la condition limite aval sur les niveaux d'eau (secteur de la confluence de l'Arc avec l'étang de Berre)

Les graphiques ci-dessous représentent l'évolution temporelle du niveau d'eau en 4 points proches de l'embouchure :



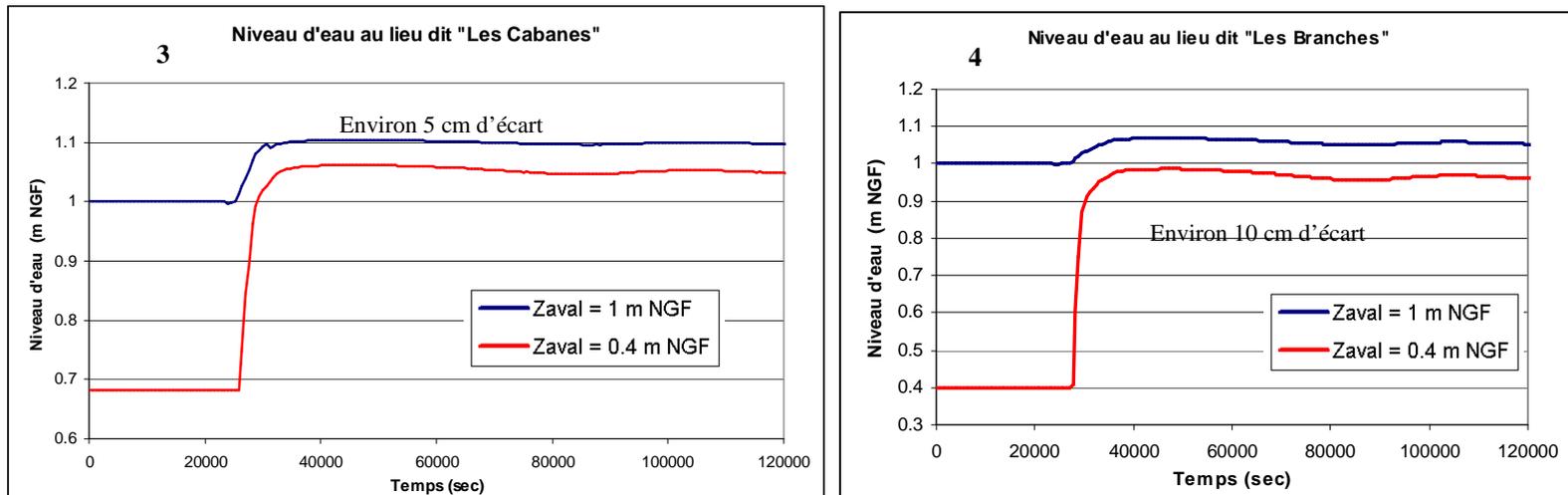


Figure 87 : Courbes des niveaux d'eau en fonction du temps à proximité de la confluence Arc/Etang de Berre pour les deux conditions limite aval testées

On retiendra que :

- l'impact de la condition limite aval reste très localisé ;
- la zone la plus impactée correspond à une superficie sans enjeux, l'impact y est d'une dizaine de centimètres environ ;
- le choix de la condition limite aval (0.4 m NGF ou 1 m NGF) a un impact de l'ordre de 5 cm sur une partie du lieu urbanisé dit « Les Cabanes » ;
- en lit mineur, à environ 150 m de l'embouchure, l'impact sur le niveau d'eau n'est que de 2 cm environ.

Dans le centre-ville de Berre, l'impact est nul. En effet, autour du centre-ville de Berre, le niveau du terrain naturel en bordure de l'étang varie entre 1.1 et 1.3 m NGF. Ainsi, quand l'écoulement en provenance de l'Arc arrive dans l'étang, un passage en régime critique se produit, comme illustré sur le schéma ci-dessous :

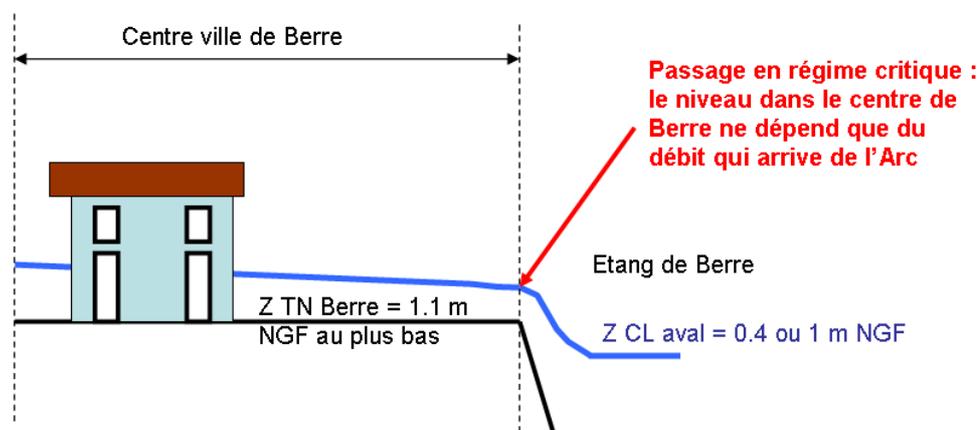
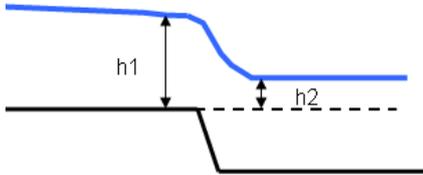


Figure 88 : Schéma de principe de la ligne d'eau dans le centre-ville de Berre

De fait, le niveau d'eau dans le centre de Berre n'est pas influencé par le niveau de l'étang.

Selon cette même approche théorique, tant que $h_2 < 2/3 h_1$ (voir illustration ci-dessous) le niveau de l'étang n'a pas d'impact sur les hauteurs d'eau dans Berre. En considérant une hauteur de l'ordre de 30 cm dans Berre en bordure de l'étang, le niveau à partir duquel l'étang a une influence serait de 1.3 m NGF.



Ce qu'il faut retenir...

Le modèle est peu sensible aux variations du coefficient de Strickler. Le choix de la condition limite aval (0.4 ou 1 m NGF) n'a qu'un impact léger et localisé (10 cm maximum) et sur une superficie restreinte.

5.10 CONCLUSION SUR LA MODELISATION DES CRUES DE CALAGE

Du fait de l'ancienneté de la crue, de la forte urbanisation et aménagement le long de l'Arc (remblai), et du peu de PHE nivelées disponibles, le calage sur la crue de 1978 n'est pas aisé.

La cohérence des résultats du modèle hydraulique avec les données historiques (emprise de crue principalement et relevés PHE) est globalement bonne.

On note toutefois deux points de différence importants pour la crue de 1978 :

- à partir d'Aix en Provence, la cohérence des hydrogrammes du modèle pluie/débit de Ginger et modèle hydraulique n'est plus assurée. Les écarts observés proviennent a priori d'un enregistrement douteux à la station hydrométrique de Saint Pons en 1978, donnée ayant servi de base au calage du modèle pluie/débit ;
- l'emprise historique à Berre diffère de l'emprise modélisée. En effet, l'emprise historique est incohérente avec la topographie actuelle.

La modélisation de la crue de 2008 montre en revanche la cohérence entre les enregistrements en station et la modélisation de la crue, concernant la temporalité de la crue. Jusqu'à la sortie du village des Milles, la crue de 2008 est très peu débordante. Les principaux débordements, qui restent modérés se produisent sur les secteurs de Saint Pons et à Berre (hameau de Mauran, Pont de Saint Estève).

La modélisation permet de retrouver les emprises, niveau d'eau et la chronologie des événements historiques. En revanche, les débits de pointe sont revus à la hausse.

6 RESULTATS DES MODELISATION DES CRUES FREQUENTES, DE REFERENCE ET EXCEPTIONNELLE

Les résultats présentés ci-dessous et les cartographies qui en ont découlées concernent uniquement les débordements du cours d'eau de l'Arc. En effet, les affluents, bien que pris en compte pour déterminer les apports hydrologiques, n'ont pas fait l'objet de modélisation hydraulique.

6.1 CRUES FREQUENTES

6.1.1 Crue décennale

Les cartes de hauteurs d'eau et vitesses d'écoulement de la crue décennale (crue fréquente) sont présentés en annexe.

Jusqu'à la sortie du village des Milles, la crue décennale est peu débordante. Seul le lit moyen est inondé sur plusieurs secteurs et quelques méandres sont coupés :

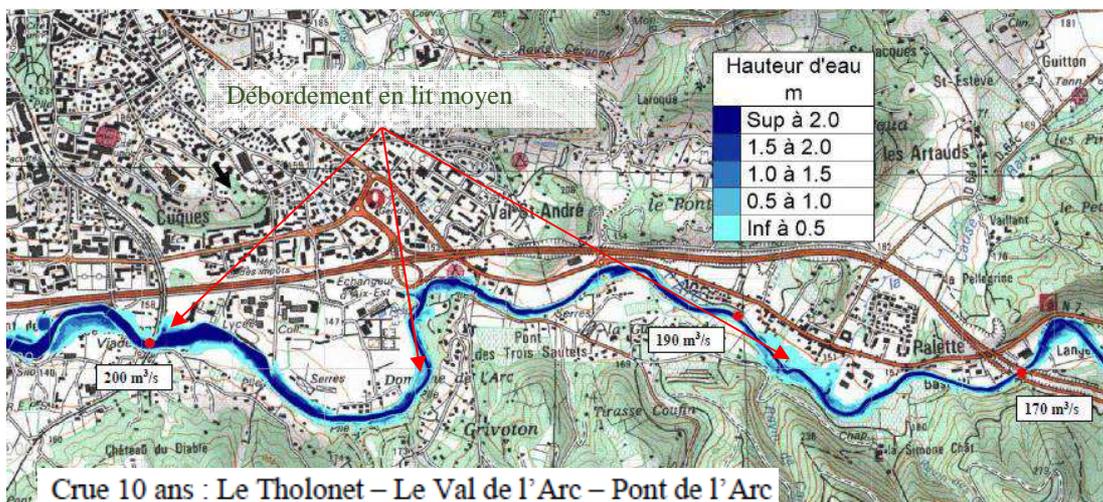
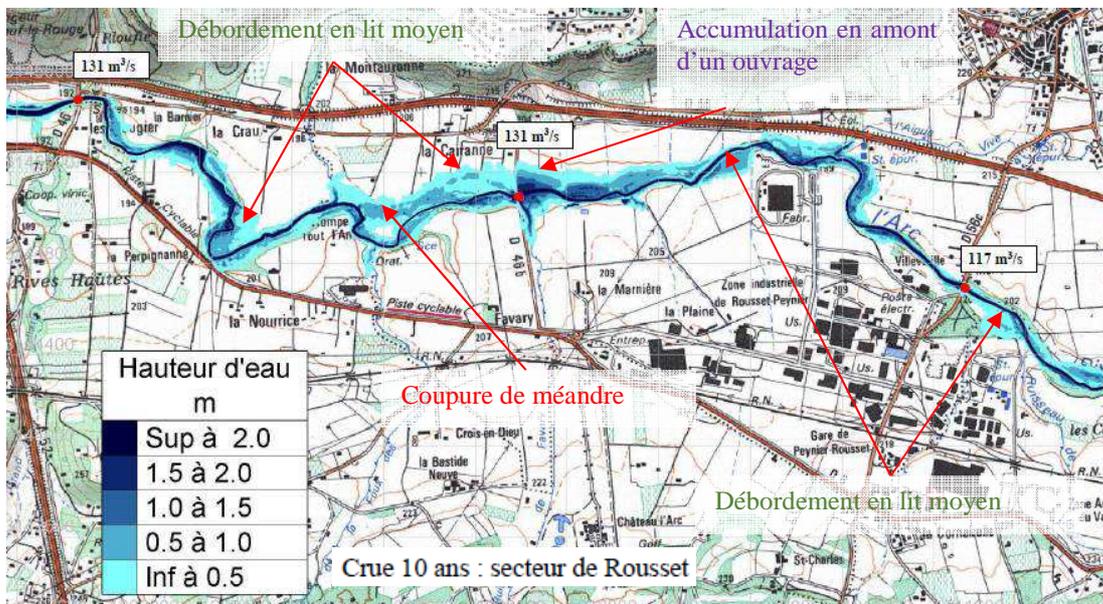
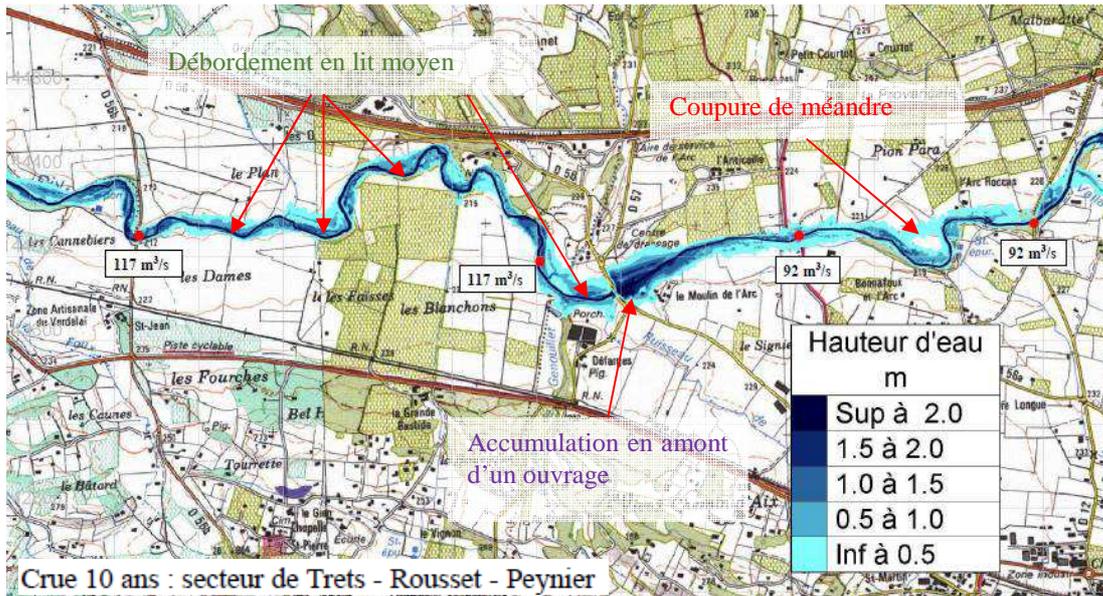


Figure 89 : hauteurs d'eau décennales (Trets, Rousset, Peynier, Le Tholonet, Val de l'Arc, Pont de l'Arc)

Les débordements commencent au niveau de la zone d'expansion de crue (ZEC) de la plaine des Milles où l'écoulement s'étale rive droite principalement, puis au niveau de la confluence avec la Petite Jouine. Les zones urbanisées en rive gauche sont protégées par les digues existantes sur ce tronçon :

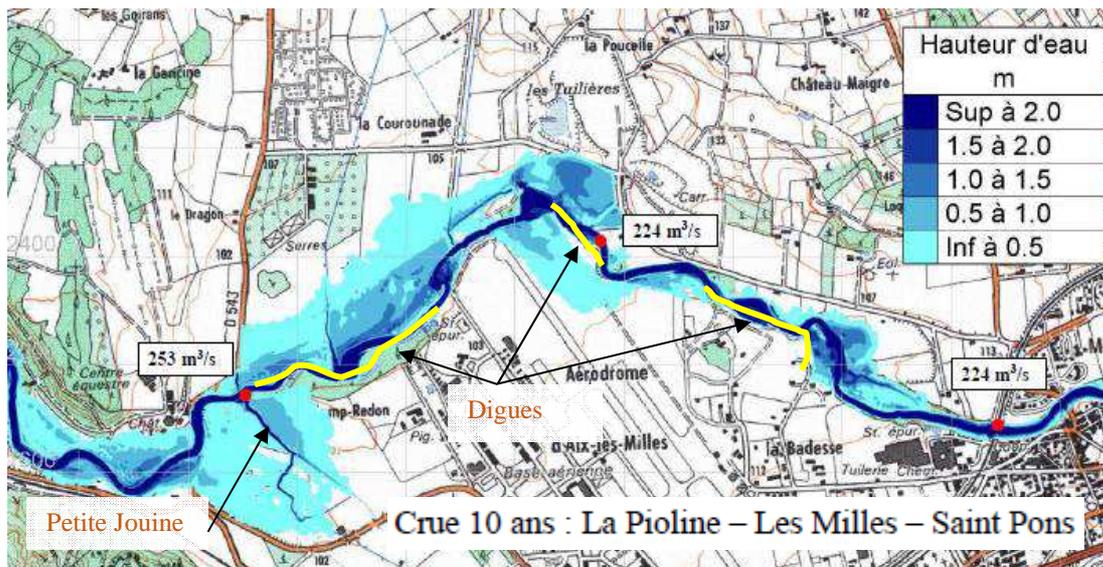


Figure 90 : hauteurs d'eau décennales (La Pioline, Les Milles, Saint Pons)

A la sortie de la ZEC, entre les gorges de Roquefavour et le franchissement de la voie ferrée à Berre, on retrouve des débordements faibles à modérés en lit moyen, et des coupures de méandre.

A l'arrivée sur la commune de Berre, on retrouve le phénomène d'étalement de l'écoulement dans le Delta, mais sur une étendue bien moins importante que pour les deux crues historiques modélisées (2008 et 1978). Aucun axe d'écoulement ne se dirige vers le centre ville de Berre et l'écoulement suit son axe principal (celui du lit mineur). La digue de Guienne n'est pas submergée. Le hameau de saint Estève n'est pas inondé par la crue décennale. Le bas du hameau de Mauran est touché par des hauteurs faibles.

