



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

Rapport de présentation – Commune de Saint Zacharie



Mars 2014



Informations qualité

Titre du projet	Etude hydrologique et hydraulique sur le bassin versant de l'Huveaune
Titre du document	Rapport de présentation – commune de Saint Zacharie
Date	Mars 2014
Auteur(s)	Valérie Fabrègue – Mireille Raymond – Franck Zangelmi
N° SCORE	HSE15245R

Sommaire

Chapitre 1 - Cadre et objet.....	7
1 Contexte : une étude globale sur la totalité du bassin versant de l'Huveaune.....	7
2 Objet du présent rapport	8
3 Zone d'étude générale	8
4 Zone d'étude de Saint Zacharie	12
Chapitre 2 - Généralités sur les inondations	14
1 Les conditions de formation d'une crue et d'une inondation	14
2 Les conséquences des inondations	15
3 Les facteurs aggravants	16
Chapitre 3 - Les données utilisées	17
1 Synthèse des études antérieures	17
2 Synthèse de terrain et contacts établis	19
2.1 Synthèse de terrain	19
2.2 Synthèse des contacts	22
3 Données hydrologiques recueillies	22
3.1 Données SPC Méd Est	23
3.2 Données CUMPM/DEA	24
3.3 Données DREAL (Banque Hydro)	24
3.4 Données Météo-France	25
4 Données historiques.....	26
5 Données topographiques utilisées	27
5.1 Données LIDAR	27
5.2 Levés topographiques complémentaires	28
Chapitre 4 - Analyse hydrologique	29
1 Prise en compte du karst.....	29
1.1 Présentation générale du système karstique	29
1.2 Le système karstique du bassin de l'Huveaune.....	32
2 Modélisation hydrologique.....	33
2.1 Modèle utilisé	33
2.2 Calage	34
3 Estimation des débits caractéristiques	35
3.1 Méthodologie pour l'estimation des débits caractéristiques	35
3.2 Calcul des débits caractéristiques.....	37
Chapitre 5 - Etude hydraulique	41
1 Données générales sur les modélisations hydrauliques	41
1.1 Choix des types de modélisation	41
1.2 Choix du régime d'écoulement.....	43
1.3 Outil de modélisation.....	44
2 Les modèles réalisés sur Saint Zacharie	45
2.1 Description des modèles.....	45
2.2 Conditions aux limites	50

2.3	Calage des modèles	51
3	Résultats de l'étude hydraulique	59
3.1	Crués de projet.....	59
3.2	Cartographies des hauteurs maximales	59
3.3	Cartographies des vitesses maximales.....	59
3.4	Cartographie de l'aléa inondation	60
3.5	Les résultats fournis	62
 ANNEXE 1 : Relevé des crués historiques.....		63
ANNEXE 2 : Résultats cartographiques de la crue de référence.....		65

Table des illustrations

Figure 1 : Zone d'étude (à remplacer)	9
Figure 2 : Cours d'eau modélisés sur la commune de Saint Zacharie.....	12
Figure 3 : Paysage karstique (Agence de l'eau, 1999)	29
Figure 4 : L'aquifère karstique (Mangin, 1975)	30
Figure 5 : Les deux types de systèmes karstiques (AERMC, 1999).....	31
Figure 6 Répartition des zones karstiques, urbaines et mixtes sur le bassin versant de l'Huveaune	34
Figure 7 : répartition spatiale des pluies	36
Figure 8: exemple de liaison 1D/2D.....	42
Figure 9 : <i>Exemple de maillage avec bâtiments enlevés pour former des « îles » (pas de passage d'eau)</i> 43	
Figure 10 : Localisation des modèles hydrauliques 2D	47
Figure 11 : calage de la crue de 2008 à St Zacharie	52
Figure 12 : calage de la crue de 2008 à Roquevaire	53
Figure 13 : photographies des PHE 2008 sur le modèle Huveaune amont	54
Figure 14 : Calage de la crue de 1978 à Roquevaire	55
Figure 15 : Modèle Huveaune Amont : PHE 1978 (étoiles rouges) et 2008 (losanges orange).....	57
Figure 16 : limites de déplacements dans l'eau.....	61

Liste des tableaux

Tableau 1 – Synthèse des débits de crue des études existantes à Saint Zacharie	18
Tableau 2 – Synthèse des méthodes hydrauliques des études antérieures à Saint Zacharie.....	18
Tableau 3 : Caractéristiques des épisodes de projet sur le bassin de l'Huveaune	36
Tableau 4 : Débits caractéristiques maxima du BV de l'Huveaune	39
Tableau 5 : Débits caractéristiques retenus à Saint Zacharie.....	40
Tableau 6 : Caractéristiques du modèle hydraulique 2D	46
Tableau 7 : caractéristiques principales du modèle hydraulique 1D sur St Zacharie.....	48
Tableau 8 : Caractéristiques du modèle hydraulique 1D réalisés sur Saint Zacharie.....	49
Tableau 9 : Calage de la crue de 2008 pour le modèle Huveaune Amont	53
Tableau 10 : Calage de la crue de 1978 pour le modèle Huveaune Amont	56
Tableau 11 : Grille d'aléa retenue – croisement hauteurs/vitesses	60

Chapitre 1 - Cadre et objet

1 Contexte : une étude globale sur la totalité du bassin versant de l'Huveaune

L'Huveaune et ses principaux affluents traversent des secteurs à enjeux majeurs sur le territoire des Bouches du Rhône dont en particulier la commune de Saint Zacharie.

Egis Eau a été mandaté par les services de l'État pour réaliser des compléments d'étude hydrogéomorphologique, ainsi qu'une étude hydrologique et hydraulique sur le bassin versant de l'Huveaune dans son intégralité. Son objectif est d'obtenir des valeurs de référence actualisées et homogènes en matière d'hydrologie et de débits de crues, de cartographier les aléas pour différents niveaux de crue (la crue centennale - appelée crue de référence - et la crue exceptionnelle). Les zones inondables pour des périodes de retour de crues faibles sont également produites.

L'étude a donc été menée sur la totalité du bassin versant de l'Huveaune et en particulier sur la commune de Saint Zacharie.

Cette étude est un préalable à l'élaboration de Plan de Prévention du Risque inondation (PPR).

Les études engagées dans la démarche de PPR visent à approfondir et à communiquer la connaissance des phénomènes, des aléas et des enjeux, afin de gérer efficacement l'occupation du sol et de maîtriser l'extension urbaine dans les zones exposées.

Les études préalables aux PPRi se déroulent en deux étapes principales :

- la qualification des aléas, nécessitant un recueil de données et des investigations de terrain.
- l'évaluation des enjeux socio-économiques, qui présente les espaces urbanisés, et notamment les secteurs d'habitations, les zones stratégiques pour l'intervention des secours, mais également les zones naturelles qu'il convient de préserver pour ne pas aggraver les risques par ailleurs.

L'enchaînement de ces étapes aboutit au zonage réglementaire du PPRi, que l'ensemble des acteurs doit s'approprier grâce à l'étroite concertation qui doit guider ce travail.

L'étude globale sur le bassin versant de l'Huveaune concerne l'analyse du fonctionnement du bassin versant et la cartographie de l'aléa. Elle est décomposée en 6 phases, dont les rapports de présentation respectifs sont disponibles en DDTM des Bouches du Rhône :

- Phase 1 : Analyse du territoire, collecte des données, rencontre des partenaires et enquête de terrain,
- Phase 2 : Compléments en hydrogéomorphologie,
- Phase 3 : Étude hydrologique,
- Phase 4 : Réalisation des travaux topographiques de l'étude hydraulique,
- Phase 5 : Modélisations hydrauliques et cartographie des aléas,
- Phase 6 : Restitution cartographique.

2 Objet du présent rapport

L'objet de ce rapport est de présenter en synthèse l'ensemble des méthodes et résultats de l'étude globale sur la commune de Saint Zacharie:

- **Une présentation de la méthodologie mise en œuvre,**
- **Le compte rendu de l'enquête menée sur la commune,**
- **Les données hydrologiques utilisées pour la modélisation,**
- **Les documents cartographiques relatifs à la zone à enjeux (cartographie de la crue de référence et de l'aléa).**

Le détail des méthodes employées est fourni dans le rapport global de l'étude.

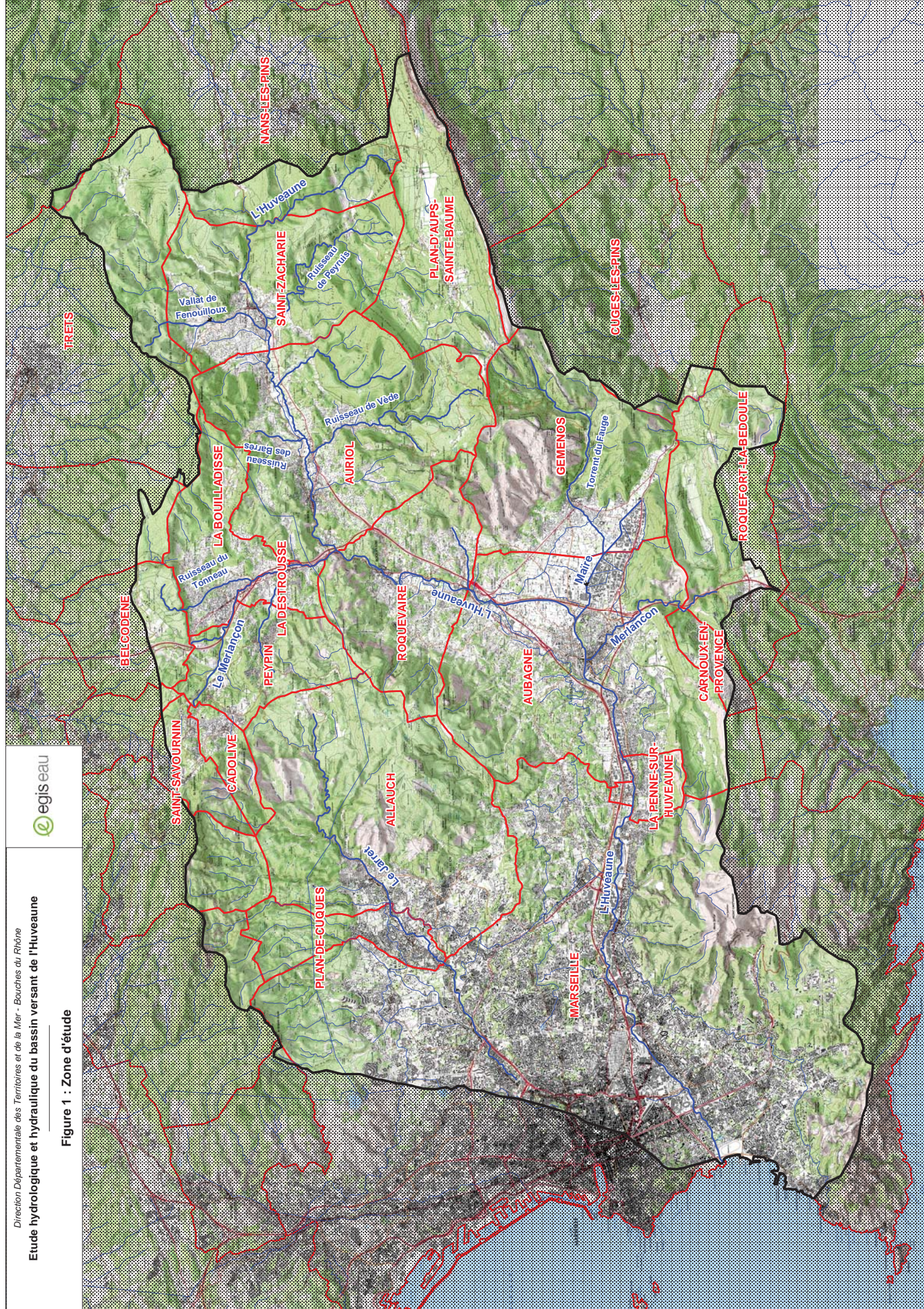
Tous les rapports communaux, le rapport global, leurs annexes, et les données SIG sont fournis sur la clé USB jointe.

3 Zone d'étude générale

La zone géographique concernée par l'étude dans son ensemble est le bassin versant de l'Huveaune, présenté sur la figure 1 en page suivante.

L'Huveaune prend sa source à environ 50 km de la mer et à 470 mètres d'altitude en contrebas du Plan d'Aups, perché à 650 m d'altitude. Soumise au climat méditerranéen, l'Huveaune connaît de fortes variations de son régime d'écoulement.

Figure 1 : Zone d'étude



Les terrains traversés, majoritairement calcaires surtout dans la partie amont, influencent aussi sensiblement le régime du cours d'eau. La vallée de l'Huveaune s'écoule en grande partie dans un bassin sédimentaire tertiaire (Oligocène) encadré de massifs calcaires : le massif de la Sainte-Baume à l'est où elle prend sa source, la montagne de Regagnas au Nord, le Garlaban à l'ouest et au sud la chaîne de St-Cyr.

Le bassin versant de l'Huveaune est situé sur les départements des Bouches-du-Rhône et du Var.

Les communes concernées par l'étude de ce bassin versant sont les suivantes :

- Pour les Bouches-du-Rhône : Allauch, Aubagne, Auriol, Belcodène, La Bouilladisse, Cadolive, Carnoux-en-Provence, La Destrousse, Gémenos, Marseille, La Penne-sur-Huveaune, Peypin, Plan-de-Cuques, Roquevaire, Saint-Savournin.
- Pour le Var : Plan d'Aups Sainte-Baume, Saint Zacharie.

Plusieurs particularités du territoire du bassin versant de l'Huveaune ont conduit à réaliser une étude poussée et rigoureuse afin de caractériser et cartographier correctement les phénomènes de crues.

