

Chapitre 5 - Modélisations hydrauliques

1 Choix des types de modélisation

1.1 Choix du type de logiciel

La modélisation de rivière est un exercice complexe qui demande une bonne connaissance du terrain et des écoulements. Les logiciels hydrauliques sont des outils informatiques qui permettent de simuler les écoulements d'un cours d'eau et sont donc utilisés pour modéliser les rivières.

Dans le cadre de la modélisation de rivière, il existe différents type de logiciel hydraulique :

- les logiciels 1D,
- les logiciels 2D,
- et également les logiciels qui couplent les modèles 1D et 2D.

Pour cette étude les grands cours d'eau ont été modélisés en 1D lit mineur couplé 2D lit majeur qui permettent une modélisation fine des écoulements complexes en lit mineur et majeur :

- L'Huveaune de Saint Zacharie à son embouchure,
- Le Merlançon
- La plaine de la Maire et du Fauge
- Le Merlançon d'Aubagne
- Le Jarret
- La Gouffone aval

Note : Pour la suite de l'étude, pour plus de simplicité, on parlera de modèle 2D et non plus de modèle 1D couplé 2D.

La modélisation fine avec un modèle 2D se justifie dans les sites d'étude pour :

- acquérir des résultats de vitesses plus précis (au droit des ouvrages par exemple) ;
- représenter un système hydraulique spécifique (surverse, écoulements sur les routes, confluence, défluence, ruptures de digues),
- représenter des écoulements complexes générés par les écoulements en site urbain dense,
- apporter des précisions indispensables sur les conditions locales d'écoulement.

Le reste des cours d'eau (petits affluents non pérennes), où les enjeux sont moindres en termes de population exposée, ont été modélisés en 1 dimension (lits mineur et majeur). En effet ces affluents ne possèdent pas de zone de défluence ou confluence majeure, permettant de justifier la mise en œuvre d'un modèle 2D.

1.2 Choix du régime d'écoulement

Le régime permanent (modélisation à débit constant) est basé sur l'hypothèse que la pointe de crue est suffisamment étalée pour que s'instaure au paroxysme de la crue un régime d'écoulement à débit constant. Il ne permet pas de modéliser les laminages de crue par stockage dans les champs d'inondation. Il est donc applicable sur des petits cours d'eau, sur lesquels les champs d'inondations sont limités.

Le régime transitoire intègre le facteur temps et permet de ce fait de travailler sur la réalité d'un événement de crue à travers la prise en compte d'un hydrogramme.

Peuvent ainsi être mis en évidence sur les paramètres hydrauliques, les phénomènes de :

- stockage dans le champ d'inondation,
- laminage de la pointe de crue,

De plus, et par définition, le facteur durée de submersion peut être introduit dans l'analyse de l'aléa inondation en tant que critère de caractérisation du risque.

Il faut noter que l'analyse des crues antérieures a fait ressortir un laminage important des crues de l'Huveaune sur une grande partie de son linéaire, notamment dans la plaine d'Aubagne-Gemenos mais aussi en aval au niveau de la Penne sur Huveaune. Seule l'application d'un régime transitoire sur ces secteurs permettra de rendre compte de ce phénomène.

Le régime transitoire est donc utilisé pour l'Huveaune et ses principaux affluents (les Merlançons, la Gouffone, le Fauge, la Maire et le Jarret) pour permettre de quantifier les amortissements des crues dans les zones d'expansion.

Les petits affluents, sans réelle zone d'expansion des crues, ont été modélisés en régime permanent.

La cartographie en page suivante illustre les différents types de modèles utilisés :

- En bleu les modèles 2D transitoires
- En rose les modèles 1D permanents

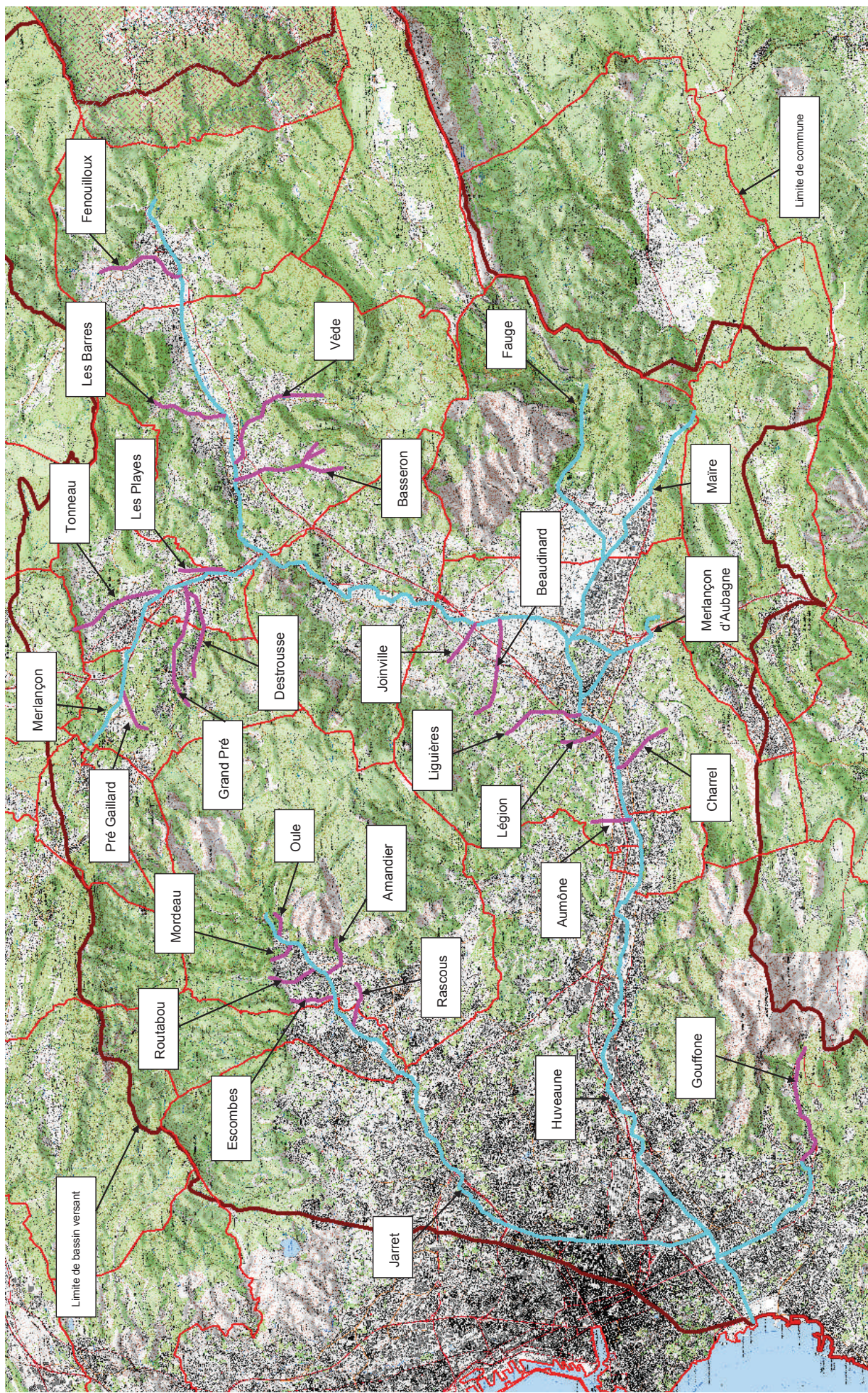


Figure 53 : Modélisations réalisées 2D (en bleu) et 1D (en rose)

2 Outil de modélisation

Dans ces conditions, l'outil de modélisation utilisé est le **logiciel INFOWORKS RS et ICM** qui permettent la modélisation en régime permanent ou transitoire et prennent en compte des écoulements filaires multidirectionnels pouvant être ramifiés ou maillés (1D, 2D ou 1D couplé 2D).

Ce logiciel a été développé par HR WALLINGFORD et est commercialisé en France par la société GEOMOD.

Le modèle INFOWORKS est basé sur la résolution des équations de St Venant :

$$\partial S/\partial t + \partial Q/\partial x = q$$

Equation de continuité exprimant la conservation des volumes.

$$\partial Q/\partial t + \frac{\partial(Q^2/S)}{\partial x} = -gS\left(\frac{\partial Z}{\partial x} + J\right)$$

Equation dynamique exprimant la conservation de la quantité de mouvement.

La résolution de ces équations repose sur la connaissance de lois empiriques de pertes de charge établies expérimentalement pour des écoulements filaires (ex : formules de Manning Strickler, ou de Chézy, lois de seuils,...).

Z	cote de la surface libre
Q	débit
a	apport ou perte au m ²
x	abscisse
S	section mouillée
J	gradient de charge hydraulique

Le logiciel INFOWORKS utilise le schéma numérique de PREISSMANN pour la résolution des équations de St-Venant.

La schématisation du site d'étude est décrite dans une base de données au moyen d'une série de profils en travers et d'ouvrages tels que ponts, gués au niveau des lits mineurs étudiés auxquels on associe un maillage de Modèle Numérique de Terrain (MNT) pour représenter le lit majeur.

Il permet notamment d'établir des cartes de zones inondables, d'optimiser les débouchés des ouvrages hydrauliques, les protections qui leur sont associés, et d'analyser le fonctionnement des systèmes hydrauliques complexes.

Le module 2D utilise le principe de discrétisation de la zone inondable sous forme de mailles triangulaires et résout les équations de St Venant pour la hauteur et la vitesse en deux dimensions

Un module 2D a été développé pour permettre de modéliser les écoulements de surface complexes en zones inondables par un maillage bidimensionnel. La zone inondable est alors représentée par des mailles triangulaires. Les hauteurs d'eau et vitesses sont calculées localement pour chaque maille triangulaire.

La solution utilise la méthode des volumes finis, basée sur le programme de Gudonov et le solveur de Riemann. Le modèle de résolution est semi-implicite.

Le couplage 1D/2D permet de représenter le lit mineur de façon classique en 1D (permettant une bonne représentation bathymétrique des sections hydrauliques des cours d'eau, ainsi que les ouvrages en rivière) et les zones inondables en 2D, ce qui permet une représentation précise des obstacles aux écoulements (digues, remblais, bâtis...) à partir d'un module numérique de terrain. Le champ d'inondation est représenté alors par un maillage triangulaire avec des tailles de maille adaptée au terrain naturel et à l'occupation des sols.

Dans le cadre de l'étude, les lit mineurs des cours d'eau sont modélisés en filaire, ce qui permet de représenter correctement leur section hydraulique difficile à représenter en 2D, et les pertes de charge dans les ouvrages en charge. INFOWORKS RS permet la modélisation de nombreux types d'ouvrages : ponts, orifice, seuil, vannes mobiles, siphon.

La zone inondable, hors lit mineur, est modélisée en 2D.

Le maillage du modèle est adapté à la configuration de la zone d'étude. La densité du maillage résulte de contraintes de représentation des écoulements et de la bathymétrie, tout en conservant des temps de calcul acceptables pour les simulations.

Les zones 2D modélisées sont représentées par des mailles triangulaires dont les sommets sont les points de donnée topographique.

Il s'agit donc de prendre en compte de façon suffisamment précise la topographie, tout en conservant des temps de calculs « raisonnables ».

Le maillage s'appuie donc sur l'utilisation de « lignes de contrainte », c'est-à-dire des lignes topographiques utilisées obligatoirement dans le maillage : cas des fossés, digues, et des remblais en lit majeurs (route, ...).

Les lignes de « contrainte » sont des lignes de forçage du maillage afin que la donnée topographique souhaitée (dans le cas de remblai ou de fossé) soit utilisée dans le maillage. Rappelons qu'un modèle 2D n'utilise la donnée topographique qu'aux points de calcul des mailles (contrairement aux modèles filaires ou à casiers, pour lesquels la densité de points topographique entrée dans la modélisation est beaucoup plus importante que le nombre de point de calcul).

Les lignes de contraintes utilisées sont entre autres les grandes infrastructures routières, autoroutières et ferroviaires de la zone d'étude.

Le module RS, dédié aux écoulements en rivière, est utilisé sur tout le linéaire modélisé, hormis la Gouffone aval. En effet, la Gouffone aval passe par un réseau pluvial souterrain et a été modélisée avec le module ICM qui permet de modéliser finement les réseaux pluviaux et leurs débordements de surface et ré-engouffrements via les regards avaloires.

3 Les modèles réalisés

Cette étude comporte environ 120km de cours d'eau modélisés, décomposés comme suit :

- 36.4 km de cours d'eau modélisés en 1D en 22 petits modèles distincts,
- 83.1 km de cours d'eau modélisés en 2D en 9 modèles distincts.

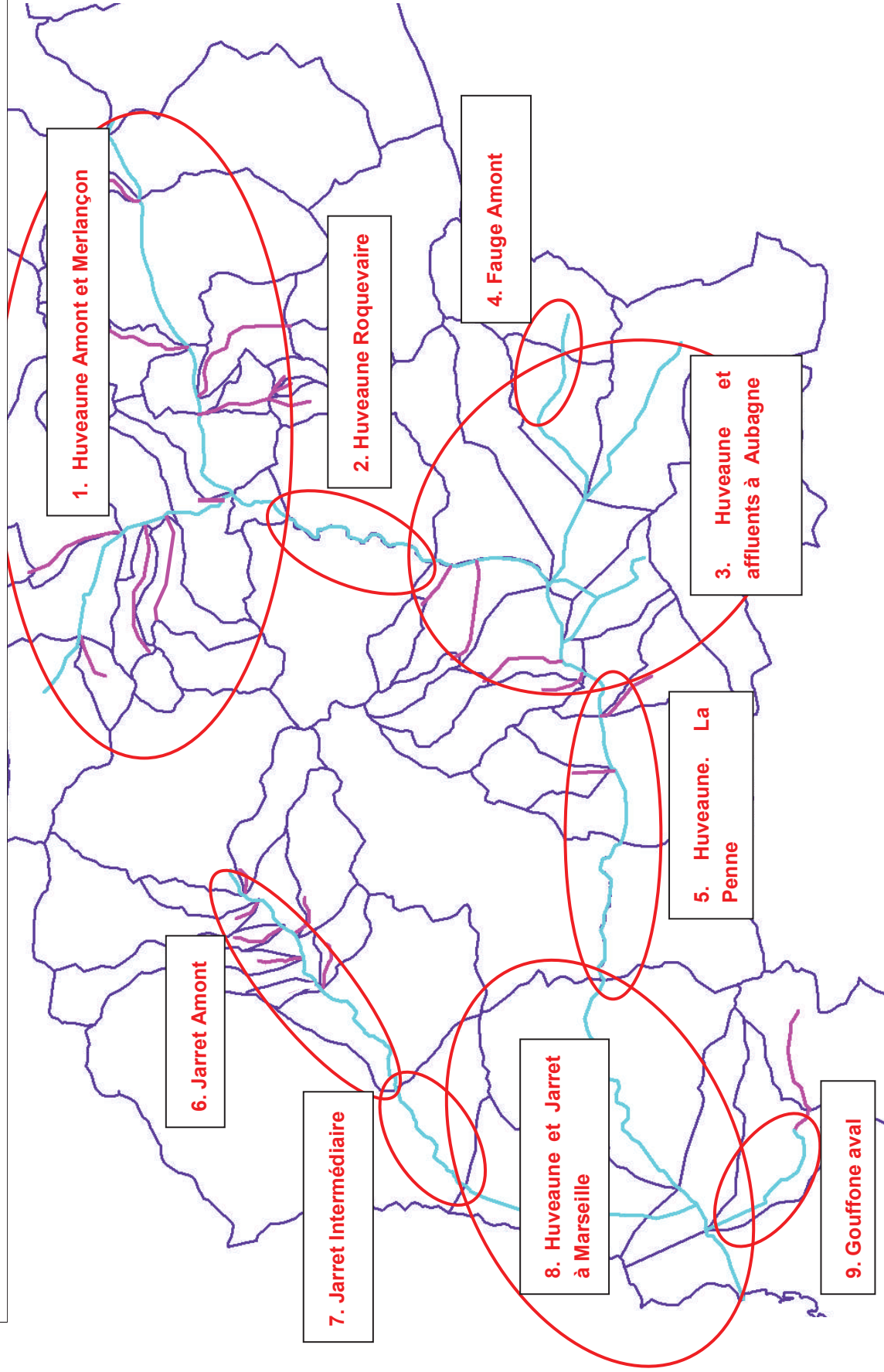
Les modèles 1D correspondent aux 22 petits affluents notés en rose sur les cartes.

Le découpage des grands modèles 2D est fourni sur la figure en page suivante, et sont détaillés dans les paragraphes ci-après.

Le lecteur est invité à consulter [l'annexe cartographique numérique](#) fournie pour visualiser les cartographies de montage de tous les modèles réalisés.

Les données fournies sur ces cartes sont précisées en fin de chapitres 5.1 et 5.2.

Figure 54 : Localisation des modèles hydrauliques 2D



- **Modèle Huveaune amont et Merlançon** : environ 20km modélisés comprenant

- l'Huveaune de l'amont de Saint Zacharie à l'amont de Roquevaire,
- Le Merlançon.

Ce modèle est en jonction directe à l'aval avec le modèle de l'Huveaune à Roquevaire. La jonction se fait dans une zone sans enjeu et à forte pente, dans les gorges en amont de Roquevaire.

A noter que 3 secteurs sont modélisés en 1D sur ce grand modèle : les extrémités amont de l'Huveaune et du Merlançon, ainsi que les gorges en aval d'Auriol.

Ce modèle ne comporte pas de partie enterrée (hors ouvrages de franchissements ponctuels classiques).

- **Modèle Huveaune à Roquevaire** : de l'amont de Roquevaire à la traversée de l'autoroute à Pont d'Etoile, soit environ 5km modélisés.

Ce modèle est en jonction à l'amont avec le modèle de l'Huveaune amont et Merlançon, et à l'aval avec le modèle de l'Huveaune et affluents à Aubagne.

La jonction avec ce dernier se fait dans une zone à faible pente, sur un linéaire commun de 690 m.

Ce modèle ne comporte pas de partie enterrée (hors ouvrages de franchissements ponctuels classiques).

- **Modèle Huveaune et affluents à Aubagne** : environ 20 km modélisés comprenant :

- L'Huveaune de Pont d'Etoile à l'aval d'Aubagne,
- Le Fauge depuis Gémenos,
- La Maire,
- Le Merlançon d'Aubagne et sa dérivation vers la Maire.

Ce modèle est en jonction à l'amont avec le modèle de l'Huveaune à Roquevaire et Fauge amont d'autre part, et à l'aval avec le modèle de l'Huveaune à La Penne.

La jonction avec ce dernier se fait dans une zone à faible pente, sur un linéaire commun de 250 m.

Ce modèle comporte des parties enterrées importantes (hors ouvrages de franchissements ponctuels classiques) :

- La canalisation du Fauge sous le centre-ville de Gémenos (environ 400 mètres linéaires)
- Les canalisations de la Maire et du Fauge sous le centre commercial des Paluds (environ 400 mètres linéaires)
- La canalisation de dérivation du Merlançon d'Aubagne vers la Maire (environ 1.2 km).

- La partie enterrée de l'Huveaune au niveau du centre d'Aubagne (environ 400 mètres linéaires)
- La partie enterrée du Merlançon au niveau du centre d'Aubagne (environ 1km).

Ce modèle comporte également la particularité de contenir le bassin de rétention de la zone des Paluds, qui stocke les eaux de la Maire et les refoule vers l'aval par pompage (1.5 m³/s). Ce bassin de rétention avec pompage est inclus au modèle.

Enfin ce modèle comporte la modélisation des apports d'un affluent arrivant au Nord de la plaine des Paluds : le débit produit par ce sous bassin versant est injecté en limite du modèle directement dans le maillage. En effet cet affluent n'a pas de réel lit mineur il s'étale dans la plaine sur un large cône de déjection.

- **Modèle Fauge amont** : environ 2 km modélisés comprenant le Fauge à l'amont de la partie enterrée de Gémenos.

Ce modèle est en jonction à l'aval avec le modèle de l'Huveaune et affluents à Aubagne.

La jonction avec ce dernier se fait dans une zone à pente moyenne, sur un linéaire commun de 60 m.

Ce modèle ne comporte pas de partie enterrée (hors ouvrages de franchissements ponctuels classiques).

- **Modèle Huveaune à La Penne** : de l'aval d'Aubagne à Saint Marcel dans Marseille, soit environ 8km modélisés.

Ce modèle est en jonction à l'amont avec le modèle Huveaune et affluent à Aubagne et à l'aval avec le modèle de l'Huveaune et Jarret à Marseille.

La jonction avec ce dernier se fait dans une zone à pente faible, sur un linéaire commun de 2.5 km.

Ce modèle comporte une partie enterrée (hors ouvrages de franchissements ponctuels classiques), au droit du lieu-dit « La Pennelle », sur un linéaire d'environ 300m.