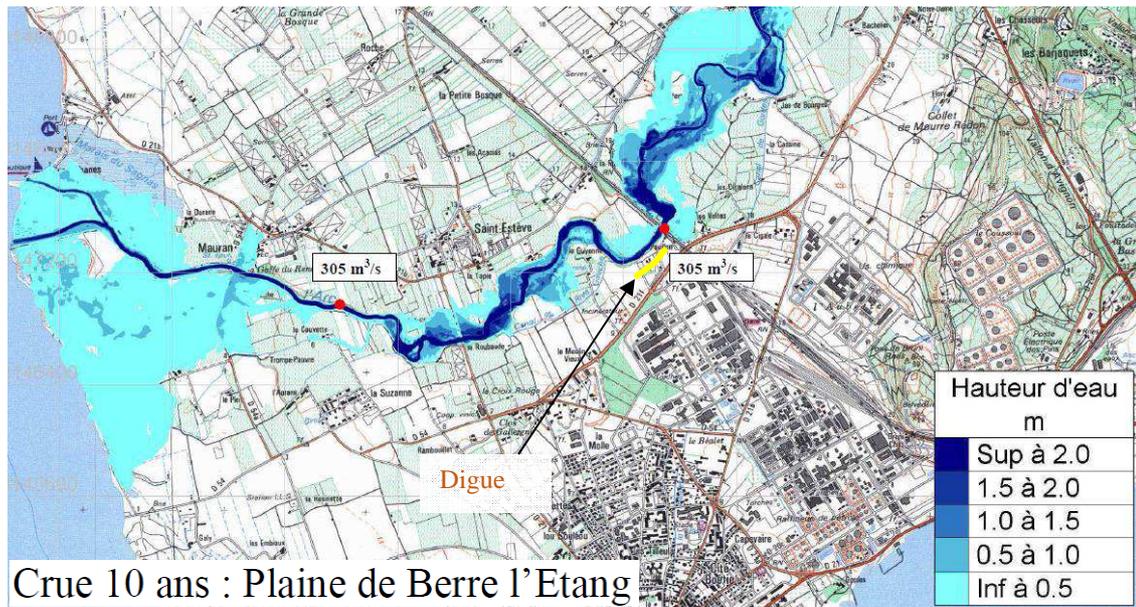
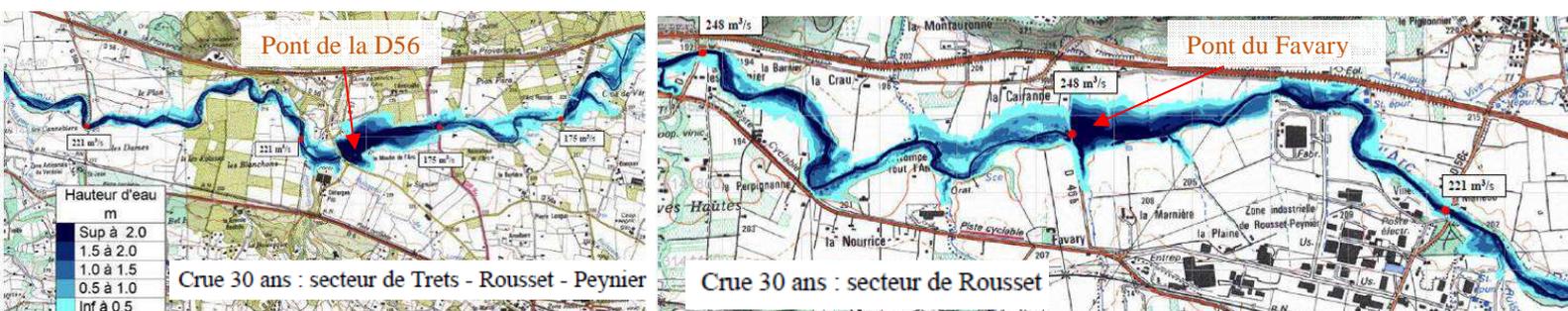


Figure 91 : hauteurs d'eau décennales (Berre l'Etang)

Pour la crue décennale, les vitesses en lit mineur sont supérieures à 1.5 m/s. Sur les zones de débordement, les vitesses sont inférieures à 0.5 m/s, hormis au niveau des coupures de méandre où les vitesses sont comprises entre 0.5 et 1.5 m/s.

6.1.2 Crue trentennale

L'emprise de la crue trentennale est nettement supérieure à la décennale. Dès la commune de Trets, les débordements en lit moyen, et les accumulations en amont des ouvrages sont importants.



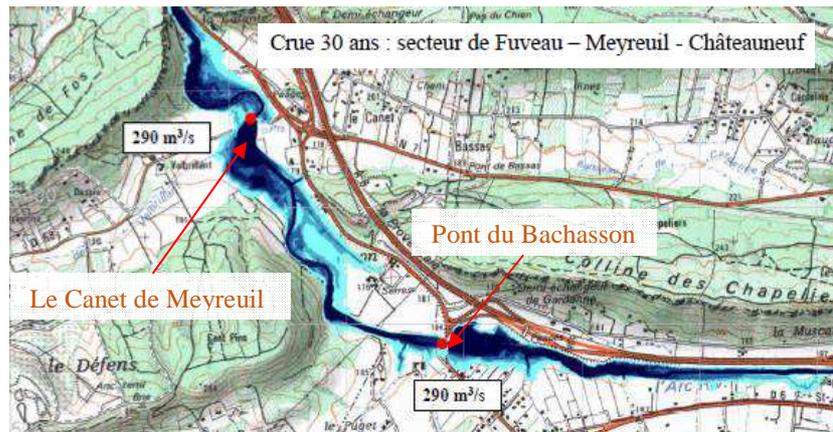
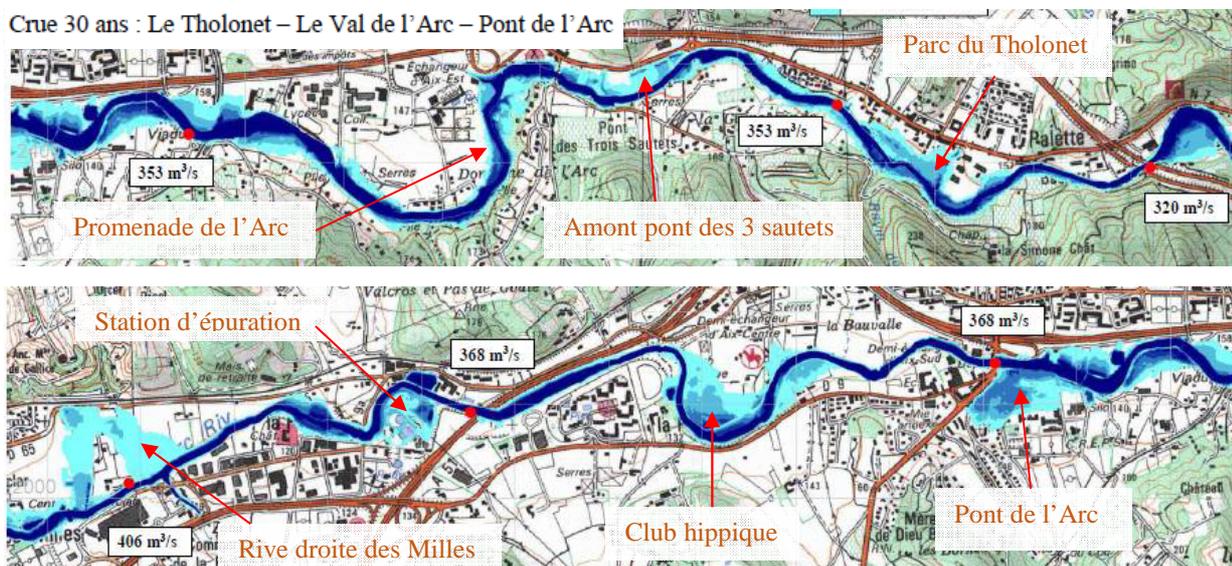


Figure 92 : Hauteurs de la crue trentennale – secteur Trets – Rousset – Peynier – Fuveau – Meyreuil - Châteauneuf

La digue de Bachasson ne surverse pas.

Sur le secteur d'Aix en Provence – Le Tholonet, des débordements en lit majeur se produisent : dans le parc du Tholonet, en amont du pont des 3 Sautets, au niveau de la promenade de l'Arc, secteur du Pont de l'Arc, au niveau du club hippique, de la station d'épuration de la Pioline et en rive droite au niveau des Milles :



Crue 30 ans : Le Pont de l'Arc – Beauville – La Parade – La Pioline

Figure 93 : Hauteurs de la crue trentennale – secteur Le Tholonet – Val de l'Arc – Pont de l'Arc – Beauville – Parade - Pioline

A l'aval du village des Milles, les 3 digues rive gauche de la ZEC ne surverse pas mais des contournements amont et/ou aval se produisent. L'aérodrome n'est pas inondé. La partie basse du quartier de la Badesse est inondé.

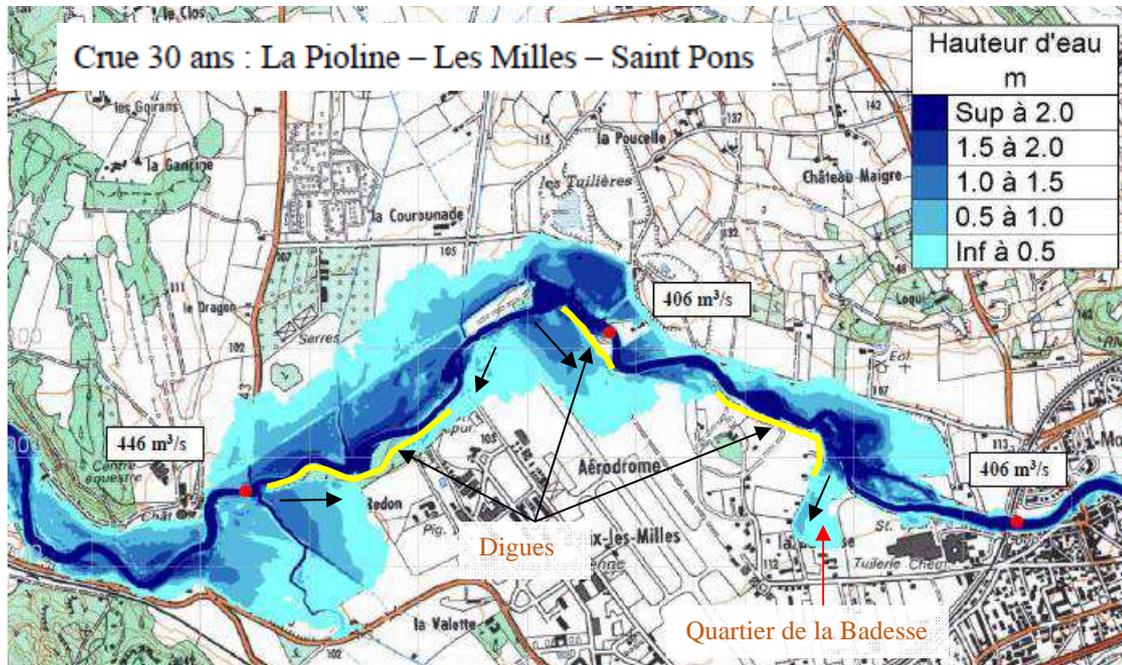
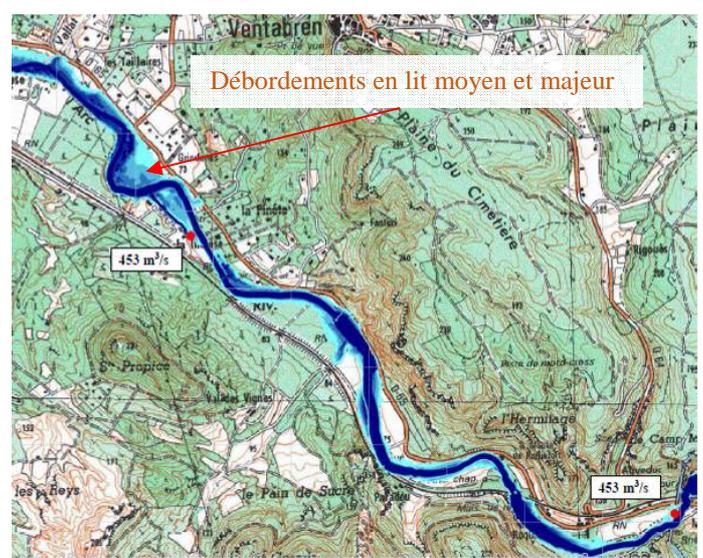


Figure 94 : Hauteurs de la crue trentennale – secteur La Pioline – Les Milles – Saint Pons

Dans les gorges de Roquefavour et à leur sortie, les débordements en lit moyen et majeur sont importants :



Crue 30 ans : De Roquefavour (Aix en Provence)
au Moulin du Pont (Ventabren)

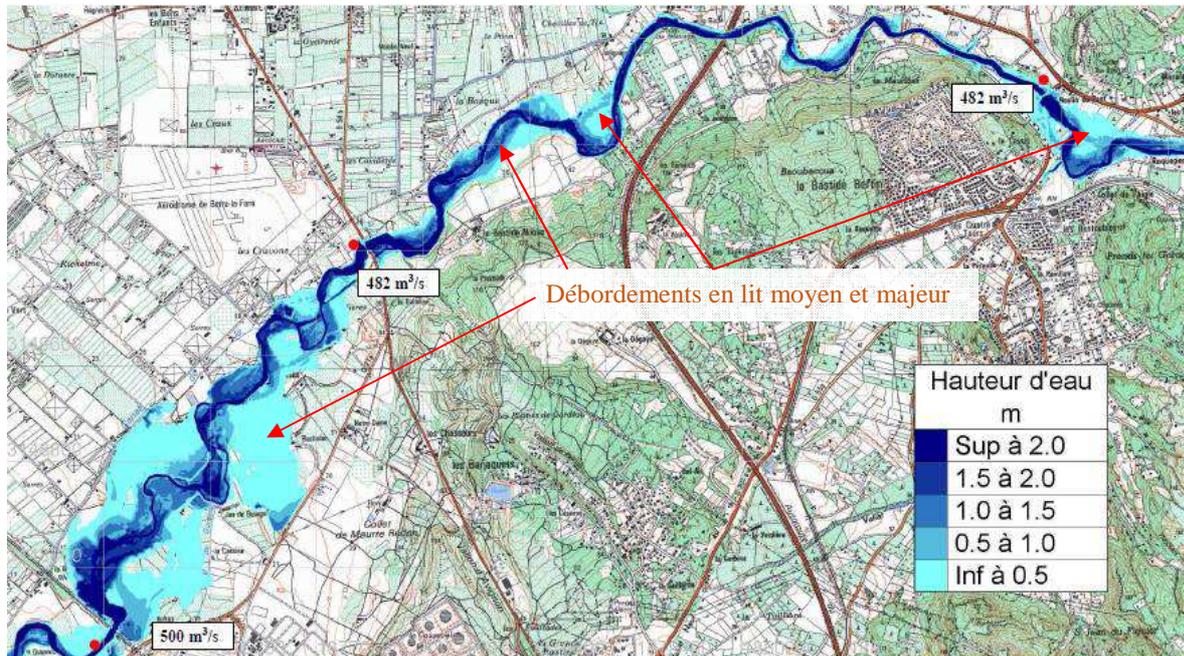


Figure 95 : Hauteurs de la crue trentennale – entre la ZEC des Milles et Berre l'Étang

Dans le delta de Berre, l'écoulement s'étale et une partie se dirige vers le centre-ville de Berre, dont une partie est inondée. La digue de Guienne est submergée. Les hameaux de Saint Estève et Mauran sont inondés.

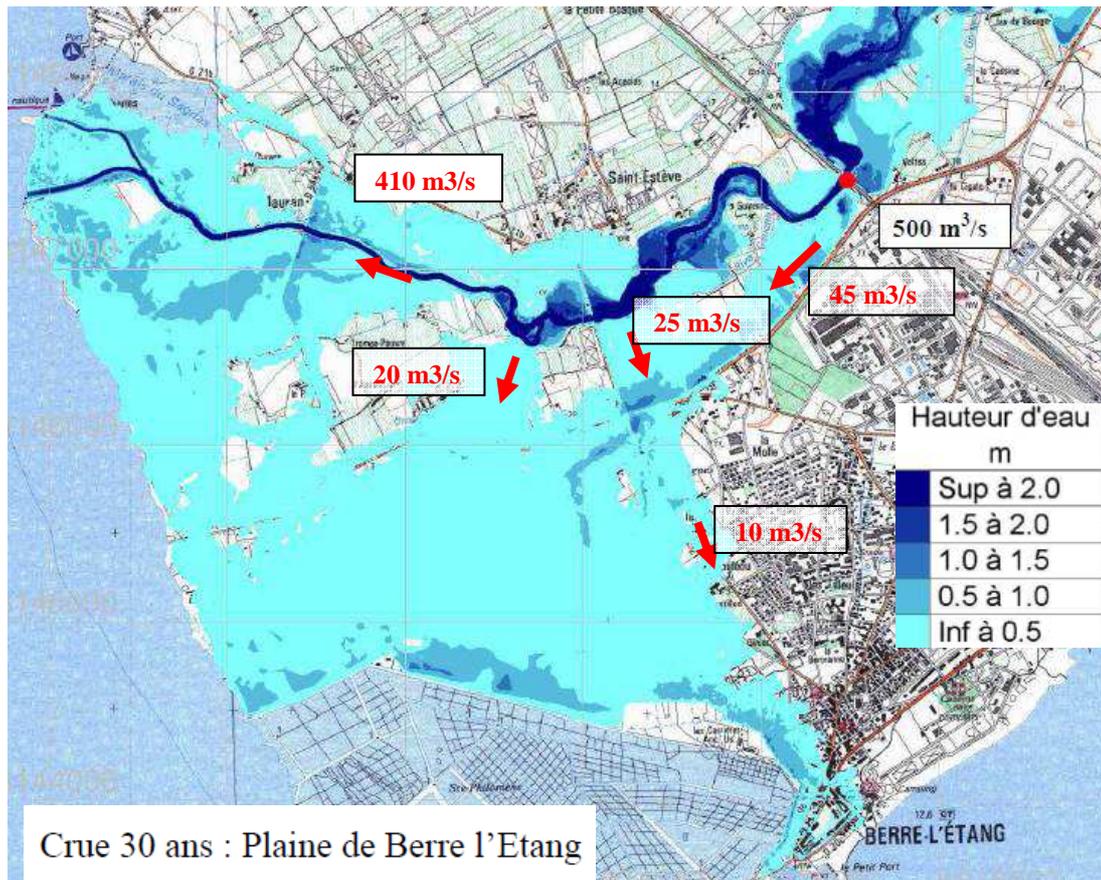


Figure 96 : Hauteurs de la crue trentennale – plaine de Berre l'Étang

La crue trentennale est supérieure en débit, sur la partie aval du bassin versant, à la crue de janvier 1978 (pour mémoire Q_{30} à la voie ferrée de Berre = $500 \text{ m}^3/\text{s}$ – Q_{1978} au même endroit = $385 \text{ m}^3/\text{s}$). Pourtant le débit déversant en rive gauche de l'Arc avant le pont de St Estève était plus fort en 1978 ($160 \text{ m}^3/\text{s}$) que pour la crue trentennale ($70 \text{ m}^3/\text{s}$), de fait les inondations dans le centre de Berre étaient plus forte en 1978 qu'elle le serait en cas de crue trentennale.

Les explications de ce phénomène sont les suivantes :

- la construction de la digue de Guienne (inexistante en 1978) qui bien que surversante en cas de crue trentennale, limite le débit déversant en rive gauche;
- la présence importante de débris dans le lit mineur et majeur et la présence d'embâcles dans ce secteur en 1978, qui a pour effet l'augmentation de la ligne d'eau.

6.2 CRUE DE REFERENCE

6.2.1 Allure générale de la crue

Les cartes de hauteurs d'eau et vitesses d'écoulement de la crue de référence (correspondant à l'application sur le bassin versant de l'Arc de l'épisode pluviométrique qui s'est abattu sur le Var le 15 juin 2010) sont présentées en annexe.