- Le bassin versant étant très étendu (460 km² environ), plusieurs types d'épisodes pluvieux intenses ont dû être testés, chacun centré sur une zone différente du bassin versant. L'abattement spatial des pluies a été pris en compte (en effet un orage pluvieux ne peut couvrir avec la même intensité la totalité du bassin versant).
- Le bassin versant est en majorité de type karstique en amont, c'est-à-dire qu'il possède un régime hydrologique particulier, avec des stockages d'eau de pluie dans les réservoirs calcaires du sous-sol avec restitution selon différents lois. Ces phénomènes karstiques ont été étudiés et pris en compte dans la modélisation hydrologique spécifique.
- En aval du bassin versant sont présentes de vastes zones urbanisées. Un modèle hydrologique spécifique a été utilisé pour cela également.
- Ainsi, la modélisation hydrologique globale du bassin versant a combiné 2 modèles hydrologiques adaptés distincts, couplés, permettant d'estimer les différents types d'apports des bassins versants.
- Les linéaires étudiés sont de types différents : de petits talwegs non pérennes (petits affluents) ruraux à l'Huveaune traversant de vastes zones densément urbanisées. L'analyse hydrologique (transformation de la pluie en débit de pointe) a donc découpé la zone d'étude en différents sous bassins versants, permettant de calculer les débits des différents apports des cours d'eau étudiés.
- Les linéaires étudiés des grands cours d'eau sont importants (plus de 50km pour l'Huveaune par exemple). Les modèles hydrologiques ne permettant pas de prendre correctement en compte les différents écrêtements et retards de propagation de l'onde de crue en plaine inondable, ils ont été couplés avec les modèles hydrauliques qui eux le permettent. Les phénomènes de propagation de crue et de concomitances des crues entre deux affluents sont donc également pris en compte.
- Ainsi pour cette étude, un couplage des modèles hydrologiques (calculs des apports des bassins versants) et hydrauliques (propagation des crues) a permis d'obtenir une analyse précise des écoulements.

- La grande longueur des rivières modélisées a également induit le découpage des linéaires en plusieurs modèles hydrauliques de taille plus réduite. Ainsi les modélisations ont été menées modèle par modèle, d'amont en aval, afin de propager les ondes de crues depuis l'amont vers l'aval, tout en y intégrant les apports intermédiaires des bassins versants de chaque modèle.

4 Zone d'étude de Saint Zacharie

La commune de Saint Zacharie se situe en partie amont du bassin versant de l'Huveaune.

Ce sont les premiers secteurs habités traversés par le cours d'eau.

L'Huveaune traverse la commune de saint Zacharie d'Est en Ouest, depuis les gorges en amont du Pont de Coulomb à la station d'épuration en aval du bourg.

L'Huveaune sur Saint Zacharie reçoit plusieurs affluents, dont un principal, le Vallat de Fenouilloux, qui draine les montagnes Nord de Saint Zacharie.

Les secteurs modélisés sur la commune, présentés sur la carte ci-dessous, sont :

- L'Huveaune depuis le Pont de Coulomb à la limite communale aval
- Le vallat de Fenouilloux depuis l'amont de la RD85 menant au Pas de Couelle, jusqu'à sa confluence dans l'Huveaune après avoir traversé une zone d'habitat pavillonnaire péri-urbain.

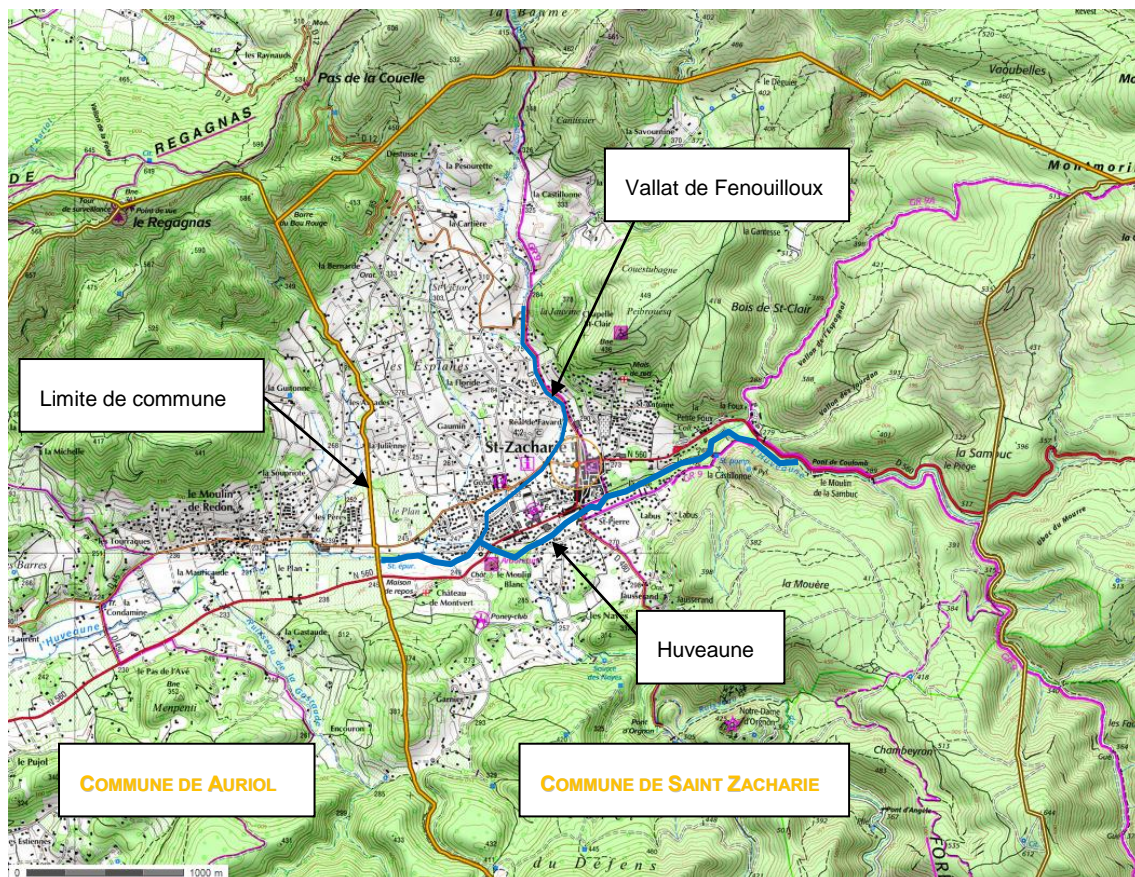


Figure 2 : Cours d'eau modélisés sur la commune de Saint Zacharie

Le territoire communal a également fait l'objet d'une analyse hydrogéomorphologique complémentaire sur les affluents indiqués en rouge sur le schéma ci-dessous :



Les cartographiques correspondantes sont fournies en annexe numérique, ainsi que la méthodologie employée pour ces tracés.

Chapitre 2 - Généralités sur les inondations

1 Les conditions de formation d'une crue et d'une inondation

Définitions

Une crue correspond à une augmentation rapide et temporaire du débit d'un cours d'eau au-delà d'un certain seuil auquel toute analyse doit faire référence. Elle est décrite à partir de plusieurs paramètres, dont le débit et la fréquence. Les paramètres secondaires tels que la vitesse, la hauteur, la durée de submersion peuvent également caractériser la crue. En fonction de son intensité, la crue peut être contenue dans le lit mineur au contraire s'épandre dans son lit majeur.

Une inondation désigne un recouvrement d'eau qui déborde du lit mineur ou qui afflue dans les thalwegs ou les dépressions. En ce sens, les inondations couvrent les phénomènes suivants : débordements directs ou non des cours d'eau, remontées de nappe, ruissellement urbain, inondations par rupture d'ouvrages de protection, ou encore inondations estuariennes résultant de la conjonction de fortes marées, de situation dépressionnaires, et de crues.

Cette étude traite uniquement des inondations par débordement de cours d'eau, et plus précisément sur Saint Zacharie des débordements de l'Huveaune et du Vallat de Fenouilloux sur les linéaires indiqués sur la figure 2.

Le processus conduisant aux crues et inondations

La compréhension du processus conduisant aux crues et inondations nécessite la connaissance de nombreux facteurs tels que :

- **l'eau mobilisable** : par les pluies ou par la rupture par exemple de digues de fermeture de barrages. Concernant les pluies, l'analyse des quantités d'eau qui provoquent les crues nécessite une connaissance fine du bassin versant et de sa réaction vis-à-vis d'événements plus ou moins étendus spatialement et de durées différentes. Les courts orages affecteront principalement des petits bassins versants urbains, tandis que les précipitations générées lors de longues pluies pourront concerner des bassins versants de plus grande étendue.
- **Le ruissellement** : dépend de la nature du sol et de sa couverture de surface. Le ruissellement concerne la fraction de pluie qui n'est retenue ni par le couvert végétal ni par le micro relief de surface (flaques d'eau par exemple), qui n'est pas évaporée, et qui n'est pas définitivement infiltrée dans le sol. En particulier, l'imperméabilisation des sols a un effet prépondérant dans la formation des crues puisqu'aucune rétention ou infiltration n'est possible.

- **Le temps de concentration** : c'est la durée qu'une goutte d'eau nécessite pour parcourir le plus long chemin hydraulique du bassin versant (entre la pointe du bassin versant et l'exutoire). Ce temps est fonction de la taille du bassin versant, mais également de sa forme, de sa pente, de sa couverture. Il peut notamment évoluer sensiblement en fonction des différents travaux de drainage mais surtout en fonction de l'imperméabilisation.
- **La propagation de la crue** : les particules d'eau ruissellent et s'accumulent à mesure de leur descente le long des thalwegs, formant des écoulements concentrés le long des axes de ruissellement et des cours d'eau. La propagation des crues est fortement conditionnée par la présence ou non de zones d'expansion (zones larges, rapidement inondables, présentant de faibles pentes). Les cours d'eau dépourvus de zones d'expansion (soit naturellement dans le cas de torrents, soit à cause de remblais incontrôlés des lits majeurs), sont les plus exposés aux crues violentes et rapides.
- **Le débordement** : est consécutif à la propagation d'un débit supérieur à celui que peut accepter le lit mineur. Les débordements du lit mineur sont bénéfiques aux milieux naturels et permettent de réduire la propagation des crues en aval. Ils sont en revanche source de risques pour les biens et vies humaines.

2 Les conséquences des inondations

Elles affectent les personnes, les communications, les biens et les activités, mais aussi les milieux naturels. Elles se traduisent principalement par :

- **la mise en danger des personnes** : survient surtout lorsque les habitations sont dans des zones soumises à forts aléas. En effet, la taille des bassins versants concernés par la zone d'étude rendent difficile les préalertes et les opérations d'évacuation et de secours du fait des temps de concentration courts des bassins versants. Le danger se traduit principalement par le risque d'être emporté et par la suite noyé, en raison de la vitesse et de la hauteur des écoulements, dont les niveaux peuvent largement dépasser les seuils de maintien de personnes en position debout.
- **L'interruption des communications** : Elles se traduisent par la submersion ou coupures de routes qui interdisent tout accès, mais également rupture de conduites, de réseaux aériens ou enterrés (électricité, téléphone ...), qui ne permettent pas le bon fonctionnement des opérations de secours, lorsqu'ils existent.
- **Les dommages aux biens et aux activités** : les dommages revêtent de multiples formes. Ils touchent les biens immobiliers dans des proportions plus ou moins importantes qui vont de la simple mise au contact avec l'eau, jusqu'à la destruction complète, avec emportement et conséquence indirectes sur l'inondabilité en aval par création d'embâcles. Les dommages mobiliers sont néanmoins les plus fréquents principalement dans les rez de chaussée et sous-sols. Les dommages se manifestent également plus ou moins directement sur les activités, par dégâts sur le matériel mais également arrêt de l'activité ou dégradation de ses conditions.
- **L'érosion et les dépôts de matériaux, le déplacement du lit ordinaire** : Les crues impliquent des phénomènes d'érosion, de transport de matériaux solides, d'alluvionnement... Elles participent ainsi à l'évolution du milieu naturel, que ce soit positif ou négatif, positif pour le milieu naturel en général et négatif pour les activités (pertes de surface de terrain cultivés par exemple ou érosion du terrain d'assiette de construction).

3 Les facteurs aggravants

Ils sont souvent dus à l'activité humaine et correspondent essentiellement à :

- **la concentration des personnes et l'accumulation des biens dans le champ d'inondation** : l'implantation de l'activité humaine aux abords des cours d'eau et l'implantation de biens sensibles à l'eau sont les principales causes de l'aggravation du risque. Elles sont d'autant plus redoutables que l'urbanisation initiale aux bords des cours d'eau s'est développée rapidement et qu'elle appelle de plus en plus des équipements de proximité pour satisfaire la population.
- Par ailleurs, **la notion de risque est facilement oubliée** puis occultée par la population d'autant plus dans le bassin versant de l'Huveaune où il n'y a pas eu de fortes crues depuis des décennies.
- **La défaillance des dispositifs de protection** : Paradoxalement, le rôle des dispositifs de protection contre les crues est souvent limité voire pire, comme le montrent régulièrement les constats après crues. Cela est d'autant plus vrai dans les zones où les ouvrages en questions sont principalement les digues de protection, dont le comportement est largement dépendant de leur conception mais également de leur entretien. Par ailleurs, en cas de rupture, le phénomène d'onde de crue générée peut se révéler plus dangereux qu'un débordement naturel et progressif.
- **Le transport et le dépôt de produits indésirables** : les écoulements de crues peuvent mobiliser et répandre en aval des produits dangereux et toxiques. Ce risque est davantage présent dans les zones urbaines et en particulier industrielles, souvent situées en zones à risques d'inondations.
- **La formation et la rupture d'embâcles** : les matériaux flottants transportés par les écoulements (végétaux, tôles, fûts, voitures ...) s'accumulent en amont des passages à section réduite (ponts en particulier) et s'y enchevêtrent au point de former un barrage d'embâcles. Les niveaux d'eau sont dans un premier temps augmentés en amont et le risque le plus important est la rupture de ce barrage qui peut provoquer une onde de crue plus importante avec un effet surprise très dommageable.
- **La surélévation de l'eau en amont des obstacles** : du fait des obstacles naturels ou non le long des cours d'eau, les niveaux d'eau sont exhaussés en amont, d'autant plus si la réduction de section est importante, c'est le cas général des ponts. Un autre phénomène à ne pas négliger est la recharge successive en enrobés de routes qui constituent ainsi des barrages et rendent d'autant plus vulnérables les habitations situées en amont immédiat.

Chapitre 3 - Les données utilisées

1 Synthèse des études antérieures

Un travail d'analyse de 52 études hydrologiques et hydrauliques existantes sur la totalité du bassin versant de l'Huveaune a été réalisé. Il en ressort une grande hétérogénéité concernant à la fois les méthodes utilisées et les résultats obtenus.

- Concernant l'hydrologie, plusieurs méthodes sont mises en œuvre pour déterminer les débits de crue de l'Huveaune et de ses affluents : ajustements statistiques sur les données de débits, modélisation pluie-débit selon la méthode SCS, méthode des transferts par rapport à des données d'autres bassins versants, méthodes rationnelle, Socose ou Crupedix pour les petits bassins versants...