- **Modèle Jarret Amont** : d'Allauch à La croix Rouge dans Marseille, soit environ 8km modélisés.

Ce modèle est en jonction à l'aval avec le modèle du Jarret Intermédiaire.

La jonction avec ce dernier est directe, et se fait dans une zone à pente forte.

Ce modèle comporte des parties enterrées importantes (hors ouvrages de franchissements ponctuels classiques) qui sont, d'amont en aval :

- La partie enterrée sur Allauch en amont des secteurs habités (lieu-dit « Le Fève » (environ 100 mètres linéaires)
- La partie enterrée sur Allauch quartier du « Logis Neuf » (environ 500 mètres linéaires)
- La partie enterrée du centre de Plan de Cuques, aux stades (environ 800m).
- La partie enterrée en aval du centre de Plan de Cuques, secteur « les Mourgues » (environ 300 mètres linéaires)

- **Modèle Jarret Intermédiaire** : de La croix Rouge à Saint Just dans Marseille, soit environ 3km modélisés.

Ce modèle est en jonction à l'amont avec le modèle du Jarret Amont et à l'aval avec le modèle de l'Huveaune et Jarret à Marseille.

La jonction avec ce dernier se fait dans une zone à pente forte, sur un linéaire commun de 30 m.

Ce modèle comporte des parties enterrées importantes (hors ouvrages de franchissements ponctuels classiques) qui sont, d'amont en aval :

- La partie enterrée du secteur « La Rose » (environ 100 mètres linéaires)
- La partie enterrée du secteur « Echangeur de Malpassé » (environ 400 mètres linéaires)
- La partie enterrée du secteur « Malpassé » (environ 100m linéaire)

- **Modèle Gouffone aval** : de l'amont de Mazargues à la confluence dans Marseille, soit environ 4km modélisés.

Ce modèle est en jonction à l'aval avec le modèle de l'Huveaune et Jarret à Marseille.

La jonction avec ce dernier se fait directement, à l'aval du pont du boulevard Michelet.

Ce modèle a la particularité d'être sous réalisé ICM, qui permet de modéliser les réseaux de type réseau pluvial, avec débordement en surface et ré-engouffrement des eaux possibles via les regards avaloirs. Seul le réseau primaire (la Gouffone) est modélisé, avec les regards présents aux changements de direction et de section du linéaire (26 regards). Ce modèle comprend également 3 courtes zones à ciel ouvert sur son linéaire (environ 400 mètres linéaire au total).

- **Modèle Huveaune et Jarret à Marseille** : environ 15 km modélisés comprenant :

- L'Huveaune de Saint Marcel à l'embouchure en mer,
- Le Jarret aval de Saint Just à l'exutoire.

Ce modèle est en jonction à l'amont avec les modèles de l'Huveaune à La Penne, de la Gouffone aval, et du Jarret intermédiaire.

Ce modèle comporte des parties enterrées importantes (hors ouvrages de franchissements ponctuels classiques) qui sont, d'amont en aval :

- La partie enterrée du Jarret, couverte sur une grande majorité du linéaire jusqu'à son exutoire dans l'Huveaune (environ 5km couverts sur 6km au total)
- La partie enterrée de l'Huveaune en amont de la confluence avec le Jarret (environ 300 mètres linéaires)

Le découpage des modèles 2D a été réalisé selon les critères suivants :

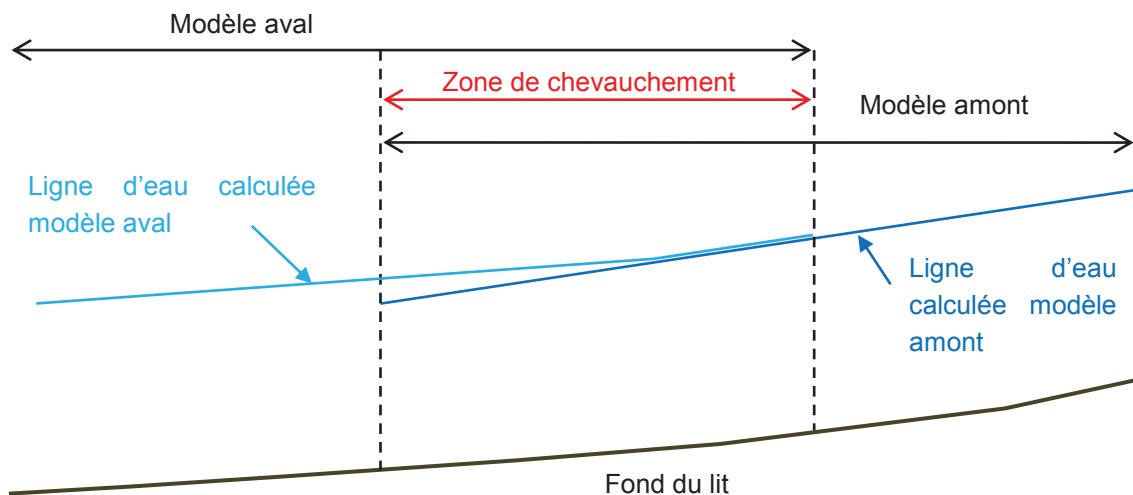
- Nombre de nœuds de construction filaires (profils en travers, ouvrages ...) inférieur à 2000,
- Découpage au niveau de nœuds hydrologiques et stations de mesure limnimétriques pour une bonne corrélation entre l'hydrologie et l'hydraulique, et faciliter les calages,
- Découpage au niveau de zones où l'expansion des crues en lit majeur est limitée, autant que possible.

Remarque : la réalisation d'un seul et unique modèle 2D n'est pas possible étant donné les temps de calcul logiciels. Un travail a donc été réalisé afin de découper les linéaires de modélisation de manière cohérente. Les temps de calcul pour les neuf modèles 2D sont compris entre 3 et 40h.

Ce découpage implique que l'hydrogramme de l'aval du premier modèle est injecté en amont du second et ainsi de suite jusqu'à l'embouchure.

Les modèles se chevauchent selon des linéaires variables décrits plus haut, dans les zones nécessitant afin de s'affranchir des problèmes de différence de cotes possibles entre 2 modèles. Le linéaire commun (en rouge ci-dessous) permet en effet de rattraper une éventuelle différence due à la condition limite aval imposée du modèle amont. Cela est représenté sur le schéma de type profil en long ci-dessous.

Dans les zones de chevauchement, les résultats obtenus sont ceux donnant les cotes maximum.



4 Conditions aux limites

4.1 Condition amont

La condition amont correspond à l'injection des hydrogrammes issus du modèle hydrologique, correspondants aux débits de pointe des périodes de retour étudiées, c'est-à-dire les crues de calage (1978, 2008, 2003) et les crues de projet de période de retour T=10ans, 50 ans, 100ans et exceptionnelle.

Il faut noter que dans chaque modèle, des hydrogrammes intermédiaires sont également injectés, à l'arrivée de chaque sous bassin versant. Cela permet de simuler de manière la plus réaliste possible les apports des divers affluents ou apports diffus au fil des linéaires modélisés.

Pour les grands modèles 2D sur l'Huveaune et ses principaux affluents, l'hydrogramme issu du modèle 2D en amont est propagé vers l'aval en tant que condition limite amont. Les apports intermédiaires sont également ajoutés, ainsi la genèse, la propagation et l'amortissement des crues de l'Huveaune et ses principaux affluents sont modélisés d'amont en aval.

Les points d'injection de débits sont cartographiés dans l'annexe cartographique numérique pour chacun des modèles.

4.2 Condition aval

Deux conditions aux limites aval sont testées :

4.2.1 La hauteur normale d'écoulement :

Dans ce cas la condition limite aval correspond à **la hauteur normale d'écoulement** établie par la formule de Manning Strickler, c'est-à-dire la hauteur d'eau théorique que prendrait le cours d'eau pour les conditions hydrauliques et géométriques d'une section donnée si le régime était uniforme. L'écoulement uniforme est considéré comme un régime théorique que l'écoulement tendrait à adopter s'il n'était contraint à la variation par la géométrie du lit.

La formule de Manning Strickler est la suivante :

$$Q = K S R^{2/3} I^{0,5}$$

Avec : *K* : Coefficient de Strickler

- *S* : Surface mouillée de la section

Rh : Rayon mouillé de la section

I : Pente du lit du cours d'eau

C'est le cas pour les conditions aval des grands modèles 2D, sauf 2 exceptions (cf § suivant) :

- L'Huveaune aval (embouchure en mer impliquant une condition aval liés à des phénomènes maritimes)
- La Gouffone aval : étant un affluent de l'Huveaune la condition aval est celle de l'Huveaune au droit de la confluence).

4.2.2 Une condition limite aval imposée

- Pour les affluents :

Concernant les affluents (les filaires 1D et la Gouffone), une concomitance avec une crue du cours d'eau récepteur (Huveaune, Jarret ou Merlançon selon le secteur) est considérée.

Dans ce cas, la condition limite aval n'est pas une hauteur normale, mais une côte d'eau imposée correspondant à la cote maximum du cours d'eau récepteur (pour les filaire 1D en régime permanent) pour une période de retour donnée.

Pour la Gouffone, en 2D transitoire, la condition limite aval est le limnigramme (hauteur d'eau en fonction du temps) de l'Huveaune au droit de la confluence pour le même scenario.

- Pour l'embouchure en mer :

Pour le modèle Huveaune et Jarret à Marseille, correspondant à l'Huveaune dans sa partie aval (embouchure), la condition aux limites est différente. En effet, l'incidence marine doit-être prise en compte. Pour cela les cotes d'eau marines imposées sont :

- La cote marine décennale : 1.50mNGF pour la crue de projet,
- 2.10mNGF pour la crue exceptionnelle.
- Les marégraphes des crues de 2003 et 2008 pour les crues de calage correspondantes.

5 Description des modèles

Les modèles hydrauliques du bassin versant de l'Huveaune ont été reconstitués à partir de profils en travers du lit mineur et parfois du lit majeur, issus des relevés topographiques effectués par le géomètre, le cabinet Hydrotopo (cf §6.2 du chapitre 3).

Les ouvrages hydrauliques (OH) sont également issus d'une campagne de relevés par le même géomètre : levés des ponts et seuils sur le linéaire d'étude.

Les levés ont été effectués de mai à décembre 2012 (cf Rapport de Phase 4 pour plus de précision).

En ce qui concerne le lit majeur, pour la majorité des cours d'eau, le LIDAR fourni par la DDTM est disponible et permet donc la modélisation des lits majeurs.

A noter toutefois que le LIDAR est d'une précision moindre que les levés géomètre terrestres. Aussi il a toujours été choisi, en cas d'incohérence entre les deux données (si différence supérieure à 0.01m), de choisir celle issue des levés géomètre.

5.1 Modélisations 2D

Les caractéristiques principales de montage de ces modèles sont fournies dans le tableau ci-dessous :

Nom du Modèle	Linéaire (Km)	Nb de PT	Nb d'OH	Nb de mailles	Tailles (max) des mailles (m ²)
Huveaune-amont et Merlançon	16.5	260	33	90850	100
Roquevaire	5.9	117	10	94925	100
Fauge-amont	1.8	64	9	4860	100
Aubagne	20.2	347	47	163881	200
La Penne	10.2	187	22	80288	200
Jarret-amont	7.3	176	34	60.245	150
Jarret-intermédiaire	3	76	9	38307	100
Huveaune-Jarret Marseille	15.1	250	49	58165	500
Gouffone aval(ICM)	3	20	44	216000	30

Tableau 40 : Caractéristiques des modèles hydrauliques 2D

Les modélisations sont des couplages 1D/2D, c'est-à-dire que les lits mineurs sont modélisés en 1D, de manière à intégrer les ouvrages hydrauliques dans les calculs.

Les lits mineurs sont ensuite connectés au maillage 2D en lit majeur par des liaisons de type « seuil latéral » sur tout le linéaire des berges.

La donnée topographique des berges est issue des relevés terrestres.

Ci-dessous est montré un exemple de liaison entre le lit mineur 1D et le lit majeur maillé. Les traits roses figurent les berges du cours d'eau c'est-à-dire l'emplacement des liens de type « loi de seuil » régissant les transferts d'eau entre le lit mineur 1D et le maillage 2D du lit majeur. Ces lois de seuils permettent de modéliser les débordements du lit mineur dans le lit majeur mais aussi à l'inverse lors de la décrue le maillage se vide peu à peu dans le lit mineur. Les échanges d'eau sont donc possible dans les 2 sens. Ci-dessous un exemple de loi de seuil sur le tronçon de berge rose épaissi, connecté dans le 2D aux mailles colorées.

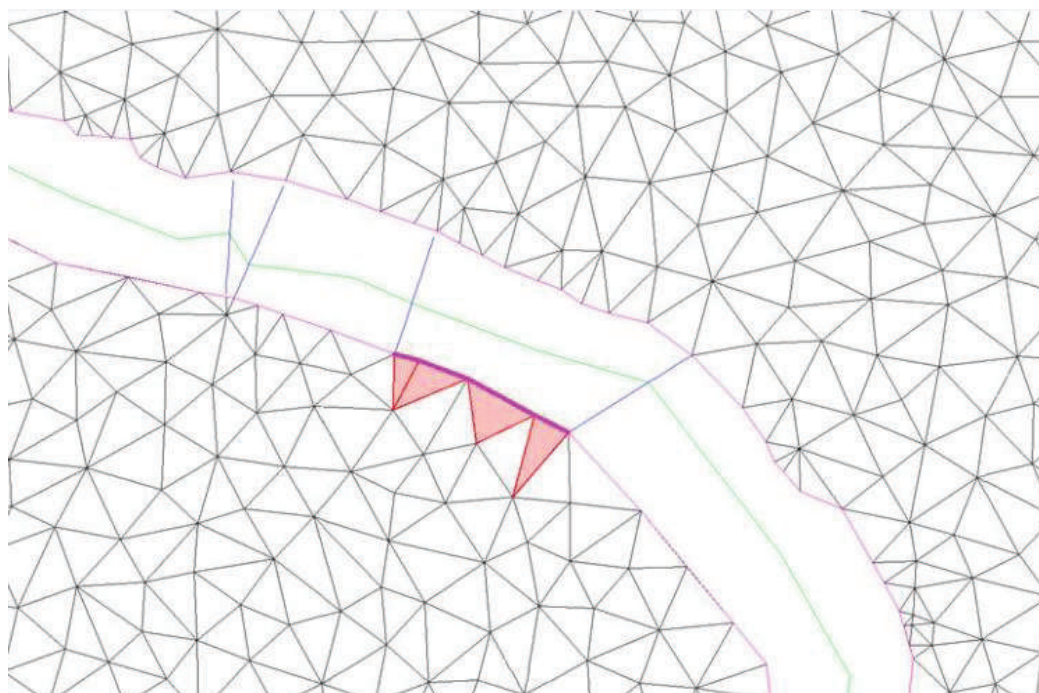


Figure 55 : exemple de liaison 1D/2D

Les modèles comprennent le lit mineur des cours d'eau modélisés en 1D (Huveaune, Merlançon, Fauge, Maïre, Merlançon d'Aubagne, Gouffone, Jarret) et le lit majeur dans la totalité de la zone inondable hydrogéomorphologique, soit une emprise variant selon les secteurs de 100m (dans les gorges en amont de Roquevaire) à 2.5km de large (plaine des Paluds).

Le maillage du modèle est adapté à la configuration de chaque zone. La densité du maillage résulte de contraintes de représentation des écoulements.

Les zones modélisées sont représentées par des mailles triangulaires dont les extrémités sont à la fois les points de calcul et les points de données topographiques.

Le maillage est construit pour prendre en compte les particularités des écoulements (lit mineur, obstacles, remblais, digues, ouvrages, discontinuités topographiques,...).

La taille des mailles est comprise entre quelques m² (au droit du lit mineur et des ouvrages) et 500 m² (dans le champ d'inondation éloigné). Le nombre total de mailles est d'environ 750 000 mailles.

Les modèles ont été construits à partir des données topographiques décrites précédemment.

Le MNT ne comprend pas les bâtiments de la zone d'étude. Ainsi, afin de représenter au mieux les contraintes d'écoulement, les zones de bâti importantes relevées sur les photographies aériennes ont été extraites du maillage de façon à former des « îles » (grands entrepôts, barres d'immeubles, pâtés

de maisons en centre urbain ...) et des lignes de contraintes ont été intégrées afin de représenter les infrastructures linéaires structurantes (routes, autoroutes, voies ferrées ...). Ce travail a été fait sur les modèles notamment en milieu urbain dense (Marseille) à ce sujet.

Ci-dessous extrait d'un quartier de Marseille.



Figure 56 : Exemple de maillage avec bâtiments enlevés pour former des « îles » (pas de passage d'eau)

Les cartographies fournies en annexe cartographique numérique reprennent les éléments de construction de chaque modèle à savoir :

- Le maillage (emprise du modèle et taille des mailles)
- Les profils en travers, les ouvrages hydrauliques, leur nom et le coefficient de rugosité (lit mineur)
- Le lit mineur (fond du cours d'eau)
- Les berges (c'est-à-dire l'emplacement des liens de type « loi de seuil » régissant les transferts d'eau entre le lit mineur 1D et le maillage 2D du lit majeur)
- Les linéaires à ciel ouvert ou enterrés
- Les points d'injection des hydrogrammes d'entrée
- Les regards avaloirs modélisés sur le modèle de la Gouffone aval.

5.2 Modélisations 1D

Les détails de la modélisation de ces petits affluents sont développés dans le tableau ci-dessous. Dans le cas où le géomètre n'a pas relevé de profil en travers, les modélisations ont été effectuées grâce aux profils en travers issus du LIDAR.

Quelques affluents, de longueur plus importante ont été modélisés avec plusieurs injections de débits, afin de modéliser au plus juste graduellement et de manière réaliste les débits de crue (injections intermédiaires).

Il convient également de noter que des affluents deviennent souterrains dans leurs parties aval (traversée de secteurs urbanisés). Notamment les affluents du Jarret et de l'Huveaune secteur intermédiaire (Aubagne, La Penne). Pour la plupart, la canalisation exutoire n'étant pas de capacité suffisante, la surverse et ruissellement conséquent en surface jusqu'au cours d'eau exutoire a également été modélisée.

Enfin 2 particularités de montage de modélisation sont à signaler :

- Les ruisseaux du Grand Pré et de la Destrousse confluent avant l'arrivée dans le Merlançon. Un seul modèle a donc été réalisé, contenant les 2 branches distinctes amont et la confluence de la partie commune aval.
- Au contraire, le vallon de l'Amandier se scinde en deux en amont de la nouvelle zone urbaine : la surverse de l'Amandier emprunte pour partie le réseau souterrain sous la nouvelle zone urbaine et rejoint directement ensuite le Jarret, mais l'autre partie de la surverse rejoint le vallon des Rascous. Cette particularité a elle aussi été modélisée.

Tableau 41 : caractéristiques des modèles hydrauliques 1D

Cours d'eau principal	Nom de l'affluent	Longueur modélisée (m)	Nombre profils en travers relevés par le géomètre	Nombre d'ouvrages	Nombre d'injections intermédiaire
Huveaune amont	Vallat de Fenouilloux	1800	9	13	1
	Barres	1985	7	5	1
	Vède	3310	13	39	1
	Vallat de Basseron	2075	9	4	1
Merlançon	Pré Gaillard	1160	4	2	0
	Tonneau	2300	11	4	3
	Playes	840	4	3	0
	Destrousse_amont	900	5	1	0
	Grand Pré_amont	2200	8	2	1
	Confluence Detrousse-GrdPré	2800	12	7	0
Huveaune intermédiaire	Joinville	1050	3	4	1
	Beaudinard	2200	7	0	2
	Vallat de Liguières	2115	10	10	1
	Légion	675	2	2	0
	Aumône	980	3	1	0
	Charrel	1530	4	3	0
Jarret	Vallon de l'Oule	170	1	0	0
	Vallon de l'Amandier	1540	0	1	0

Cours d'eau principal	Nom de l'affluent	Longueur modélisée (m)	Nombre profils en travers relevés par le géomètre	Nombre d'ouvrages	Nombre d'injections intermédiaire
	Mordeau	700	0	0	0
	Vallon du Routabou	1500	4	2	0
	Vallon des Ecombes	780	4	5	0
	Les Rascous	725	4	1	0
Huveaune aval	Gouffone	3310	34	10	1

Les cartographies fournies en annexe cartographique numérique reprennent les éléments de construction de chaque modèle à savoir :

- L'emprise du modèle
- Les profils en travers, les ouvrages hydrauliques, leur nom et le coefficient de rugosité (lit mineur)
- Le lit mineur (fond du cours d'eau)
- Les linéaires à ciel ouvert ou enterrés
- Les points d'injection des hydrogrammes d'entrée.