La crue de référence est largement débordante sur tout le linéaire de l'Arc. Le quartier de la Barque est l'un des premiers secteurs à enjeux touchés. Suivent ensuite une partie de la zone industrielle du Canet de Meyreuil :

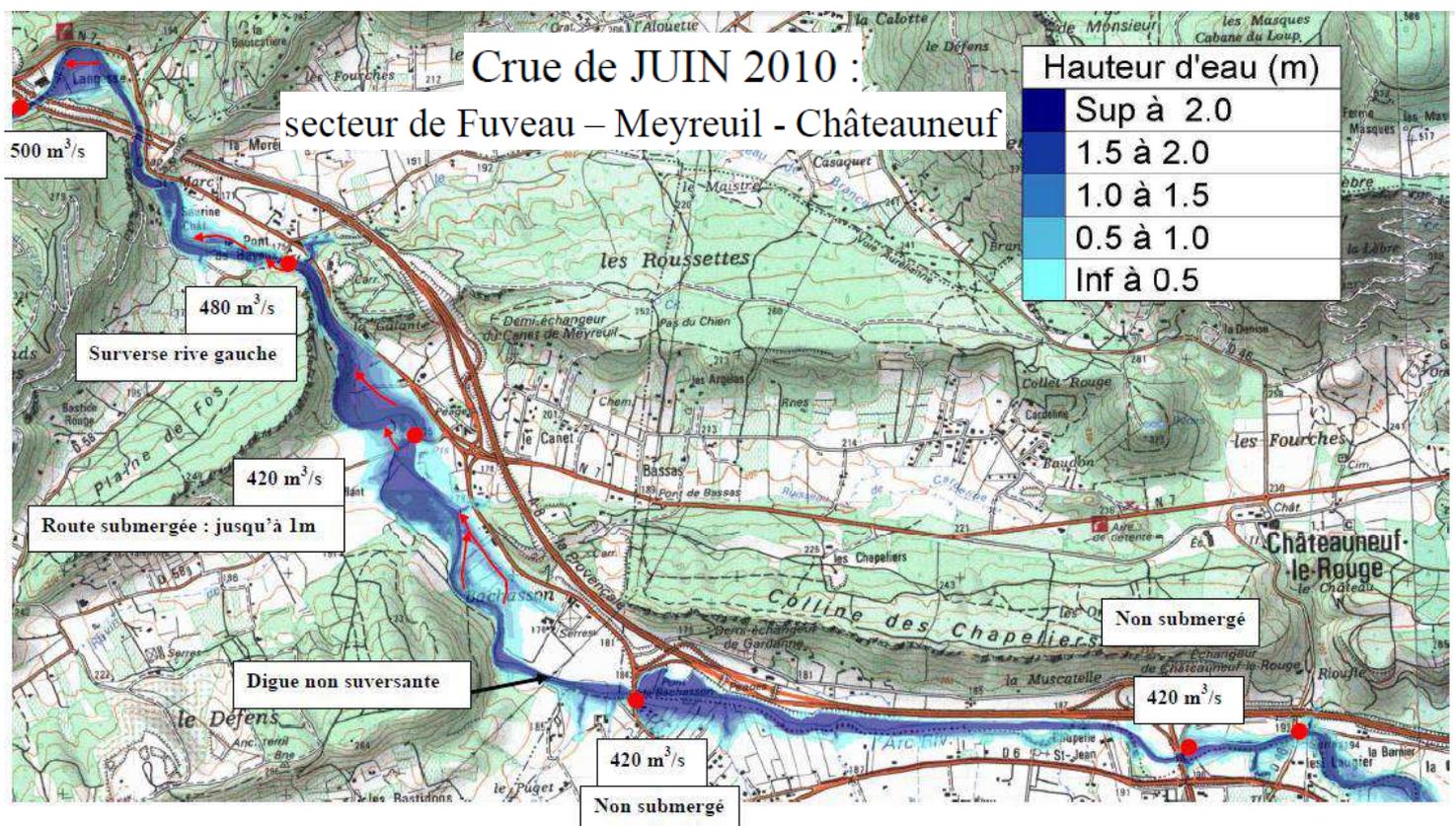


Figure 97 : hauteurs d'eau de référence (Bachasson)

Les quartiers et zone commerciale du Tholonet en bordure de l'Arc, le secteur du Pont des Trois Sautets, le secteur de l'Arc de Meyran et du Pont de l'Arc.

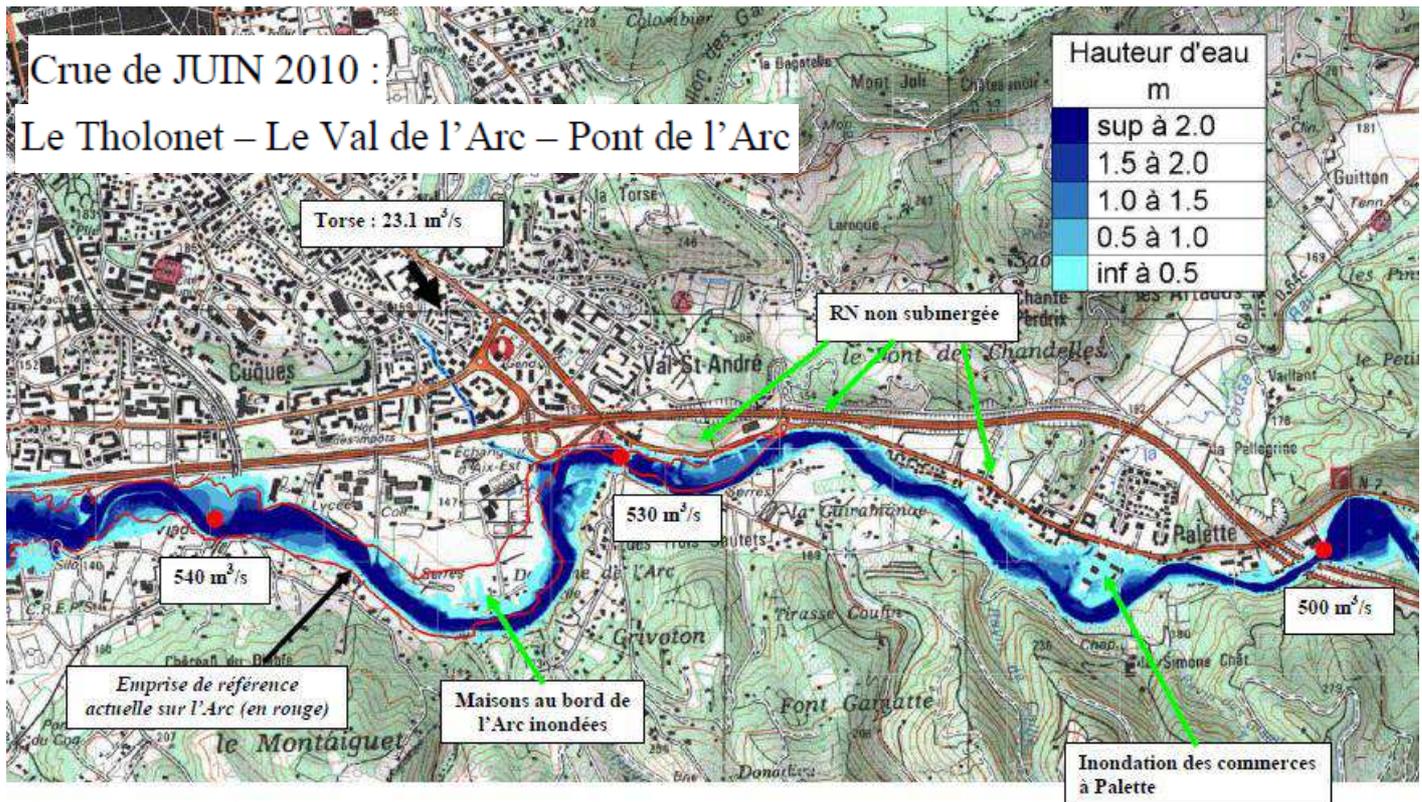


Figure 98 : hauteurs d'eau de référence (Le Tholonet – Val de l'Arc – Pont de l'Arc)

Au niveau de la sortie d'autoroute « Pont de l'Arc » des débordements se produisent en rive gauche et rejoignent l'autoroute A8, les écoulements s'écoulent sur quelques centaines de mètres et rejoignent l'Arc à l'aval du pont.

Toujours à Aix en Provence, les quartiers Beauvalle et La Parade sont également fortement impactés par la crue de référence. Il est de même pour la station d'épuration et les activités en rive droite de l'Arc immédiatement après le franchissement de l'A51.

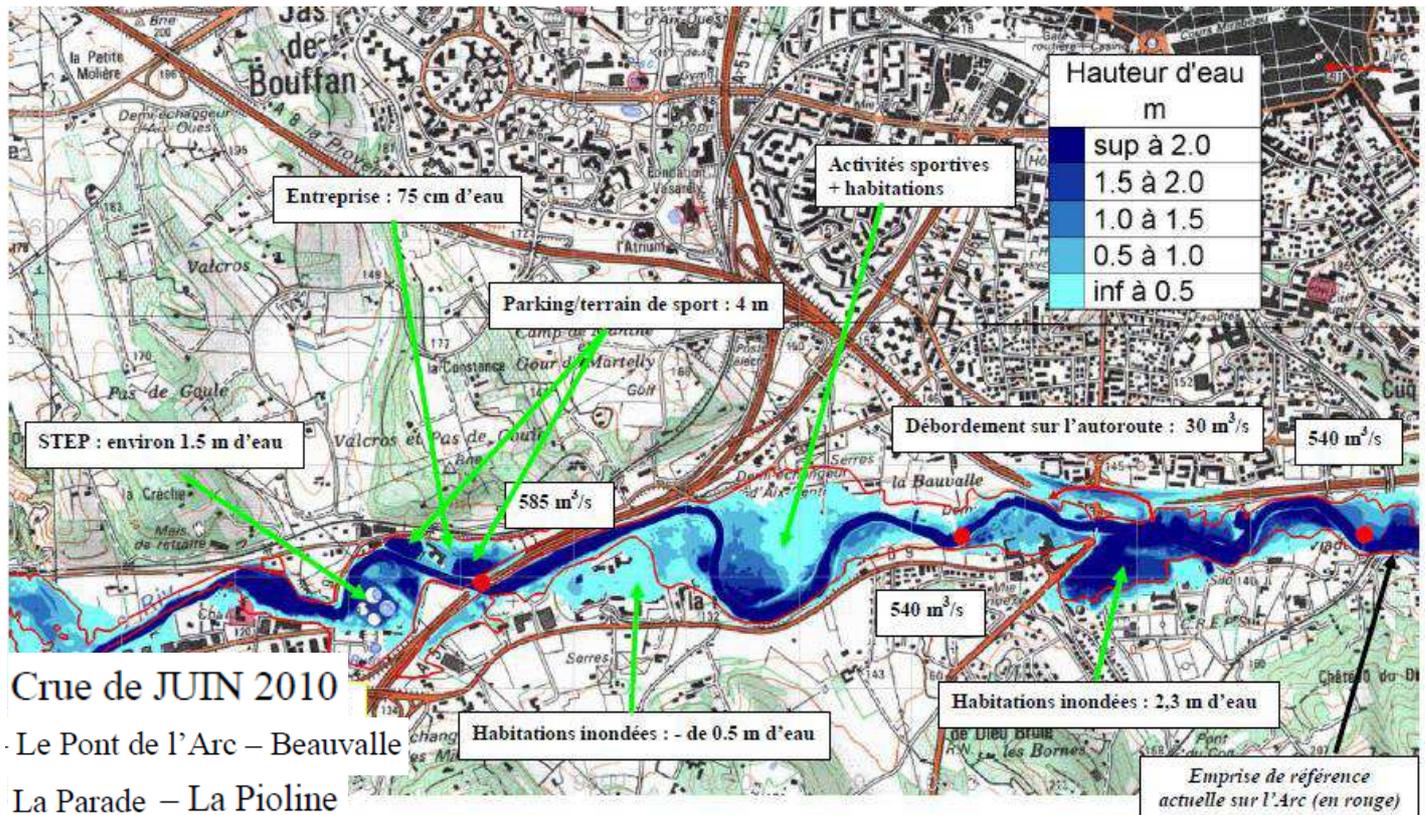


Figure 99 : hauteurs d'eau de référence (Pont de l'Arc, Beauvalle, La Parade, La Pioline)

La rive droite des Milles et les habitats pavillonnaires qui s'y trouvent sont également inondés. Les terrains de sport en rive gauche de l'Arc aux Milles sont inondés par plus de 3 m d'eau. A l'arrivée sur la ZEC de la plaine des Milles, des débordements importants se produisent. La digue de la Badesse n'est pas submergée mais elle est contournée par l'amont. Les quartiers du même nom sont ainsi inondés. La seconde digue, situé en rive gauche, à proximité de Saint Pons, est contournée par l'amont et par l'aval : l'écoulement atteint le nord de l'aérodrome :

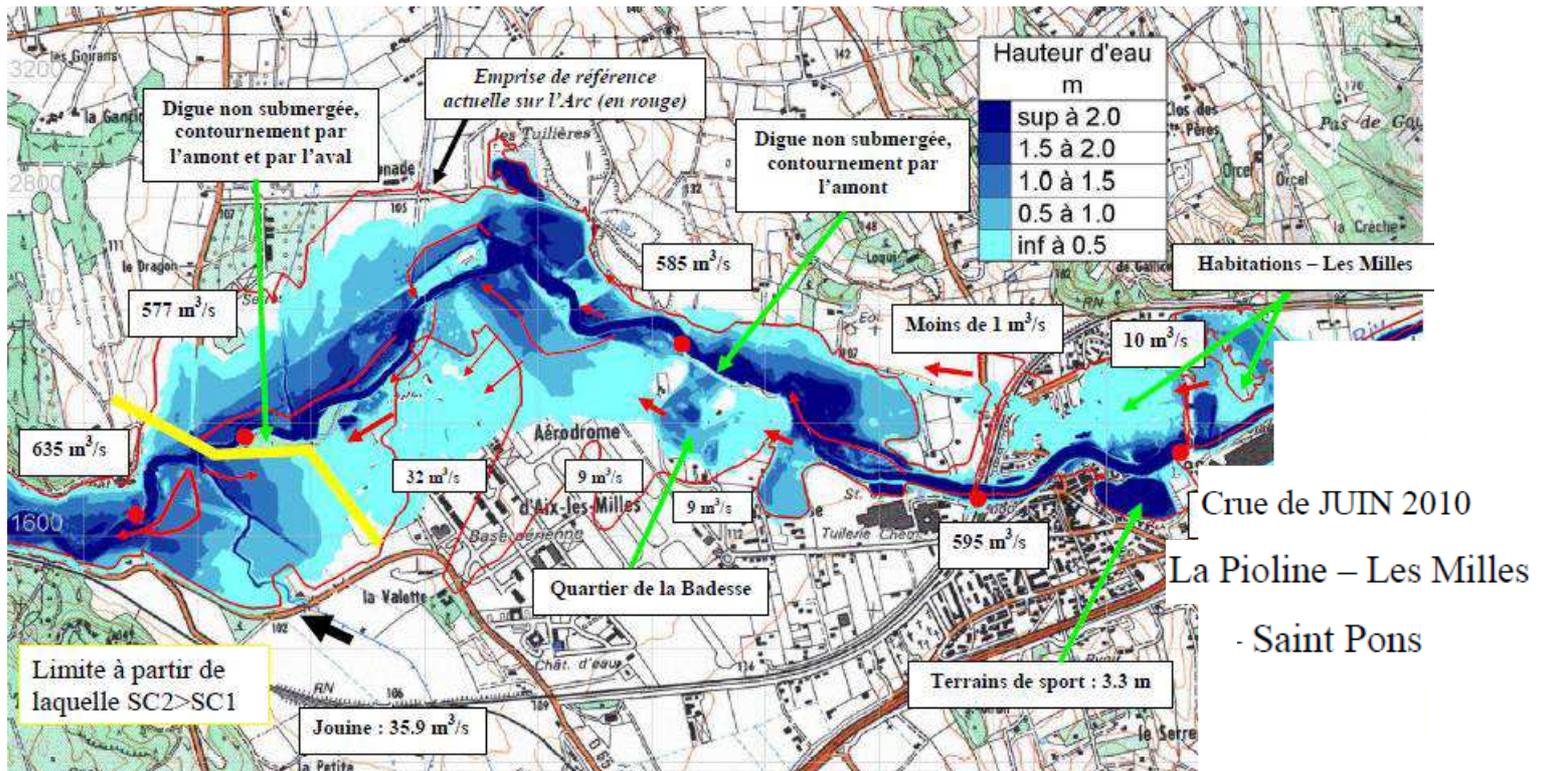


Figure 100 : hauteurs d'eau de référence (La Pioline, Les Milles, Saint Pons)

A la sortie de la ZEC, la crue est largement débordante en lit majeur. Les parcelles qui s'y trouvent sont inondées par des hauteurs d'eau qui varient entre 1.5 et 3 m. Des axes d'écoulement secondaire se créent en lit majeur. En amont de Roquefavour, plusieurs habitations sont inondées. A l'hôtel Arquier, la cote d'eau est environ 1.20 m plus haut qu'en 1978.