Les données pluviométriques utilisées sont variées et souvent anciennes : ajustements statistiques des pluies de Marignane, de Toulon, ajustement du CEMAGREF sur les pluies d'Aubagne, d'Aix-en-Provence (1983, actualisation en 1995), Instruction Technique de 1977... Les dates des plages de données exploitées sont rarement précisées.

Les hypothèses prises en compte et les détails des modèles hydrologiques (caractéristiques des sous-bassins versants, coefficients de ruissellement...) sont souvent peu explicitées. Les résultats obtenus avec des hypothèses de pluies identiques sont parfois incohérents. Dans plusieurs études, les débits de référence ont été fixés par la ville ou la DDTM et les hypothèses et méthodes de détermination ne sont pas toujours précisées. Un grand nombre d'études reprennent des résultats hydrologiques d'études antérieures, notamment ceux de l'étude de référence EGCEM 1976, sans actualisation des données de bases.

Dans tous les cas, les hypothèses hydrologiques ne sont pas actualisées (les données pluviométriques le plus récentes datent de 1995) et ne tiennent donc pas compte des événements historiques. L'évaluation des pluies et des débits de référence ne résultent pas d'un calage sur des observations réelles des événements marquants récents. Aucune analyse approfondie des données hydrométéorologiques du bassin versant n'a été menée récemment.

Le tableau en page suivante donne les débits de crues des études antérieures sur la commune de Saint Zacharie.

Tableau 1 – Synthèse des débits de crue des études existantes à Saint Zacharie

Cours d'eau	Lieu	Surface bassin versant (km ²)	Débit décennal (m ³ /s)	Débit centennal (m ³ /s)	Méthode hydrologique	Données pluviométriques	Etude
Huveaune	Amont de St Zacharie	13.5	6	25.5	Modélisation pluie-débit logiciel XP-SWMM (SCS)	Toulon	SCE 2011
Huveaune	1er pont de St Zacharie	30	19.8	62			
Huveaune	Moulin Blanc	53	24.3	73			
Huveaune	aval de St Zacharie	59	38.9	118.8			
Fenouilloux		9.1	11.9	30	Modélisation pluie-débit logiciel XP-SWMM (SCS)	Toulon	SCE 2011

- Concernant la prise en compte du comportement karstique du bassin versant de l'Huveaune, seules les études EGCEM de 1976 et IPSEAU à Roquevaire (2004) y font réellement allusion. Dans les deux cas les hypothèses retenues sont un effet d'abattement de 20% (appliqué sur la surface des bassins versants ou les débits de pointe). Le rôle aggravant du karst sur les débits de pointe n'est évoqué que dans l'étude SCE de 2008 à la Destrousse, où des hypothèses de saturation sont étudiées.

Aucune étude ne propose d'analyse des événements historiques et de la réponse des bassins versants en fonction des pluies antérieures, qui conditionnent l'état de saturation du karst.

- Les modélisations hydrauliques mises en œuvre dans le cadre de ces études sont de plusieurs types : modèles filaires (HEC-RAS, Mike 11, FLUTOR, LIDO...), modèles filaires à casiers (ISIS), modèles bidimensionnels (TELEMAC 2D, XP-SWMM/TUFLOW). Les types de modèles et les paramètres utilisés ne sont pas toujours explicités. Les modèles bidimensionnels transitoires les plus récents sont bien adaptés au contexte urbain et à la morphologie du lit majeur. Toutefois les modèles sont la plupart du temps calés d'après les observations de terrains, et très rarement sur les observations historiques (crue de 1978).

Le tableau 2 récapitule les hypothèses hydrauliques et les types de modèles utilisés dans les études existantes sur Saint Zacharie qui ont fait l'objet d'une modélisation hydraulique.

L'Huveaune a donc fait l'objet d'une modélisation hydraulique 2D transitoire sur Saint Zacharie.

Tableau 2 – Synthèse des méthodes hydrauliques des études antérieures à Saint Zacharie

Etude	Cours d'eau	Méthode hydraulique	Régime hydraulique
Saint Zacharie SCE 2011	Huveaune à Saint Zacharie	Modèle 2D (XP-SWMM/TUFLOW), calage d'après terrain	transitoire

- Les données topographiques utilisées dans les études analysées ne sont pas toujours fournies dans les documents récupérés, ou sont disponibles en format papier très peu exploitables. Seules les études les plus récentes offrent des données utilisables, principalement sur l'Huveaune. **Sur Saint Zacharie les profils en travers de l'étude SCE de 2011 ont été récupérés. Ce sont des profils en travers tirés d'une extraction LIDAR.**

2 Synthèse de terrain et contacts établis

2.1 Synthèse de terrain

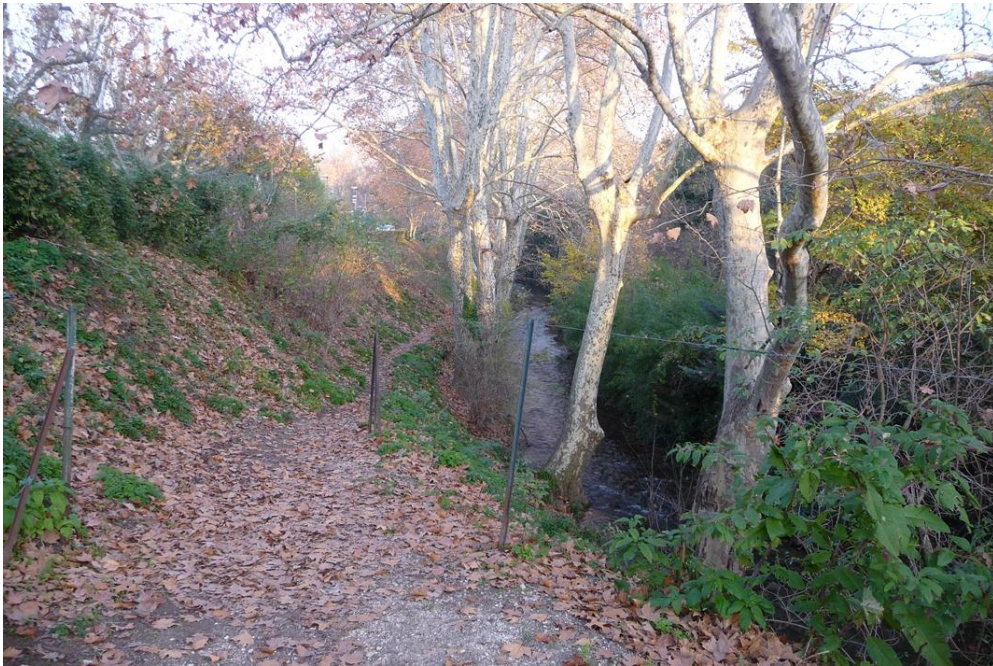
L'ensemble des cours d'eau concernés par l'étude, et plus particulièrement les linéaires concernés par la phase de modélisation hydraulique, ont fait l'objet d'une reconnaissance de terrain et d'une campagne photographique.

Cette phase de terrain a notamment permis d'acquérir une bonne connaissance de la morphologie des cours d'eau et de leurs singularités, et de définir de façon pertinente les travaux topographiques à réaliser sur le bassin versant.

Sur la commune de Saint Zacharie, l'Huveaune provient de gorges naturelles incisées dans le massif de la Saint Baume. Au niveau de la sortie des gorges, l'Huveaune traverse les zones habitées de Saint Zacharie. La partie amont jusqu'au pont de la RD480 est assez encaissée. La plaine s'élargie ensuite vers l'aval, notamment en aval de la traversée de la RN560 où des lotissements ont pris place en rive droite (secteur de la confluence du Fenouilloux).



Photographie 1 : L'Huveaune dans les gorges amont de Saint Zacharie - secteur Pont de Coulomb



Photographie 2 : L'Huveaune à Saint Zacharie - secteur amont RD480



Photographie 3 : L'Huveaune à Saint Zacharie - secteur aval RN560

Sur le territoire communal, l'Huveaune reçoit 2 principaux affluents : le ruisseau de Peyruis afflue en rive gauche de l'Huveaune tandis que le vallon de Fenouilloux la rejoint en rive droite. Ces deux cours d'eau débouchent quasiment l'un en face de l'autre au niveau du village de Saint-Zacharie. Ils se caractérisent par des parties amont très encaissées, avec un lit mineur fortement incisé. Une multitude de petits torrents alimentent ces deux collecteurs principaux. La section engorgée du Peyruis est néanmoins plus conséquente que pour le Fenouilloux, et représente la majeure partie de son linéaire.

Les pentes sont globalement soutenues, et lorsque celles-ci diminuent la plaine alluviale s'élargit, assez brusquement pour le ruisseau de Peyruis.

C'est lorsque la pente chute que la plaine s'élargit et qu'apparaissent les premiers enjeux. Au total une vingtaine de constructions sont localisées dans la plaine alluviale, dont la plupart à proximité immédiate du lit mineur, en lit moyen ou dans une zone de confluence. Cette configuration induit un risque élevé pour ce secteur en cas de fortes précipitations.



Photographie 4 : Habitations vulnérables dans la partie terminale du Peyruis

Ces visites de terrain ont également permis de bâtir les cartographies d'hydrogéomorphologie sur le territoire communal. Ces cartographies sont fournies sur le support numérique associé au rapport (clé USB).

2.2 Synthèse des contacts

De nombreux contacts ont été établis avec les différents intervenants du bassin versant lors de la première phase de l'étude pour tenter de recueillir un maximum d'informations concernant le fonctionnement hydraulique du bassin versant et les crues historiques.

Les principales informations et données recueillies concernent :

- des données hydrologiques (pluies, hauteurs, débits aux stations de mesures) fournies par la CUMPM (1987-2011) et le SPC (1994-2011), et récupérées auprès de la Banque Hydro et de la DREAL ;
- des photos et articles concernant les crues historiques, principalement pour 1978 et 2008 (localisation pas toujours précise), issues des archives municipales et départementales, du SIH et du SPC,
- des informations ponctuelles sur les zones inondées lors des crues passées et les problèmes hydrauliques rencontrés par les communes, issues de témoignages.

Les nombreux contacts établis avec les personnes ressources des communes concernées par l'étude n'ont fourni que très peu de données précises concernant les crues des cours d'eau et les inondations historiques. Aucune centralisation des connaissances sur les événements marquants n'existe sur le bassin versant à l'échelle communale.

Synthèse des contacts établis sur la commune de Saint Zacharie :

Plusieurs contacts ont été établis avec la mairie. Il nous a été indiqué que l'étude hydraulique SCE de 2011 est réalisée dans le cadre de l'élaboration du PLU. C'est M. Choley du SIH qui gère l'étude.

De plus, nous ont été indiqués les principaux points sensibles d'un point de vue des inondations sur la commune à savoir:

- lieu-dit Pont du Village (RD560),
- lotissement les Prés,
- amont de l'aqueduc.

La crue principale est celle de l'Huveaune au lieu-dit Le Plan en 1978.

Les cartes de l'aléa inondation ont été fournies.

3 Données hydrologiques recueillies

Les données hydrologiques recueillies proviennent de 4 sources principales : le Service de Prévision des Crues Méditerranée Est (SPC), la Communauté Urbaine de Marseille (CUMPM/DEA), la DREAL (Banque Hydro) et Météo France.

A l'exception de certaines données pluviométriques de Météo France qui concernent des événements anciens (fin 19^{ème} siècle et début 20^{ème}), les éléments recueillis sont postérieurs à 1987. Ces données sont décrites ci-après.

3.1 Données SPC Méd Est

3.1.1 Données pluviométriques et limnimétriques

Le SPC a fourni les données de sa base d'évènements SACHA, constituées des hauteurs d'eau, des débits et des pluies au pas de temps horaire aux stations d'Aubagne, Roquevaire et St Zacharie pour une trentaine d'évènements depuis 1994.

En ce qui concerne les données pluviométriques associées à ces évènements, il s'agit des pluies de bassin de Saint Zacharie, Roquevaire et Aubagne, définies au pas de temps horaire d'après les postes de Marseille, Cassis, la Destrousse, Aubagne, Plan d'Aups, Trets. La pluie de bassin totale a également été fournie.

Les débits de pointe maximum enregistrés sont ceux de décembre 2008. Les intensités maximales horaires des pluies de bassins sont de l'ordre de 30 mm.

3.1.2 Indice d'humidité des sols

Le SPC a de plus fourni les coefficients SWI journaliers (Soil Wetness Index = indice d'humidité des sols) sur la période de 1993 à 2011, en cinq points du bassin versant.

Cet indice, qui permet le suivi de l'humidité des sols superficiels.

C'est un moyen d'évaluer l'état de la réserve en eau d'un sol, par rapport à sa réserve optimale (réserve utile). Lorsque le SWI est voisin de 1, voire supérieur à 1, le sol est humide, tend vers la saturation. Lorsque le SWI tend vers 0, voire passe en dessous de 0, le sol est en état de stress hydrique, voire très sec.

Dans le cas du bassin versant de l'Huveaune caractérisé par un fonctionnement karstique sur toute sa partie amont, le SWI va donner des indications pertinentes sur l'état de saturation du sol.

L'analyse de l'évolution des SWI a été effectuée au pas de temps journalier et au pas de temps hebdomadaire.

La valeur moyenne des SWI a été établie sur la période 1993-2011, au pas de temps hebdomadaire, et au pas de temps journalier.

En synthèse, on peut retenir :

- En hiver (décembre-janvier), le SWI s'établit à une valeur de base correspondant à sa valeur moyenne (voisine de 1.1), il monte à des valeurs supérieures lors d'un épisode pluvieux puis rejoint la valeur de base en 7 à 8 jours s'il ne pleut pas.
- En automne, le SWI est globalement en phase de montée, sa valeur dépend fortement de la chronique des pluies sur les jours et les mois précédents (été).

3.1.3 Pluviogrammes des crues de 1973 et 1978

Les diagrammes pluviométriques des pluies des années 70 sont disponibles au SPC (format papier) sur les stations de Roquevaire et Aubagne. Les scans des relevés d'Aubagne et de Roquevaire ont été récupérés et exploités. Ils ont permis de recréer les hyétogrammes des pluies des crues d'octobre 1973 et de janvier 1978 au pas de temps 1h à Roquevaire et 30 minutes à Aubagne.