5.2.1 Les affluents de l'Huveaune amont

1) Le vallon de Fenouilloux

C'est un affluent rive droite de l'Huveaune amont de 1,8km de long.

Il s'écoule du Nord vers le sud, depuis les hauteurs karstiques dominant Saint Zacharie, jusqu'à l'Huveaune à la traversée de Saint Zacharie.

2) Le ruisseau des Barres

C'est un affluent rive droite de l'Huveaune amont de 2km de long.

Il s'écoule du Nord vers le Sud, depuis les hauteurs karstiques dominant Auriol, jusqu'à l'Huveaune à l'amont de la traversée du bourg d'Auriol.

3) Le Vède

Le Vède est un affluent rive gauche de l'Huveaune amont de 3,3km de long.

Il s'écoule du Sud vers le Nord et conflue avec l'Huveaune à Auriol après un infléchissement vers l'Ouest à partir du giratoire du collège. La canalisation de passage sous le giratoire étant insuffisante pour les fortes crues, une surverse a été modélisée, afin de représenter les écoulements de surface issus des débordements depuis le giratoire. Cette surverse rejoint directement l'Huveaune au Nord après un passage par une zone pavillonnaire et le quartier du collège.

4) Le vallon de Basseron

Le Basseron est un affluent rive gauche de l'Huveaune amont de 2km de long.

Il s'écoule du Sud vers le Nord et conflue avec l'Huveaune au niveau du centre ancien d'Auriol. La canalisation aval étant suffisante pour les fortes crues (stockage possible en amont de celle-ci), aucune surverse n'a dû être modélisée. La partie amont est composée de 2 branches distinctes.

5.2.2 Les affluents du Merlançon

a) Le ruisseau de Pré Gaillard

Le ruisseau de Pré Gaillard est un affluent rive droite du Merlançon, dans sa partie amont.

Il parcourt 1 km du Sud Ouest vers le Nord Ouest. Sa partie amont est de type gorges, l'aval serpente dans des zones à pentes plus faibles (prés).

b) Le ruisseau du Tonneau

Le ruisseau du Tonneau est un affluent rive gauche du Merlançon.

Issus des parties karstiques surplombant La Bouilladisse, il chemine à travers la ville pendant environ 2km, pour rejoindre le Merlançon au droit de l'autoroute.

c) Le ruisseau des Playes

Le ruisseau des Playes est un petit affluent rive gauche du Merlançon.

Issus des parties karstiques surplombant La Bouilladisse, il chemine à l'aval de la ville pendant environ 1km, pour rejoindre le Merlançon au droit de l'autoroute après l'avoir longé.

d) La Destrousse et le Grand Pré

Comme annoncé plus haut, le ruisseau de la Destrousse et celui du Grand Pré confluent au niveau du centre-ville de la Destrousse (stade) avant de confluer avec le Merlançon en rive droite, après quelques dizaines de mètres.

Le ruisseau de la Destrousse et celui du Grand Pré parcourent tous deux un linéaire de 3km environ.

La Destrousse travers des zones urbanisées (pavillonnaires), le Grand Pré est lui plutôt de type rural.

La Confluence ce fait en partie urbaine de la Destrousse (canalisations).

Trois modèles ont été construits : La Destrousse Amont, Le Grand Pré Amont, puis La confluence.

5.2.3 Les affluents de l'Huveaune centre

1) Le ruisseau de Joinville

Le ruisseau de Joinville est un affluent rive droite de l'Huveaune intermédiaire de 3,3km de long.

Il s'écoule du Nord-Ouest vers le Sud Est et conflue avec l'Huveaune à Aubagne. La canalisation aval à la traversée de la zone d'activités étant insuffisante pour les fortes crues, une surverse a été modélisée, afin de représenter les écoulements de surface issus des débordements depuis la canalisation. Cette surverse rejoint directement l'Huveaune.

2) Le ruisseau de Beaudinard

Le ruisseau de Beaudinard est un affluent rive droite de l'Huveaune intermédiaire.

Il conflue avec l'Huveaune après un cheminement de 2,2km d'Ouest en Est. La partie amont traverse des zones pavillonnaires, la partie aval traverse une zone d'activités avant de rejoindre l'autoroute.

3) Le vallat de Liguère

Le vallat de Liguères est un affluent rive droite de l'Huveaune intermédiaire.

Il conflue avec l'Huveaune après un cheminement de 2,1km du Nord au Sud. La partie amont est un secteur de gorges, puis il traverse des zones pavillonnaires, enfin la partie aval traverse une zone d'activités avant de rejoindre l'Huveaune après passage sous l'autoroute puis la voie ferrée.

4) Le vallat de la Légion

Le vallat de la Légion est un affluent rive droite de l'Huveaune intermédiaire.

Il conflue avec l'Huveaune après un cheminement de 0,7km du Nord au Sud. La partie amont traverse des zones pavillonnaires, la partie aval traverse une zone d'activités avant de rejoindre l'autoroute.

Sa partie amont est rurale, et à l'arrivée au niveau de la Légion, le ruisseau emprunte une canalisation suffisamment bien dimensionnée pour les forts débits. Ainsi aucune surverse jusqu'à l'Huveaune n'est modélisée sur cet affluent.

5) Le ruisseau de l'Aumône

Le ruisseau de l'Aumône est un petit affluent rive droite de l'Huveaune Intermédiaire.

Issus d'une partie de gorges, il aboutit ensuite en une plaine rurale plus large.

La modélisation se fait sur un linéaire de 1km environ.

6) Le ruisseau du Charrel

Le Charrel est un affluent rive gauche de l'Huveaune intermédiaire.

Il chemine d'abord dans une partie rurale karstique puis traverse la zone urbanisée de La Penne sur Huveaune au Charrel. La modélisation couvre un linéaire de 1,5km.

5.2.4 Les affluents du Jarret amont

a) Vallon de l'Oule

Le vallon de l'Oule est un petit affluent rive gauche du Jarret amont.

Issus de zones naturelles karstiques il chemine ensuite dans un fond de vallée urbanisé sans réel réseau de drainage, à travers les jardins des propriétés et les rues. La modélisation porte sur les 170m de partie urbanisée avant sa confluence Jarret.

b) Vallon de l'Amandier

Le vallon de l'Amandier est un petit affluent rive gauche du Jarret amont.

Issus de zones naturelles karstiques il chemine ensuite dans un fond de vallée urbanisé à travers une zone pavillonnaire d'Est en Ouest. La modélisation porte sur 1,5km avant la conduite de confluence vers le Jarret. Cette conduite étant de dimension insuffisante pour le transit des débits de pointe, une surverse a été modélisée. Cette surverse modélise les écoulements de surface non admis par la canalisation. Ces écoulements de surface se dirigent selon 2 directions opposées : l'un rejoint directement le Jarret au Nord à travers un nouvelle zone urbanisée, l'autre rejoint la vallée du Rascous. En effet la limite des 2 bassins versants est très peu marquée. Il y a donc transfert d'une partie des débits de l'Amandier vers les Rascous. (Remarque : ceci corrobore l'analyse faite du secteur dans l'étude hydrogéomorphologique).

c) Ruisseau du Mordeau

Le ruisseau du Mordeau est un petit affluent rive droite du Jarret Amont.

Issus d'un bassin versant naturel karstique, il chemine ensuite à travers une zone pavillonnaire.

La modélisation d'étend sur environ 700m.

d) Ruisseau du Routabou

Le Routabou est un affluent rive droite du jarret amont. Issus d'une zone naturelle karstique il traverse ensuite les zones habitées. Sa partie aval est couverte avant de rejoindre le Jarret. Cette canalisation n'étant pas suffisante pour le transit des débits de pointe, une surverse a été modélisée afin de caractériser les écoulements non admis dans la canalisation, rejoignant le Jarret en surface.

Le total de la modélisation couvre un linéaire de 1,5km environ.

e) Vallon des Escombes

Le vallon des Escombes est un affluent rive droite du Jarret amont. Issus d'un bassin versant naturel karstique amont il traverse ensuite des zones rurales (champs) puis pavillonnaires.

La modélisation couvre un linéaire de 800m avant la confluence avec le Jarret.

f) Ruisseau des Rascous

Le ruisseau de Rascous est issu d'un bassin versant naturel karstique. C'est un affluent rive gauche du Jarret amont. Comme vu plus haut, une partie de ses débits sont issus du vallon de l'Amandier.

La modélisation prend en compte cette surverse amont par l'injection de débit de surverse correspondant à chaque crue testée.

Le Rascous traverse des zones rurales et pavillonnaires avant de rejoindre le Jarret. Il passe également sous le canal de Marseille.

5.2.5 Les affluents de l'Huveaune aval

Le seul modèle 1D réalisé sur l'Huveaune aval concerne la partie amont de la **Gouffone**.

C'est une partie à ciel ouvert, issus de zones karstiques naturelles amont, qui chemine ensuite sans réel cours identifié, d'Est en Ouest à travers les jardins de la zone pavillonnaire de la combe de la Gouffone. Le lit se marque ensuite peu à peu pour devenir de plus en plus important. Le lit est toujours contraint par la densification de l'habitat du secteur. En aval il entre dans une grande canalisation traversant le centre urbain de Marseille (secteur Bd Michelet). C'est là que la modélisation 1D s'arrête.

Le linéaire modélisé en 1D est de 3,3km.

Ci- dessous sont fournis les différentes caractéristiques des modèles 1D réalisés et les débits de projets injectés :

Cours d'eau principal	Nom de l'affluent	Longueur modélisée (m)	Nombre profils en travers relevés par le géomètre	Nombre d'ouvrages	Fourchette KS lit mineur	Fourchette KS lit majeur	Nombre d'injections interm.	Q100 modélisé amont	Q100 modélisé exutoire	Q10 modélisé amont	Q10 modélisé exutoire	Q50 modélisé amont	Q50 modélisé exutoire	Qexcep modélisé amont	Qexcep modélisé exutoire
Huveaune amont	Vallat de Fenouilloux	1800	9	13	20	5 à 10	1	18	20	8.3	9.9	14.9	15.8	36	40
	Barres	1985	7	5	20	10	1	2.4	8.5	0.9	4.8	2	6.7	4.8	17
	Vède	3310	13	39	20	5 à 10	1	38.6	53.1	11.9	19.9	23.8	39.8	77.2	106.2
Merlançon	Vallat de Basseron	2075	9	4	20	5 à 10	1	2.2 + 3.6 = 5.8	10.8	1.8+1.1=2.9	5.8	2.9+1.9=4.8	9.3	11.6	21.6
	Pré Gaillard	1160	4	2	20	10		4.5	4.5	1.9	1.9	3.8	3.8	9	9
	Tonneau	2300	11	4	20	5 à 10	3	5.6	28.1	2.4	14.9	4.6	22.4	11.2	56.2
Huveaune interm.	Playes	840	4	3	20	10		18.6	18.6	8.8	8.8	15	15	37.2	37.2
	Destrousse_amont	900	5	1	20	5		6.4	6.4	3.2	3.2	5.1	5.1	12.8	12.8
	Grand Pré_amont	2200	8	2	20	10	1	4.75	9.5	2.8	5.6	4.5	9	9.5	19
Huveaune aval	Confluence Detrousse-GrdPré	2800	12	7	20	5 à 10		9.5 (GrdPré) et 16.2 (Det)	5.6 (GrdPré) et 8.9 (Det)	5.6 (GrdPré) et 8.9 (Det)	9.5 (GrdPré) et 14.2 (Det)	9 (GrdPré) et 14.2 (Det)	19 (GrdPré) et 32.4 (Det)	19 (GrdPré) et 32.4 (Det)	5
	Joinville	1050	3	4	20	5 à 10	1	1.3	2.5	0.5	1.1	1.1	2.1	2.6	5
	Beaudinard	2200	7	0	20	10	2	0.7	4.2	0.3	2.2	0.6	3.3	1.4	8.4
Jarret	Vallat de Liguères	2115	10	7	20	5 à 10	2	1.3	3.6	0.5	1.7	1.1	2.9	2.6	7.2
	Légion	675	2	2	20	10		4.7	4.7	2	2	4	4	9.4	9.4
	Aumône	980	3	0	20	10		11.1	11.1	4.1	4.1	9	9	22.2	22.2
Huveaune aval	Charrel	1530	4	0	20	10		17.9	17.9	8	8	14.4	14.4	35.8	35.8
	Vallon de l'Oule	170	1	0	-	5		6.5	6.5	2.7	2.7	5.4	5.4	13	13
	Vallon de l'Amandier*	1540	0	1	20	5 à 10		11.1	4.5	4.6	2.9	9.2	3.6	22.2	9.1
Huveaune aval	Mordeau	700	0	0	-	5		16.4	16.4	8	8	12.8	12.8	32.8	32.8
	Vallon du Routabou	1500	4	2	20	5 à 10		2.2	2.2	1	1	1.8	1.8	4.4	4.4
	Vallon des Ecombes	780	4	5	20	5 à 10		8.13	8.13	4.1	4.1	7	7	16.26	16.26
Huveaune aval	Les Rascous**	725	4	1	20	10		12.3	12.3	5.3	5.3	10.4	10.4	24.6	24.6
	Gouffone	3310	34	10	20 - 35 - 50	5	1	8.8	26.4	3.7	11.1	6.95	20.85	17.6	52.8

Tableau 42 : Caractéristiques des modèles hydrauliques 1D réalisés

* Débit Amandier aval = Débit Amandier moins la surverse qui se dirige vers le Rascous

** Débit Rascous : comprend les débits issus de la surverse Amandier

6 Calage des modèles

Le calage des modèles est une étape essentielle dans la modélisation. Il permet de s'assurer que les résultats donnés par la simulation ne sont pas aberrants et coïncident avec la réalité observée. Le calage s'effectue avec les données disponibles de débits et hauteurs d'eau (aux stations hydrométriques). En général, les données issues de la crue la plus forte ayant eu lieu sont choisies. Il est préférable d'avoir plusieurs événements pluvieux avec des caractéristiques différentes et n'induisant pas un comportement et une réponse similaires du réseau hydrographique.

Les résultats des simulations, par comparaison aux mesures, permettent alors de vérifier les hypothèses faites lors de la construction du modèle. Si les résultats ne coïncident pas, la phase de calage à proprement parlé débute. Les paramètres des modèles hydrauliques qui sont ajustés sont :

- les coefficients de Manning-Strickler (qui permettent de prendre en compte la rugosité liée à la végétation, la granulométrie du fond ...),
- les coefficients de perte de charge dans les ouvrages.

La gamme des coefficients de Strickler retenus est :

- Lit mineur naturel : K_s compris entre 15 et 25 selon l'état et la dimension du cours d'eau (végétation, granulométrie, entretien ...)
- Lit mineur artificiel (béton, murs, enrochements ...) : K_s compris entre 40 et 50
- Lit majeur urbain dense : $K_s = 5$ hors Marseille
- Lit majeur urbain dense Marseille : 40 (ilots de bâtiments enlevés : écoulements dans les rues uniquement)
- Lit majeur urbain pavillonnaire diffus : $K_s = 10$
- Lit majeur naturel (champs/prairies) : $K_s = 10$ à 20

Ces coefficients sont issus de la littérature technique, pour les modélisations de type 1D. Rappelons ici que tous les modèles hydrauliques ont un lit mineur modélisé en 1D.

Tous les coefficients de Strickler utilisés, en lit mineur et lit majeurs 1D ou 2D sont dans la gamme des valeurs recommandées.

Les coefficients de Strickler utilisés pour les modèle 2D sont en théorie plus élevés (moins de frottement) que pour les modèles filaires. En effet, la modélisation 2D en calculant les vitesses locales représente mieux les pertes de charge singulières liées aux variations de vitesse (coude, variations de topographie...).

Concernant les zones urbaines modélisées en 2D avec l'extraction des bâtiments, le coefficient retenu de Strickler est de 40

De plus la spécificité de cette étude avec les allers-retours entre les modèles hydrologiques et hydrauliques a nécessité de vérifier le calage des hydrogrammes de crues calculés par les modèles hydrauliques (et en particulier la pointe principale donnant les débits et donc les débordements maximums) et ceux mesurés aux stations limnimétriques. Nous donnons dans les chapitres suivants non seulement le calage hydraulique (comparaison des PHE observées et calculées) mais aussi le résultat du calage hydrologique (comparaisons des hydrogrammes obtenus avec ceux observés).

6.1 Modélisations 2D

Comme les modèles hydrologiques, les modèles hydrauliques sont calés sur des crues moyennement débordantes (crue de février 1978 notamment), ou très peu débordantes (décembre 2008 ou 2003).

Le calage s'est fait :

- sur les crues de 1978 et 2008 pour l'Huveaune et le Merlançon,
- et 2003 pour le Jarret, l'Huveaune aval et la Gouffone.

Les hydrogrammes injectés sont ceux issus des modèles hydrologiques correspondant.

Chaque calage comprend les résultats du calage en débit, au niveau des stations de mesures (se rapprocher au maximum de la courbe des hydrogrammes observés aux stations), et un calage altimétriques des PHE relevées le long du linéaire.

Ce calage des PHE a été fait en faisant varier les coefficients de rugosité du lit mineur, et les coefficients de perte de charge des ouvrages hydrauliques. Le but étant de se rapprocher au maximum des PHE fiables relevées.

6.1.1 Modèle Huveaune Amont

Le calage hydrologique est réalisé pour les crues de 1978 et 2008.

Deux stations sont présentes sur le linéaire :

- La station de Saint Zacharie : mise en service en 2006,
 - La station de Roquevaire : mise en service en 1900.
- **Crue de 2008** : les deux stations étaient en service à ce moment-là. Les hydrogrammes correspondants calculés et observés sont fournis sur les graphiques suivants.

On constate que le calage de la propagation des hydrogrammes est de bonne qualité sur la pointe principale de crue aux deux stations.

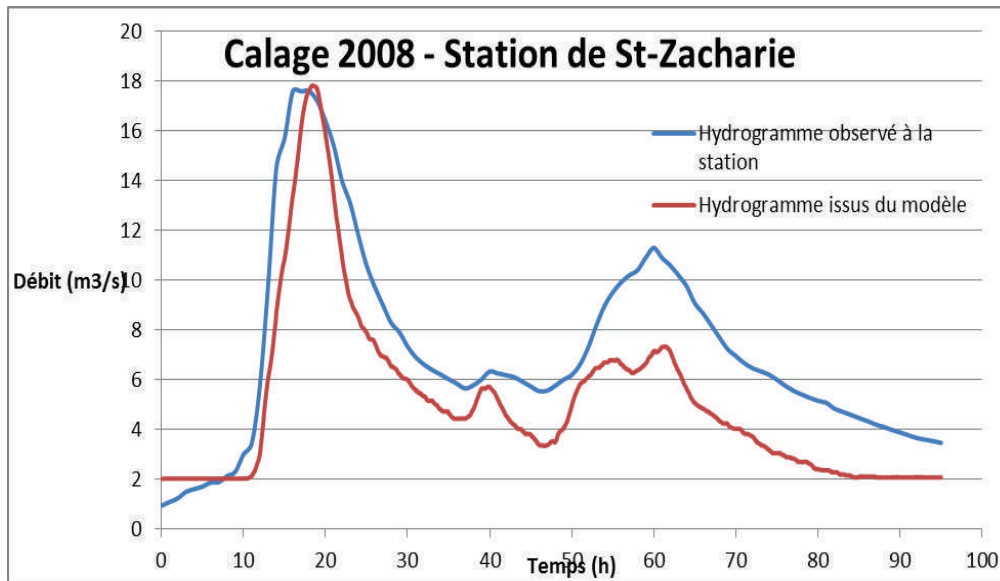


Figure 57 : calage de la crue de 2008 à St Zacharie

Il existe un léger décalage de 2 apports en fin de crue qui ainsi ne se somment pas comme cela a été observé. Cela peut s'expliquer par un phénomène de décalage spatial de la pluie. Néanmoins il a été choisi de ne pas chercher à caler cette fin de crue car les principaux débordements ont été observés lors de la 1ere pointe de crue.