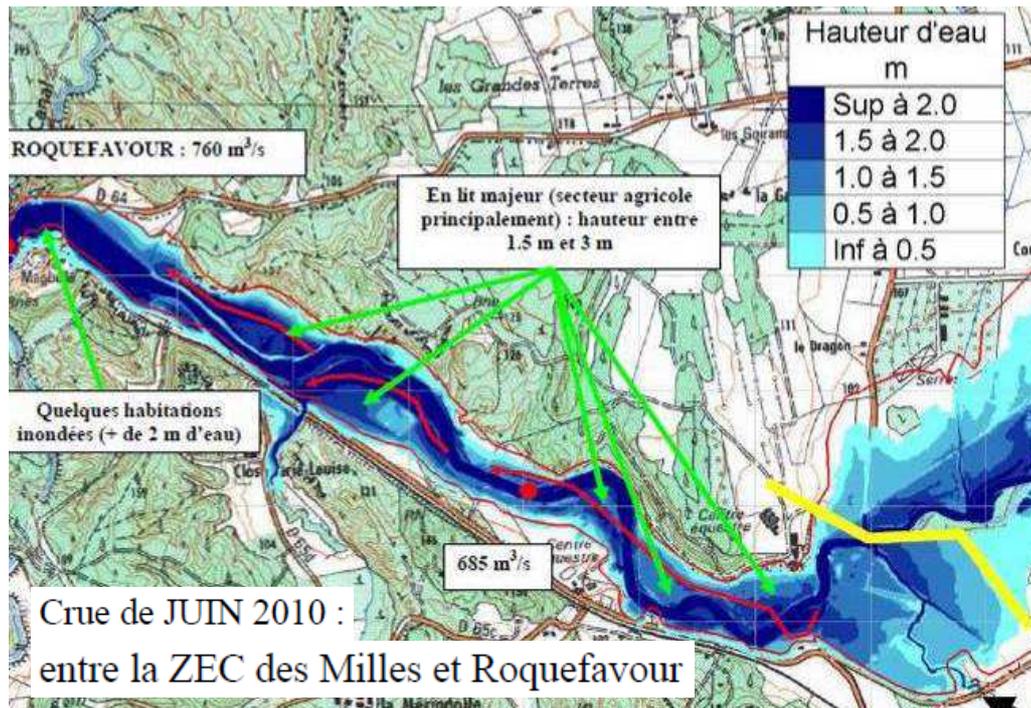


Figure 101 : hauteurs d'eau de référence (entre la ZEC des Milles et Roquefavour)

Plus en Aval (communes de Velaux, Ventabren et Coudoux), plusieurs quartiers sont inondés par les débordements de l'Arc : La Thérèse, Roquepertuse, le Moulin du Pont. Au niveau de certaines coupures de méandre, les débits en lit majeur sont très forts (300 m³/s) :

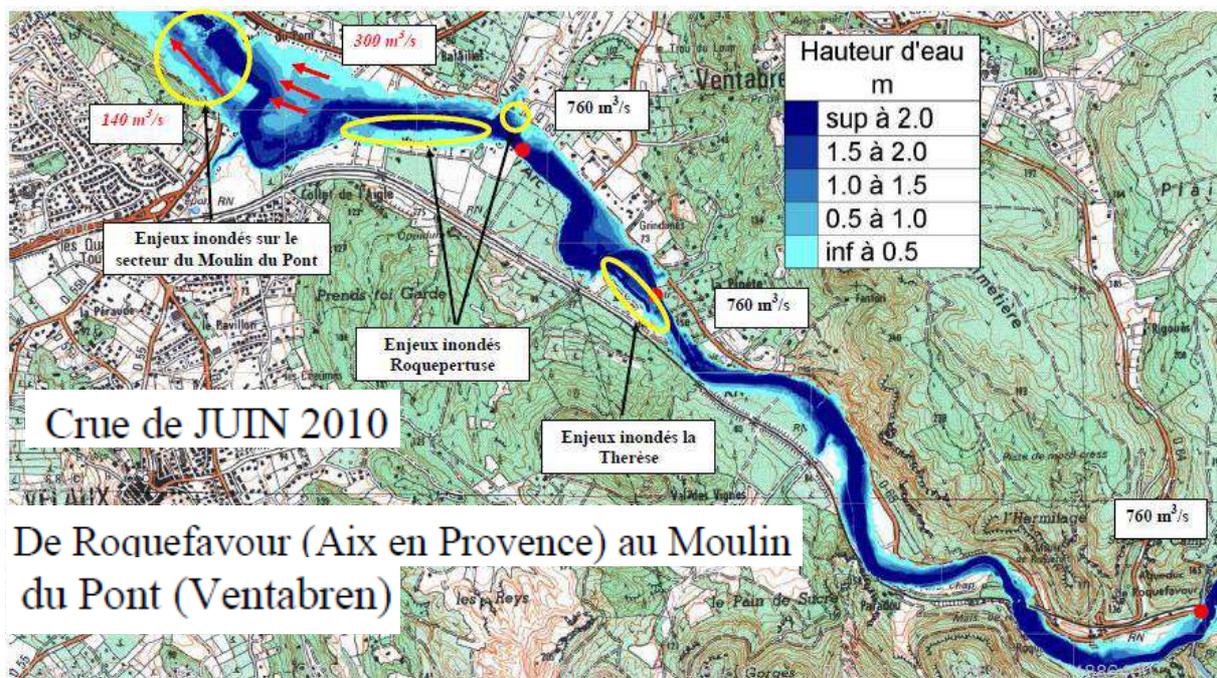


Figure 102 : hauteurs d'eau de référence (entre la ZEC des Milles et Roquefavour)

La zone inondable atteint les limites du lit majeur qui reste relativement encaissé jusqu'à la RN113 à Berre l'Étang. Au-delà, l'écoulement s'étale de façon plus importante dans une cuvette qui se remplit à l'amont de la voie ferrée. Dans ce secteur plusieurs hameaux constitués de quelques habitations sont inondés : les Oulières, Gatte et Brémonnes, La Cassine et les Voltes.

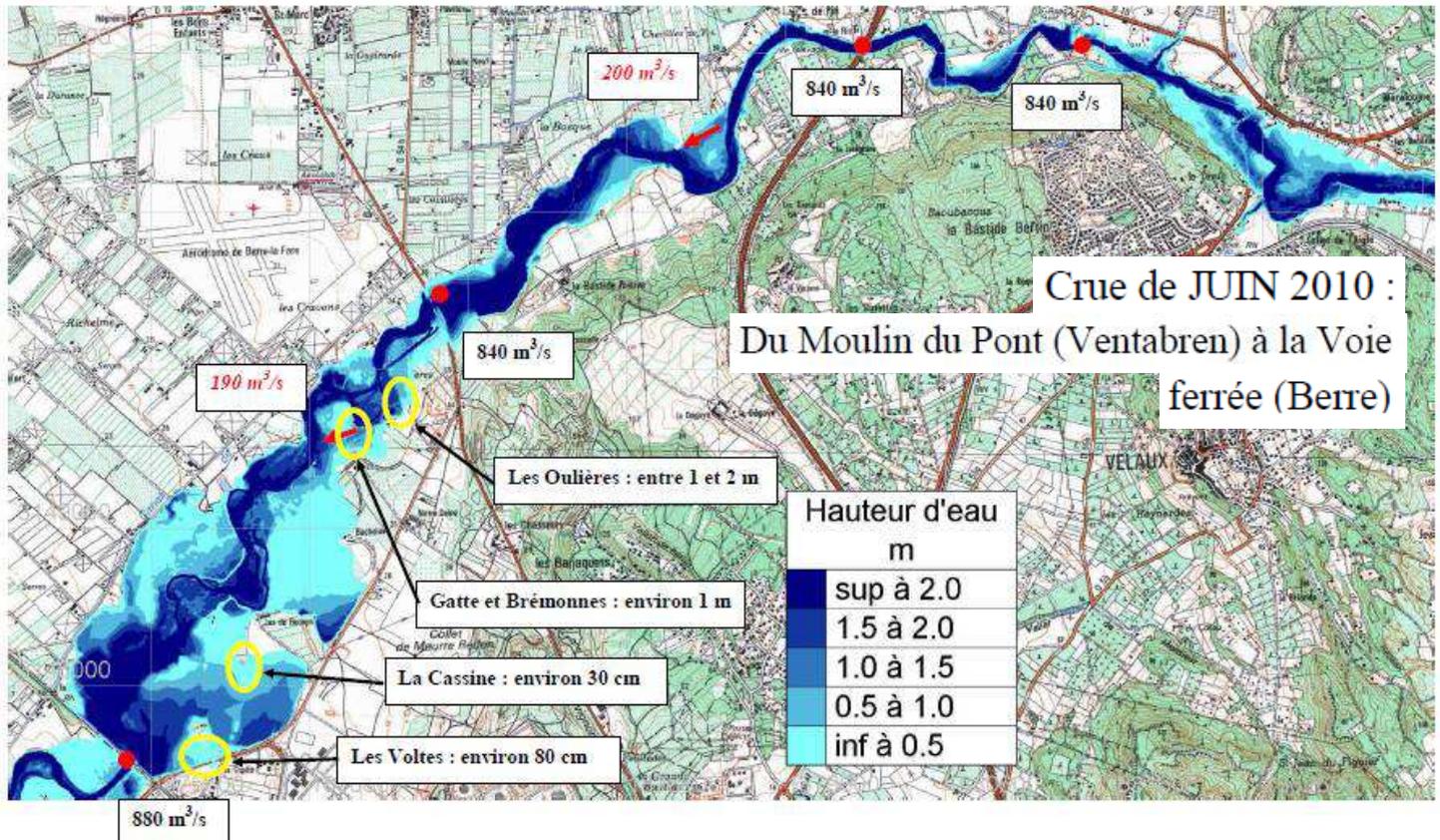


Figure 103 : hauteurs d'eau de référence (entre le Moulin du Pont et la voie ferrée de Berre)

A l'aval de voie ferrée, l'écoulement s'étale et se divise dans le delta de Berre. La digue de Guienne est submergée, ce qui génère un écoulement (230 m³/s environ) contre la RD21f. Cet écoulement est rejoint par les déversements rive gauche, en amont de la RD21(100 m³/s). Une partie de cet écoulement se dirige en direction du sud et vers le centre de Berre (20 m³/s vers le centre). Les écoulements qui atteignent le centre ont, en grande majorité, des hauteurs d'eau inférieures à 50 cm.

Au total, entre 300 et 350 m³/s sur les 880 m³/s quittent l'axe principal de l'écoulement (axe du lit mineur) pour se diriger vers le sud.

En plus du centre ville de Berre, plusieurs enjeux sont touchés : Sud de Saint Estève, Mauran, le Clos de Galleigne, l'Épine et la Suzanne :

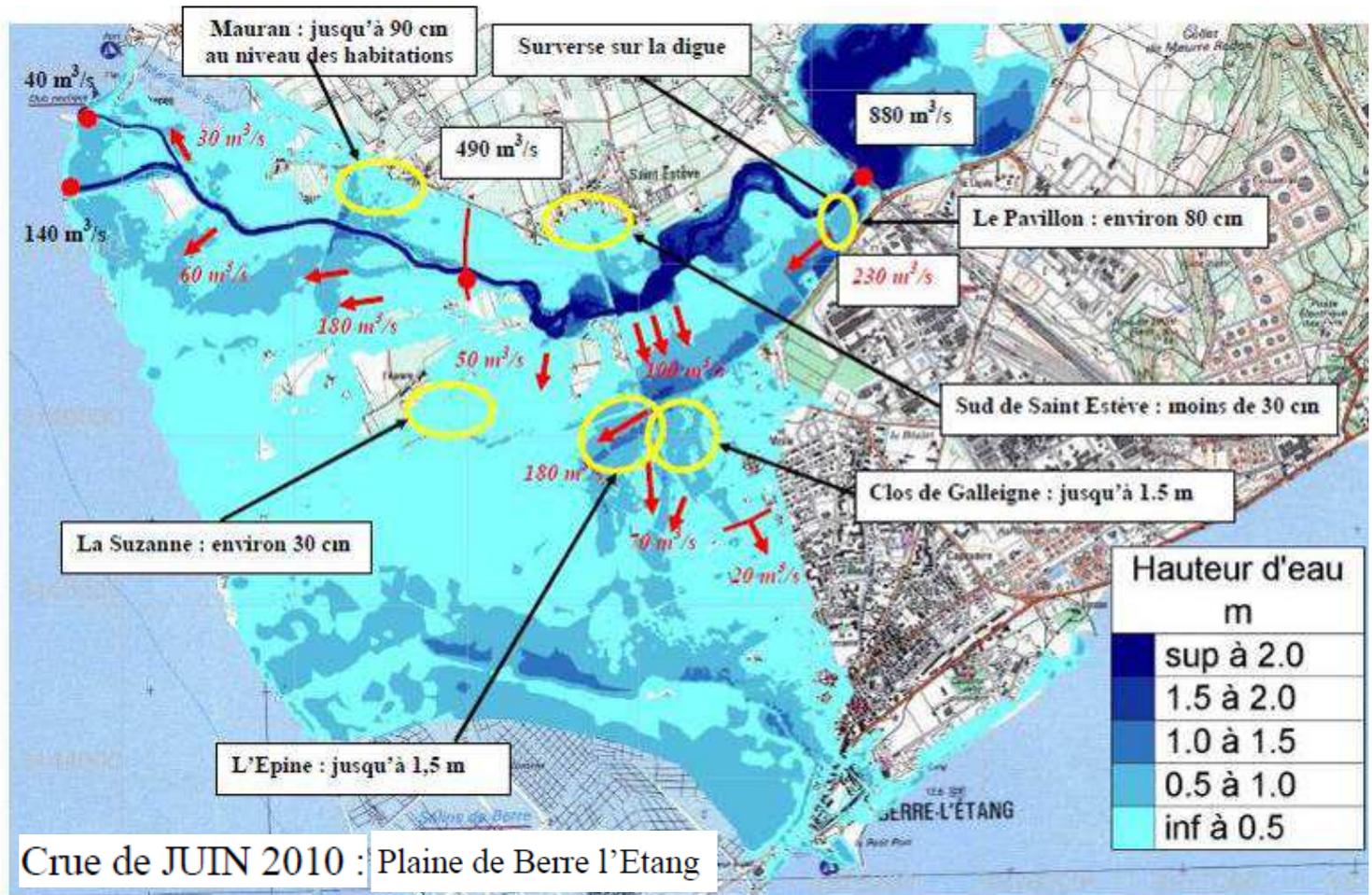


Figure 104 : hauteurs d'eau de référence (Plaine de Berre l'Étang)

Hormis dans les gorges de Roquefavour et dans les axes secondaires marqués, les vitesses en lit majeur sont inférieures à 1 m/s.

6.2.2 Aléa inondation

Les cartes d'aléa, issues du croisement des hauteurs et des vitesses, ont été déterminées selon la grille présentée sur la figure ci-dessous :

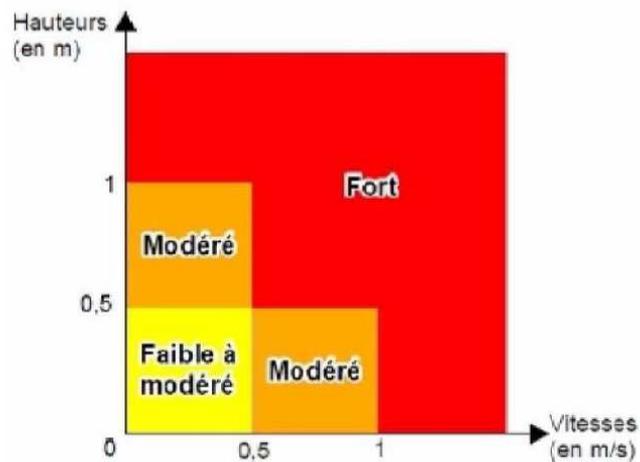


Figure 105 : grille d'aléa

Les cartes d'aléa sur l'ensemble du linéaire de l'Arc sont présentées en annexe.

6.2.3 Cas particulier de la digue de Bachasson

Une rupture de la digue de Bachasson (commune de Meyreuil) a été modélisée. La rupture a été située au début de la crue (pour maximiser les volumes débordés). La largeur de brèche a été déterminée selon des formules empiriques à partir de la hauteur de la digue (2 m environ), elle est de 30 m ; La brèche a été localisée au niveau de l'entrée du talweg en lit majeur, quelques mètres à l'aval du pont de Bachasson.

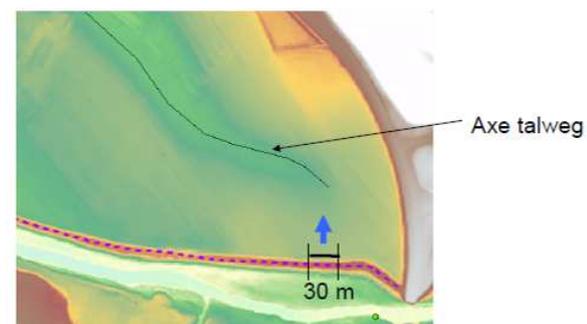
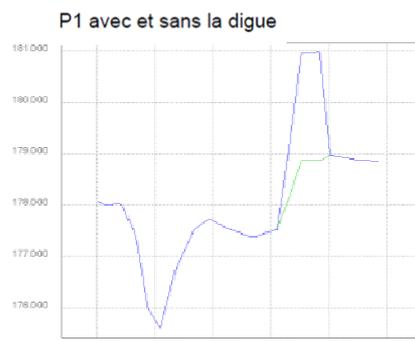
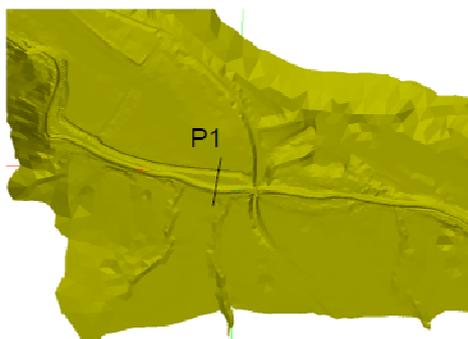


Figure 106 : Localisation de la rupture de la digue de Bachasson

Les résultats ont été comparés au résultat de la modélisation sans brèches. Ils sont présentés ci-dessous :

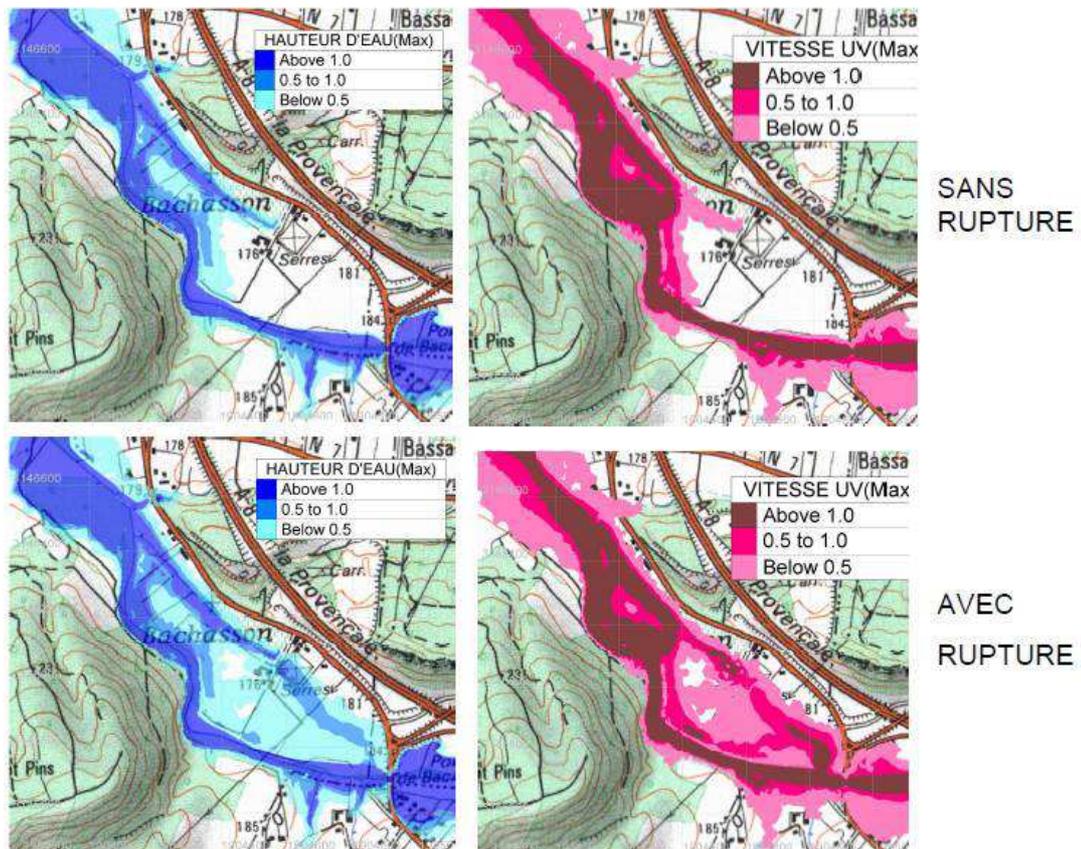


Figure 107 : Impact de la rupture de la digue de Bachasson

La modélisation de la rupture permet de mettre en évidence les terrains protégés par la digue. Sur ces terrains, les hauteurs d'eau, dans le cas de la modélisation avec rupture, sont inférieures à 0.5 m, hormis dans l'axe secondaire d'écoulement où elles sont comprises entre 0.5 et 1 m. Les vitesses en sortie de brèche et dans l'axe secondaire d'écoulement sont importantes.