3.2 Données CUMPM/DEA

Les données brutes fournies par la CUMPM (Département Eau et Assainissement) comprennent des données pluviométriques sur 26 postes de la commune de Marseille (période 1988-2012), et des données limnimétriques sur une série de limnimètres, dont 3 sur l'Huveaune (Le Mouton, Saint Marcel, Ramon) et 2 sur le Jarret (la Bégude, Pugette) - (période 1996-2012).

La CUMPM a également fourni les rapports d'orages ayant touché la ville de Marseille disponibles depuis 1986. Ces rapports regroupent les informations et analyses recueillies et effectués par le service assainissement de la ville de Marseille et la SERAM. Ils synthétisent les données hydrologiques (cumuls de pluies aux stations, intensités maximales, hyétogrammes et limnigrammes), et décrivent les problèmes et incidents identifiés sur les différents points du réseau (points de débordements, cause des désordres, interventions...).

3.3 Données DREAL (Banque Hydro)

Il existe 6 stations de mesures limnimétriques gérées par la DREAL PACA sur le bassin versant de l'Huveaune. Seules 4 d'entre elles sont en service et présentent une plage de données de l'ordre de 15 ans.

La totalité des chroniques de hauteurs et de débits disponibles sur les stations de Saint-Zacharie, Roquevaire, Aubagne et Saint-Pons a été importée depuis la Banque hydro. Ces données à pas de temps variables viennent compléter celles du SPC qui ne concernent qu'une série d'évènements ponctuels.

La station de Saint Zacharie ne dispose pas de suffisamment d'années de mesures pour permettre l'estimation de débits de crue caractéristiques.

Les stations de Roquevaire et Aubagne ne dispose pas de suffisamment d'années de mesures pour permettre l'estimation de débits de crue caractéristiques au-delà des crues décennales.

3.4 Données Météo-France

3.4.1 Données pluviométriques

Des données pluviométriques complémentaires ont été commandées auprès de Météo-France sur 35 postes gérés par météo-France sur et au voisinage du bassin versant.

Les données recueillies sont les suivantes :

- pluies mensuelles des 3 mois précédant les crues historiques marquantes du bassin versant sur tous les postes en fonctionnement (1892, 1907, 1935, 1960, 1972, 1973, 1978, 1994, 1996, 2008), afin de disposer d'informations sur l'état de saturation des sols, et pluie maximale journalière le jour de la crue,
- pluies journalières des crues historiques et des épisodes bancarisés par le SPC,
- pluies horaires aux postes en fonctionnement pour une douzaine d'épisodes retenus entre 1997 et 2011, afin de pouvoir établir une comparaison avec les pluies de bassins fournies par le SPC et les pluies de Marseille, et d'avoir une idée de la répartition spatiale des pluies pour ces événements.

3.4.2 Données statistiques

Les données statistiques disponibles sur les postes pluviométriques du bassin versant ont été achetées à Météo-France. Il s'agit :

- Des durées de retour des fortes précipitations sur 1 jour aux postes de Cuges-les-Pins, Gémenos, Marseille-Observatoire, Roquefort-la-Bédoule, Roquevaire. Les données fournies comprennent également les valeurs maximales de l'échantillon traité. Les statistiques sont établies à partir de valeurs quotidiennes non centrées, relevées entre 6 heures et 6 heures UTC le lendemain.
- Des durées de retour des fortes précipitations sur des durées de 2 et 3 jours au poste de Marseille-Observatoire,
- Des coefficients de Montana sur le poste de Marseille Observatoire, pour des pluies de durées de 1min à 1h, de 1h à 6h et de 6h à 24h.

3.4.3 Données SHYREG

Les quantiles SHYREG ont été fournis par la DDTM pour 16 points situés sur le bassin, pour les durées 1, 2, 3, 4, 6, 12 et 24h et les périodes de retour 10, 50 et 100 ans.

La méthode Shyreg permet en principe une bonne estimation des quantiles de fréquence rare, car elle est basée sur un générateur aléatoire de pluies, et s'affranchit de l'extrapolation des lois d'ajustement statistique qui a lieu lorsque les séries d'observation ont des durées courtes. Elle permet de plus une régionalisation des quantiles sur la base de pixels d'1km².

4 Données historiques

Les données existantes concernant les crues historiques du bassin versant ont été recueillies lors des rencontres et discussions avec les communes et les divers interlocuteurs locaux, ainsi qu'au cours des visites des archives municipales et départementales. Des informations intéressantes proviennent également des études existantes, d'ouvrages historiques et de recherche menées sur internet.

La compilation des données a permis de dresser une chronique des évènements marquants identifiés depuis le 16^{ème} siècle, qui met en évidence une vingtaine de crues largement débordantes sur le bassin versant depuis le début du 16^{ème} siècle, soit une moyenne de 4 par siècle.

La plus forte crue connue est celle d'octobre 1892, dont la période de retour serait de l'ordre de 100 ans sur la partie aval du bassin versant.

Au cours du 20^{ème} siècle, 4 crues importantes ont été identifiées en 1907, 1935, 1960 et 1978, la crue de 1935 étant la plus forte.

La crue de 1907 est localisée sur l'aval du bassin versant, ses conséquences seraient sensiblement égales à celles de 1892 à Marseille.

Les crues de 1935 et 1960 sont surtout marquantes à l'amont de Roquevaire (période de retour estimée de 15 à 20 ans en 1960, supérieure en 1935). Les pluies sont localisées en amont du bassin versant. En 1960, un phénomène d'écrêtement a contribué à atténuer les débits de pointe sur la zone aval du bassin entre Aubagne et la Penne sur Huveaune.

La crue de 1978 est la crue débordante la plus récente et concerne tout le bassin versant. Elle fut générée par une averse longue et généralisée sur tout le bassin, intervenant sur un karst saturé. Un épisode de pluie assez similaire a eu lieu en 1973, mais ses conséquences ont été moindres car il s'est produit sur un sol non saturé.

Sur Saint Zacharie, c'est la crue de 1935 qui semble être la plus forte crue historique, mais c'est celle de 1978, plus récente, qui reste dans les mémoires.

Toutes ces analyses précédentes montrent qu'il n'y a pas eu récemment de forts épisodes pluvieux sur le bassin versant de l'Huveaune et donc de forte crue associée. En effet les cumuls de pluies maxima ont été de l'ordre de 300mm, sur des zones peu étendues, ce qui est nettement inférieur aux forts cumuls de pluie que l'on peut attendre sur le pourtour méditerranéen français. En effet les épisodes de crue marquant de l'arc méditerranéen (type Vaison la Romaine, Nîmes, Draguignan ...) étaient de l'ordre de 400mm sur des superficies de bassin versant plus importantes.

Sur Saint Zacharie l'ensemble des repères de crues historiques relevés est fourni en [Annexe 1](#).

5 Données topographiques utilisées

5.1 Données LIDAR

Une campagne de relevés du fond des vallées de l'Huveaune, du Jarret et de leurs affluents a été réalisée par technique LIDAR en août 2010 (OPSIA). Ces données comprennent :

- un Modèle Numérique de Surface (MNS), représentant le relief avec le sur-sol (végétation et bâti) sous la forme d'une grille régulière au pas de 2 m (format ASCII et compatible Mapinfo),
- un Modèle Numérique de Terrain (MNT), sans sur-sol, sous la forme d'une grille régulière au pas de 2 m (format ASCII et compatible Mapinfo),
- un semi de points classés en deux catégories (sol et sur-sol), géoréférencés et cotés en altitude (XYZ) de la même densité que le levé laser brut (formats ASCII, compatibles Mapinfo et DXF).

Acquisition des données :

Pour cette mission les paramètres d'acquisition des données étaient les suivantes :

- Densité de points : 4pts/m²
- Hauteur de vol : 600m
- Espacement entre les lignes : 450m

Traitement des données :

Après l'acquisition, Le traitement de données Lidar est fait sur 4 phases qui sont résumés ci-dessous :

- 1 Calcul de la trajectographie GPS – IMU : Précision Altimétrique **3 à 4 cm**
- 2 Calcul des semis de points Lidar : Précision Altimétrique **10 cm**
- 3 Filtrage et classification des points Sol : Précision Altimétrique **15 cm**
- 4 Calcul du MNT et du MNS : Précision Altimétrique **15 cm**

Contrôle des données:

Afin de s'assurer de la précision du levé Lidar, des relevés terrestres précis par GPS répartis sur l'ensemble du secteur d'étude ont été réalisés.

Les statistiques issues des comparaisons entre les données Lidar et les données GPS au sol, ont abouti à une erreur quadratique moyenne (EMQ) de **7cm**.

5.2 Levés topographiques complémentaires

Le linéaire total des cours d'eau à modéliser est de l'ordre de 125 km, dont 100 km en amont de Marseille et 25 km à Marseille.

Des travaux topographiques complémentaires ont été réalisés dans le cadre de la présente étude. Ils concernent la morphologie des lits mineurs des cours d'eau à modéliser, les éléments ponctuels structurant les vallées et pouvant contrôler les écoulements en crue (digues, ouvrages de franchissement, ouvrages souterrains, remblais...), et les Plus Hautes Eaux recensées sur le secteur d'étude.

Ces travaux de levés ont été réalisés par la société de géomètres experts Hydrotopo.

Sur l'ensemble des relevés du Bassin Versant de l'Huveaune, une dizaine de repères de nivellement de l'IGN ont été comparés aux relevés afin de calculer la précision des levés. **La précision altimétrique des relevés est de 5cm.**

Sur la commune de Saint Zacharie, ont été relevés :

- **17 profils en travers**
- **22 ouvrages**
- **2 relevés de plus hautes eaux (PHE)**

Ces relevés en lit mineur ont permis de préciser les profils en travers issus du LIDAR utilisés par l'étude SCE.

Ces relevés sont disponibles sur le support USB accompagnant cette étude.

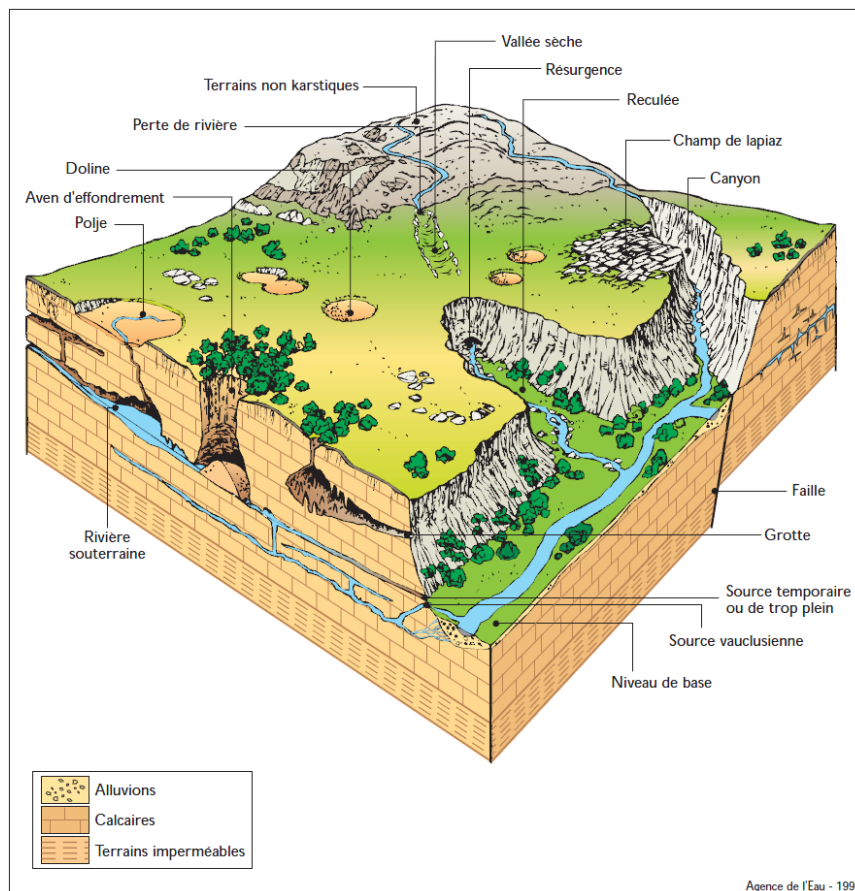
Chapitre 4 - Analyse hydrologique

1 Prise en compte du karst

1.1 Présentation générale du système karstique

La karstification consiste en la transformation d'une formation carbonatée fracturée (l'aquifère carbonaté fissuré) caractérisé par une architecture géologique, en un aquifère karstique, du fait de l'érosion hydrochimique et hydraulique. C'est donc la circulation d'eaux dans la formation géologique qui façonne les vides de l'aquifère (allant de fissures d'ouverture micrométrique et longues de plusieurs mètres jusqu'à des conduits de quelques dizaines de mètres et longs de plusieurs kilomètres) et induit des caractéristiques spécifiques. Toutes les régions karstiques présentent la marque de plusieurs phases de karstification, dont seules les plus récentes participent au fonctionnement de l'aquifère : il convient donc de considérer la fonctionnalité karstique de l'aquifère, et de ne pas se contenter de constater l'existence de phénomènes karstiques.