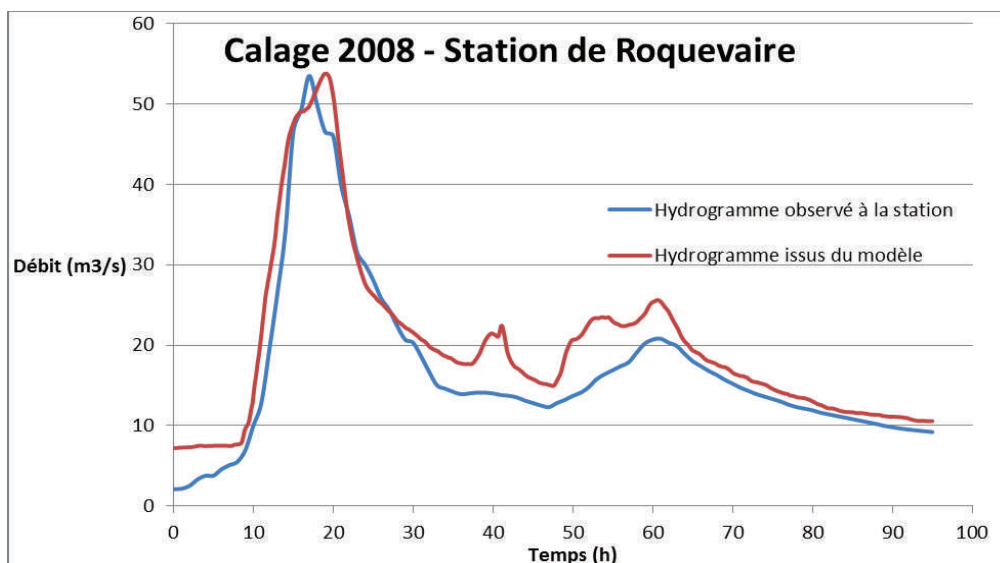


Figure 58 : calage de la crue de 2008 à Roquevaire

Trois PHE nivelées précisément sont disponibles sur le tronçon (relevées par Hydrotopo).

Nom PHE	PHE (m NGF)	Fiabilité	Résultat (m NGF)	delta PHE - résultat (m)
2008-001	246.12	Précis (échelle station)	246.15	-0.03
2008-002	246.00	Peu précis (photo)	246.05	-0.05
2008-003	190.13	Peu précis (photo)	190.39	-0.26

Tableau 43 : Calage de la crue de 2008 pour le modèle Huveaune Amont

PHE 2008 001

PHE 2008 002



PHE 2008 003

Figure 59 : photographies des PHE 2008 sur le modèle Huveaune amont

Le calage est donc bon aux 2 PHE de Saint Zacharie (001 et 002), la différence altimétrique calculée étant de l'ordre de la précision du modèle (précision du modèle de l'ordre de la dizaine de centimètres). A noter que ces deux PHE sont issues de laisses de crues.

Le calage à Auriol (003) est de moins bonne qualité mais il faut noter qu'il est issu d'une photo de crue, et donc peu fiable (la photo n'étant pas forcément prise au moment du plus fort de la crue). Il n'y avait pas de laisse de crue.

Remarque : le rapport d'orage de 2008 obtenu ne traite que de la commune de Marseille. Il ne comporte donc malheureusement aucune indication sur le linéaire de ce modèle.

- **Crue de 1978** : seule une seule station était en service à cette date, à savoir la station de Roquevaire, à l'extrémité aval du modèle.

Il faut noter que l'**hydrogramme observé alors est peu fiable**, seulement composé de quelques points (d'où la forme simplifiée de l'hydrogramme observé en rouge ci-dessous).

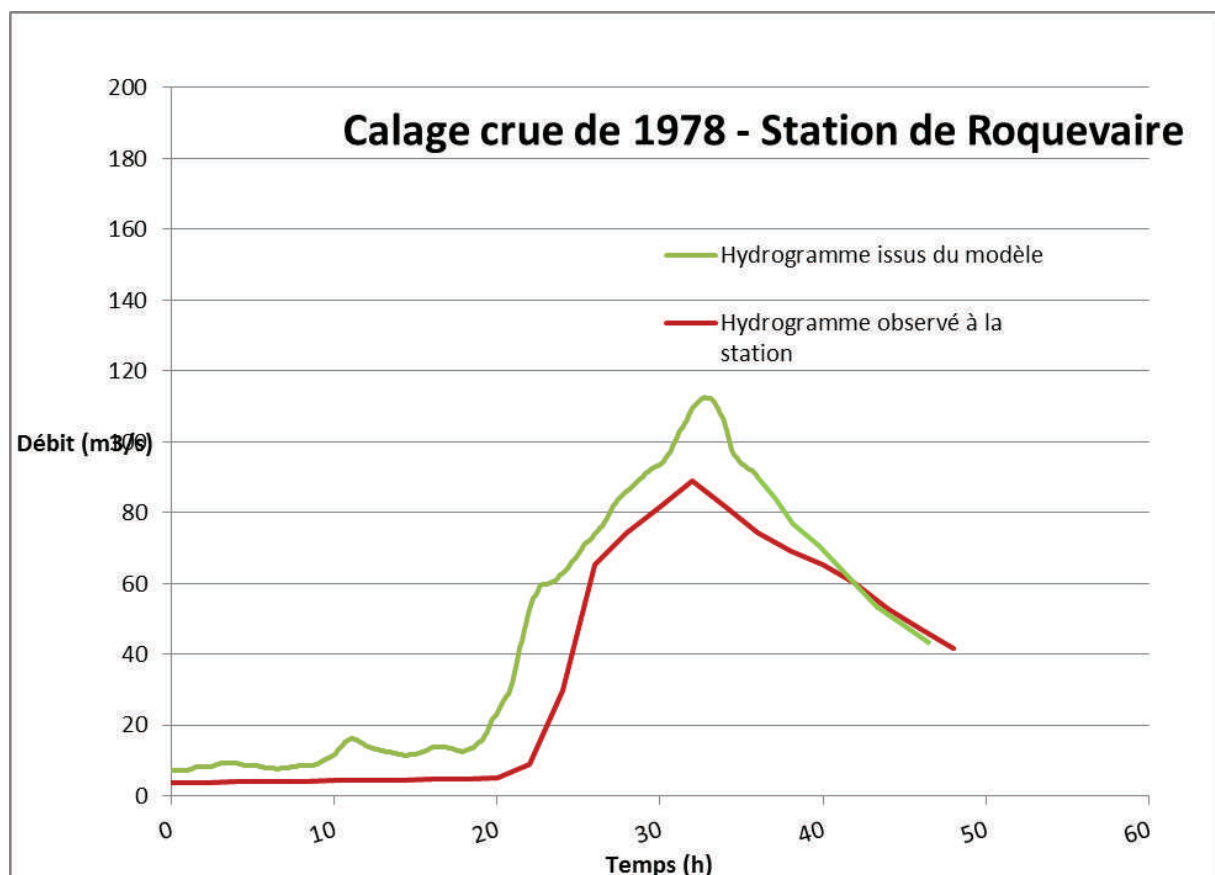


Figure 60 : Calage de la crue de 1978 à Roquevaire

La forme générale est respectée, et le modèle indique que la pointe de crue n'a à priori pas été relevée à la station (dysfonctionnement probable).

De nombreuses PHE sont disponibles pour cette crue. Malheureusement elles sont **peu fiables** car issues d'une enquête de terrain de 1988, soit 10 ans après la crue, et mesurées avec une précision à 10 cm seulement. Il faut de plus indiquer que des travaux ont été réalisés sur Auriol et Roquevaire depuis, modifiant la topographie du secteur.

Les valeurs correspondantes sont néanmoins indiquées dans le tableau ci-dessous, et révèlent une corrélation relativement bonne.

Il faut garder également à l'esprit que les témoignages recueillis sur Auriol (cf rapport de phase 1) ont fait état de l'obstruction du pont des Capucin en centre-ville, et donc d'une grande perturbation des écoulements sur Auriol, influant notablement à la hausse la ligne d'eau. Les embâcles et obstructions ne sont pas pris en compte par le modèle.

Nœud(s)	PHE (m NGF)	Fiabilité de la PHE	Résultat simulation (m NGF)	Delta PHE - Simu (m)
OH01av - P02	234.3	Peu fiables (enquête de voisinage 10 ans postérieure) Travaux réalisés depuis	234.1	0.2
P02	232.8		232.9	-0.1
OH02am	230.7		230.9	-0.2
P04 - OH03am	228.6		228.5	0.1
OH03av - P05	228.0		227.5	0.5
P05_lit-majeur	226.8		226.3	0.5
OH04am	224.9		224.3	0.6
Maille - 35385 (lit-majeur)	223.1		222.6	0.5
OH06 - P07	221.7		221.4	0.3
OH07am	220.1		220.0	0.1
P08	218.9		218.8	0.1
P09 - P10	217.8		217.5	0.3
P10	216.6		216.5	0.1
P11	215.0		213.8	1.2
P12	213.0		210.8	2.2
P14	207.7		207.5	0.2
P15 - OH08am	204.9		204.9	0.0
OH09av	202.6		202.6	0.0
OH10am	202.8		202.5	0.3
P16	200.7		200.7	0.0
P17	199.3		199.0	0.3
P18	197.6		196.8	0.8
OH11am	196.2		195.9	0.3
P20	195.0	194.4	0.6	
OH13am	192.9	192.2	0.7	

Tableau 44 : Calage de la crue de 1978 pour le modèle Huveaune Amont

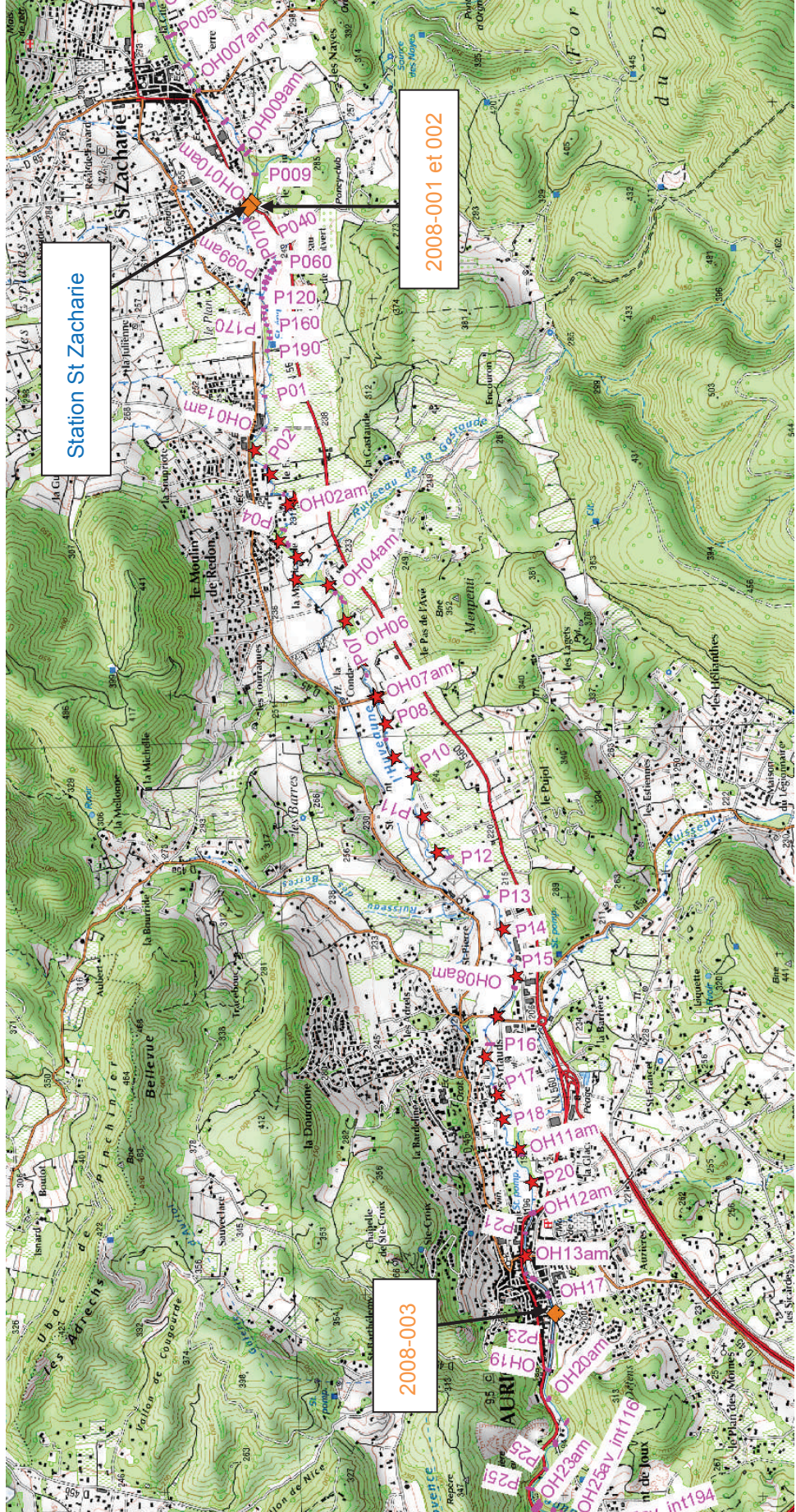


Figure 61 : Modèle Huveaune Amont : PHE 1978 (étoiles rouges) et 2008 (losanges orange)

6.1.2 Modèle Huveaune à Roquevaire

Le calage en débit est réalisé pour la crue de de 1978 à Roquevaire, seule station du linéaire d'étude (en limite amont du modèle). Cette station est commune au modèle Huveaune amont et Huveaune à Roquevaire. Il faut rappeler que **l'hydrogramme observé alors est peu fiable**, seulement composé de quelques points (d'où la forme simplifiée de l'hydrogramme observé en rouge ci-dessous).

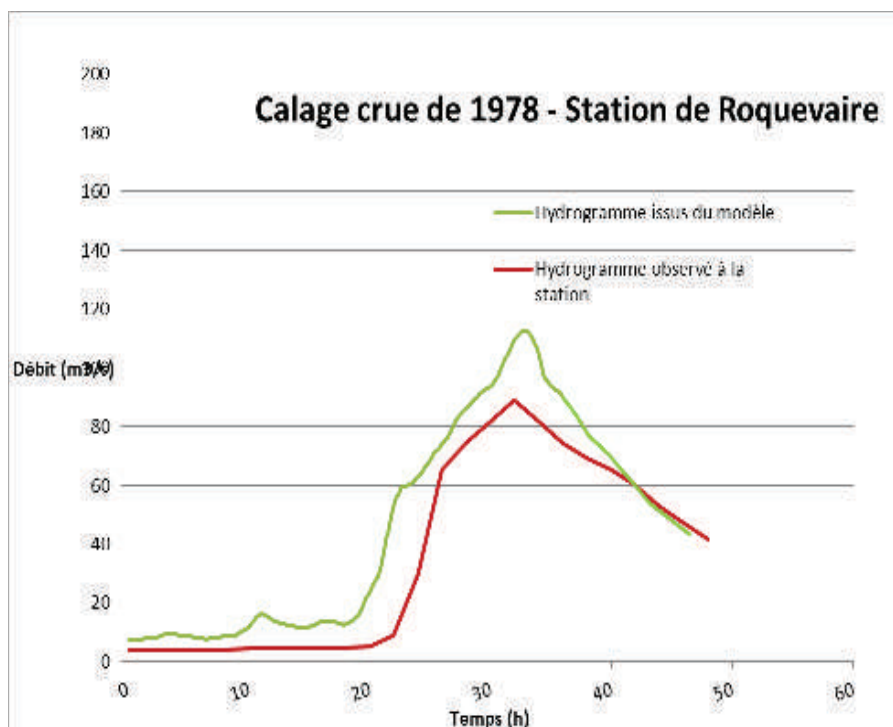


Figure 62 : calage de la crue de 1978 à Roquevaire

De même que pour le modèle amont, la forme générale est respectée, et le modèle indique que la pointe de crue n'a à priori pas été relevée à la station (dysfonctionnement probable).

Les PHE obtenues par le modèle sont néanmoins cohérentes avec les dires des riverains, recensés en phase 1 de l'étude et synthétisés dans le tableau ci-dessous.

Tableau 45 : Calage de la crue de 1978 pour le modèle Huveaune à Roquevaire

PHE (m NGF)	Fiabilité	Cote calculée (m NGF)	Delta (m)
0.5 m sur parking en rive gauche	Peu précis - Témoignage 30 ans post crue	entre 0.4 et 0.6 m	OK
Environ 1m sur chemin Carraire de l'Etoile		environ 1m	OK
environ 0.5m sur stade		environ 30 cm	-0.20
Limite Zi en Rive droite au chemin communal du Pont de l'Etoile		Limite Zi en Rive droite au chemin communal du Pont de l'Etoile	OK

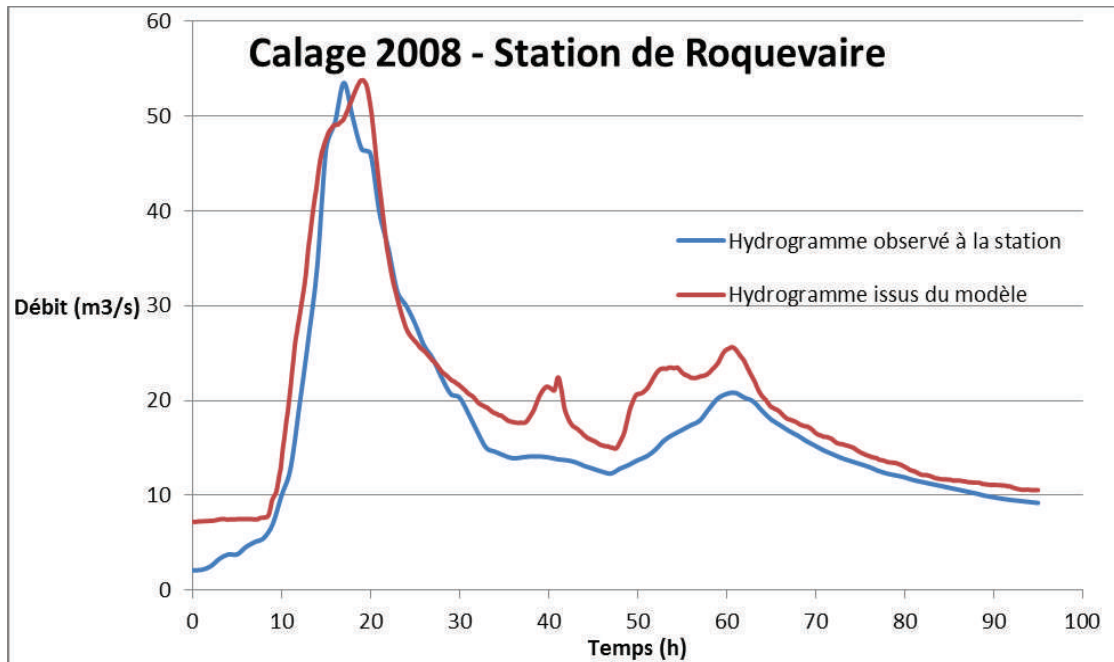


Figure 63 : Calage de la crue de 2008 à Roquevaire

Les PHE de 2008 disponibles sur ce tronçon sont fournies ci-dessous.

La PHE 004 est fiable car issue de la lecture d'une échelle limnimétrique dans Roquevaire.

Par contre la 005 est peu fiable car est issue d'une photo en crue. Le maximum ne semble pas être atteint comme le montre la cote calculée beaucoup plus importante.