Les cartes d'aléa de référence intègrent la rupture de la digue des Bachassons. (les secteurs inondables par la rupture sont représentés sous la forme de figuré hachuré).

6.3 CRUE EXCEPTIONNELLE

L'emprise de la crue exceptionnelle est nettement supérieure à celle de la crue de référence, en particulier à partir du secteur du pont de Bachassons.

Les figures ci-dessous illustrent les secteurs où les emprises varient fortement :

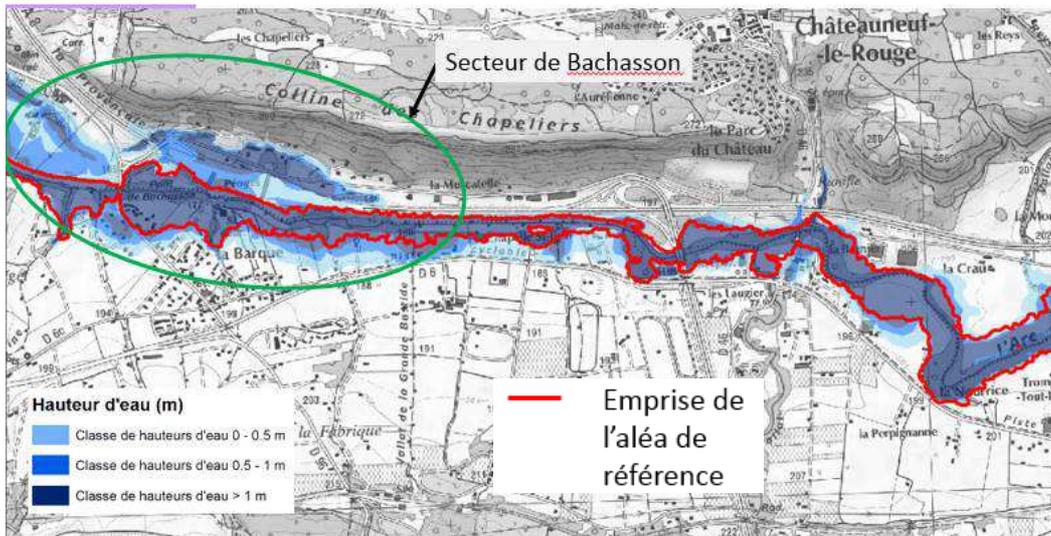


Figure 108 : Hauteurs de la crue exceptionnelle – secteur de Bachasson

Sur le secteur de Bachasson (figure ci-dessus), des débordements en amont du pont se produisent à la fois en rive gauche (route de la Barque) et en rive droite (Autoroute A8). La digue est submergée.

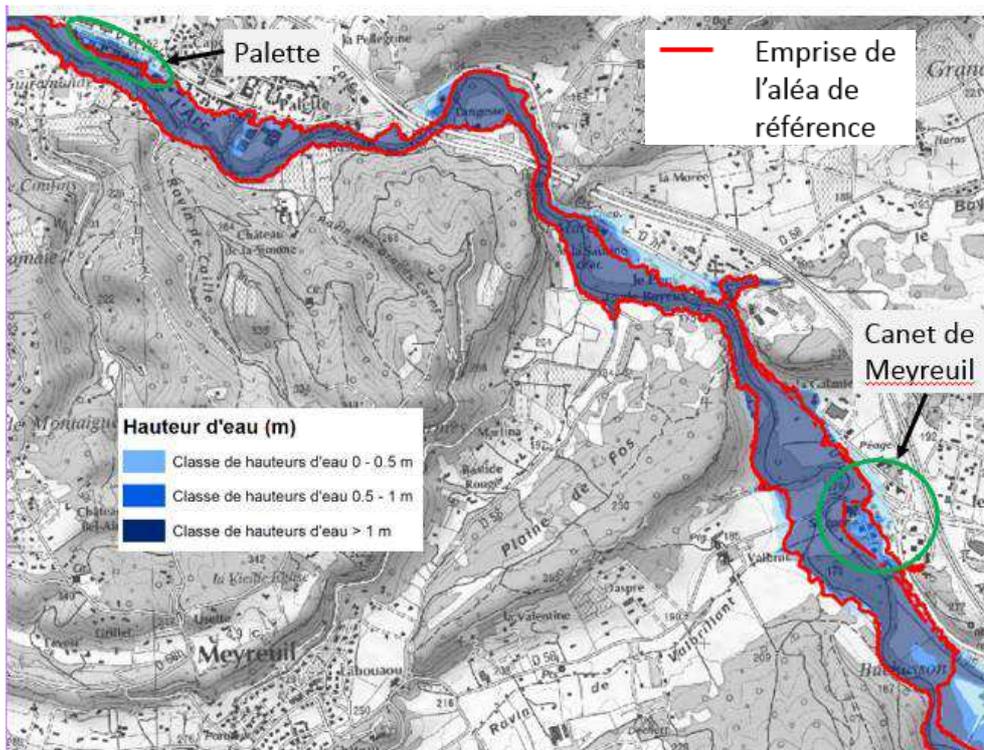


Figure 109 : Hauteurs de la crue exceptionnelle – secteur de Meyreuil – Le Tholonet

Les habitations du secteur de Palette sont inondées et la zone inondable atteint localement la D7n.

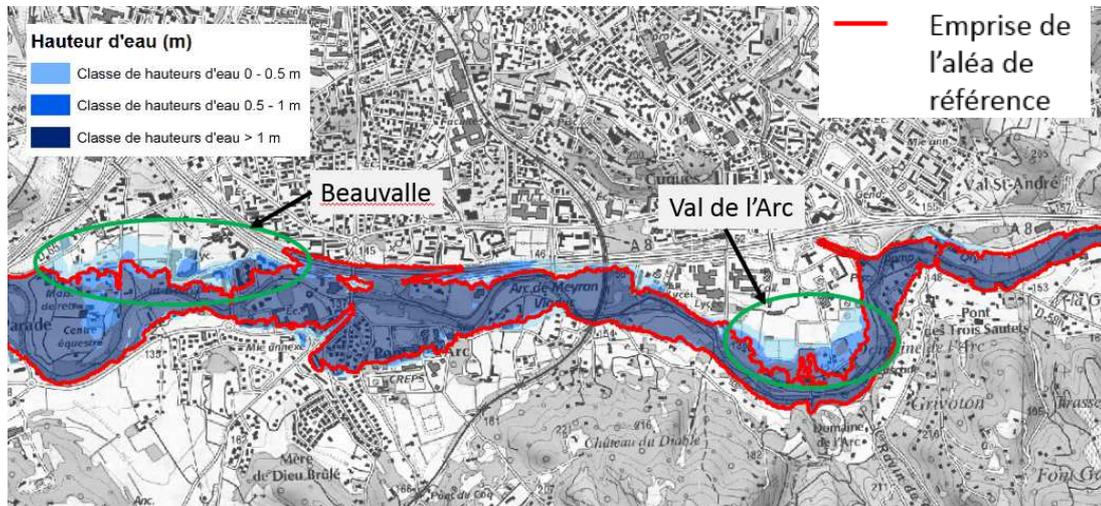


Figure 110 : Hauteurs de la crue exceptionnelle – secteur de Val de l'Arc - Beauvalle

Quartier val de l'Arc et Beauvalle, les emprises sont nettement supérieures pour la crue exceptionnelle. On retrouve l'axe de débordement sur l'autoroute qui avait été identifié pour la crue de référence.

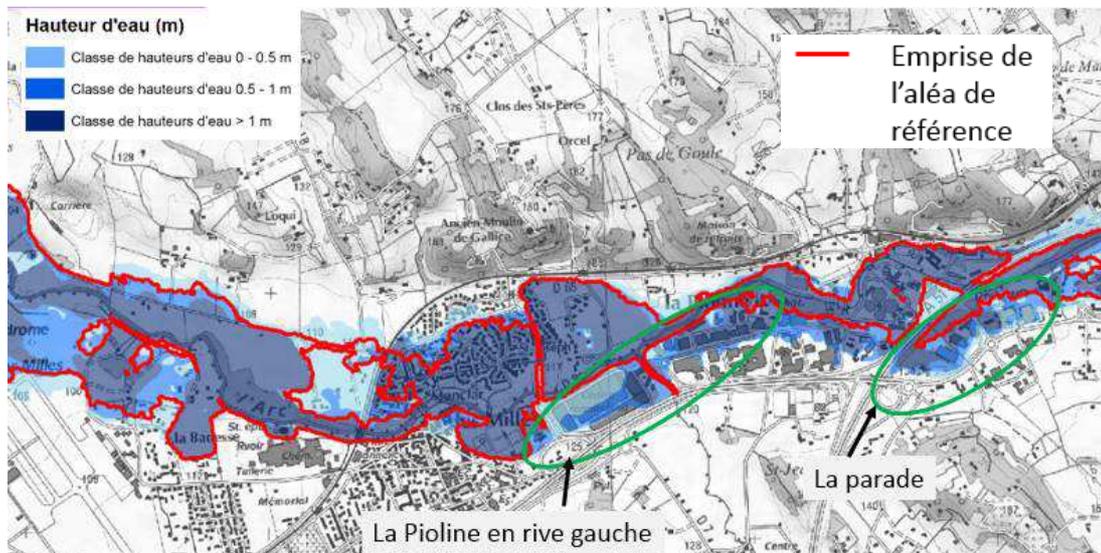


Figure 111 : Hauteurs de la crue exceptionnelle – secteur de la Pioline, la Parade

La zone d'activités de la Pioline, en rive gauche de l'Arc est inondée par l'Arc pour la crue exceptionnelle. Elle était hors-d'eau pour la crue de référence.

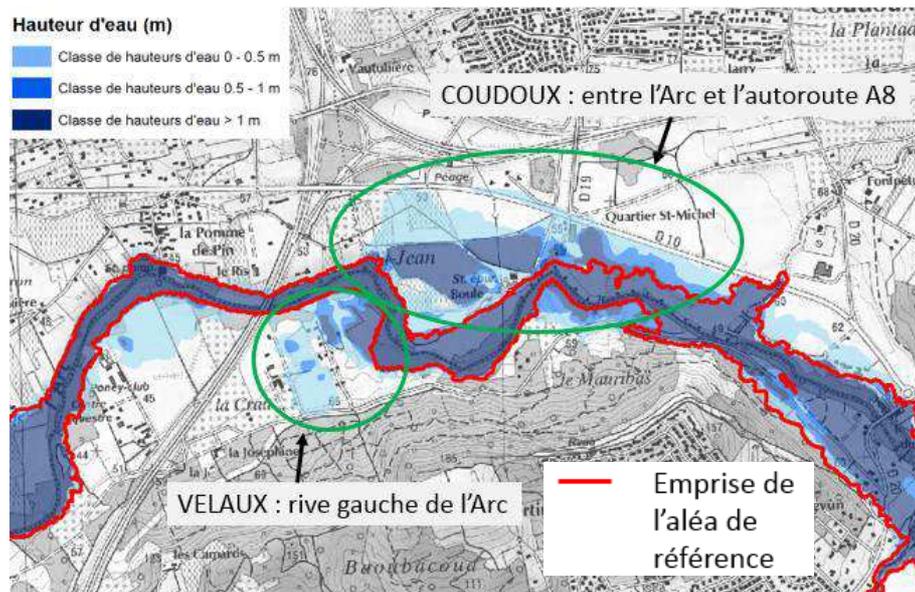


Figure 112 : Hauteurs de la crue exceptionnelle – secteur Coudoux - Velaux

A Coudoux et Velaux, les débordements en lit majeur sont conséquents.

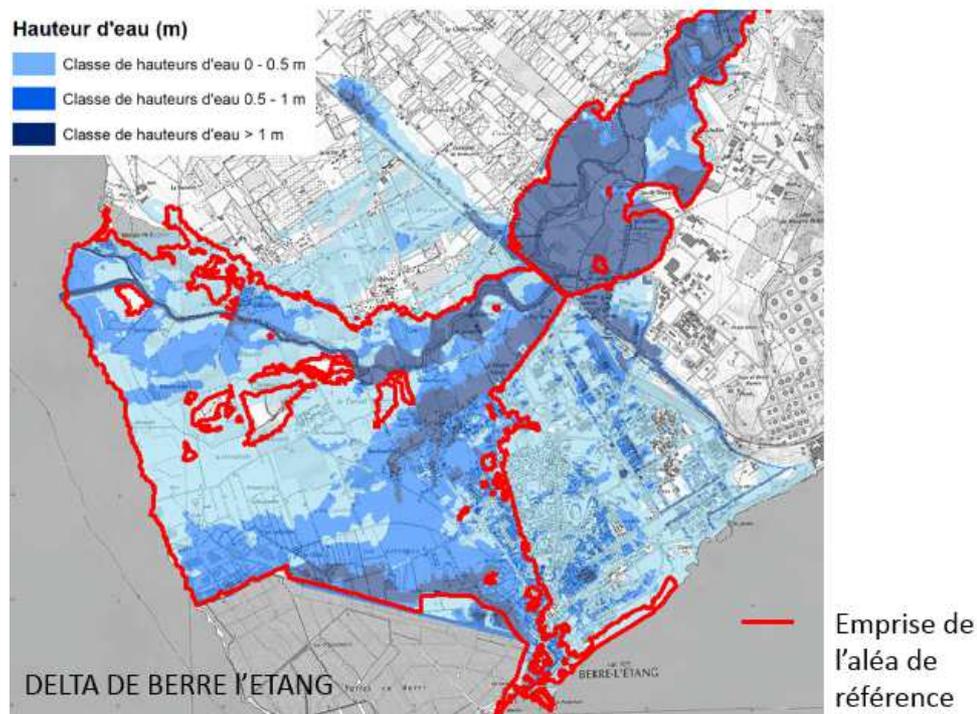


Figure 113 : Hauteurs de la crue exceptionnelle – secteur delta de Berre

Dans le delta de Berre, l'accumulation en amont de l'ouvrage de la voie ferrée est telle que des débordements en rive gauche s'étalent sur la zone industrielle. L'emprise des débordements en rive droite est également supérieure à l'emprise de référence. Le débit au pont de la voie ferrée est de 1700 m³/s environ.

6.4 CRUE DE PREMIER DEBORDEMENT

Des tronçons homogènes ont été identifiés et les capacités de lits mineurs et lits moyens ont été estimés. Cela permet d'identifier, pour chacun de ces tronçons homogènes, les débits à partir desquels on observe les premiers débordements.

La définition des lits mineurs et lits moyens sont rappelés sur la figure suivante :

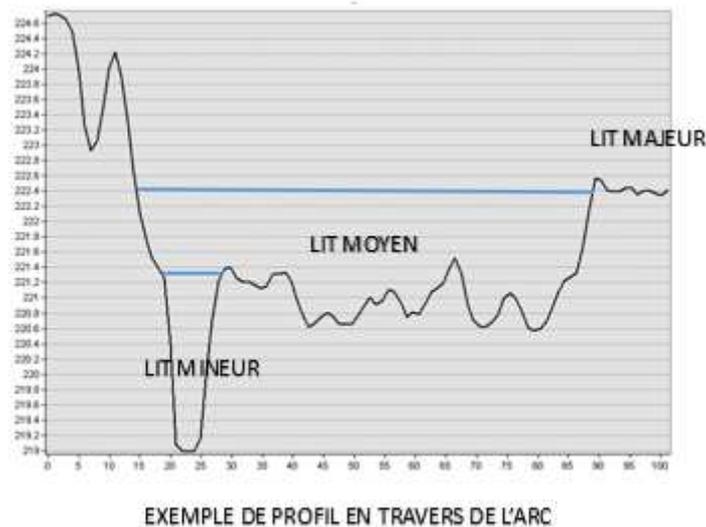


Figure 114 : Illustration lit mineur/lit moyen sur un profil en travers

Les cartes sont présentées en annexes. Les deux valeurs affichées sur les cartes correspondent à :

- La capacité du lit mineur ;
- La capacité de l'ensemble lit mineur + lit moyen.

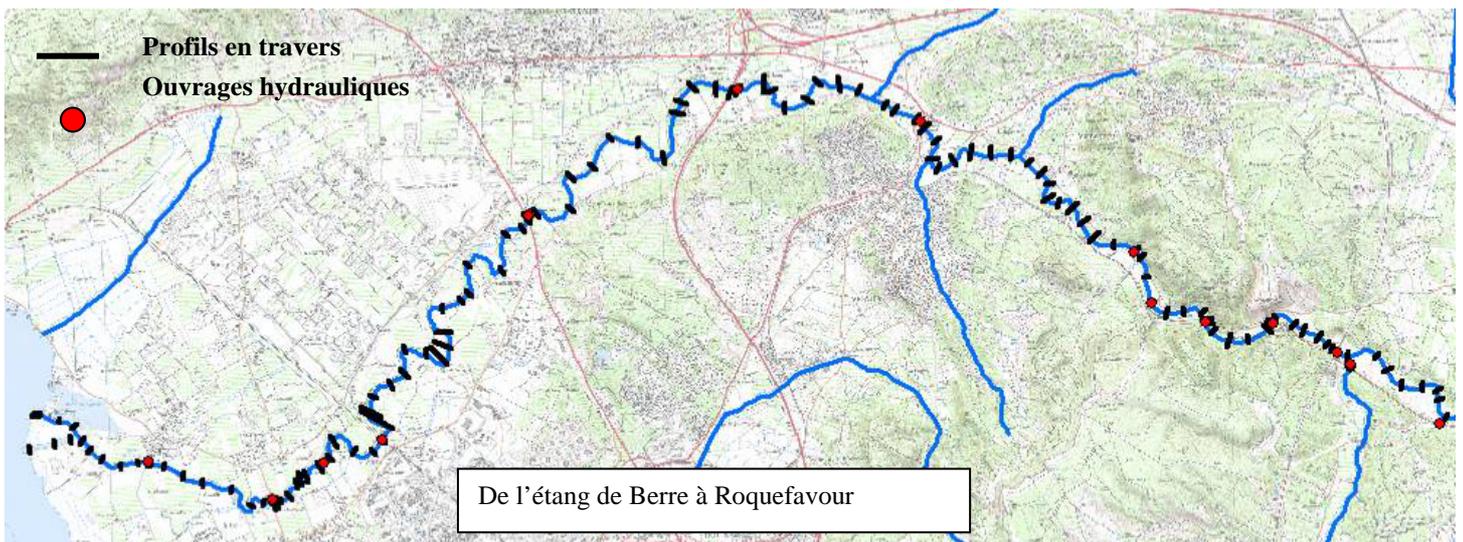
La capacité du lit mineur, hors secteur endigué, varie entre 25 et 150 m³/s le long du linéaire.