Figure 3 : Paysage karstique (Agence de l'eau, 1999)



Dans l'aquifère karstique, les écoulements ont créé des vides organisés en une structure hiérarchisée de drainage, le réseau de conduits, de l'amont (la surface) vers l'aval (la source, exutoire en général

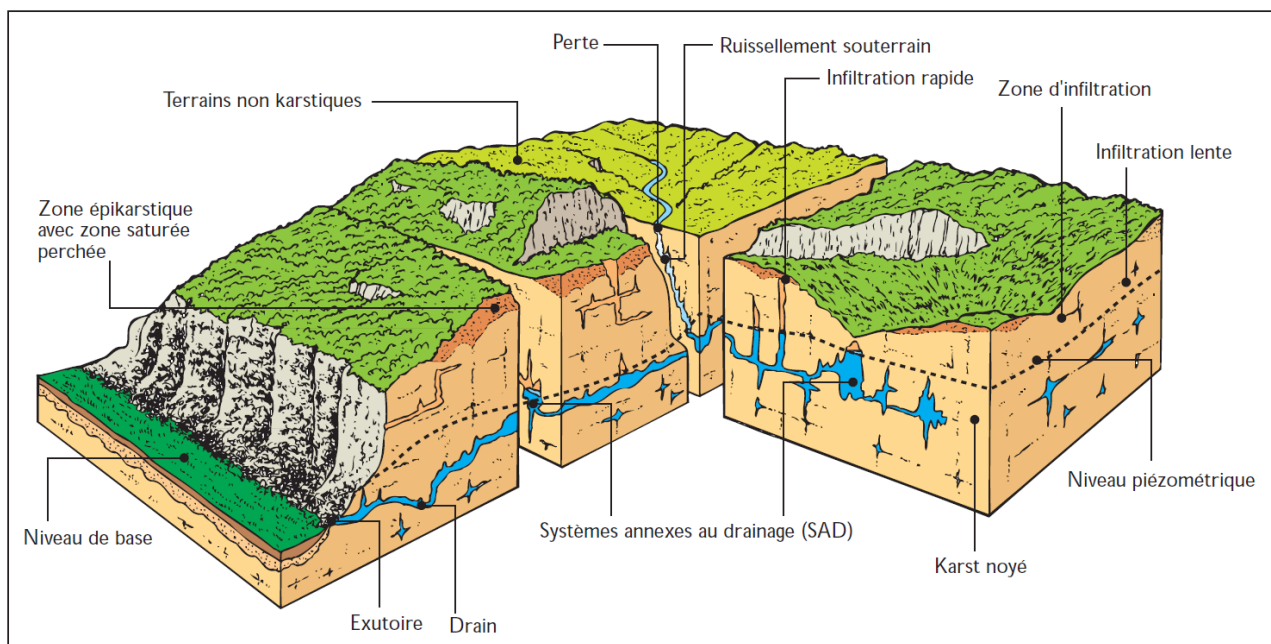
unique de l'aquifère). Souvent, au cours de la saison de recharge de l'aquifère, des remontées importantes de l'eau dans le réseau de conduits provoquent l'inondation de réseaux supérieurs, habituellement sans écoulement, et la mise en fonctionnement de sources temporaires de trop plein.

L'aquifère karstique présente une organisation des écoulements souterrains, qui détermine celle des vides qu'ils créent. Dans cette organisation, les deux fonctions classiques (stockage et drainage) sont séparées, au moins dans la zone noyée, et sont assurées par des éléments distincts de la structure :

- le drainage est assuré par un réseau de conduits hiérarchisé.
- le stockage est fourni soit par les parties microfissurées ou poreuses de la roche non karstifiée, soit par des cavités karstiques, parfois de grandes dimensions, connectées au drainage par des zones à fortes pertes de charge (Systèmes Annexes au Drainage, SAD).

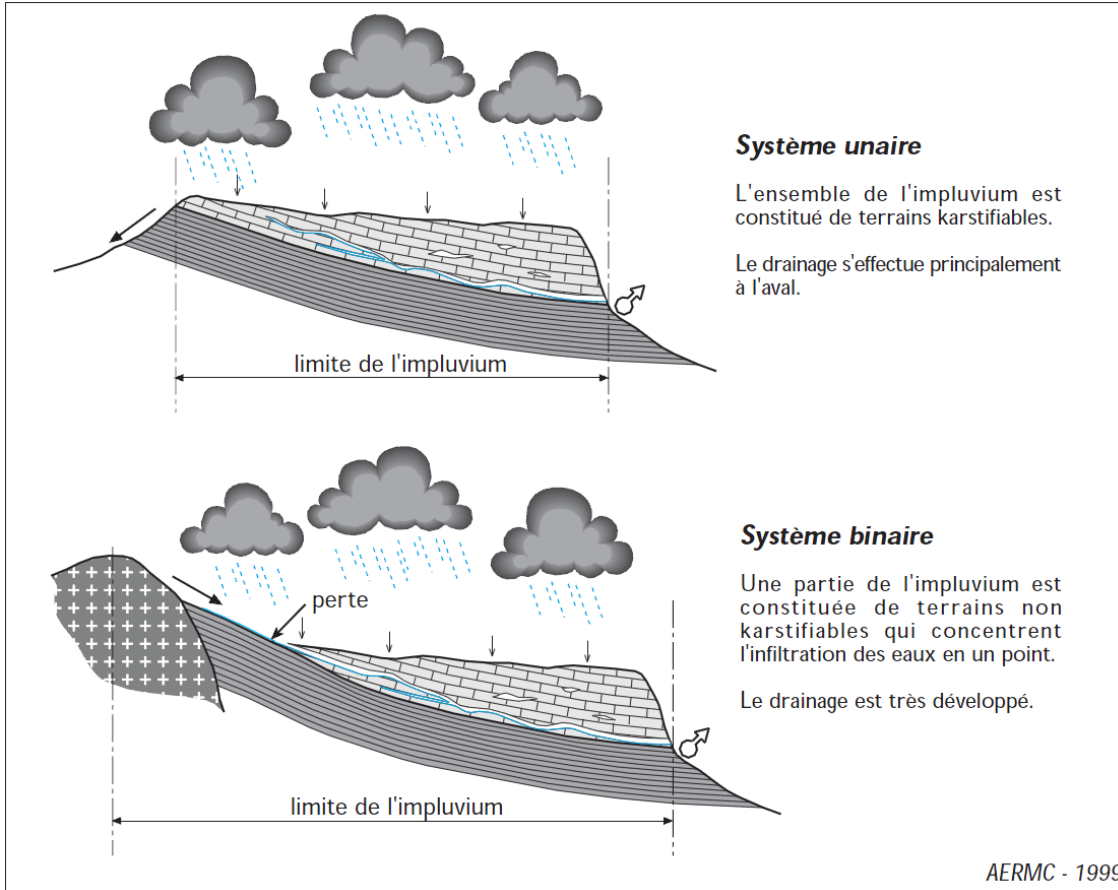
On notera que les vitesses d'écoulement souterrain vont de moins de quelques centimètres heure à plusieurs centaines de mètres par heure, selon les dimensions des vides, valeurs qui sont bien plus importantes que celles constatées dans les aquifères poreux. Par conséquent, le temps de séjour de la majorité des eaux est inférieur à un cycle hydrologique, et donc toutes les caractéristiques physiques, chimiques et hydrauliques présentent une très grande variabilité spatiale et temporelle.

Figure 4 : L'aquifère karstique (Mangin, 1975)



Les régions karstiques sont des milieux où l'eau est souvent absente en surface du fait de la grande perméabilité des terrains, notamment en raison de l'épikarst (zone plus perméable en raison de l'altération, en surface, sur quelques mètres de profondeur). On trouve deux types d'alimentation. D'une part, il y a l'alimentation par les précipitations, où on distingue les écoulements à infiltration lente avec possibilité de stockage temporaire, et ceux à infiltration rapide et concentrée qui rejoignent rapidement la zone saturée du karst sans nécessairement recharger significativement la zone non saturée : les limites du système correspondant aux limites de l'aquifère, on parle de système karstique uniaire. D'autre part, on retrouve l'alimentation par les pertes de rivière allochtone, où les écoulements provenant d'un bassin non karstique vont s'infiltrer rapidement : le système recevant des eaux précipitées sur une autre surface, on parle de système karstique binaire. A noter que la plupart des systèmes karstiques du bassin méditerranéen sont binaires.

Figure 5 : Les deux types de systèmes karstiques (AERMC, 1999)



Le karst a par ailleurs un impact lors des phénomènes de crue de surface. En effet, les inondations en milieu karstique se manifestent sous deux formes :

- une saturation des terrains en surface résultant de précipitations extrêmes, ce qui entraîne une saturation de la capacité d'absorption du karst (colmatage possible des drains et des fissures, sous dimensionnement des réseaux de drainage,...) ;
- une contribution rapide et intense des eaux karstiques aux écoulements de surface suite à une mise en charge du karst qui se traduit par une augmentation rapide du débit des émergences karstiques drainées par le cours d'eau.

Par ailleurs, en situation d'étiage, et compte tenu des fortes vitesses d'infiltration constatées, le karst permet d'absorber une partie non-négligeable des crues de surface.

On constate alors que le niveau de saturation du karst est un paramètre essentiel pour expliquer son rôle lors d'un phénomène de crue de surface.

Comme on peut le voir, les systèmes karstiques sont des ensembles complexes à analyser compte tenu du nombre important d'éléments qui entrent en jeu, et ce à des niveaux d'échelles différentes. Le karst est alors considéré dans une première approche comme une boîte noire, étudiée à partir de modèles faisant intervenir des mesures hydrologiques et hydrométriques.

1.2 Le système karstique du bassin de l'Huveaune

Comme évoqué précédemment, le bassin versant de l'Huveaune est hautement karstique, avec la répartition estimée suivante :

■ Massif de la Sainte Baume (Plan d'Aups compris)	77.0 km ²
■ Aurélien-Regagnas	39.5 km ²
■ Etoile Massif d'Allauch (+ La Salette)	85.5 km ²
■ Carpiagne, et chaînes méridionales	68.5 km ²

Ainsi, on estime à plus de 270 km² la surface totale des affleurements calcaires sur le bassin versant de l'Huveaune, ce qui représente plus de la moitié de la surface totale du bassin (source : J.J. Mazet). On retiendra notamment que la plupart de ces affleurements correspondent aux reliefs, situés dans la partie amont du bassin versant, en particulier au niveau de la Sainte Baume (Baou de Bertagne, altitude 1041m) et de l'Etoile (Grand Puech, altitude 781m).

Le système karstique du bassin versant de l'Huveaune apparaît comme un système complexe. Il est tout d'abord très difficile de le délimiter très précisément car, compte tenu des écoulements souterrains, le bassin versant réel est différent du bassin versant géographique, et les apports provenant de surfaces drainées à l'extérieur du bassin versant géographique peuvent être considérables.

Il semble cependant admis que des écoulements souterrains importants drainent une partie du karst vers l'extérieur du bassin versant de l'Huveaune, le bilan sur le bassin étant globalement négatif.

La synthèse des informations recueillies permet de décrire le fonctionnement global de la manière suivante :

- **Les écoulements dans le massif karstique se font avec un niveau de base à -300m, et avec plusieurs étages bien identifiés.**
- **Il existe un drainage horizontal profond, à l'origine de plusieurs rivières souterraines ayant leur exutoire en mer (Port Miou, Sormiou). Les pertes semblent plus importantes sur la partie Sud-Ouest de la Ste Baume.**
- **Massif de la Ste Baume : superposé au drainage horizontal profond, il existe des compartiments verticaux à l'origine des différences sources dans le massif (sept compartiments). Les écoulements Sud et Ouest sont dirigés hors du bassin de l'Huveaune. Les sources ont des fonctionnements différents : la source de St Pons drainerait l'épikarst de la partie Ouest de la Ste Baume. Les sources ont des fonctionnements qui peuvent être assez différents.**
- **Le massif du Garlaban devrait alimenter l'Huveaune via le karst, des analyses sont prévues dans le cadre de l'étude BRGM en cours. Des pertes auraient lieu également vers le plateau de la Mure.**
- **Massif de l'Etoile : très forte infiltration, pertes vers l'extérieur du bassin de l'Huveaune**

- **La galerie de la mer draine le massif de l'Etoile, avec un débit de l'ordre de 1000 à 1200 m³/h. Il s'agit d'une conduite qui se rejette en mer, réalisée pour drainer des eaux de pompage de galeries minières de Gardanne, et qui de fait réalise également un drainage du massif. La capacité maximale est de 2,5 à 3 m³/s.**
- **Massif du Regagnas : pas de grands axes de circulation souterraine identifiés.**

2 Modélisation hydrologique

2.1 Modèle utilisé

La modélisation hydrologique du bassin versant de l'Huveaune a été menée à l'aide du logiciel AGYR, qui permet un découpage en sous-bassins versants, et la représentation de la transformation pluie-débit. C'est le modèle GR4 qui a été utilisé. Les tests réalisés notamment en vue de représenter la réponse des zones karstiques nous ont conduits à prendre en compte une fonction d'infiltration à partir du réservoir sol. Cela permet de reproduire les pertes importantes par infiltration qui alimentent le karst profond et sont drainées en dehors du bassin versant, et ne participent pas aux écoulements de surface.

Ce type de modèle représente de manière globale les différentes sources possibles d'écoulement pour générer le débit à l'exutoire : le ruissellement et les écoulements souterrains. Le modèle GR4 permet de représenter avec un nombre réduit de paramètres (4) à la fois les phénomènes de ruissellement et de transfert souterrain par l'intermédiaire du transfert dans deux réservoirs (le réservoir sol et le réservoir eau gravitaire), le débit calculé à l'exutoire étant composé du débit superficiel et du débit souterrain.

Le ruissellement sur les zones urbaines a été représenté à l'aide du modèle RERAM.