SPC Med-Est_Huveaune_Roquevaire_15/12/2008_10h30 PHE 2008-004



Figure 64 : Photos des PHE 2008 à Roquevaire

	PHE (m NGF)	Fiabilité	Cote calculée (M NGF)	Delta (m)
2008-004	153.33	Bonne (lecture échelle)	153.30	0.03
2008-005	151.35	Mauvaise (photo de crue)	152.03	-0.68

Tableau 46 : Calage de la crue de 2008 pour le modèle Huveaune à Roquevaire

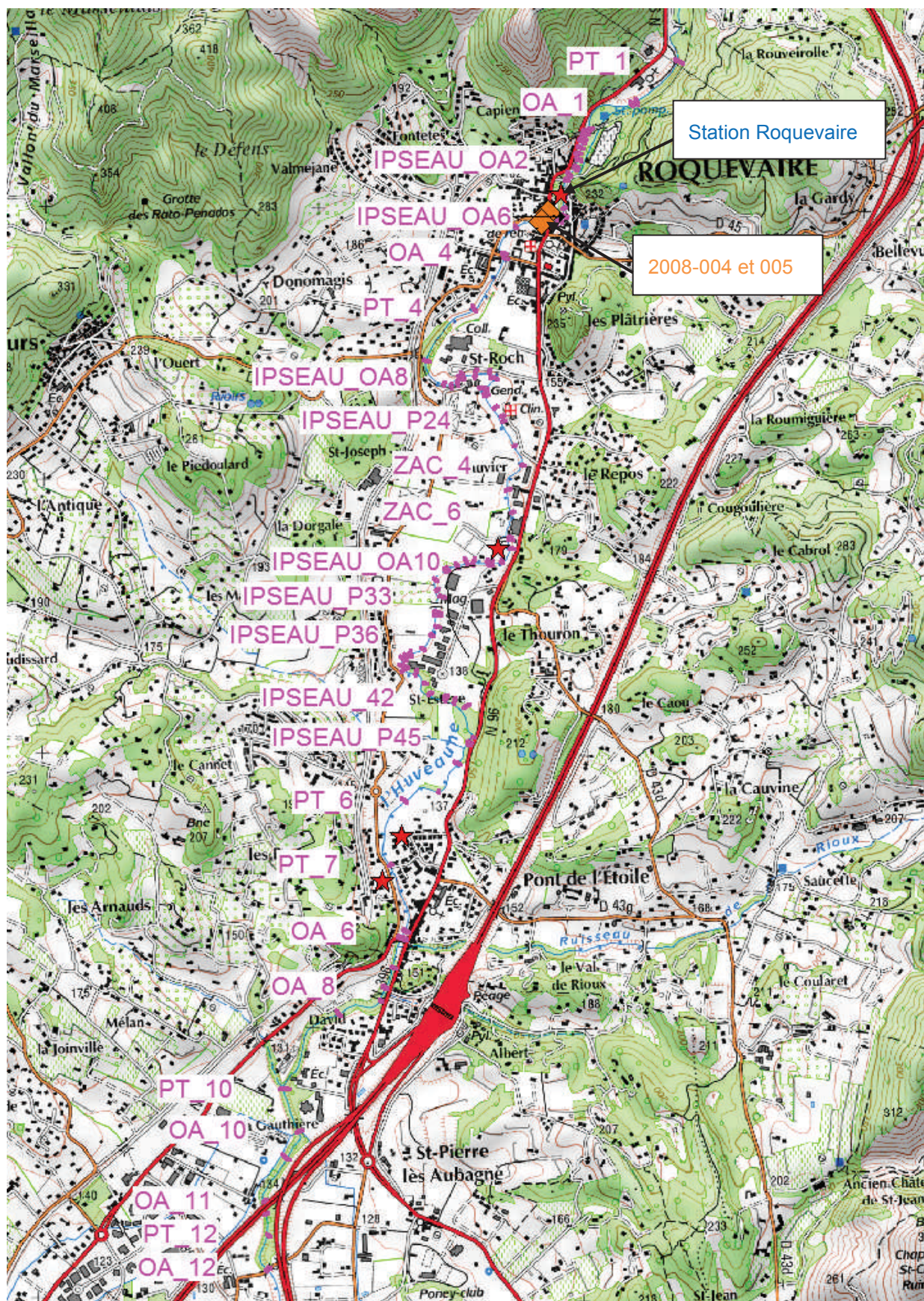


Figure 65 : Modèle de Roquevaire : PHE 1978 (étoiles rouges) et 2008 (losanges orange)

6.1.3 Modèle Huveaune et affluents à Aubagne

Il existe sur ce linéaire une seule station, celle d'Aubagne Charrel, en aval du modèle (située en aval de l'A50).

Il n'existe pas de PHE dans la plaine de la Maïre ni de station de mesure.

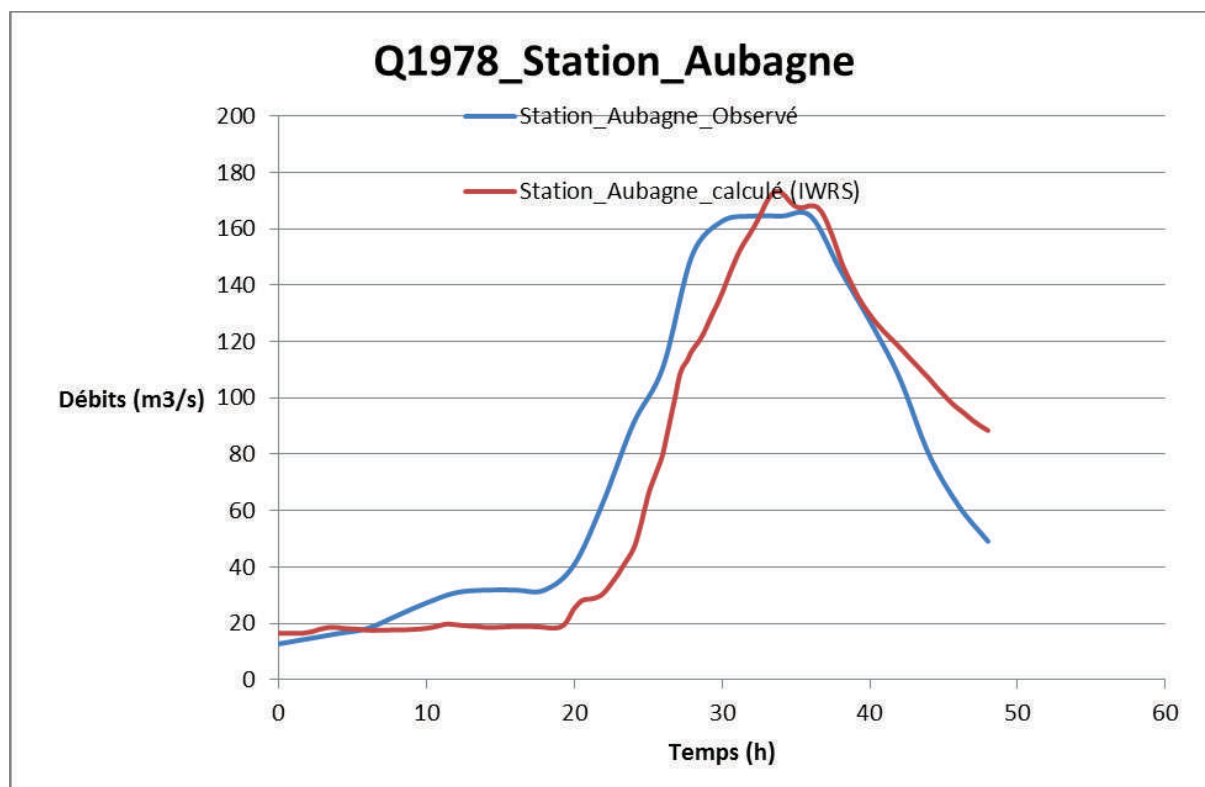


Figure 66 : Calage de la crue de 1978 à Aubagne

L'hydrogramme relevé semble relativement fiable, néanmoins une nouvelle station a été mise en service en 1997 avec réalisation de travaux hydrauliques. La cote d'eau PHE de 1978 ne peut donc pas être comparée à la cote calculée sur le modèle actuel.

C'est ce que montre le tableau des PHE ci-dessous :

	PHE (m NGF)	Fiabilité de la PHE	Cote modélisée (m NGF)	Delta PHE-modélisé (m)
OA20_Sortie souterrain	98.45	Mauvaise car importants travaux hydrauliques dans le lit mineur	98.61	-0.16
PT26-PT27	97.54		97.97	-0.43
OA_21	97.21		97.57	-0.36
OA22_aval_A50	96.25		96.28	-0.03
OA22!_aval_A50 (Charrel)	95.63		96.13	-0.50
OA23_aval_seuil	95.83		96.33	-0.50
OA24_aval_USBPR	95.80		95.26	0.54
OA25	95.07		95.10	-0.03

Tableau 47 : Calage de la crue de 1978 pour le modèle Plaine d'Aubagne

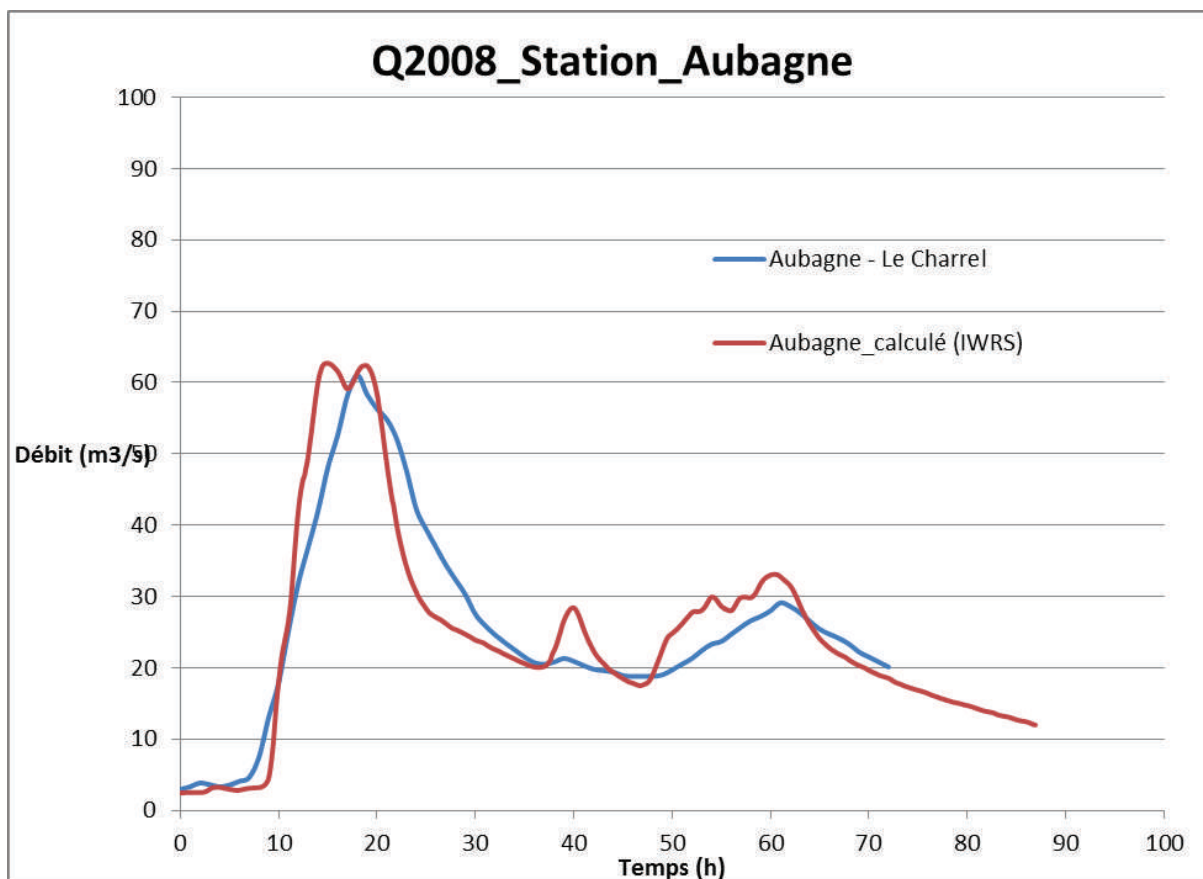


Figure 67 : Calage de la crue de 2008 à Aubagne

Ce calage d'hydrogramme dans l'Huveaune a pu être obtenu grâce au laminage par le modèle hydraulique des débits de pointes des apports issus de la plaine des Paluds (apport en pointe de quelques m³/s). La zone des Paluds joue donc le rôle de bassin de rétention des débits de la Maïre et du Fauge, les débits étant écrêtés par le verrou hydraulique de la canalisation sous le centre commercial et l'autoroute en remblai. Le volume de la crue est donc stocké en amont du remblai autoroutier dans la plaine des Paluds. La ZI est paluds est inondée.

Ce phénomène a été observé lors de la crue de 2008 (cf rapport de phase 1, entretien avec les Services Techniques d'Aubagne) sans toutefois être précis en termes de niveau maximal d'eau atteint. Le calage hydraulique précis de ce secteur de la plaine des Paluds n'est donc pas possible par manque de donnée.

Les 3 PHE disponibles, uniquement sur l'Huveaune, sont fournies ci-dessous et montrent un bon calage hydraulique sur l'Huveaune.

	PHE (m NGF)	Fiabilité	Cote calculée (m NGF)	Delta (m)
2008-006	105.00	Bonne	104.98	0.02
2008-007	97.69		97.74	-0.05
2008-008	95.62		95.59	0.03

Tableau 48 : Calage de la crue de 2008 pour le modèle Plaine d'Aubagne

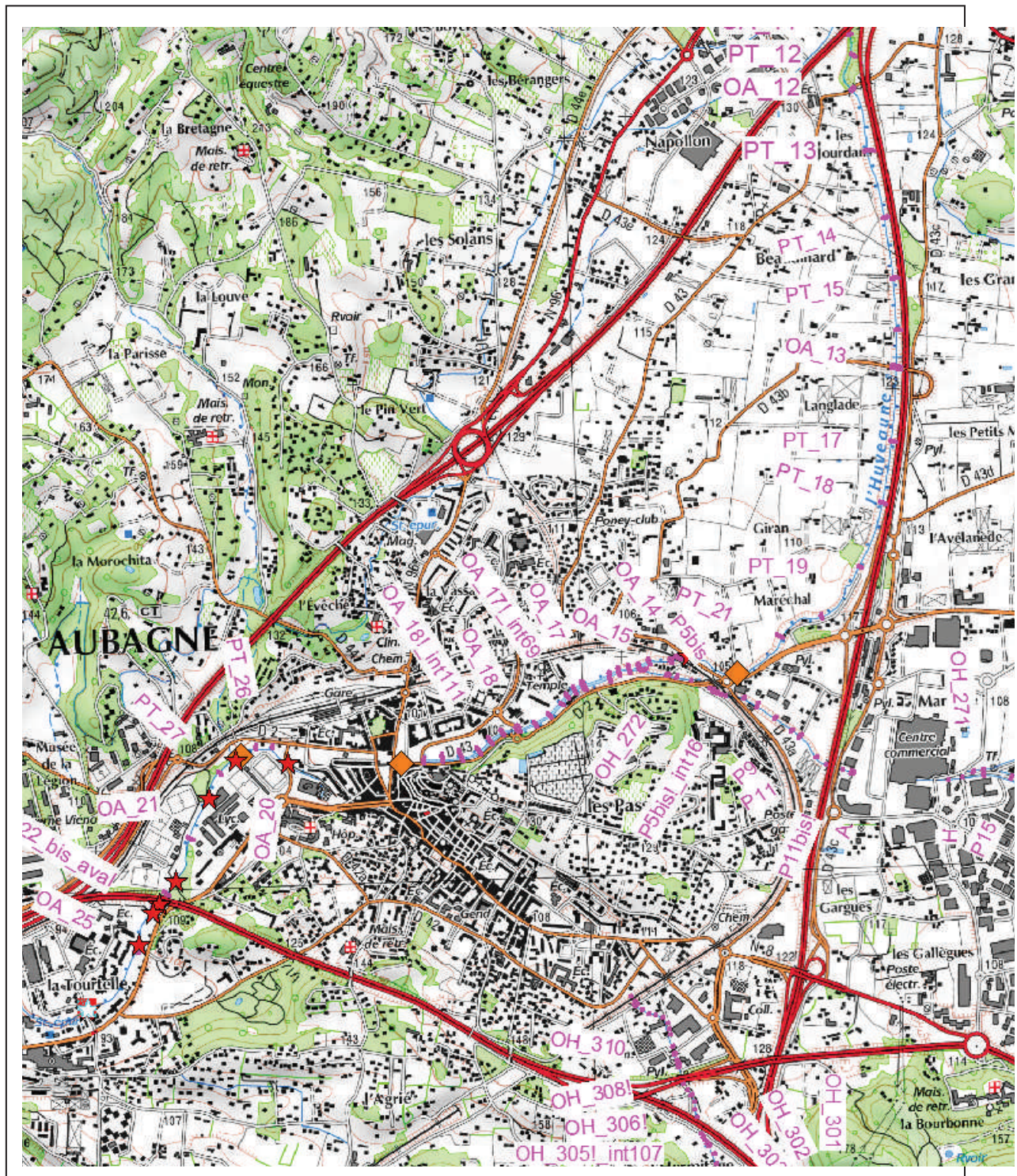


Figure 68 : Modèle Aubagne : PHE 1978 (étoiles rouges) et 2008 (losanges orange)



PHE 2008 006



SPC Med-Est_Huveaune_Aubagne_15/12/08_12h

PHE 2008 007



SPC Med-Est_Huveaune_Aubagne_15/12/08_12h

PHE 2008 008

Figure 69 : Photographies des PHE 2008 à Aubagne

6.1.4 Modèle Huveaune à La Penne

Ce modèle comprend en amont la station d'Aubagne Charrel et en aval la station de Marseille Saint Marcel. Les données de 1978 ne sont disponibles qu'à la station d'Aubagne.

Les hydrogrammes de la Station Aubagne Charrel sont injectés à l'amont du modèle pour les calages.

➤ **Crue de 1978 :**

De gros travaux ont été réalisés également sur ce tronçon dans l'Huveaune. Une fois de plus, l'usage des PHE pour le calage n'est donc pas pertinent. La comparaison est tout de même fournie ci-dessous à titre indicatif.

Nœud	PHE (m NGF)	Fiabilité	calculé (m NGF)	Delta (m)
OH_1	96.25	Mauvaise car de gros travaux dans lit mineur réalisés depuis	96.21	0.04
OH_1!	95.63		96.07	-0.44
OH_2	95.83		96.26	-0.43
OH_3	95.8		95.11	0.69
OH_4	95.07		94.82	0.25
OH_5!	92.81		93.88	-1.07
OH_7!	90.58		90.37	0.21
OH_9	90.08		89.21	0.87
P_21	82.9		84.54	-1.64
OH_15	77.15		77.13	0.03
OH_16	75.8		75.92	-0.12
OH_22	70.86		71.01	-0.15
OH_22!	70.15		69.91	0.24
OH_36	52.8		53.07	-0.27

Tableau 49 : Calage de la crue de 1978 pour le modèle Huveaune à la Penne

➤ **Crue de 2008 :**

L'hydrogramme correspondant en aval du modèle est bien calé comme le montre la figure ci-dessus.

Il existe une seule PHE sur ce tronçon pour la crue de 2008 (source SPC) :

PHE (m NGF)		Fiabilité	Cote calculée (m NGF)	Delta (m)
2008-009	76.96	Bonne	77.02	-0.06

Tableau 50 : Calage de la crue de 2008 pour le modèle Huveaune à la Penne

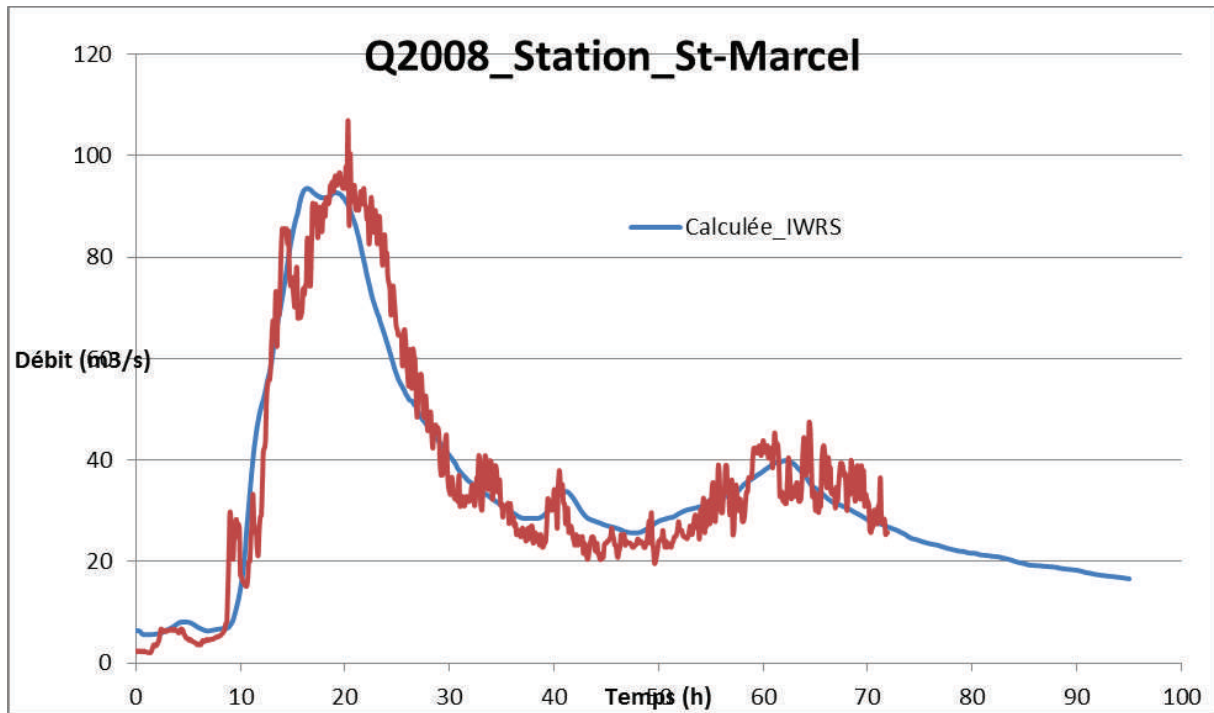


Figure 70 : Calage de la crue de 2008 à St Marcel



PHE 2008 009

Figure 71 : Photographie de la PHE 2008 de La Penne

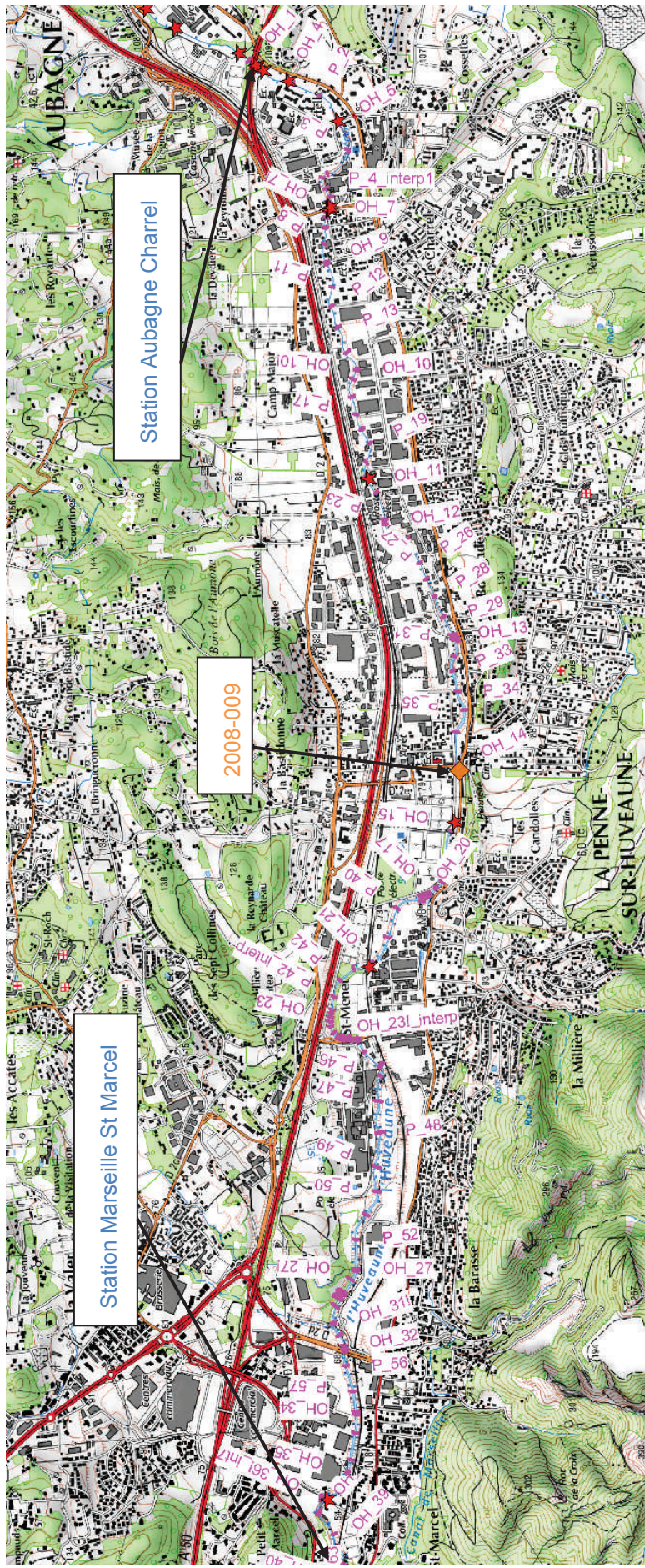


Figure 72 : Modèle La Penne : PHE 1978 (étoiles rouges) et 2008 (losanges orange)