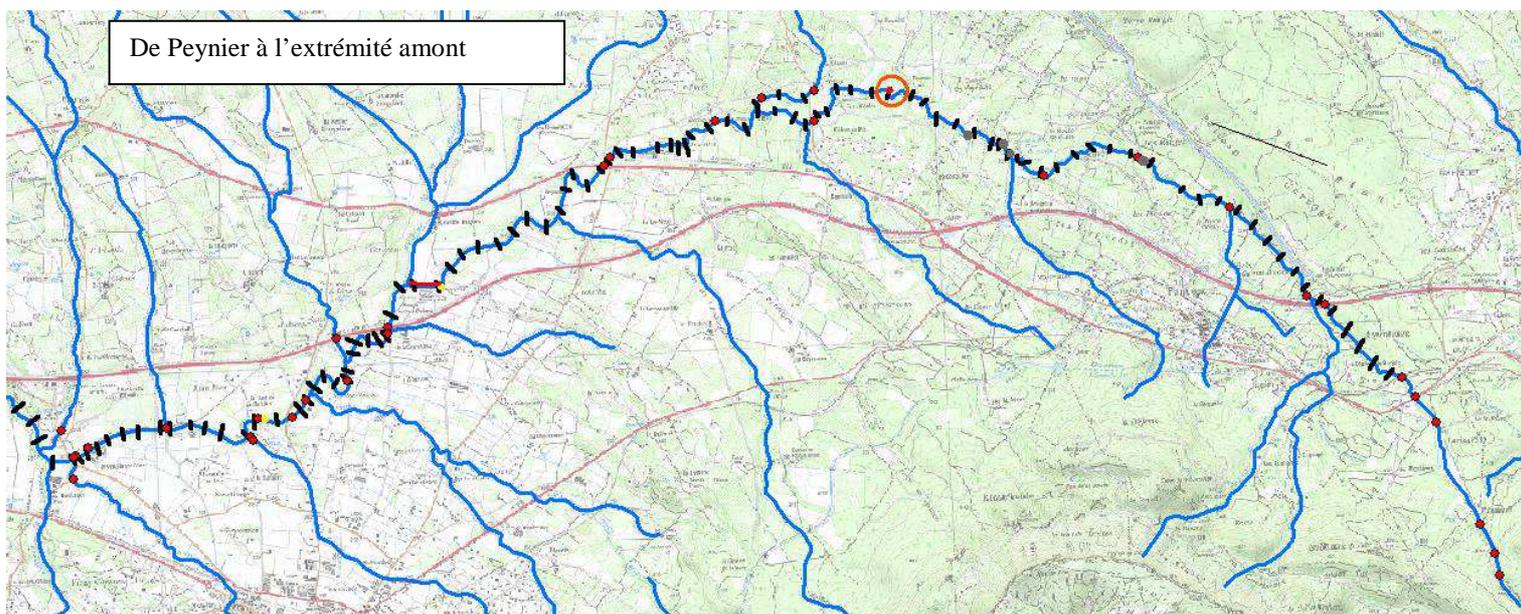
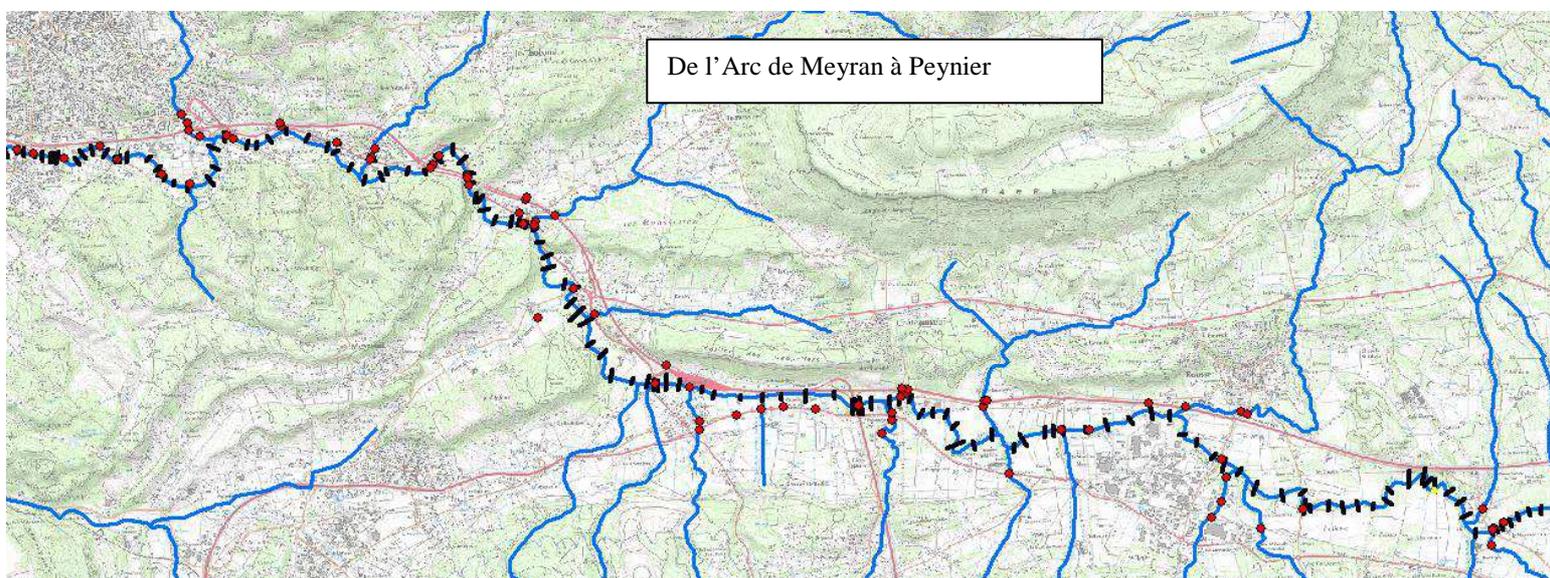
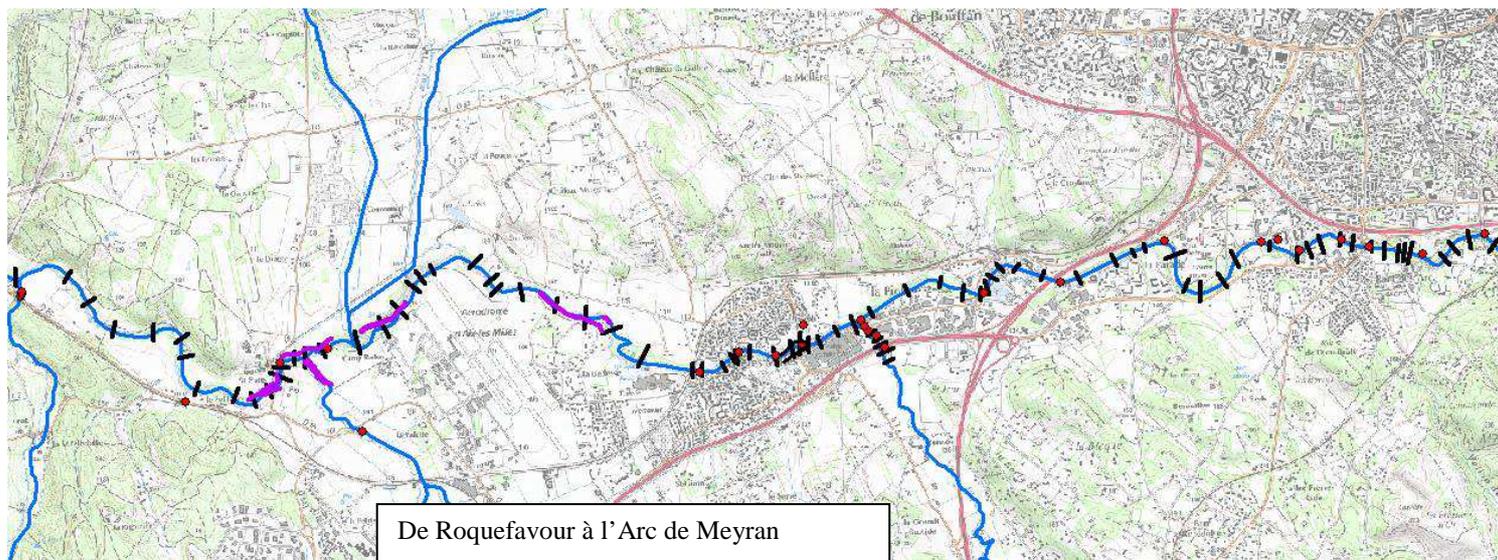
La capacité de l'ensemble lit mineur + lit moyen varie entre 100 m³/s et 1300 m³/s.

D'une façon générale, la capacité de l'ensemble « lit mineur + lit moyen + lit majeur » d'un cours d'eau augmente d'amont vers l'aval. En revanche, la variation de capacité de l'ensemble « lit mineur + lit moyen » n'est pas forcément croissante d'amont vers aval.

Sur le cours d'eau de l'Arc, l'anthropisation a fortement influencé l'hydrogéomorphologie du bassin.

7 ANNEXE 1 : LOCALISATION DES OUVRAGES HYDRAULIQUES ET PROFILS EN TRAVERS RELEVÉS SUR L'ARC





8 ANNEXE 2 : FICHES PHE POUR LA CRUE DE 1978



FICHE DE MARQUE DE CRUE

Référence 13_AixEnProvence_Arc_1978-01

Localisation

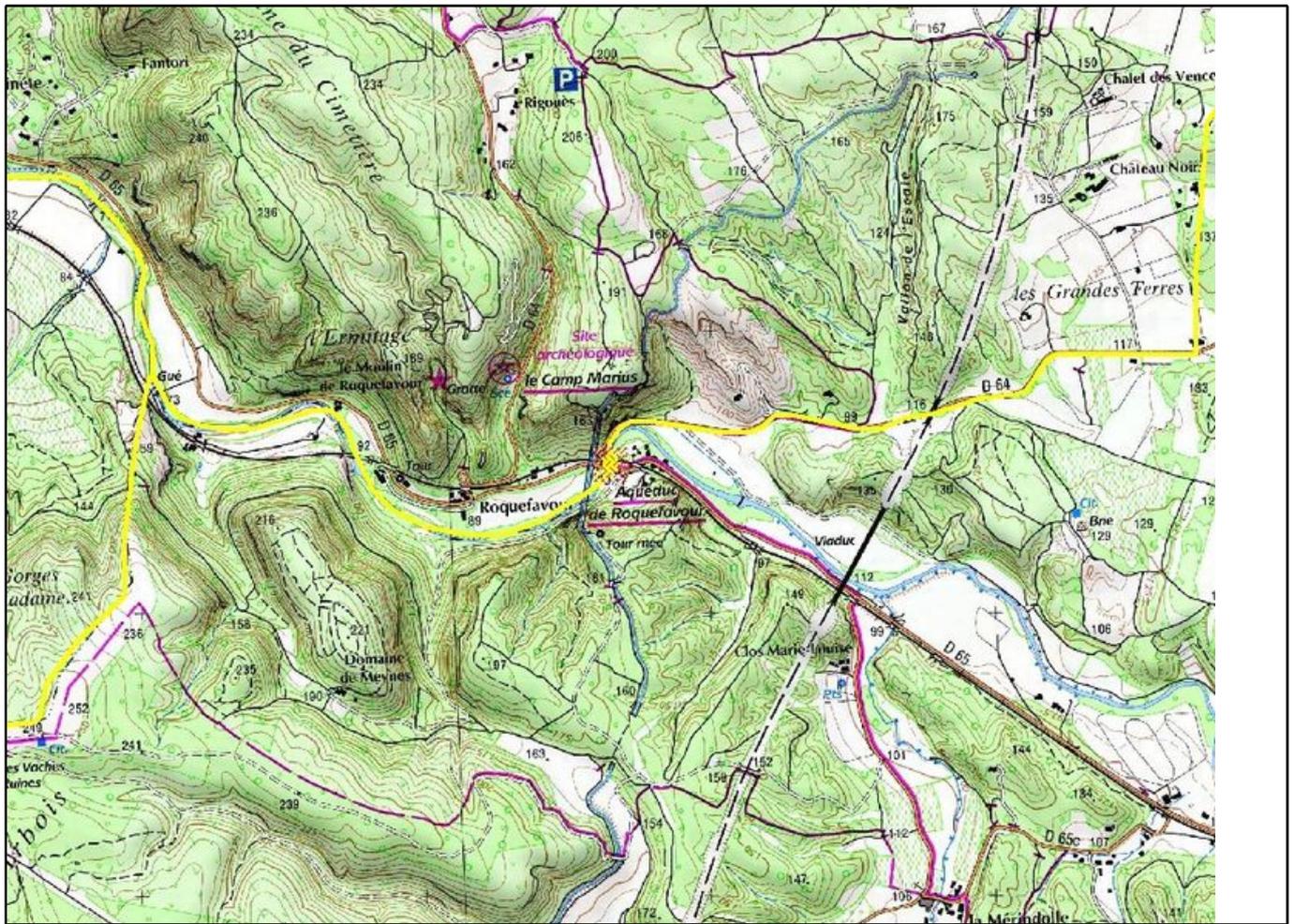
Localisation Générale

Département : BOUCHES-DU-RHONE
Commune : AIX-EN-PROVENCE
Lieu-dit : Roquefavour
Cours d'eau : arc, l'(rivière)
Bassin versant : L'Arc de la Cause incluse à l'étang de Berre

Coordonnées

X (m) 841019
Y (m) 1839500
Projection Lambert II étendu
Précision Précise (0 - 5 m)
Date de mesure 17 Janvier 1978

Carte : PLAN_export\13\Plan_13_AixEnProvence_Arc_1978-01_25000_150.jpg



Description de la marque

Nature de la marque :

Hauteur d'eau constatée

Nivellement de la marque

Niveau NGF (m) : 87,59
 Sur la face aval du pont

Date de mesure :

Niveau relatif (m) :

Commentaire

Description de la crue

Date : 17 Janvier 1978

Durée :



FICHE DE MARQUE DE CRUE

Référence 13_Meyreuil_Arc_1978-01_1

Localisation

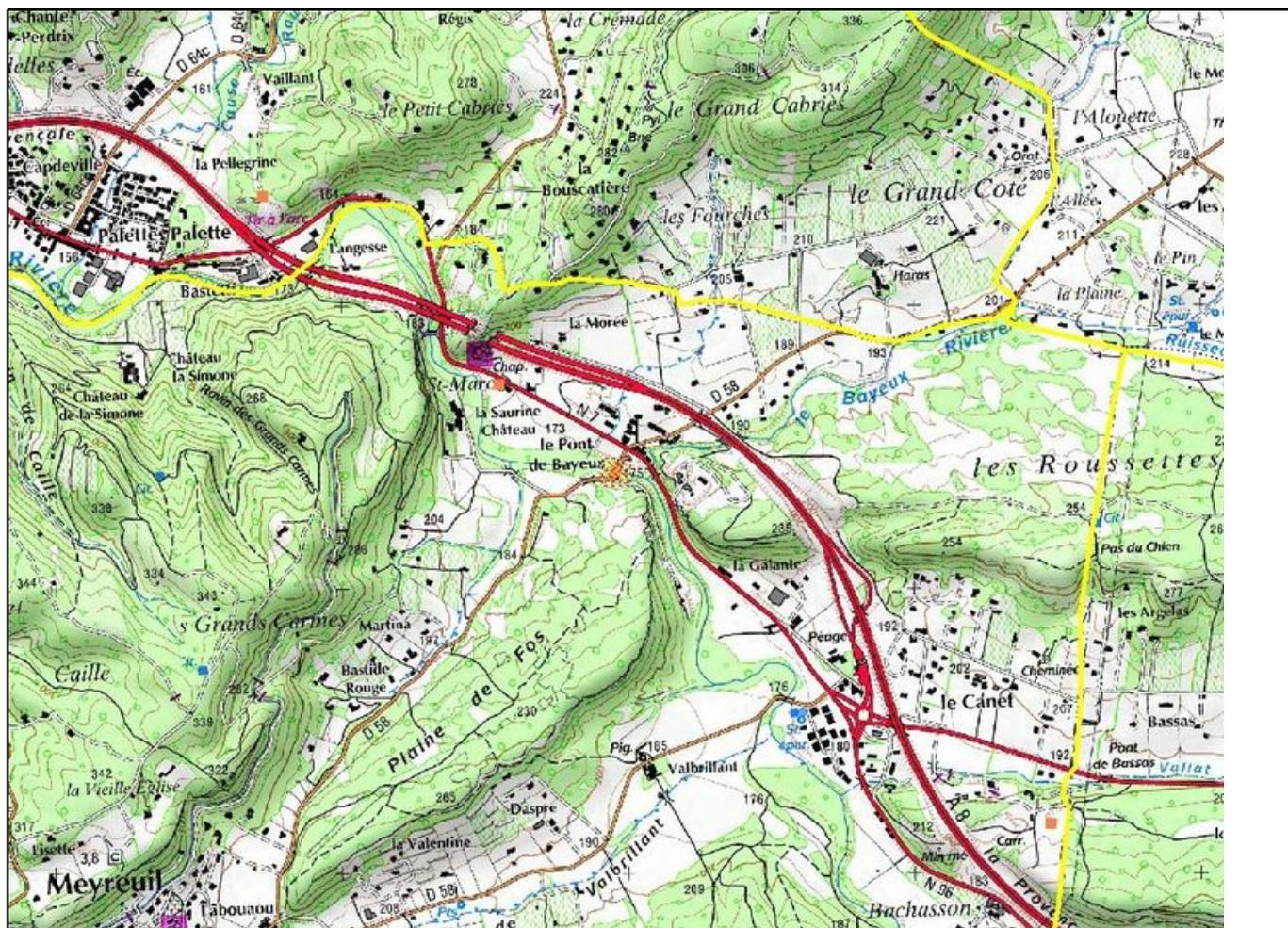
Localisation Générale

Département : BOUCHES-DU-RHONE
Commune : MEYREUIL
Lieu-dit : Pont de Bayeux
Cours d'eau : arc, l'(rivière)
Bassin versant : L'Arc de sa source à la Cause

Coordonnées

X (m) 857360
Y (m) 1838417
Projection Lambert II étendu
Précision Précise (0 - 5 m)
Date de mesure 17 Janvier 1978