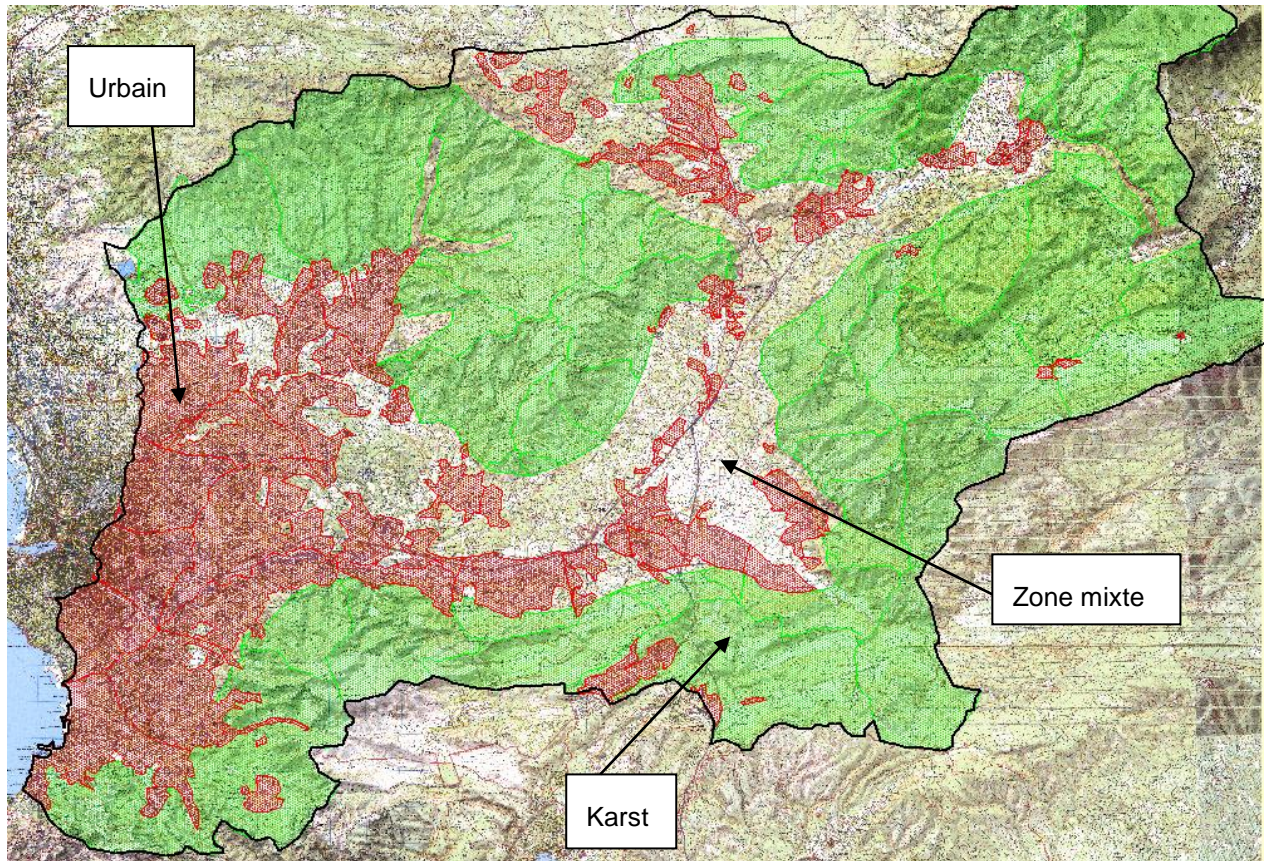
Les différents tests préalables réalisés nous ont conduits à distinguer pour chaque sous-bassin versant 3 composantes :

- Une composante karstique,
- Une composante urbaine,
- Une composante mixte.

La surface affectée à chaque composante a été définie à partir de la carte géologique du bassin versant et des caractéristiques de l'occupation du sol. La composante mixte correspond aux zones de dépôts alluvionnaires et/ou détritiques qui surmontent le calcaire karstique dans les vallées et en pied de versant.

Ce modèle a permis de prendre en compte les phénomènes hydrologiques karstiques du bassin versant.

Figure 6 Répartition des zones karstiques, urbaines et mixtes sur le bassin versant de l'Huveaune



2.2 Calage

Les modèles ont été calés sur les hydrogrammes de crue des crues récentes, et notamment la crue de décembre 2008. La crue de février 1978 a également été utilisée pour le calage, à partir des informations disponibles. Les crues historiques ont été utilisées pour la validation du modèle.

Le calage a été effectué aux stations hydrométriques, en distinguant les réponses différentes des parties karstiques et non karstiques des bassins versants, et celles des parties urbanisées. Un découpage du bassin versant en sous-bassins versants a été effectué, tenant compte de la position des stations hydrométriques et des différents massifs karstiques identifiés. A ce découpage est superposé un découpage en zones de lame d'eau : 6 zones de lame d'eau ont été prises en compte dans le calcul pour tenir compte de la répartition spatiale de la pluviométrie pour les différentes crues simulées.

3 Estimation des débits caractéristiques

3.1 Méthodologie pour l'estimation des débits caractéristiques

Les débits caractéristiques ont été estimés à partir de pluies de projet de même période de retour. Le modèle hydrologique détaillé a été utilisé, afin d'obtenir des débits cohérents aux différentes échelles spatiales. Le modèle hydrologique a donc permis d'obtenir les hydrogrammes de chaque sous bassin versant, pour différents scénarios de pluies. Ces hydrogrammes ont ensuite été injectés dans les modèles hydrauliques.

Ainsi les débits caractéristiques présentés en cartographie de synthèse sont issus des résultats des modèles hydrauliques, après propagation des hydrogrammes le long des linéaires modélisés.

Les hypothèses de calcul sont décrites ci-dessous. Elles concernent :

- La durée et la forme des pluies,
- La répartition spatiale des épisodes sur le bassin,
- L'état initial représenté par l'indice SWI. Compte-tenu de l'importance de ce paramètre, des tests de sensibilité ont été effectués.

L'analyse de la répartition spatiale des épisodes pluvieux importants sur le bassin de l'Huveaune (tels qu'octobre 1892, décembre 2003, janvier 1978) montre que la partie intense de l'épisode peut concerner une surface de l'ordre de 200 à 300 km². Il serait par conséquent pessimiste de considérer un épisode intense touchant l'ensemble du bassin de l'Huveaune. De plus, dans le cas d'épisodes très intenses comme celui d'octobre 1892, l'épicentre de l'épisode concerne une zone de taille plus réduite, qui peut atteindre environ 50 à 70 km². Les valeurs de pluies caractéristiques définies précédemment à partir des quantiles Shyreg corrigés correspondent à la pluie maximale « locale » qui peut être observée dans la zone de l'épicentre (elles résultent d'analyses de données à des postes pluvios).

La construction des épisodes de projet a été effectuée en tenant compte des formules d'abattement spatial établies par l'Irstea suite à des réanalyses d'images radar.

Les épisodes de projet ont ensuite été construits en considérant des incréments de surface de l'ordre de 60km², soit un découpage du bassin-versant complet en 8 sous-zones. Chaque épisode prend en compte les 8 sous-zones avec un coefficient d'abattement spatial différent, de façon à obtenir pour chaque surface cumulée la valeur de l'abattement global correspondant.

Plusieurs épisodes de projet ont été construits, correspondant à différents scénarios de positionnement de la partie intense de l'épisode sur le bassin de l'Huveaune. En effet, les analyses précédentes ont montré de nombreux types de réponses du bassin versant en fonction de la pluie (plutôt karst, plutôt urbain, ou mixte). Il n'y a donc pas à priori de zone de pluie « préférentielle » générant les fortes crues.

Les zones voisines de la zone intense sont ensuite affectées d'un coefficient d'abattement spatial qui diminue progressivement en fonction de l'éloignement, le coefficient étant calculé de manière à obtenir le coefficient voulu pour la surface cumulée.

Au total, 16 épisodes sont construits, de durée 24h.

	Position de la zone intense
Episodes 1a.1, 1a2, 1a3	Amont St Zacharie (LH1a)
Episodes 1b1, 1b2, 1b3	St Zacharie - Auriol (LH1b)
Episodes 2.1, 2.2	Merlançon (LM1)
Episode 3a	Maïre (LH2a)
Episode 3b	Aubagne (LH2b)
Episodes 4.1, 4.2	Jarret amont (LJ1)
Episodes 5.1, 5.2	Marseille (LH4)
Episodes 6.1, 6.2	La Penne (LH3)

Tableau 3 : Caractéristiques des épisodes de projet sur le bassin de l'Huveaune

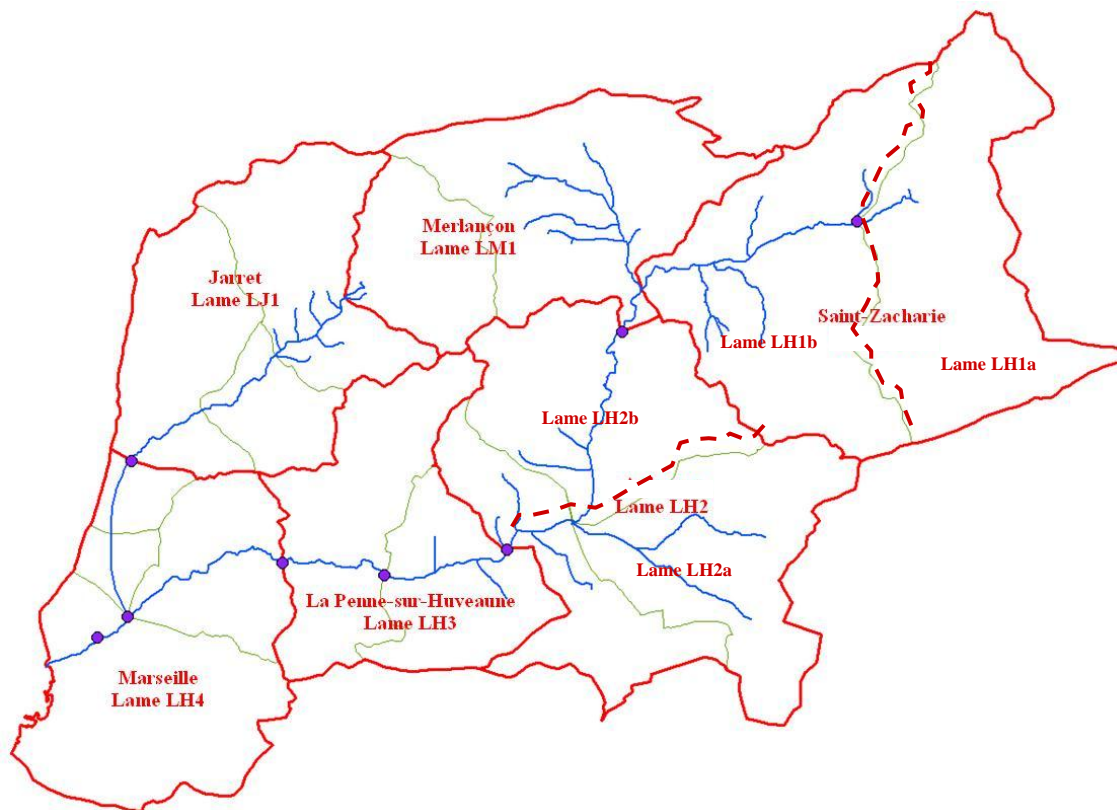


Figure 7 : répartition spatiale des pluies

On retient l'hypothèse d'un SWI égal à 1.2 au début de l'épisode de 24h qui va générer la crue.

3.2 Calcul des débits caractéristiques

3.2.1 Mise en œuvre du modèle hydrologique

Le modèle hydrologique a été mis en œuvre pour les épisodes de projet définis précédemment, (16 épisodes définis), et avec des conditions initiales de SWI égales à 1.2, afin de calculer les apports des bassins versants. Ces apports sont ensuite intégrés en entrée des modèles hydrauliques.

3.2.2 Mise en œuvre du modèle hydraulique

Après calage, les modèles hydrauliques mis en œuvre ont été exploités pour les crues de projet. Ils ont été utilisés pour préciser les conditions d'écoulement dans les tronçons présentant des débordements significatifs et ayant un impact sur la forme de l'hydrogramme.

Comme les modèles hydrologiques, les modèles hydrauliques ne sont calés que sur des crues moyennement débordantes (crue de février 1978 notamment), ou très peu débordantes (décembre 2008). Cependant, les modèles hydrauliques ayant, eux (contrairement aux modèles hydrologiques), une bonne représentativité des écoulements en lit majeur, ils permettent de préciser les conditions d'écoulement pour les fortes crues.

Les résultats obtenus amènent aux constats suivants :

- De manière générale, la propagation de la crue centennale est un peu plus lente que celle de la crue de 1978, du fait de débordements plus importants : le temps de propagation est de l'ordre de 6h entre St Zacharie et Marseille en crue centennale,
- Huveaune en amont du Merlançon : l'hydrogramme se déforme peu
- Confluence Huveaune-Merlançon : la pointe du Merlançon passe à la confluence un peu avant celle de l'Huveaune amont, la propagation sur le Merlançon est également ralentie pour les forts débits et débordements associés, ce qui favorise la concomitance.
- Huveaune entre Roquevaire et le Pont de l'Etoile, l'hydrogramme se déforme peu
- Huveaune entre le pont de l'Etoile et la station d'Aubagne (aval A50) : cette zone est complexe, du fait de la présence d'ouvrages, des débordements de l'Huveaune vers la Maïre et de l'étalement de la Maïre avant la confluence avec l'Huveaune. La zone inondable est ici très large.
- Maïre : l'apport de la Maïre est très retardé par l'étalement dans la plaine, et l'hydrogramme subit un laminage très important. On peut assimiler ce fonctionnement à celui d'une zone de stockage. Du fait de la forme très plate de l'hydrogramme à l'exutoire. Il y a concomitance avec la pointe de l'Huveaune. Le débit max de la Maïre à son exutoire est de l'ordre de 40 m³/s (y compris la dérivation du Merlançon d'Aubagne), alors que les apports pourraient générer un débit total de l'ordre de 100 m³/s.
- A La Penne sur Huveaune les débordements sont très importants, notamment en rive droite, et submergent l'autoroute et la voie ferrée. Les apports sur le secteur sont néanmoins importants et le débit de pointe augmente vers l'aval. L'écrêtement du fait des débordements en lit majeur est donc limité.
- Sur le Jarret de manière générale il n'y a pas de déformation d'hydrogramme, du fait notamment de l'artificialisation importante du secteur. Les débordements se font en amont des parties enterrées de Plan de Cuques et l'écoulement se propage alors vers l'aval via les rues en surface. On a également des débordements au niveau du stade. En aval, c'est dans le quartier de La Rose

que les débordements sont les plus importants : la canalisation sous le nœud routier de la N1547 et de la RD4c est insuffisante et l'eau passe en surface sous la Rn via la RD908.

- Sur Marseille les débordements importants en amont de la confluence avec le Jarret lamine quelque peu la crue. La confluence avec le Jarret amène de nouveau une hausse importante de débit, néanmoins la pointe de crue du jarret passe avant l'arrivée de la pointe de crue de l'Huveaune.

Ces éléments ont été pris en compte dans le modèle hydrologique afin d'améliorer sa représentativité pour les fortes crues, d'être cohérent avec les modèles hydrauliques, et de pouvoir utiliser le modèle hydrologique pour les tests de sensibilité (gains en temps de calcul).

Ainsi, le paramètre de la propagation a été modifié sur certains tronçons dans le modèle hydrologique. En particulier sur la Maire, les conditions d'écoulement ont été modifiées pour tenir compte de l'écrêtement très important des débits dans la plaine en amont de la confluence avec l'Huveaune.

Le modèle hydrologique permet de représenter ces phénomènes par l'ajustement d'un paramètre : le retard en fonction du débit.

3.2.3 Débits caractéristiques

Les débits de pointe maximaux obtenus aux principaux points de calcul pour les périodes de retour 100 ans, 50 ans et 10 ans sont présentés dans le tableau suivant.

Ce sont donc les débits de crue résultants des simulations hydrologiques et hydrauliques.