6.1.5 Modèle Jarret Amont

Ce modèle ne comprend pas de station hydrométrique, il intègre par contre plusieurs PHE relevées dans un rapport d'orage de 2003 en aval du modèle. Ces cotes PHE sont peu fiables du fait de l'incertitude des relevés et de leur localisation précise. Ils sont néanmoins fournis ci-dessous :

Nœud	PHE (m NGF)	Fiabilité	Calculé (m NGF)	Delta (m)
P30.4R	105.71	Mauvaise	105.78	-0.07
P22.2R!	94.81		95.06	-0.25
P20.5R	93.52		93.50	0.02

Tableau 51 : Calage de la crue de 2003 sur le modèle Jarret Amont

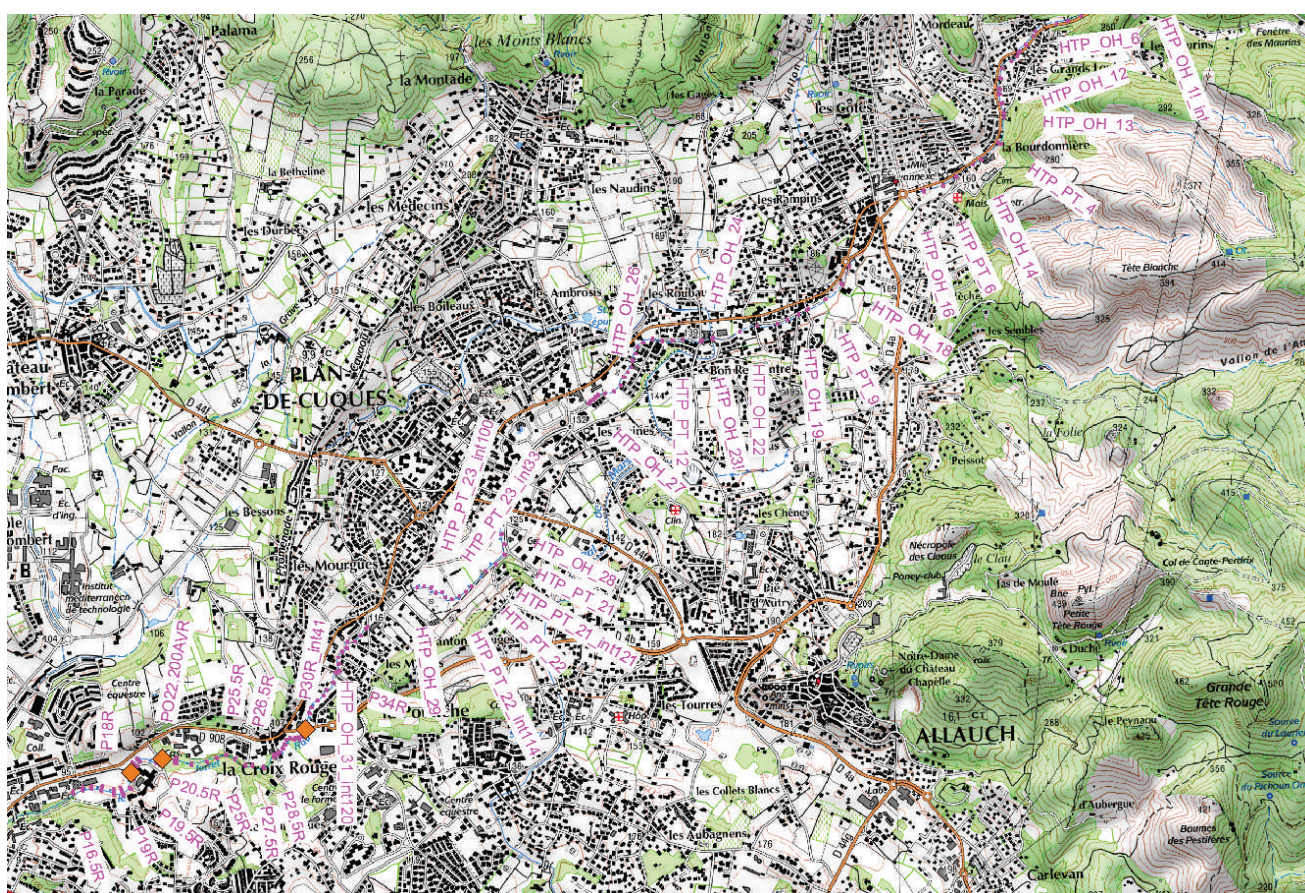


Figure 73 : Modèle Jarret Amont : PHE 2003 (losanges orange)

Les paramètres du modèle retenus sont ceux des modèles calés avec les PHE disponibles.

6.1.6 Modèle Jarret Intermédiaire

Ce linéaire comprend à l'aval la station de Jarret La Bégude.

Un calage sur les crues de 2003 et 2008 a pu être réalisé à cette station.

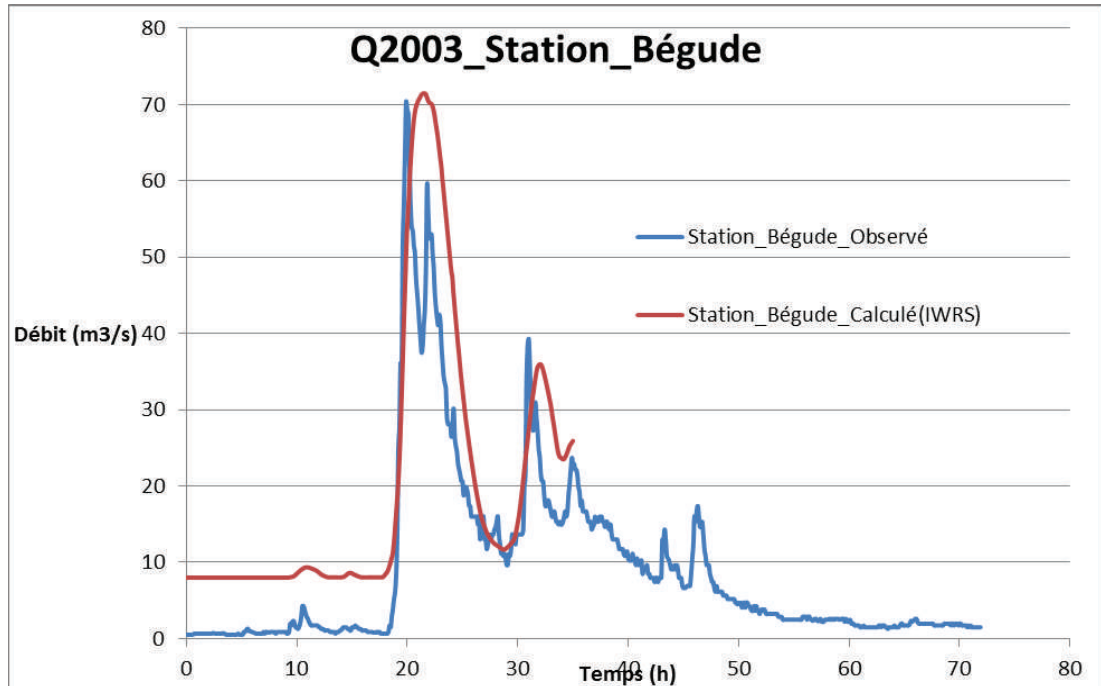


Figure 74 : calage de la crue de 2003 à la Bégude

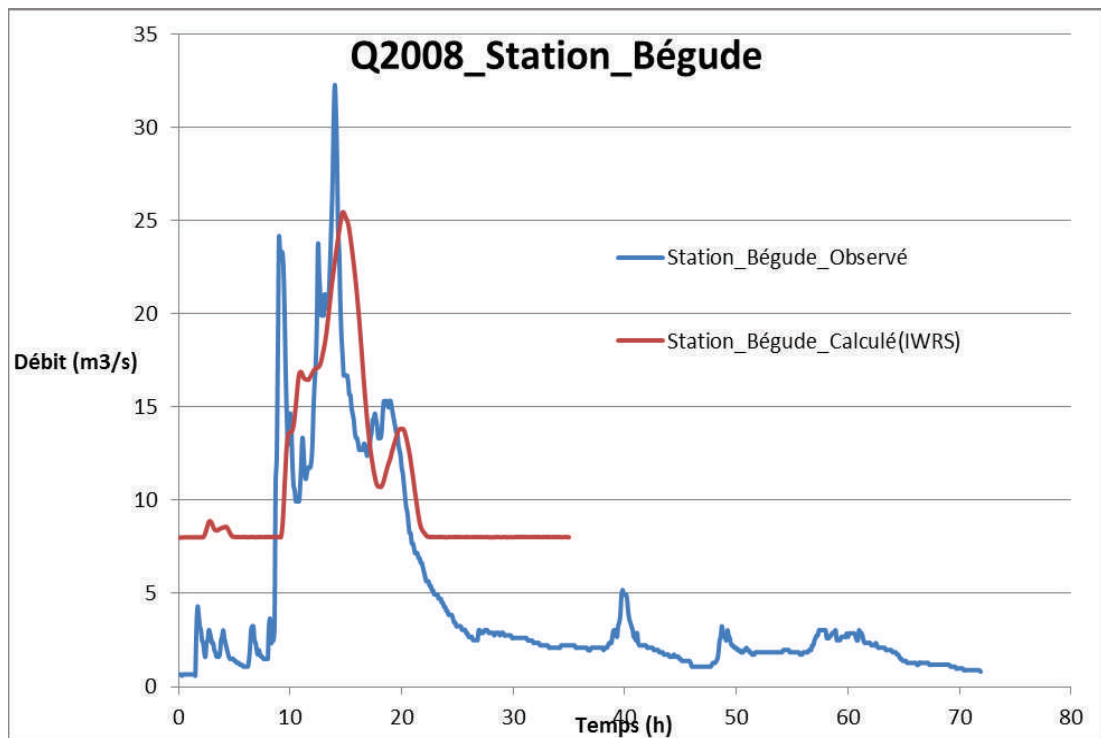


Figure 75 : calage de la crue de 2008 à la Bégude

Les seules PHE disponibles sont le rapport d'orage de la crue de 2003 de la SERAM. Les valeurs relevées, comme le modèles précédent, doivent être prises avec précautions du fait de grandes incertitudes, pointées par la SERAM.

Les écarts sont en effets importants, en positif comme en négatif. Ils peuvent être expliqués par des phénomènes d'embacles pouvant modifier localement la ligne d'eau et des problèmes locaux issus majoritairement du ruissellement pluvial plutôt que de réels débordements du cours d'eau (comme indiqué dans le rapport d'orage 2003). En effet les PHE relevées sont situées dans le lit mineur au droit de ponts, dans des zones sans débordement. Il n'y a eu que très peu de débordement sur ce tronçon pour cette crue.

Nœud	PHE (m NGF)	Fiabilité	calculé (m NGF)	Delta (m)
P13.6R	89.58	Mauvaise	88.75	0.83
P10R!	82.96		83.50	-0.54
P9.55R	78.28		77.59	0.69
P8.68R	68.00		67.87	0.13
PO8.630AMR_int14	66.45		66.21	0.24
PO8.555AVR (Bégude)	58.41		58.60	-0.19

Tableau 52 : calage de la crue de 2003 du modèle Jarret Intermédiaire

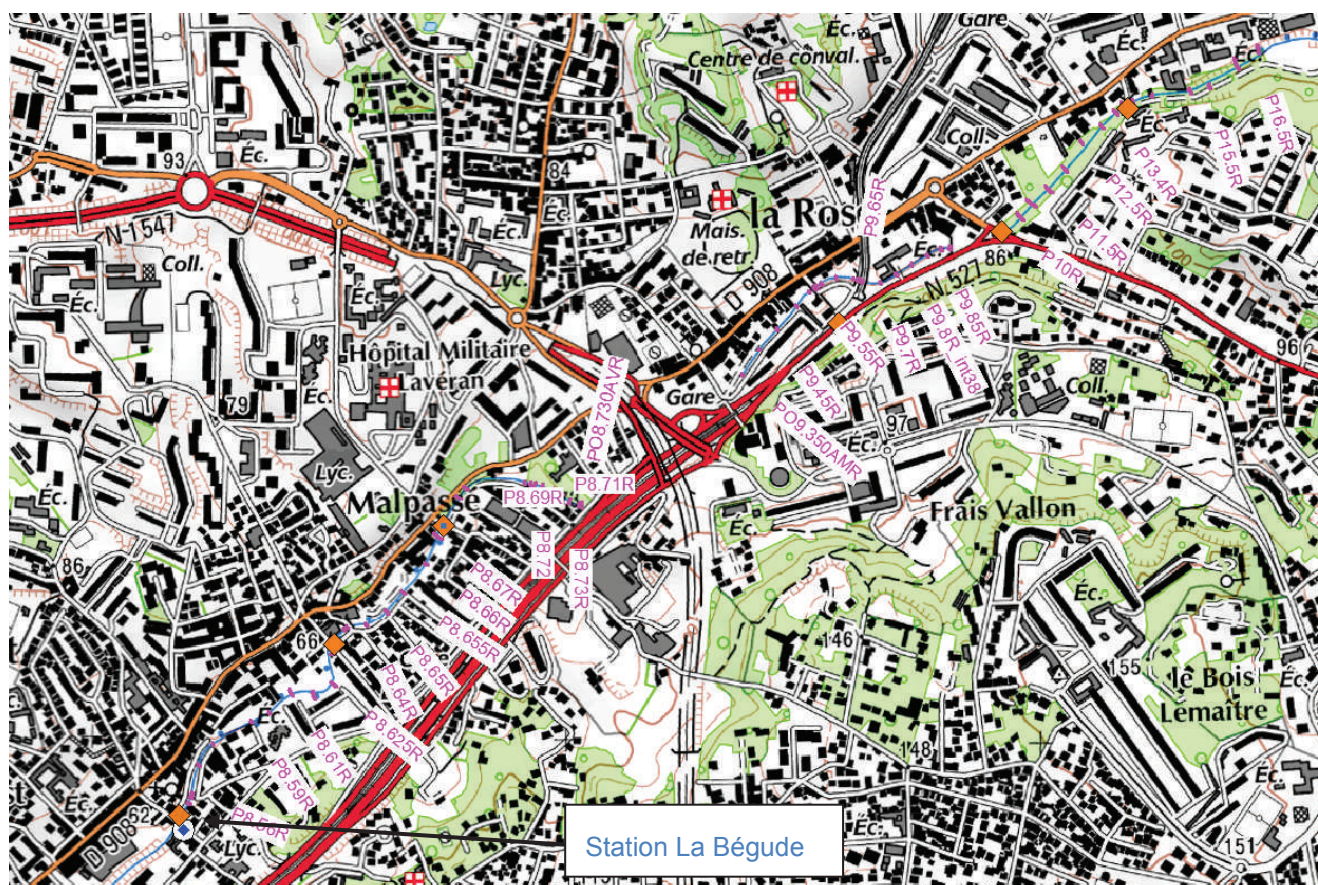


Figure 76 : Modèle Jarret intermédiaire : PHE 2003 (losanges orange)

6.1.7 Modèle Gouffone aval

Le modèle Gouffone aval a pour particularité d'être en milieu urbain dense. La Gouffone n'est plus une rivière mais un réseau pluvial enterré. C'est pour cela que le modèle réalisé est sous Infoworks ICM, permettant la simulation de réseau pluviaux, avec notamment une modélisation fine des entrées et sorties de débits par les regards des collecteurs.

Aucune PHE n'est présente sur ce tronçon.

Les crues historiques testées sont 1978, 2003 et 2008.

Les conditions limites aval sont les niveaux d'eau de l'Huveaune pour les crues correspondantes au droit de l'exutoire (liminigraphes 1978 2003 et 2008 de l'Huveaune à Michelet).

La crue de 1978 est débordante, le débit de pointe à l'exutoire (arrivée dans l'Huveaune au niveau du boulevard Michelet) est de 8.5 m³/s environ.

La crue de 2003 est la plus importante (ce qui était attendu car l'épisode de pluie était centré sur Marseille). Elle déborde assez largement à travers les rues de Marseille. Le débit de pointe à l'exutoire est de l'ordre de 18 m³/s. Le rapport d'orage de 2003 indique des débordements à travers les rues, charriant les voitures et inondant les propriétés riveraines. La route de Cassis a été inondée à Valmante. Plus à l'aval les eaux en contrebas du rondpoint de Mazargues ont été inondées.

La crue de 2008 est beaucoup plus faible. On arrive en limite de débordement de la Gouffone sur la plus grande partie du linéaire. Seuls quelques rares secteurs voient un peu d'eau déborder : la partie amont entre le Redon et Mazargues. Le débit de pointe à l'exutoire est de l'ordre de 5.5 m³/s. Le rapport d'orage de 2008 n'indique rien de particulier sur le bassin de la Gouffone.

Bien qu'un calage précis de ce modèle n'ait pu être réalisé faute de donnée de PHE observées précises, l'ajustement des différents paramètres de modélisation a permis de reproduire convenablement le fonctionnement hydraulique de ces deux crues, sur la base de l'analyse des rapports d'orage de 2003 et 2008.

6.1.8 Modèle Huveaune et Jarret à Marseille

Comme indiqué précédemment, la particularité de ce modèle est l'embouchure en mer. L'incidence du niveau marin a donc été prise en compte. Les données récoltées auprès du marégraphe de Marseille disponibles pour les crues de calage de 2003 et 2008, injectées dans le modèle en tant que condition limite aval, sont fournies dans un tableau en annexe.

Il n'y a pas de donnée du niveau marin pour la crue de 1978, c'est la cote marine fixée à 1.5m NGF qui a été modélisée dans ce cas.

Aucune PHE pour les crues de 2003 et 2008 ne sont disponibles. Les seules indications sont que la crue de 2008 a été en limite de débordement (crue de plein bord) et la crue de 2003 a vu de nombreux débordements. Les divers témoignages indiquent pour cette crue 40 à 50 cm d'eau dans les rues, et jusqu'à 2m d'eau par endroit, dans les maisons.