Carte : PLAN_export\13\Plan_13_Meyreuil_Arc_1978-01_1_25000_150.jpg



Description de la marque

Nature de la marque :

Hauteur d'eau constatée

Nivellement de la marque

Niveau NGF (m) : 170,27
Face aval du pont, au limni

Date de mesure :

Niveau relatif (m) :

Commentaire

Description de la crue

Date : 17 Janvier 1978

Durée :



FICHE DE MARQUE DE CRUE

Référence 13_Meyreuil_Arc_1978-01_2

Localisation

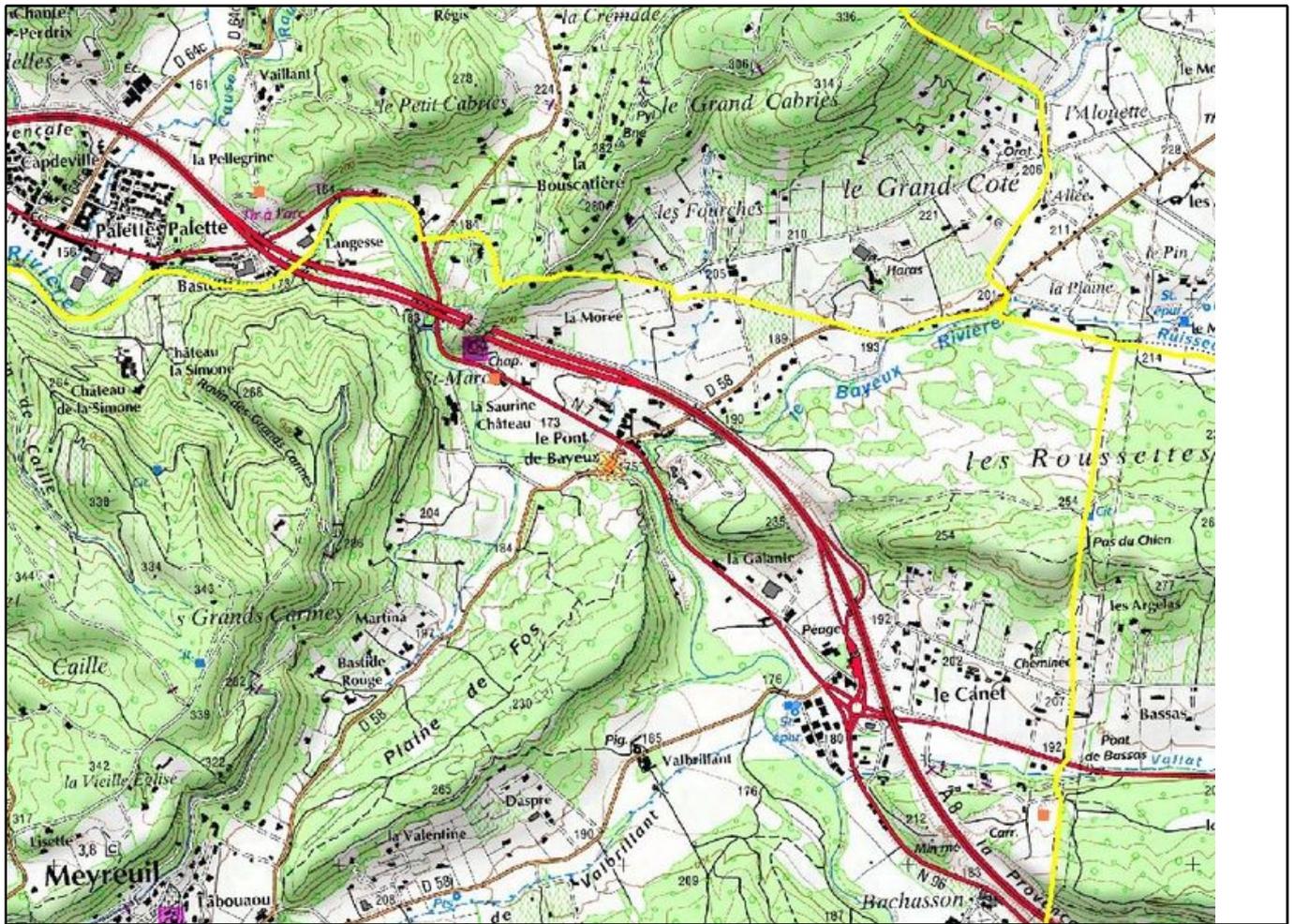
Localisation Générale

Département : BOUCHES-DU-RHONE
Commune : MEYREUIL
Lieu-dit : Pont de Bayeux
Cours d'eau : arc, l'(rivière)
Bassin versant : L'Arc de sa source à la Cause

Coordonnées

X (m) 857360
Y (m) 1838417
Projection Lambert II étendu
Précision Précise (0 - 5 m)
Date de mesure 17 Janvier 1978

Carte : PLAN_export\13\Plan_13_Meyreuil_Arc_1978-01_2_25000_150.jpg



Description de la marque

Nature de la marque :

Hauteur d'eau constatée

Nivellement de la marque

Niveau NGF (m) : 171,34
Face amont du pont

Date de mesure :

Niveau relatif (m) :

Commentaire

Description de la crue

Date : 17 Janvier 1978

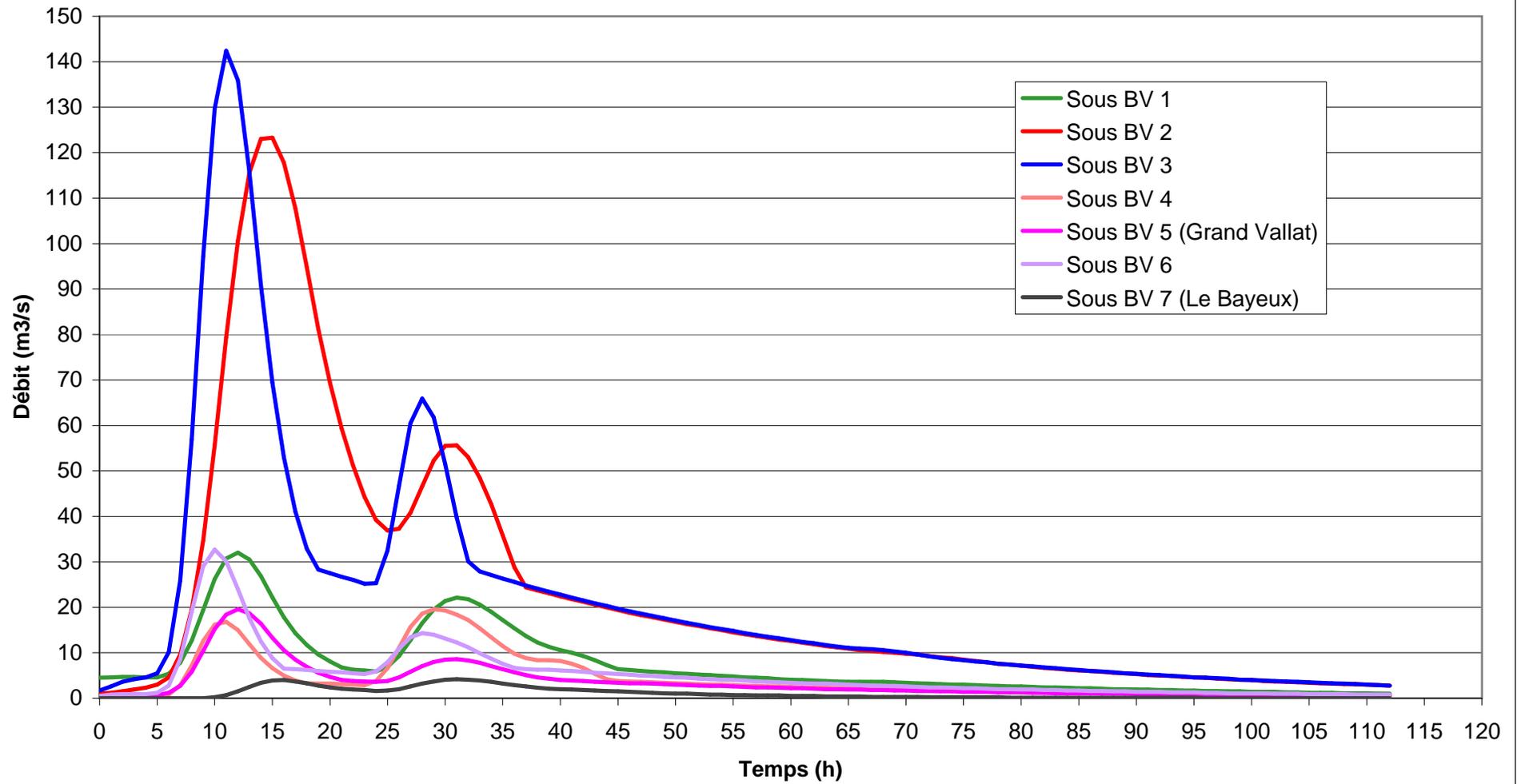
Durée :

**9 ANNEXE 3 : CARTE RECAPITULATIVE DE
LA CRUE DE 1978 (EXTRAIT DE L'ETUDE DE
MISE EN COHERENCE DES ETUDES
HYDROLOGIQUES ET HYDRAULIQUES SUR
LE BASSIN VERSANT DE L'ARC – GINGER –
SABA – 2010)**

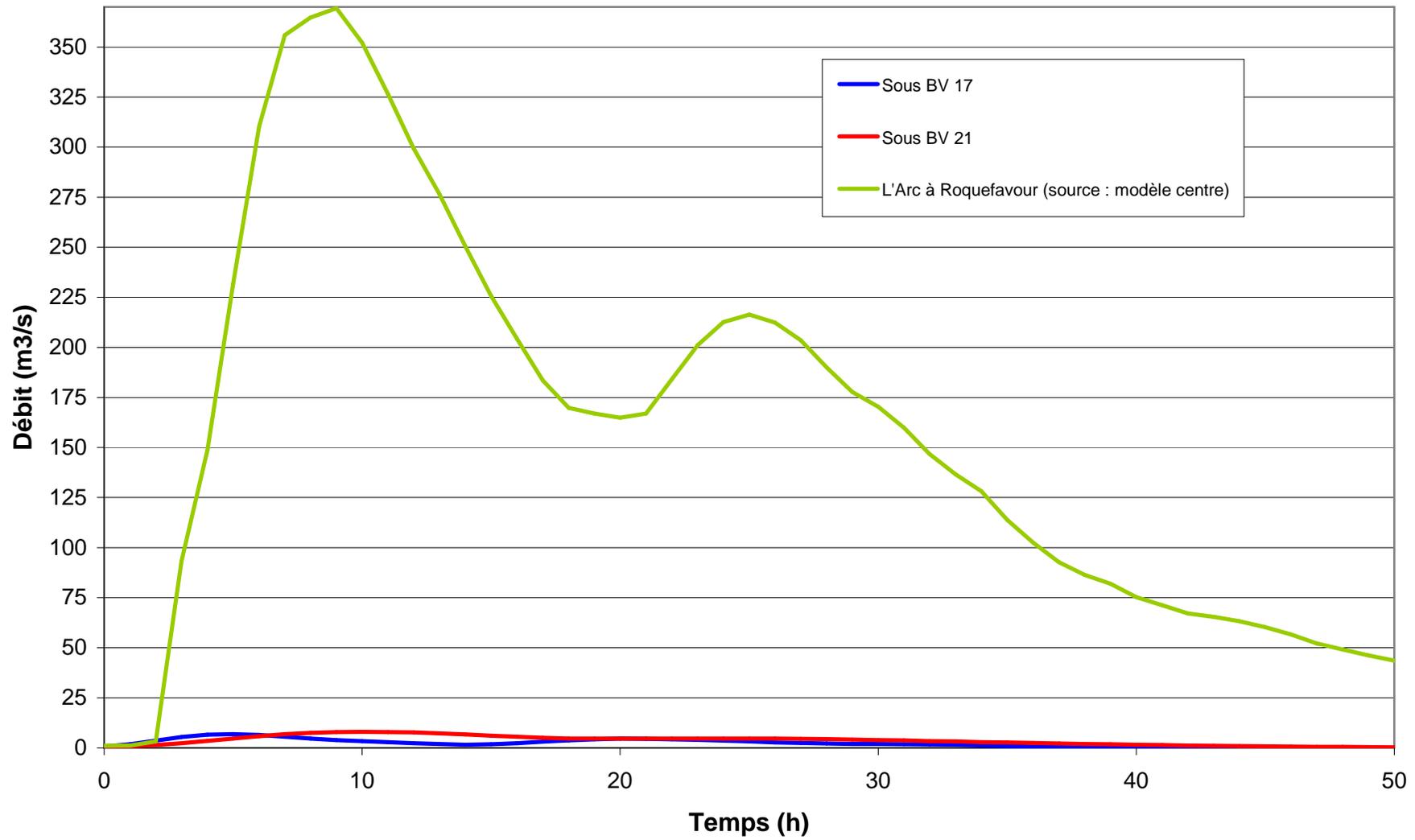
(ANNEXE DANS LE DOSSIER CARTOGRAPHIQUE)

10 ANNEXE 4 : HYDROGRAMMES INJECTES DANS LE MODELE HYDRAULIQUE

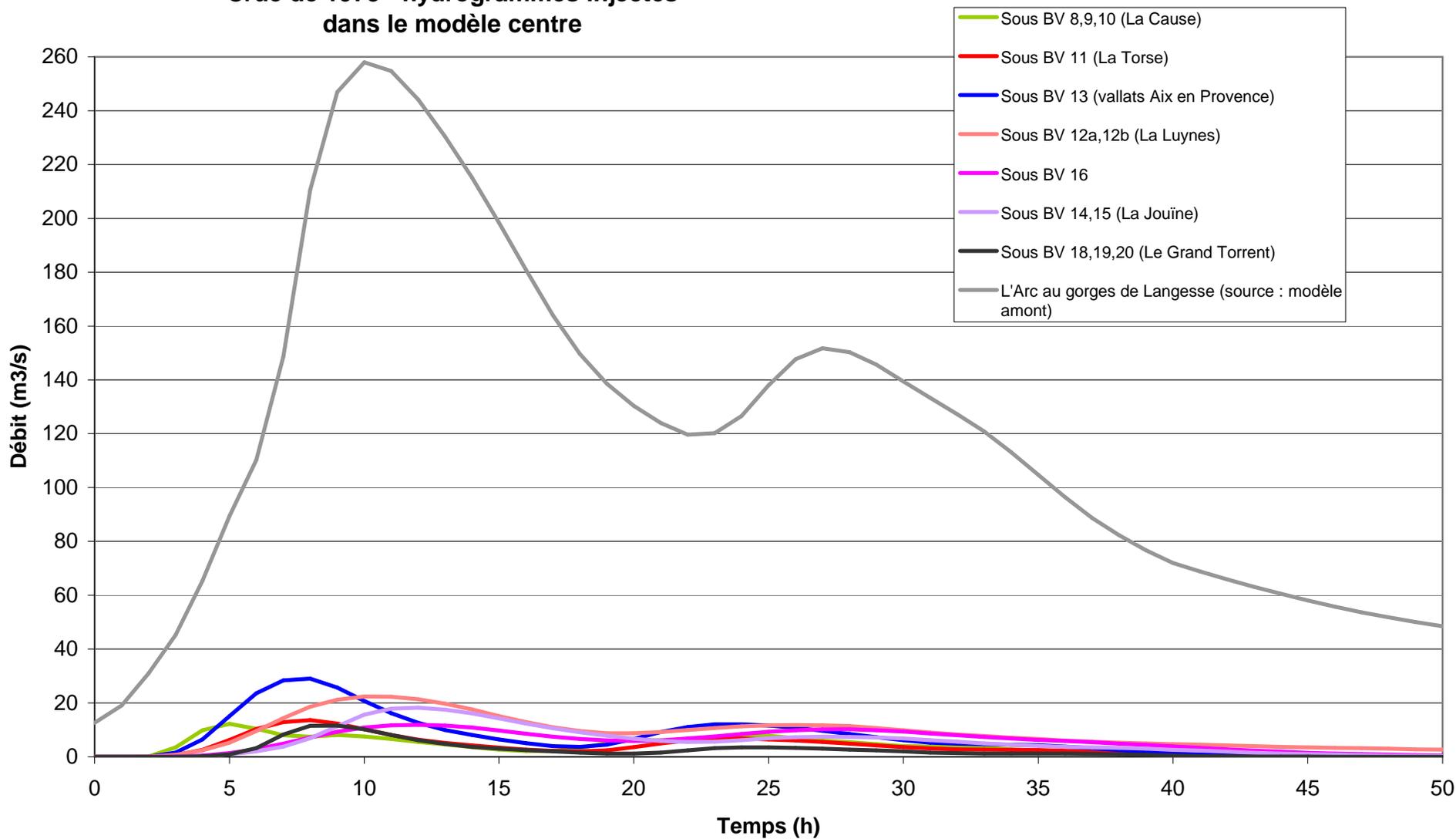
Crue de 1978 - hydrogrammes injectés dans le modèle amont



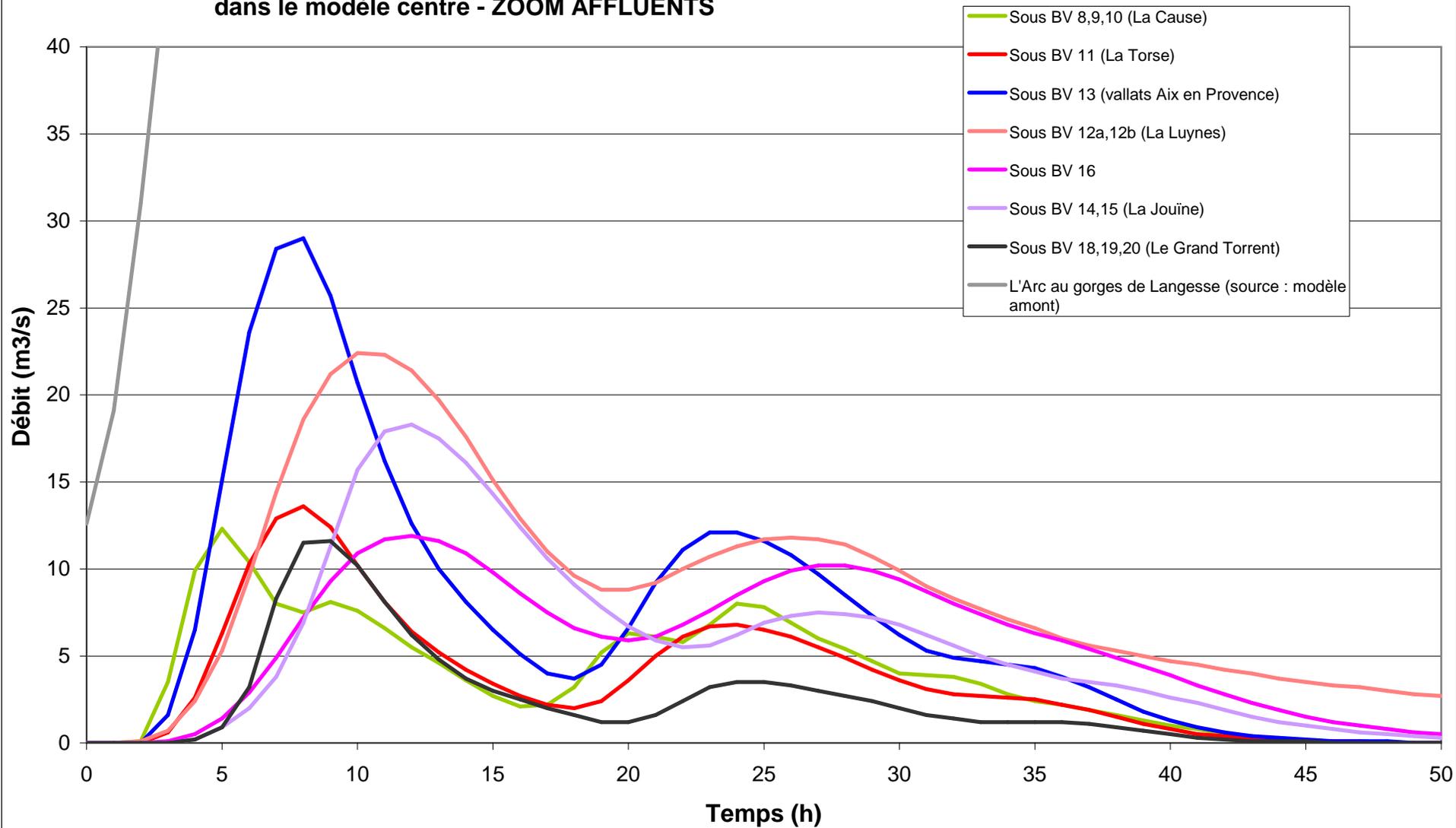
Crue de 1978 - Hydrogrammes injectés dans le modèle aval