L'épisode générant le débit maximal est indiqué pour la période de retour 100 ans, ainsi que le débit spécifique.

Sur Saint Zacharie, l'épisode de pluie donnant le débit maximal est l'épisode 1a.1, dont la zone intense est centrée sur l'amont du bassin versant de l'Huveaune (partie karstique).

Remarque : les débits de la crue exceptionnelle ont été obtenus en multipliant les débits de pointe des apports des modèles hydrauliques par 2, conformément aux souhaits de la DDTM13. Les résultats sont également fournis dans le tableau de synthèse ci-dessous.

Tableau 4 : Débits caractéristiques maxima du BV de l'Huveaune

Point de calcul	Période de retour	100 ans			10 ans	50 ans	Exceptionnel
		Débit de pointe (m3/s)	Débit spécifique (m3/s/km2)	Episode générant le débit de pointe			
Huveaune	Surface drainée (km2)	Débit de pointe (m3/s)	Débit spécifique (m3/s/km2)	Episode générant le débit de pointe	Débit de pointe (m3/s)	Débit de pointe (m3/s)	Débit de pointe (m3/s)
Saint Zacharie	56.0	124	2.21	1a.1	50	110	285
Auriol (amont confluence Merlançon)	116.6	230	1.97	1a.1	70	170	350
Roquevaire (aval confluence Merlançon)	165.8	297	1.79	1a.1	110	220	540
Aubagne (amont confluence Maire)	207.6	341	1.64	1a.3	115	240	615
Aubagne (station)	281.0	360	1.28	1a.3	135	275	660
Le Mouton	305.2	374	1.23	1a.3	140	295	665
Saint Marcel	339.9	400	1.23	1a.3	150	325	780
Marseille (amont confluence Jarret)	361.5	360	1.00	1a.3	150	260	675
Marseille (aval confluence Jarret)	463.2	460	0.99	1a.3	220	340	960
Le Merlançon							
Souque Nègre - confluence	25.1	67	2.65	2.2	32	52	115
Exutoire	47.9	105	2.2	2.2	53	87	240
La Maire							
Fauge (amont confluence Maire)	15.6	57	2.9	3.a	25	45	120
Maire (amont confluence Fauge)	16.6	20	2.11	3.a	7	15	39
Le Jarret							
Plan de Cuques – amont urbain	21	41	1.95	4.1	16	31	80
Plan de Cuques – Bourdonnière	38	80	2.10	4.1	32	63	163
Plan de Cuques Roubauds	60	127	2.15	4.1	56	102	256
Aval croix Rouge	69	152	2.20	4.1	62	120	342
La Bégude	92	205	2.24	4.1	80	155	430
La Pugette	102	202	1.98	4.1	90	175	430

Pour les petits affluents modélisés en régime permanent, les débits obtenus et modélisés ont été obtenus par la méthode des transferts surfacique à partir des débits des bassins versants principaux calés précédemment, et ce pour chacune des 3 composantes (karst, mixte et urbain).

Tableau 5 : Débits caractéristiques retenus à Saint Zacharie

Cours d'eau	Débit exceptionnel retenu (m3/s)	Débit centennal retenu (m3/s)	Débit cinquantennal retenu (m3/s)	Débit décennal retenu (m3/s)
Huveaune	285	124	110	50
Fenouilloux amont	36.0	18.0	14.9	8.3
Fenouilloux aval	40.0	20.0	15.8	9.9

Chapitre 5 - Etude hydraulique

1 Données générales sur les modélisations hydrauliques

1.1 Choix des types de modélisation

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 (monodimensionnels),
- les logiciels 2D (bidimensionnels),
- 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.

Précisions sur la modélisation hydraulique 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.

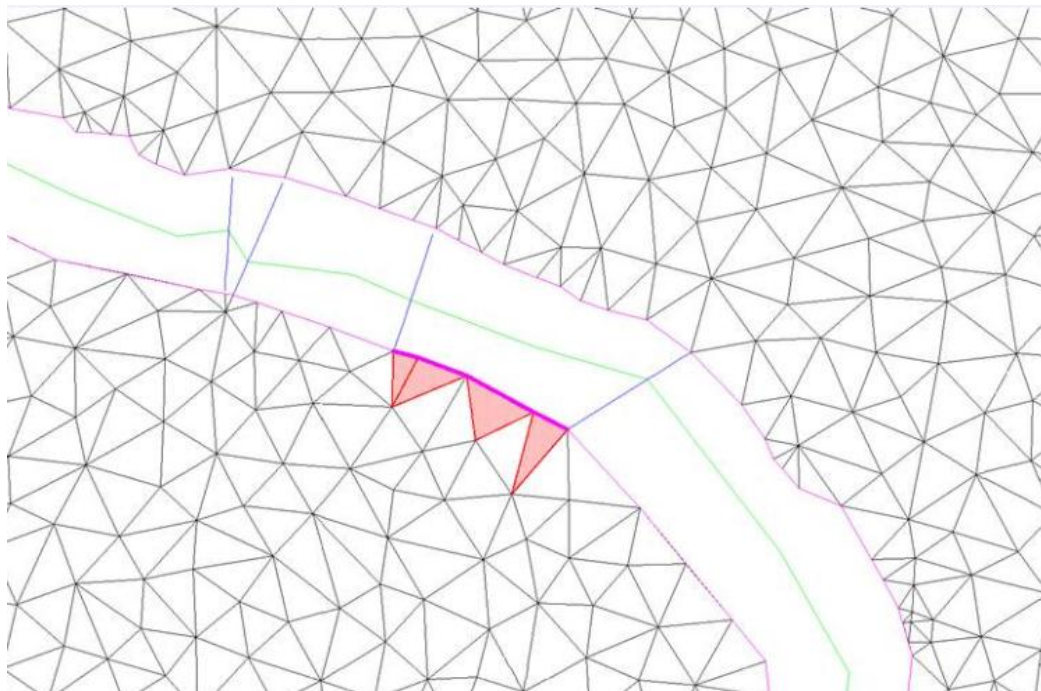


Figure 8: exemple de liaison 1D/2D

Les modèles comprennent le lit mineur des cours d'eau modélisés en 1D et le lit majeur dans la totalité de la zone inondable hydrogéomorphologique, soit une emprise variant selon les secteurs de 100m à 2.5km de large.

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

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).

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 ...).

Ci-dessous un exemple de maillage avec les bâtiments enlevés.



Figure 9 : Exemple de maillage avec bâtiments enlevés pour former des « îles » (pas de passage d'eau)

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 (variation du débit en fonction du temps).

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 permet 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 de crue.

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

1.3 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).

2 Les modèles réalisés sur Saint Zacharie

Sur la commune de Saint Zacharie, il a été réalisé (cf. figure 2) :

- Un modèle 2D sur l'Huveaune
- Un modèle 1D sur le vallon de Fenouilloux.

2.1 Description des modèles

Les modèles hydrauliques ont été construits à partir de profils en travers du lit mineur issus des relevés topographiques effectués par le géomètre, le cabinet Hydrotopo.

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.

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.

2.1.1 Modélisation 2D de l'Huveaune

La modélisation de l'Huveaune à la traversée de la commune de Saint Zacharie est intégrée dans le modèle général « Modèle Huveaune Amont et Merlançon » qui s'étend sur un linéaire d'environ 16.5km. (cf figure 10).

- **Modèle Huveaune amont et Merlançon** :
 - l'Huveaune de l'amont de Saint Zacharie à l'amont de Roquevaire,
 - Le Merlançon.

A noter que 3 secteurs sont modélisés en 1D sur ce grand modèle : les extrémités amont de l'Huveaune (gorges sur la partie amont de Saint Zacharie) 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).

Les caractéristiques principales du modèle sont synthétisées dans le tableau ci-dessous :

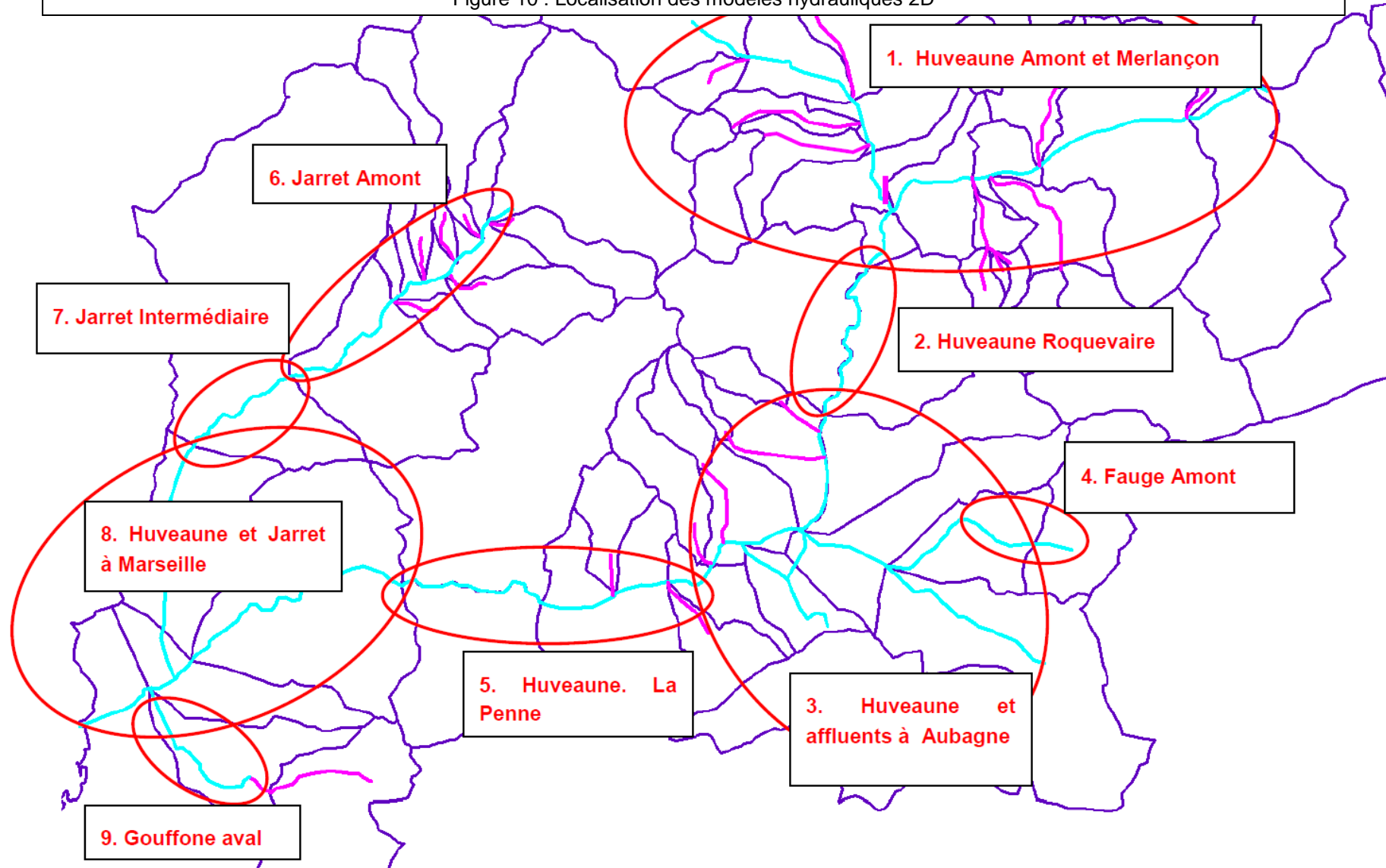
Nom du Modèle	Linéaire (Km)	Nombre de profils en travers	Nombre d'ouvrages	Nombre de mailles	Tailles maximum des mailles (m ²)
Huveaune-amont et Merlançon	16.5	260	33	90850	100

Tableau 6 : Caractéristiques du modèle hydraulique 2D

Les cartographies fournies en annexe cartographique numérique (clé USB) 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
- 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

Figure 10 : Localisation des modèles hydrauliques 2D



2.1.2 Modélisation 1D sur le vallon de Fenouilloux

Les détails de la modélisation de cet affluent 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.

Tableau 7 : caractéristiques principales du modèle hydraulique 1D sur St Zacharie

Cours d'eau principal	Nom de l'affluent	Longueur modélisée (m)	Nombre de profils en travers	Nombre d'ouvrages
Huveaune	Vallon de Fenouilloux	1800	52	13

Le vallon de Fenouilloux 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.

Cet affluent, de longueur importante, a été modélisé avec une injection de débit intermédiaire, afin de modéliser au plus juste graduellement et de manière réaliste les débits de crue.

Ci- dessous sont fournis les différentes caractéristiques du modèle 1D réalisé et les débits de projets injectés :

Avec : Ks = coefficient de rugosité de Strickler ; Qx = débit de pointe de période de retour x années, Qexcep = débit de pointe exceptionnel

Cours d'eau principal	Nom de l'affluent	Fourchette Ks lit mineur	Fourchette Ks lit majeur	Q100 amont (m ³ /s)	Q100 exutoire (m ³ /s)	Q10 amont (m ³ /s)	Q10 exutoire (m ³ /s)	Q50 amont (m ³ /s)	Q50 exutoire (m ³ /s)	Qexcep amont (m ³ /s)	Qexcep exutoire (m ³ /s)
Huveaune	Fenouilloux	20	5 à 10	18	20	8.3	9.9	14.9	15.8	36	40

Tableau 8 : Caractéristiques du modèle hydraulique 1D réalisés sur Saint Zacharie

2.2 Conditions aux limites

2.2.1 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.

Les points d'injection de débits sont cartographiés dans l'annexe cartographique numérique (support USB).

2.2.2 Condition aval

Deux conditions aux limites aval sont testées :

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

Une condition limite aval imposée

Concernant les affluents (les filaires 1D, ici le Fenouilloux), une concomitance avec une crue du cours d'eau récepteur (ici l'Huveaune) est considérée.

Dans ce cas, la condition limite aval n'est pas une hauteur normale, mais une cote d'eau imposée correspondant à la cote maximum du Jarret pour une période de retour donnée.

2.3 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 utilisés 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 : $K_s = 5$
- 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...).

2.3.1 Modélisation 2D : modèle Huveaune Amont et Merlançon

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.