➤ **Crue de 2008 :**

Les résultats des modélisations de cette crue donnent des débordements minimes. La simulation permet d'identifier de faibles débordements sur 3 secteurs très localisés : on est bien en présence d'une crue « de plein bord » comme indiqué dans le rapport d'orage de la SERAM.

➤ **Crue de 2003 :**

La crue de 2003 est largement plus débordante comme indiqué sur la cartographie en page suivante, notamment le Jarret et l'Huveaune aval.

Le rapport d'orage de 2003 de la SERAM indique des débordements dans l'avenue du Prado, au bd de Marzargues, Bd Michelet et rue Teisseire, que l'on retrouve dans les résultats des modélisations.



Figure 77 : Résultat de la modélisation 2003 Huveaune et Jarret

➤ **Crue de 1978 :**

De gros travaux ont été réalisés également sur ce tronçon dans l'Huveaune, notamment en aval, entre le stade Vélodrome et l'émissaire en mer. Les PHE ne sont donc pas comparables mais sont fournies ci-dessous à titre indicatif.

Emplacement	PHE (m NGF)	Calculé (m NGF)	Delta (m)
Hippodrome Pont de Vaux	21.3	21.5	0.2
Collège Capelette	17.56	17.42	-0.14
Ste Margueritte	12.95	13.00	0.05
Stade Vélodrome	10.5	10.67	0.17
Face Parc Borely	4.6	4.2	-0.4

Tableau 53 : calage de la crue de 1978 modèle Huveaune aval

En page suivante, l'enveloppe de la crue de 1978 calculée est comparée avec l'enveloppe de la crue relevée (en rouge). Cette enveloppe rouge est issue d'une étude réalisée par EGCEM en février 1978, fournie par la DDTM13 compilant l'enquête de riverains menée après la crue (cf rapport de phase 1). Néanmoins rappelons que les documents de référence ayant servi à élaborer ce tracé n'ont pas pu être récupérés, la fiabilité de la donnée n'est pas précisée.

Globalement on note que les travaux de recalibrage entre le stade Vélodrome et l'émissaire en mer permettent de largement améliorer la situation. A noter que cette enveloppe de crue n'inclue pas le stade Vélodrome ce qui est incohérent avec les PHE relevées et calculées. L'inondation de ce quartier lors du tracé de l'enveloppe de la crue de 1978 a été semble-t-il sous estimée.

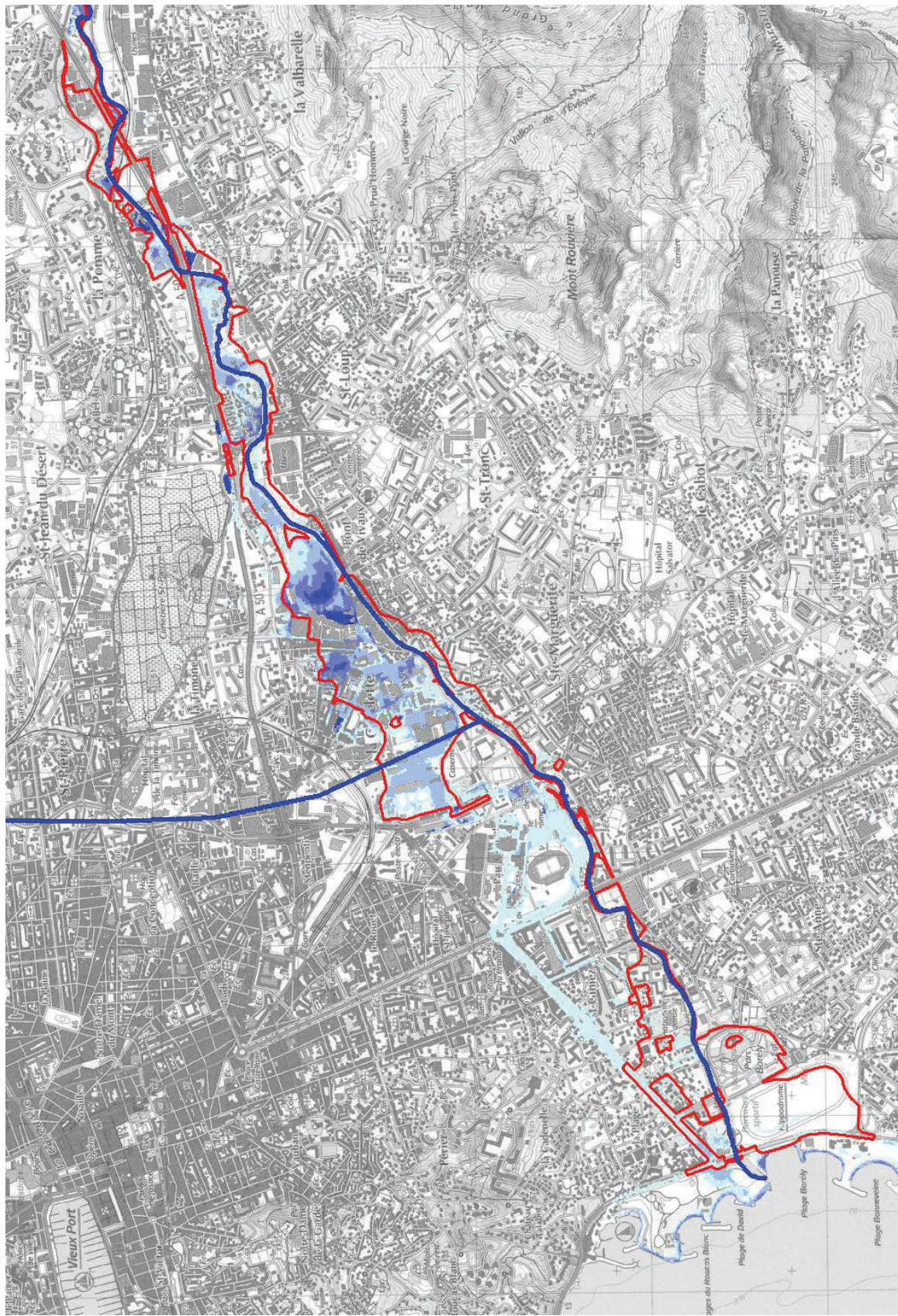


Figure 78 : Résultat de la modélisation 1978 (bleu) et enveloppe PHE 1978 (rouge)

Etude hydrologique et hydraulique sur le bassin versant de l'Huveaune

Page 202
Version 1

Etude hydrologique et hydraulique sur le bassin versant de l'Huveaune

6.1.9 Conclusion sur le calage des modèles 2D

➤ **Calage des modèles de l'Huveaune :**

La crue de 1978 a permis de vérifier le calage de la propagation des hydrogrammes de crues (et donc le modèle hydrologique), par contre le calage des cotes d'eau sur les PHE relevées pour cette crue est difficilement réalisable, du fait de nombreux travaux réalisés dans l'Huveaune depuis, qui ont modifié la ligne d'eau et l'emprise des zones inondables.

Le calage sur la crue de 2008 est quant à lui satisfaisant, sur les hydrogrammes de crue (hydrologie) comme en PHE (hydraulique), même si le nombre de PHE n'est pas très important au regard des linéaires étudiés. La crue de 2008 est en limite de débordement sur de longs linéaires, seuls quelques secteurs voient de légers débordements pour cette crue. Cela corrobore le fait que cette crue était la crue « de plein bord » de l'Huveaune.

La genèse et la dynamique des crues de l'Huveaune sont donc représentées correctement par les modèles, et corroborent les différents témoignages recueillis lors de la phase 1.

➤ **Calage des modèles du Jarret :**

La crue de 2008 a permis de caler la propagation des hydrogrammes de crues sur les trois modèles représentant de Jarret (amont, intermédiaire et aval). Par contre il n'y a pas de PHE disponible pour le calage hydraulique de cette crue.

La crue de 2003 a permis de caler la propagation des hydrogrammes de crues sur les trois modèles représentant de Jarret (amont, intermédiaire et aval).

Le calage hydraulique sur **la crue de 2003** est satisfaisant sur le **modèle amont**. Par contre les PHE relevées, sur le **modèle intermédiaire et aval** ne permettent pas un réel calage du fait de l'imprécision des données existantes. En effet, les PHE relevées en 2003 se situent au niveau d'ouvrages de franchissement. Les modélisations hydrauliques ne prennent pas en compte les phénomènes de type embâcle ou obstruction qui influent beaucoup sur les écoulements lors de la crue. Par contre en 2003 le Jarret est globalement resté dans son lit ce qui a été validé dans nos modélisations.

Les paramètres de calage hydraulique sur le Jarret intermédiaire et aval retenus sont donc issus du modèle Jarret amont, calés avec des PHE fiables.

En conclusion, sur la zone d'étude au global, le calage hydrologique aux stations limnimétrique a pu être réalisé et a permis de modéliser précisément la genèse et la propagation des crues.

D'un point de vue calage hydraulique, il n'y a finalement que très peu de PHE fiables sur la zone d'étude et les crues antérieures sont soit peu ou non débordantes, soit trop anciennes (de grands travaux en rivière ont depuis profondément modifié la topographie et la bathymétrie).

Les paramètres de calage retenus (coefficient de rugosité et de perte de charge des ouvrages) sont toujours dans les gammes des paramètres de la littérature technique et permettent de corroborer les différents témoignages de déroulement des crues.

6.2 Modélisations 1D

Le calage des différents modèles à proprement parlé n'a pu être réalisé, car nous ne disposons pas de données précises relatives aux crues antérieures sur les petits cours d'eau du bassin versant de l'Huveaune. Ainsi, le réglage a été essentiellement effectué à partir des observations sur le terrain, des témoignages de riverains, et des coefficients de Strickler recommandés dans la littérature technique.

Ces coefficients ont pu être appréciés en fonction de la nature du lit (lit enherbé, bétonné...), et dans la fourchette des coefficients de Strickler issus des calages des modèles hydrauliques 1D couplés 2D précédents.

Remarque :

- Tous les lits mineurs, que ce soient ceux des grands modèles 1D couplés 2D ou petits modèles 1D, sont modélisés en 1D. L'analogie des coefficients de Strickler des lits mineurs entre grands et petits modèles est donc adaptée.
- La question de cette analogie se pose sur les lits majeurs puisque ceux des grands modèles sont modélisés en 2D contrairement aux petits modèles 1D. En effet généralement il est admis que sur les parties de maillage 2D, les coefficients de Strickler sont généralement légèrement plus importants par rapports aux coefficients de Strickler en 1D à rugosité équivalente. Il a donc été choisi de conserver les coefficients de Strickler 2D des zones urbanisées mais de diminuer ceux des zones naturelles de lits majeur 1D qui ne vont jamais au-delà de 10 (contrairement au maillage 2D qui monte jusqu'à 20 par endroit).

7 Tests de sensibilité

Etant donné la difficulté du calage sur les crues du fait du manque de fiabilité des données (stations et PHE), il paraît important d'étudier l'incidence de la variation du coefficient de Strickler, paramètre de calage du modèle, sur le calcul des cotes d'eau.

L'incidence des coefficients de Strickler est donc testée dans le cadre de cette phase sur les crues de période de retour centennale (crues de référence).

De plus, un test de sensibilité sur la cote marine prise en compte dans le modèle de l'embouchure a également été réalisé.

7.1 Tests de sensibilité des modèles 2D

Deux modèles « références » ont été choisis pour ces tests de sensibilité :

- Un modèle sans conduite, au lit mineur tour à tour naturel et artificialisé : le modèle de l'Huveaune à Roquevaire.
- Un modèle avec conduites et chenaux béton, en milieu urbain dense : le Jarret Intermédiaire

Sur ces deux modèles, deux tests ont été réalisés,

- un en augmentant globalement les coefficients de 5 (hors zone urbaine dense qui est à 5)
- et l'autre en les diminuant d'autant.

Ces tests permettent d'avoir l'incidence sur les niveaux d'eau d'une fourchette haute et basse des coefficients.

Les coefficients utilisés dans le tableau ci-après. L'incidence sur les lignes d'eau centennales est fournie en annexe 6.

Gamme des KS	Ks « -5 »		Ks utilisé		Ks « +5 »	
	Lit mineur	Lit majeur	Lit mineur	Lit majeur	Lit mineur	Lit majeur
Modèle de Roquevaire	15-45	5-15	20-50	5-20	25-55	10-25
Modèle du Jarret	15-45	5-15	20-50	5-10	25-55	10-15

Tableau 54 : test de sensibilité

Les variations de cotes pour le modèle de Roquevaire sont de quelques centimètres sur la majorité du linéaire. Néanmoins la variabilité peut atteindre localement jusqu'à 50cm, en positif comme en négatif.

Les tronçons ayant la plus grande variabilité sont les tronçons avec pas ou peu de débordement, cette variabilité de côte est donc admissible. Lorsque la crue s'étale en lit majeur la variabilité des coefficients de Strickler influe peu sur la ligne d'eau.

De même que précédemment, les variations de cotes pour le modèle de Jarret Intermédiaire sont de quelques centimètres sur la majorité du linéaire. Néanmoins la variabilité peut atteindre localement jusqu'à 0.5m.

Les tronçons ayant la plus grande variabilité sont les tronçons avec pas ou peu de débordement, cette variabilité de côte est donc admissible. On observe d'ailleurs un effet de seuil sur le premier tiers amont du modèle, où le fait d'augmenter de coefficient de Strickler de 5 implique la plus grande baisse de cote d'eau : l'eau qui déborde et s'étale en lit majeur avec le K_s retenu ne déborde plus avec le K_s augmenté. On est donc sur ce tronçon dans les limites de débordement. Il a donc été choisi par mesure de sécurité de conserver le K_s donnant des débordements en lit majeur.

Sur le reste des secteurs, dans les secteurs où les débordements sont importants, la variabilité des coefficients de Strickler influe peu sur la ligne d'eau.

7.2 Tests de sensibilité des modèles 1D

4 petits modèles 1D ont été choisis par le maître d'ouvrage pour y mener les tests de sensibilité :

- Sur le Merlançon : le ruisseau de Grand Pré (mixte),
- Sur l'Huveaune amont : le ruisseau de la Vède (rural),
- Sur le Jarret : le vallon de Routabau (zone urbaine),
- Sur l'Huveaune aval : le Charrel (mixte)

Sur ces 4 modèles, deux tests ont été réalisés,

- un en augmentant globalement les coefficients de 5 (hors zone urbaine dense qui est à 5)
- et l'autre en les diminuant d'autant.

Ces tests permettent d'avoir l'incidence sur les niveaux d'eau d'une fourchette haute et basse des coefficients.

Les incidences sur les lignes d'eau centennales sont fournies dans les tableaux en annexe.

➤ **Ruisseau du Grand Pré :**

Le tableau des résultats donnant les cotes d'eau maximales atteintes dans les trois cas (Ks retenu, Ks+5, Ks-5) est fourni en annexe.

Les variations de cotes pour le modèle du Grand Pré sont de quelques centimètres sur la majorité du linéaire. Néanmoins la variabilité peut atteindre localement jusqu'à 68cm en négatif et une 36 centimètres en positif.

Les tronçons ayant la plus grande variabilité sont les tronçons avec pas ou peu de débordement, cette variabilité de côte est donc admissible. Lorsque la crue s'étale en lit majeur la variabilité des coefficients de Strickler influe peu sur la ligne d'eau.

On observe par contre un effet de seuil au milieu du modèle, où le fait d'augmenter de coefficient de Strickler de 5 implique la plus grande baisse de cote d'eau : l'eau qui déborde et s'étale dans le champ en lit majeur avec le Ks retenu ne déborde plus avec le Ks augmenté. On est donc sur ce tronçon dans les limites de débordement. Il a donc été choisi par mesure de sécurité de conserver le Ks donnant des débordements en lit majeur.

Sur le reste, dans les secteurs où les débordements sont importants, la variabilité des coefficients de Strickler influe peu sur la ligne d'eau.

➤ **Ruisseau du Vède :**

Le tableau des résultats donnant les cotes d'eau maximales atteintes dans les 3 cas (Ks retenu, Ks+5, Ks-5) est fourni en annexe.

Ici, les variations de cotes pour le modèle du Vède sont assez importantes (environ 20cm en moyenne) sur la majorité du linéaire. La variabilité peut atteindre localement jusqu'à 60cm en négatif et une 43 centimètres en positif.

Cela s'explique par le fait que ce cours d'eau est majoritairement non débordant. Les variations de niveau d'eau n'influent pas ou peu sur la zone inondable.

Sur le reste, dans les quelques secteurs où les débordements sont importants (en amont de la RN160), la variabilité des coefficients de Strickler influe beaucoup moins sur la ligne d'eau (quelques centimètres d'écart).

➤ **Ruisseau du Routabau :**

Le tableau des résultats donnant les cotes d'eau maximales atteintes dans les 3 cas (Ks retenu, Ks+5, Ks-5) est fourni en annexe.

Les variations de cotes pour le modèle du Routabou sont de quelques centimètres sur la majorité du linéaire. La variabilité maximale reste très légère, elle peut atteindre localement une dizaine de centimètres en positif comme en négatif, malgré le fait qu'il y ait très peu de débordements. Cela est dû au fait que les débits modélisés sont faibles sur ce tout petit cours d'eau.

Les tronçons ayant la plus grande variabilité sont les tronçons avec pas ou peu de débordement, cette variabilité de côte est donc admissible. Lorsque la crue s'étale en lit majeur la variabilité des coefficients de Strickler influe peu sur la ligne d'eau.

Sur le reste, dans les secteurs où les débordements sont importants (en aval principalement), la variabilité des coefficients de Strickler influe très peu sur la ligne d'eau.

➤ **Ruisseau du Charrel :**

Le tableau des résultats donnant les cotes d'eau maximales atteintes dans les 3 cas (Ks retenu, Ks+5, Ks-5) est fourni en annexe.

Les variations de cotes pour le modèle du Charrel sont de l'ordre de 10 centimètres sur la majorité du linéaire. La variabilité maximale reste raisonnable, elle peut atteindre localement une trentaine de centimètres en positif comme en négatif.

Les tronçons ayant la plus grande variabilité sont les tronçons avec pas ou peu de débordement, cette variabilité de côte est donc admissible. Lorsque la crue s'étale en lit majeur la variabilité des coefficients de Strickler influe peu sur la ligne d'eau.

7.3 Impact de la cote marine

La cote marine retenue pour la crue de référence est de 1.5 m NGF, correspondant à la surcote marine décennale associée à la surcote due au changement climatique.

Afin de connaître l'incidence de la surcote marine sur les zones inondables de l'Huveaune, il a été réalisé une modélisation supplémentaire, avec une surcote marine de 0.9 m NGF (correspondant à la surcote décennale sans changement climatique), toute autre chose restant égale par ailleurs.