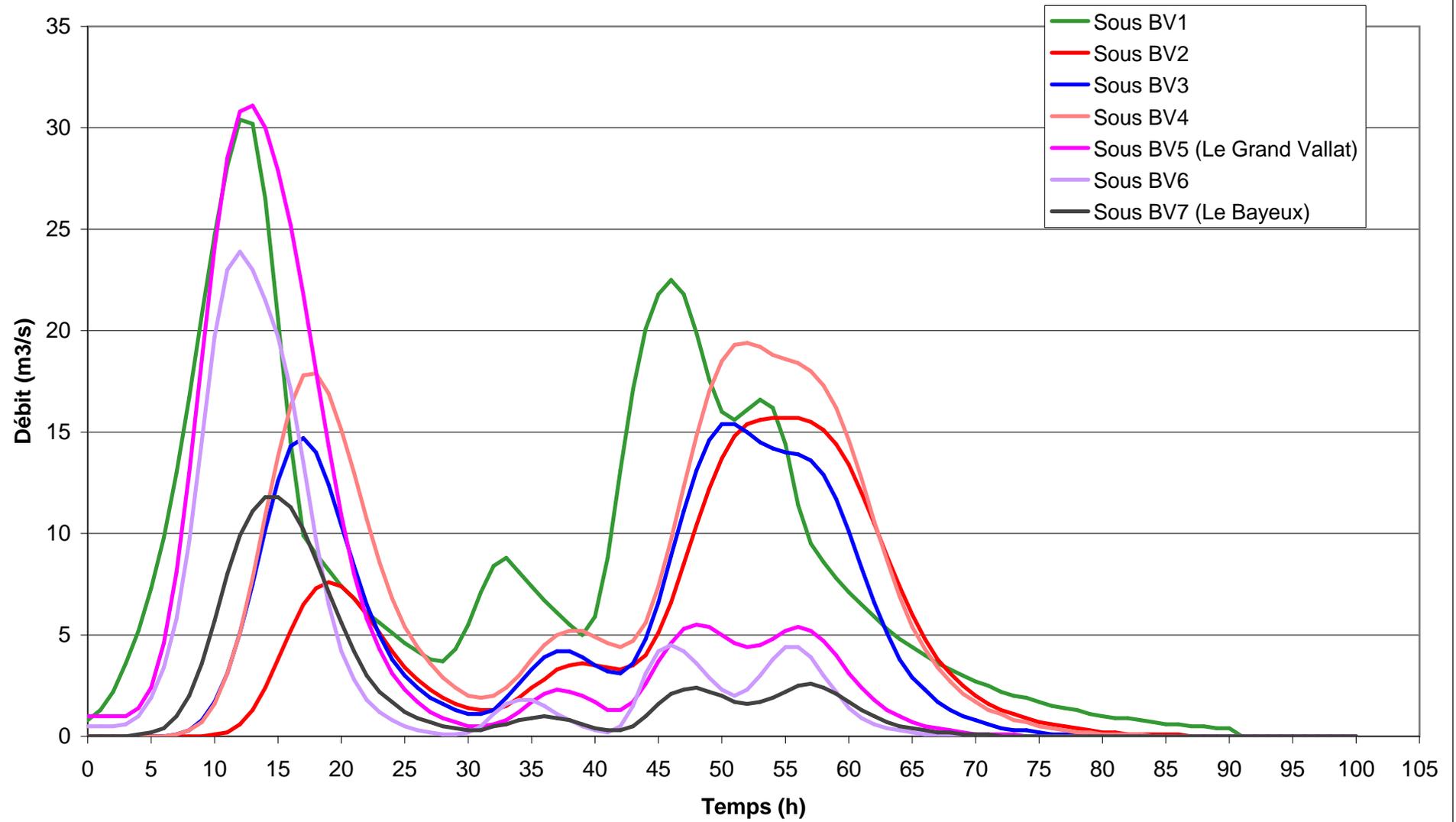
Crue de 1978 - hydrogrammes injectés dans le modèle centre



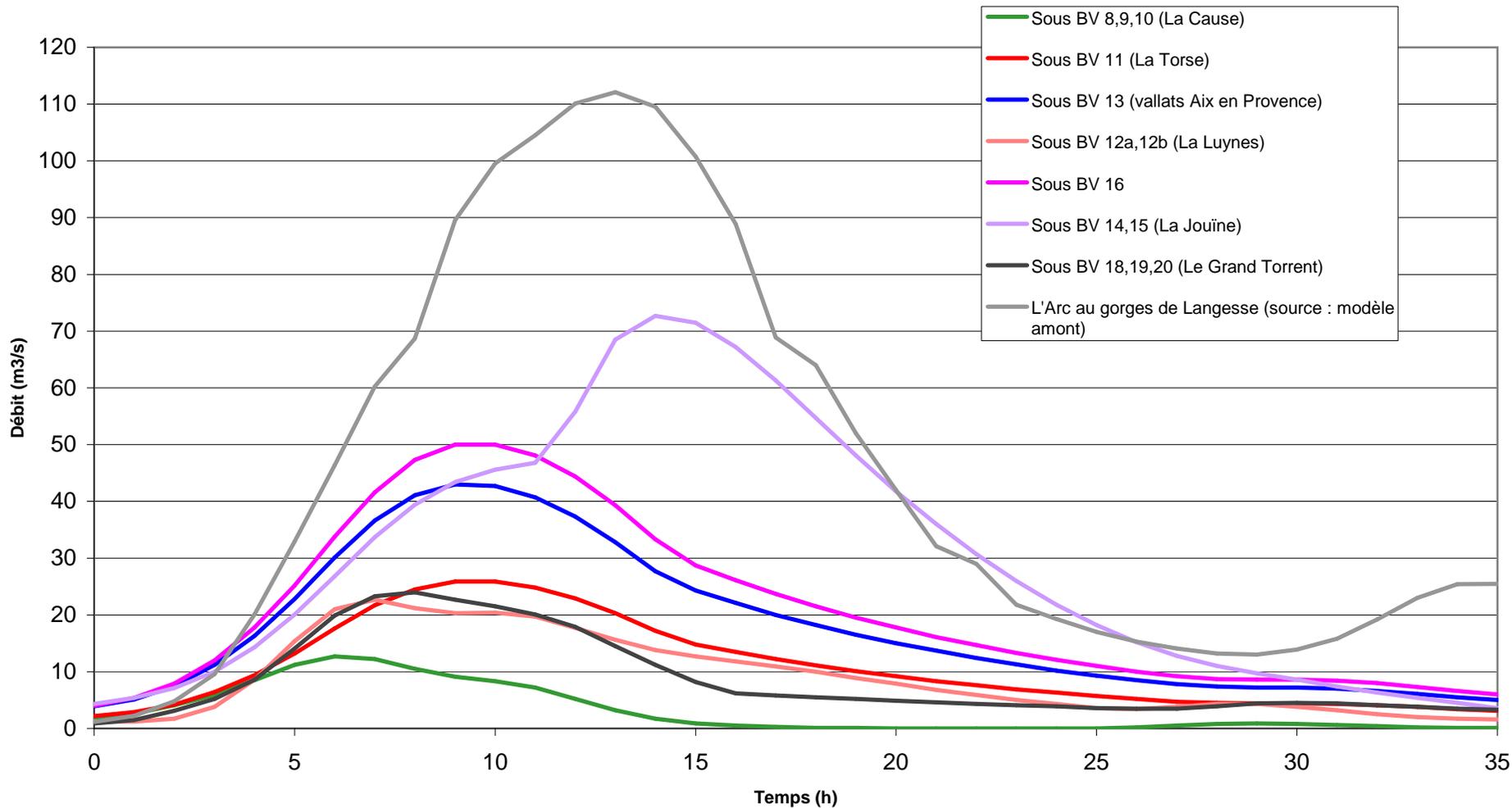
Crue de 1978 - hydrogrammes injectés dans le modèle centre - ZOOM AFFLUENTS



Crue de 2008 - hydrogrammes injectés dans le modèle amont



Crue de 2008 - hydrogrammes injectés dans le modèle centre



11 ANNEXE 5 : CARTES DES HAUTEURS ET VITESSES DE LA CRUE DECENNALE

(ANNEXE DANS LE DOSSIER CARTOGRAPHIQUE)

12 ANNEXE 6 : CARTES DES HAUTEURS ET VITESSES DE LA CRUE TRENTENNALE

(ANNEXE DANS LE DOSSIER CARTOGRAPHIQUE)

13 ANNEXE 7 : CARTES DES HAUTEURS ET VITESSES DE LA CRUE DE REFERENCE

(ANNEXE DANS LE DOSSIER CARTOGRAPHIQUE)

14 ANNEXE 8 : CARTES DES HAUTEURS ET VITESSES DE LA CRUE EXCEPTIONNELLE

(ANNEXE DANS LE DOSSIER CARTOGRAPHIQUE)

15 ANNEXE 9 : CARTES D'ALEA DE LA CRUE DE REFERENCE

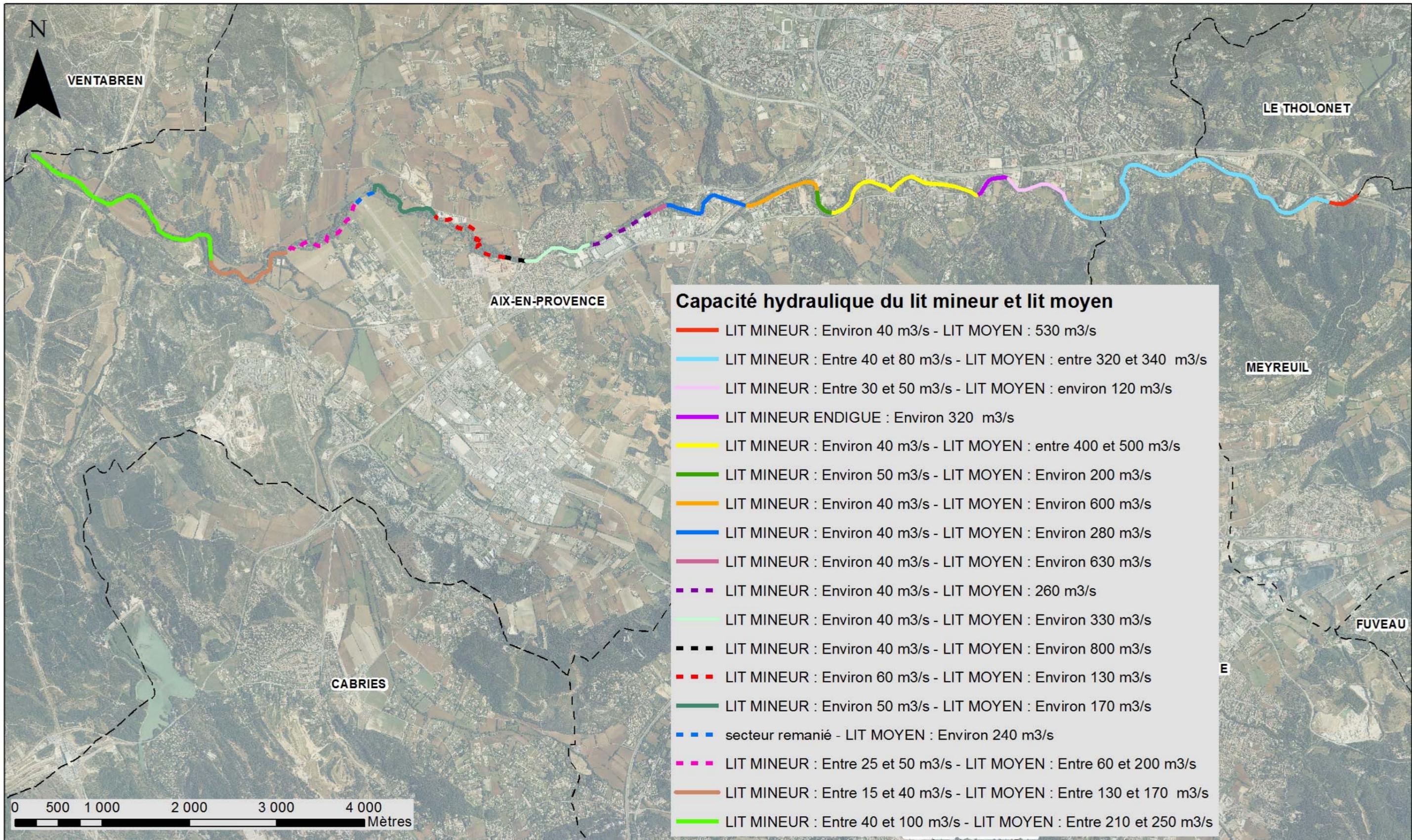
(ANNEXE DANS LE DOSSIER CARTOGRAPHIQUE)

16 ANNEXE 10 : CARTES D'ALEA DE LA CRUE EXCEPTIONNELLE

(ANNEXE DANS LE DOSSIER CARTOGRAPHIQUE)

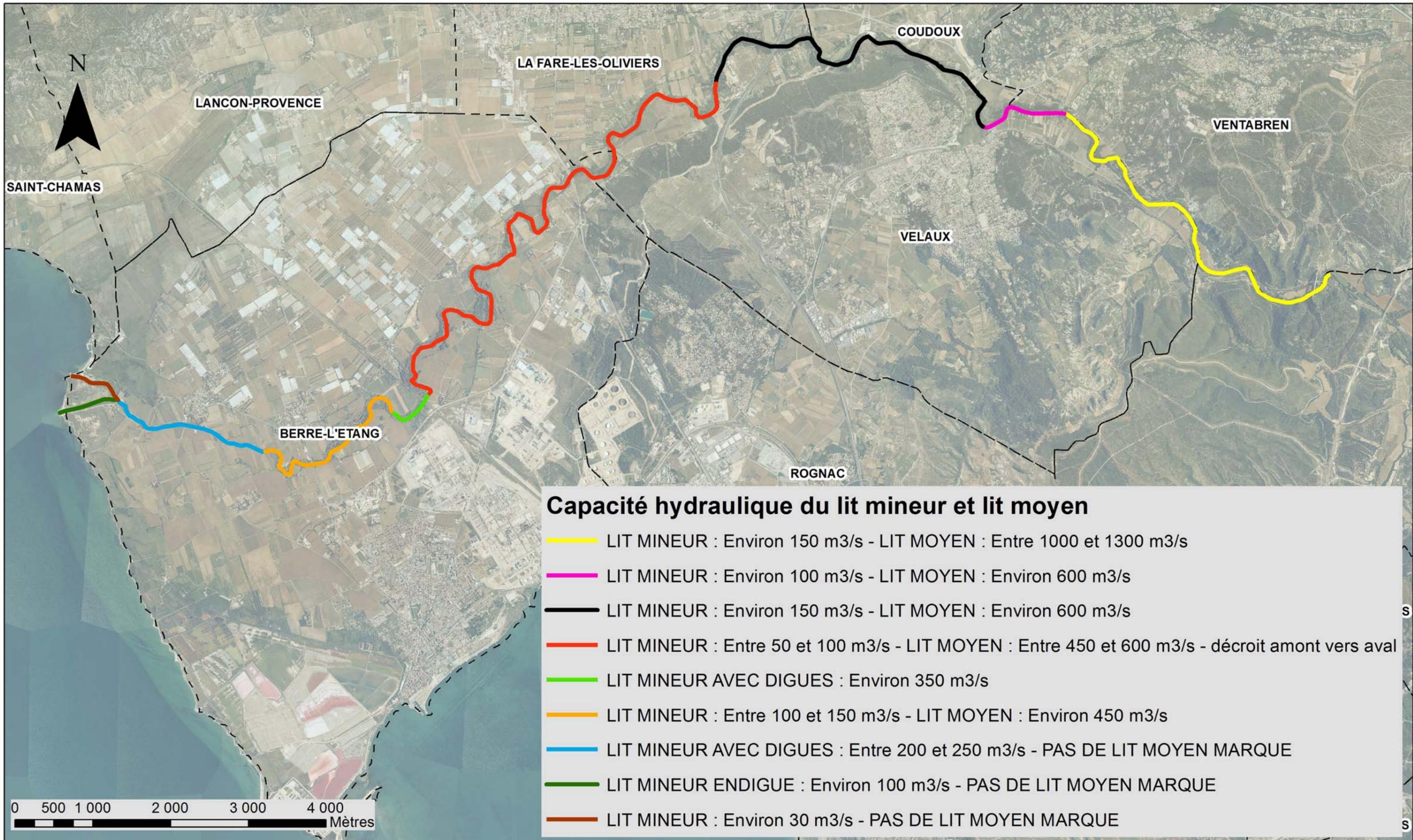
17 ANNEXE 11 : CARTES DES PREMIERS DEBORDEMENTS

Capacité hydraulique du lit mineur et du lit moyen de l'Arc avant débordement Secteur centre (Aix en Provence)



Capacité hydraulique du lit mineur et du lit moyen de l'Arc avant débordement

Secteur aval (entre Roquefavour et l'Etang de Berre)



Capacité hydraulique du lit mineur et du lit moyen de l'Arc avant débordement

Secteur amont (jusqu'aux gorges de Langesse à Meyreuil)