Les résultats sont fournis sur les figures suivantes :

Du plus clair au plus foncé les classes de hauteurs d'eau : $H < 0.5m$; $0.5 < H < 1m$; $1 < H < 1.5m$; $1.5 < H < 2m$; $H > 2m$

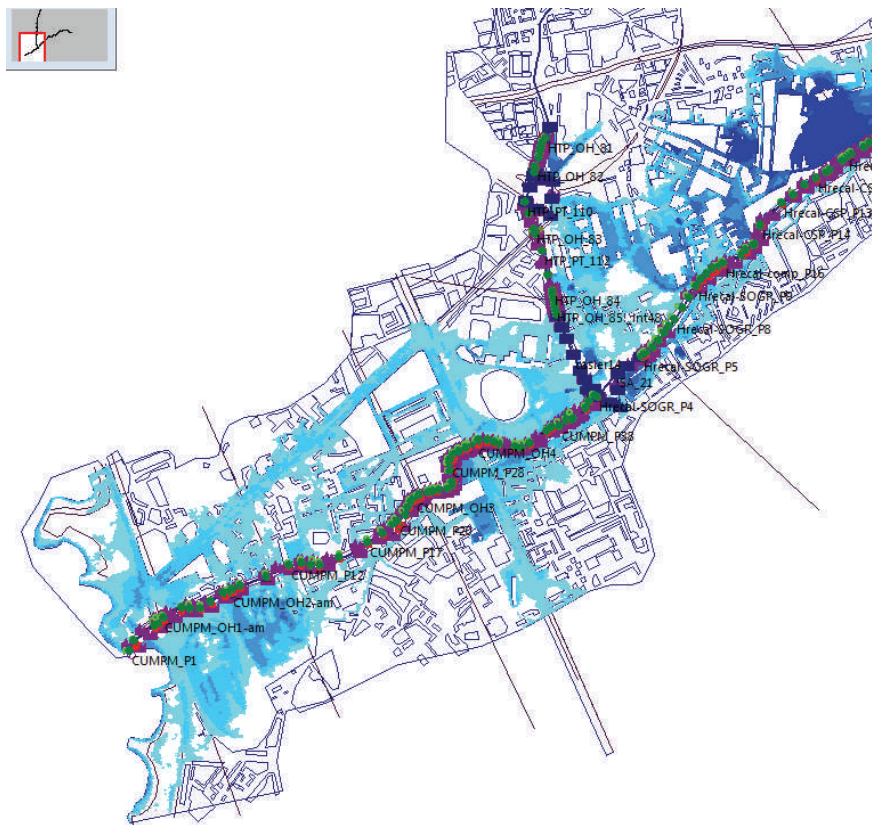


Figure 79 : hauteurs d'eau en crue centennale cote marine 1.5 m NGF

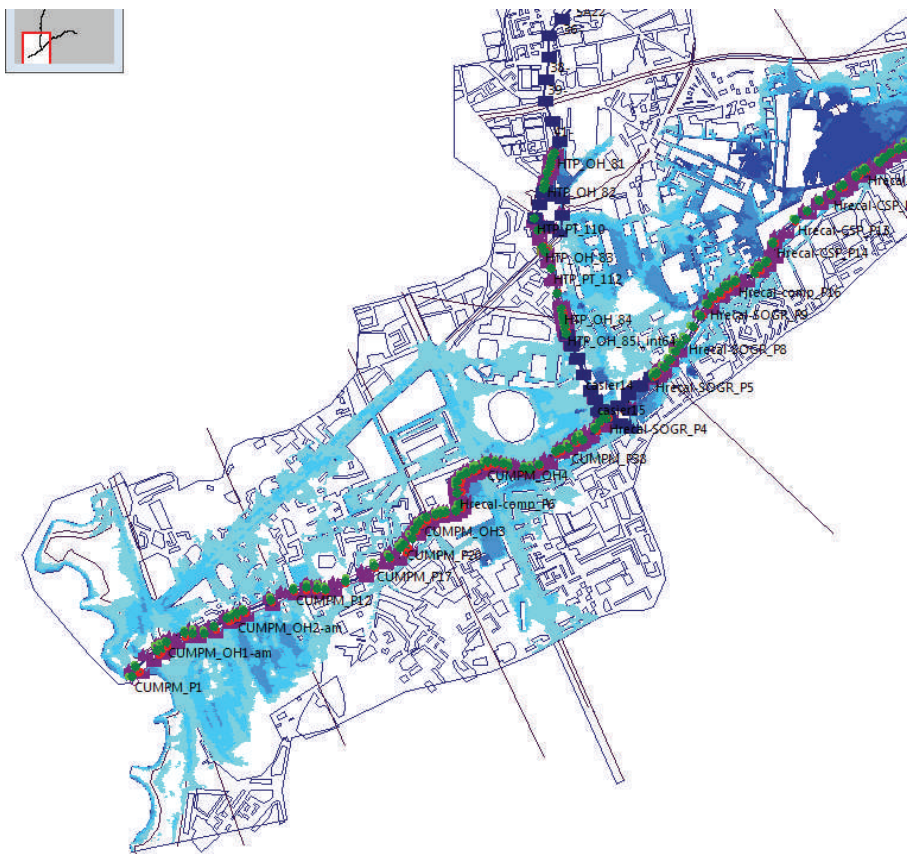


Figure 80 : hauteurs d'eau en crue centennale cote marine à 0.9 m NGF

On constate que la zone inondable est du même ordre dans les deux cas.

Plus précisément l'impact sur la ligne d'eau maximale est de – 7cm au droit de l'école de danse (en amont du Parc Borely). Cet impact s'atténue ensuite progressivement jusqu'à s'annuler totalement au niveau de l'hippodrome de Pont de Vivaux.

En conclusion l'impact de la rehausse du niveau marin par le changement climatique est peu important sur les crues de l'Huveaune au niveau de l'embouchure, et s'annule totalement à l'intérieur des terres.

..

8 Résultats des modélisations pour les crues de projet

Cf Annexes cartographiques fournies, synthétisant les résultats obtenus par commune, au 1/10 000 et 1/5000. Attention, certaines communes au territoire modélisé étendu possèdent plusieurs planches de rendu cartographiques.

8.1 Crues de projet

Suite au calage des modèles, les crues de projet ont été simulées à savoir :

- Les crues décennales
- Les crues cinquantennales
- Les crues centennales
- Les crues exceptionnelles

Et ce pour chacun des scénarios de spatialisation de pluie testés (cf chapitre Hydrologie).

De la même manière que précédemment, les modélisations ont été menées d'amont en aval, l'hydrogramme du modèle amont étant injecté dans le modèle aval.

8.2 Analyse de la crue de 1978

La crue de 1978 reste marquante dans les mémoires.

Nous avons ci-dessous regroupé les hydrogrammes (débits en m³/s en fonction du temps) des crues de projet obtenus aux stations de Roquevaire et d'Aubagne, ainsi que les hydrogrammes observés en 1978 en ces mêmes stations.

La pluie de 1978 a été moyennement intense mais sur une très longue durée (cf hyétogramme en figure 31), ce qui explique la forme aplatie de l'hydrogramme observé aux stations, contrairement à nos crues issues de pluies de projet à période intense courte, générant plutôt des hydrogrammes 'en pointe'.

On constate qu'en débit de pointe (pointe des hydrogrammes) la crue de 1978 est de l'ordre de la crue décennale projet, par contre en volume (représenté par la surface sous la courbe des hydrogrammes), elle correspond plutôt à une crue de période de retour 30 à 50 ans environ par rapport aux crues testées.

Cela explique sans doute les importants débordements en lit majeur observés alors, étant donné que le lit mineur n'était pas recalibré comme actuellement : le débit de pointe, même de l'ordre du débit décennal calculé, n'a pas été entièrement évacué par l'ancien lit de l'Huveaune. Des débordements ont donc eu lieu et ont été importants du fait de la grande quantité d'eau débordée (volume de crue).

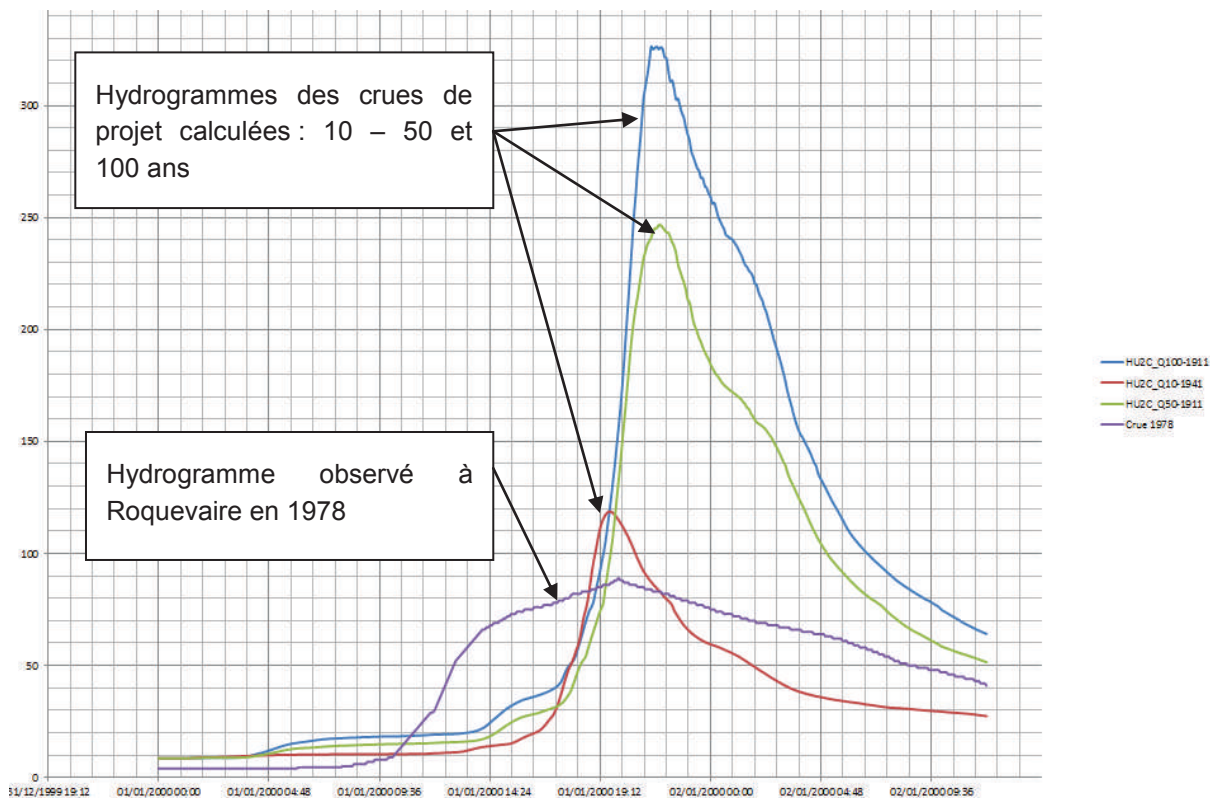


Figure 81 : Comparaison crue de 1978 à Roquevaire avec les crues de projet

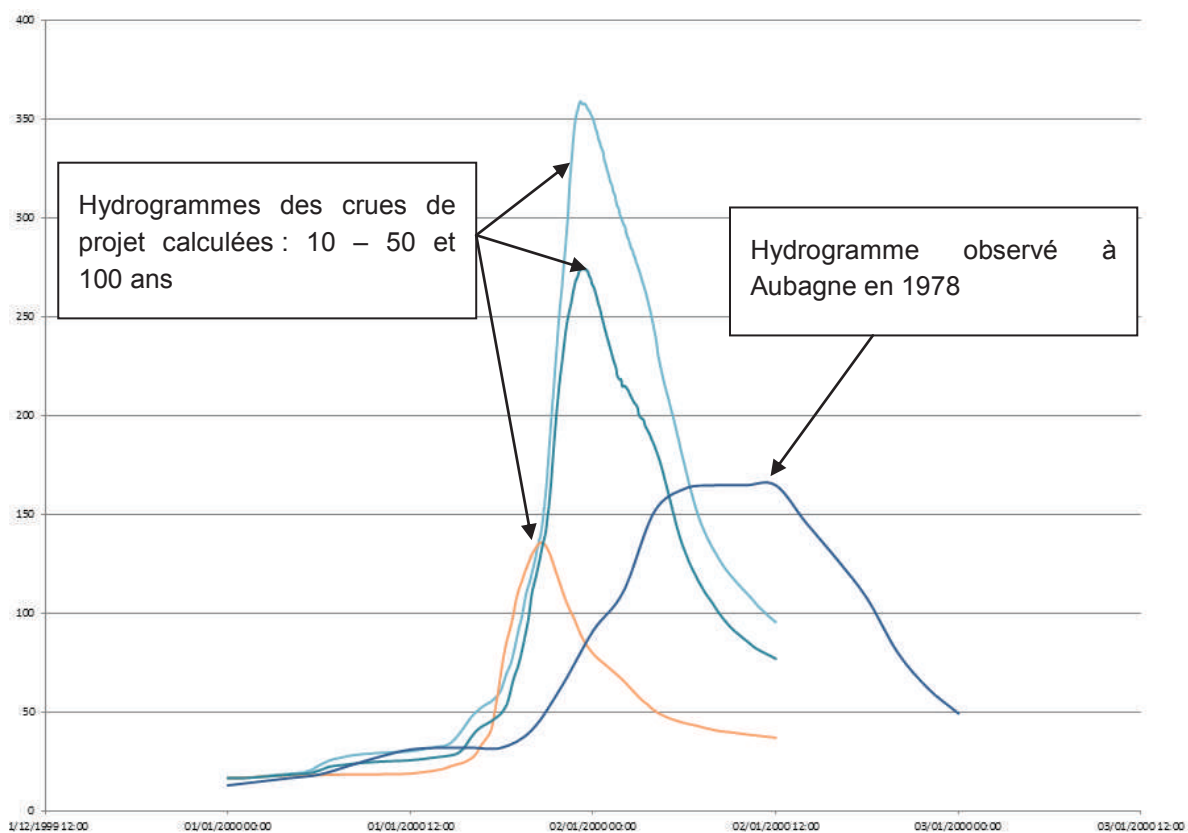


Figure 82 : Comparaison crue de 1978 à Aubagne

8.3 Cartographies des hauteurs maximales

Les cotes d'eau maximales ont été calculées pour chacune des crues testées, sur chacun des modèles. Un travail d'assemblage des résultats a été réalisé pour permettre le rendu cartographique final.

Pour ce travail d'assemblage, le principe a été de prendre, pour une occurrence donnée :

- les maxima par modèle en fonction des scénarios hydrologiques testés,
- ainsi que les maxima à la jonction entre les différents modèles.

Une cartographie de synthèse de l'enveloppe des crues 10, 50, 100 ans et exceptionnelle a été réalisée, sur tous les cours d'eau modélisés.

Les cartographies des classes de hauteurs d'eau pour les crues 10, 50, 100 ans et exceptionnelles ont également été réalisées sur tous les cours d'eau modélisés. Ces hauteurs d'eau sont calculées par la différence entre la cote d'eau issue des modèles hydrauliques et la cote du terrain naturel en dessous.

Sur certains modèles 1D, la donnée MNT n'est pas disponible pour tracer automatiquement les zones inondables et hauteurs d'eau. Le tracé a été réalisé à la main, en fonction des profils en travers levés par le géomètre et la visualisation du terrain. Les hauteurs cartographiées sur les modèles 1D sans MNT sont donc précises au droit des profils en travers, mais leurs précisions se dégradent entre les profils. Cela est inhérent au manque de données MNT.

8.4 Cartographies des vitesses maximales

Le même travail que pour les hauteurs d'eau a été réalisé pour les vitesses maximales d'écoulement.

Les cartographies des classes de vitesse pour les crues 100 ans et exceptionnelles ont également été réalisés sur tous les cours d'eau modélisés.

Les cartographies des classes de vitesse pour les crues 10 et 50 ans ont également été réalisées sur les cours d'eau modélisés en 2D.

Pour les modèles 2D, les vitesses locales sont fournies au centre de chaque maille. La cartographie des iso vitesses se fait alors automatiquement au droit de chaque maille.

Pour les modèles 1D, les vitesses moyennes sont uniquement disponibles au droit des profils en travers. Chaque profil en travers a été discrétisé de manière à avoir plusieurs valeurs de vitesses par profils, puis une interpolation a été réalisée, de manière automatisée, entre les profils en travers. Les vitesses cartographiées sur les modèles 1D sont donc précises au droit des profils en travers, mais leurs précisions se dégradent entre les profils. Cela est inhérent au type de modélisation 1D.

8.5 Cartographie de l'aléa inondation

De façon générale, l'aléa traduit la manifestation physique d'un phénomène naturel potentiellement dommageable d'occurrence donnée.

Dans le cadre particulier des PPRI, où le phénomène dommageable est l'inondation, on adopte une définition élargie qui intègre l'intensité du phénomène (hauteurs et vitesses d'écoulement).

La qualification de l'aléa, de faible, de modéré ou de fort, dépend donc du croisement entre ces deux paramètres selon la grille présentée ci-dessous, qui traduit le fait que plus la hauteur d'eau ou la vitesse d'écoulement est élevée, plus le danger est important.

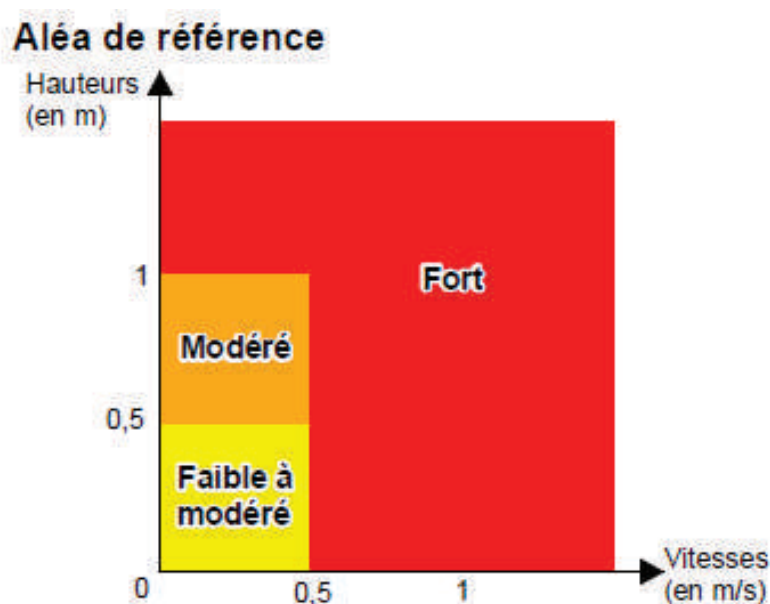


Tableau 55 : Grille d'aléa retenue – croisement hauteurs/vitesses

Cette grille de croisement est entre autre élaborée sur la base du retour d'expérience des évènements passés qui a permis aux services en charge des secours d'élaborer la matrice suivante qui illustrent les limites de déplacement et d'intervention de secours en fonction de l'importance de la crue.

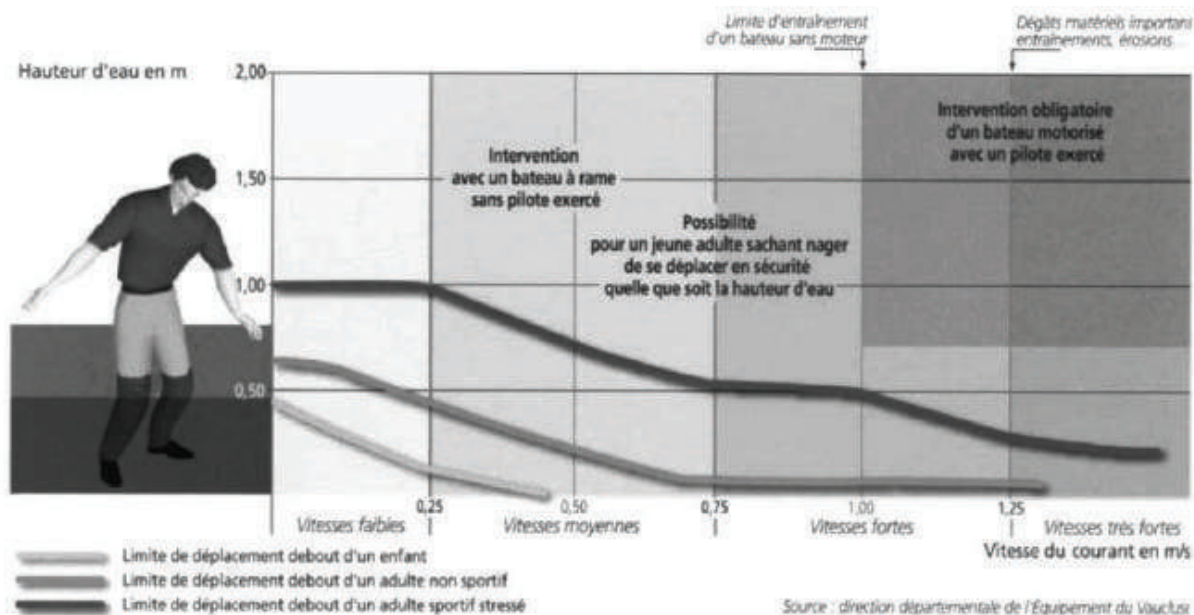


Figure 83 : limites de déplacements dans l'eau

La cartographie de l'aléa inondation a donc été réalisée pour les crues centennale et exceptionnelle, sur la base du croisement des valeurs maximales de hauteur et de vitesse au cours de chacune des crues modélisées. Celles-ci sont fournies en annexe cartographique.

Dans le cadre des PPRI, il est important de noter que l'aléa de référence (la plus forte crue historique connue, ou la crue d'occurrence centennale si elle lui est supérieure) doit être déterminé en prenant en compte des hypothèses de rupture d'ouvrages de protection.

Dans le cas du bassin versant étudié, une analyse de chacune des digues située le long de l'Huveaune a été réalisée (digués recensées par la DIG Huveaune), et a démontré que la totalité des ouvrages de protection étaient submergées pour la crue centennale, et à fortiori pour la crue exceptionnelle : les cotes en lit majeur et mineur sont les mêmes à quelques centimètres près.

Ainsi même en cas de rupture de digue au moment de la montée de la crue, les niveaux d'eau maxima resteront les mêmes. Il n'a de fait pas été nécessaire de définir des hypothèses particulières de rupture d'ouvrages. Seule des vitesses peuvent être localement plus importantes en cas de rupture. Cependant, les vitesses en lit majeur sont importantes même sans rupture, et impliquent déjà des aléas forts même à l'arrière des digues.

Ainsi qu'il y ait rupture de digue ou pas, l'aléa sera toujours fort dans les zones concernées.

A noter que dans les zones où des bâtiments faisant obstacle aux écoulements avaient été enlevés des modélisations, la cartographie de l'aléa a été réalisée par extrapolation des données moyennes.