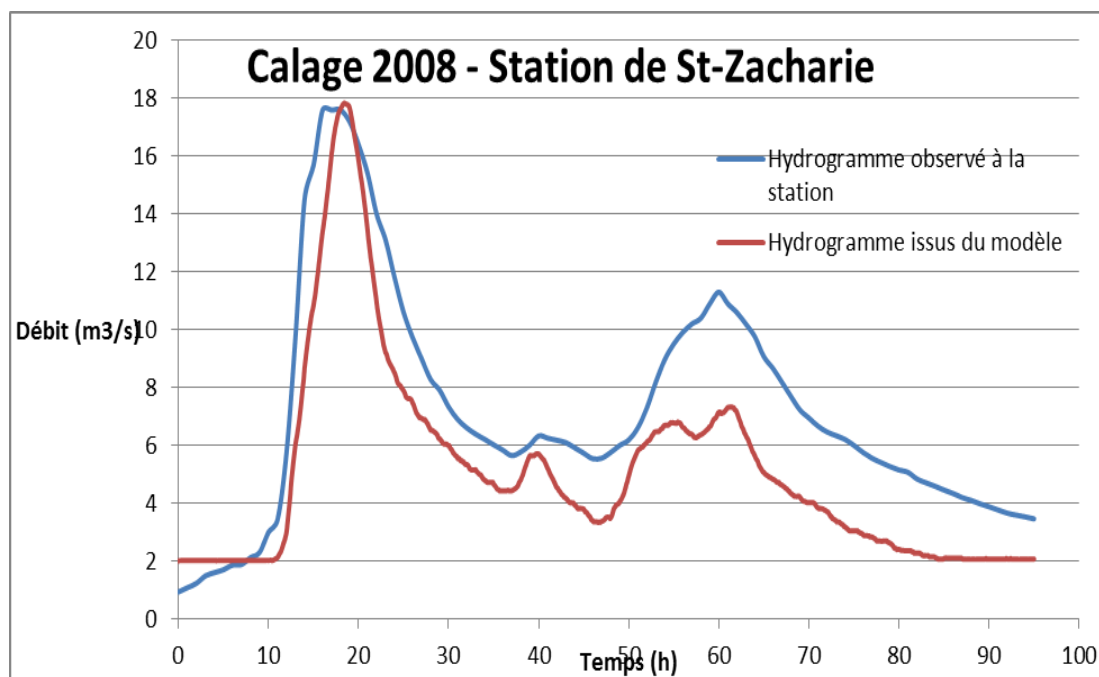


Figure 11 : calage de la crue de 2008 à St Zacharie

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 1^{ère} pointe de crue.

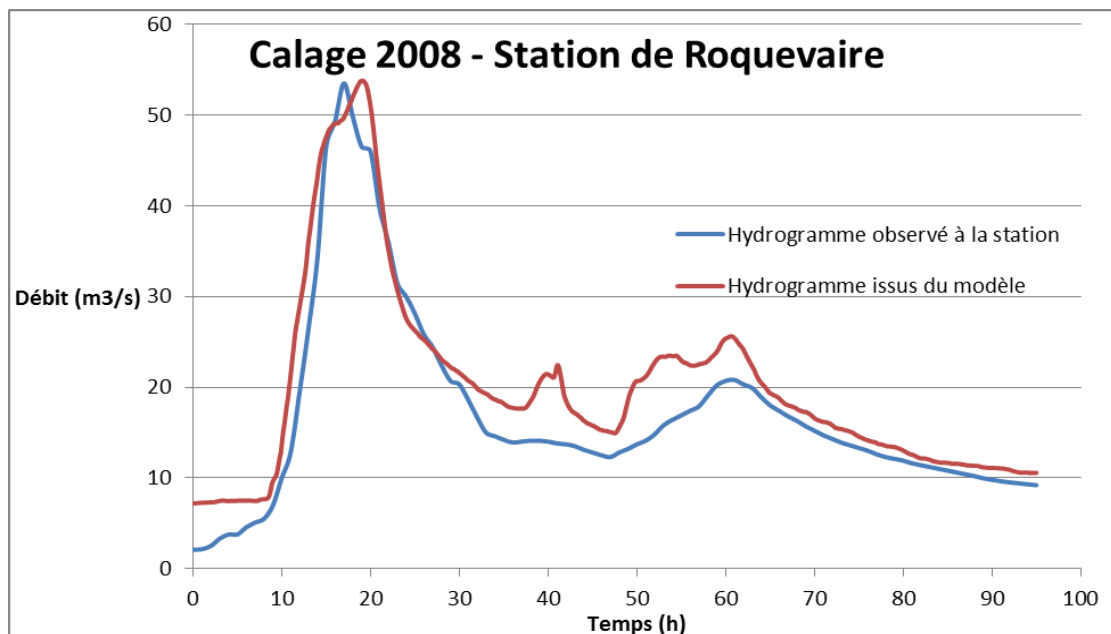


Figure 12 : calage de la crue de 2008 à Roquevaire

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 9 : Calage de la crue de 2008 pour le modèle Huveaune Amont

PHE 2008 001

PHE 2008 002



PHE 2008 003

Figure 13 : 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).

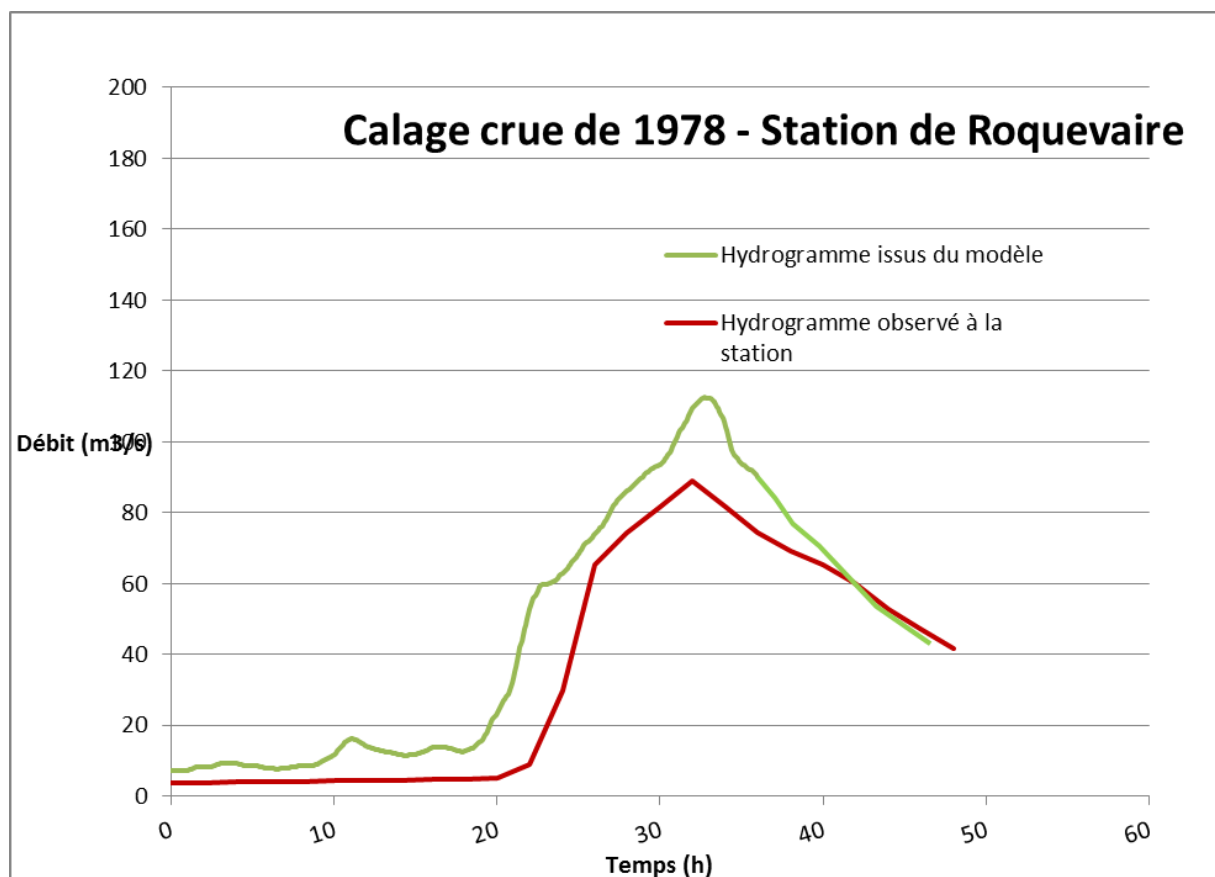


Figure 14 : Calage de la crue de 1978 à Roquevaire

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 10 : Calage de la crue de 1978 pour le modèle Huveaune Amont

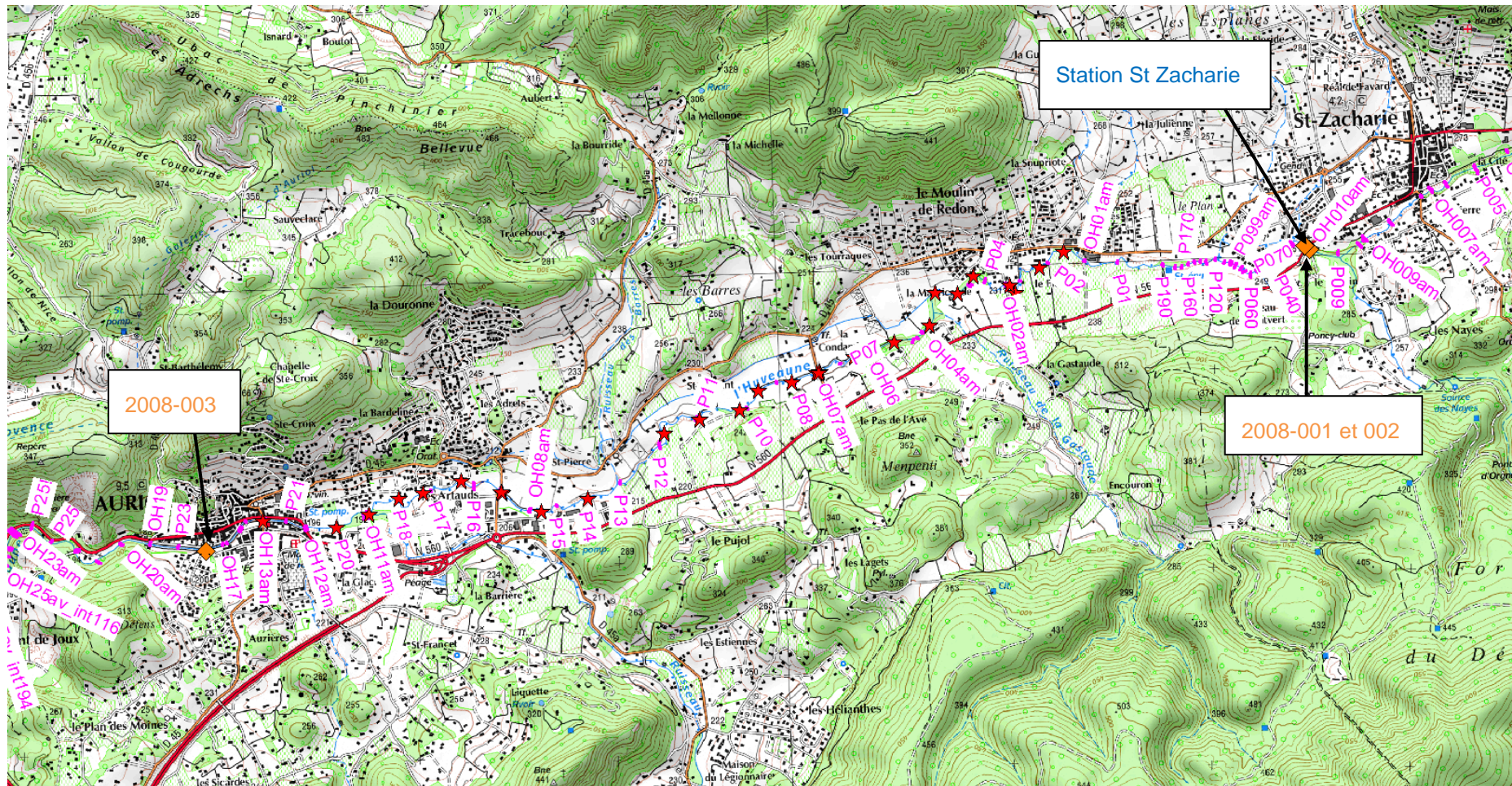


Figure 15 : Modèle Huveaune Amont : PHE 1978 (étoiles rouges) et 2008 (losanges orange)

2.3.2 Modélisation 1D

Le calage des différents modèles 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.

3 Résultats de l'étude hydraulique

3.1 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 (crues de référence),
- Les crues exceptionnelles.

Et ce pour chacun des scénarios de spatialisation de pluie testés.

3.2 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 (différence entre la cote d'eau calculée et la cote du terrain naturel).

3.3 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.

3.4 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.

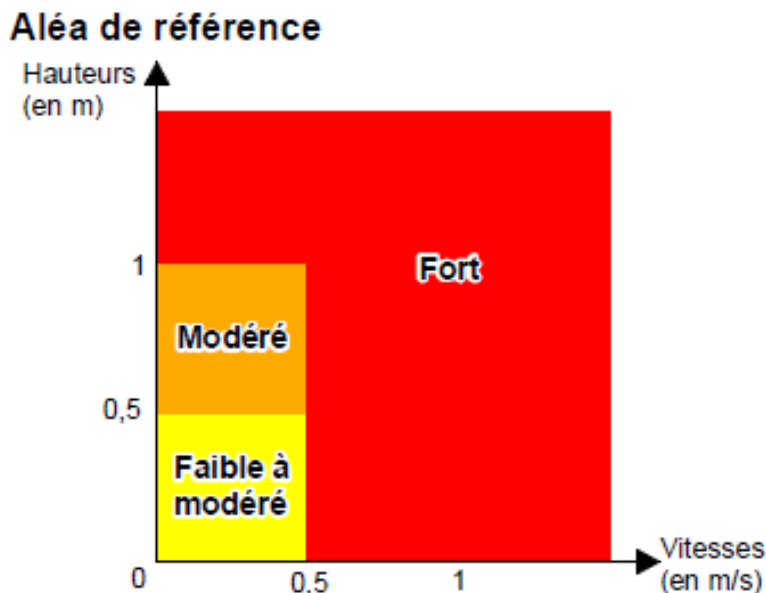


Tableau 11 : Grille d'aléa retenue – croisement hauteurs/vitesses

Cette grille de croisement est entre autre élaborée sur la base du retour d'expérience des événements 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.

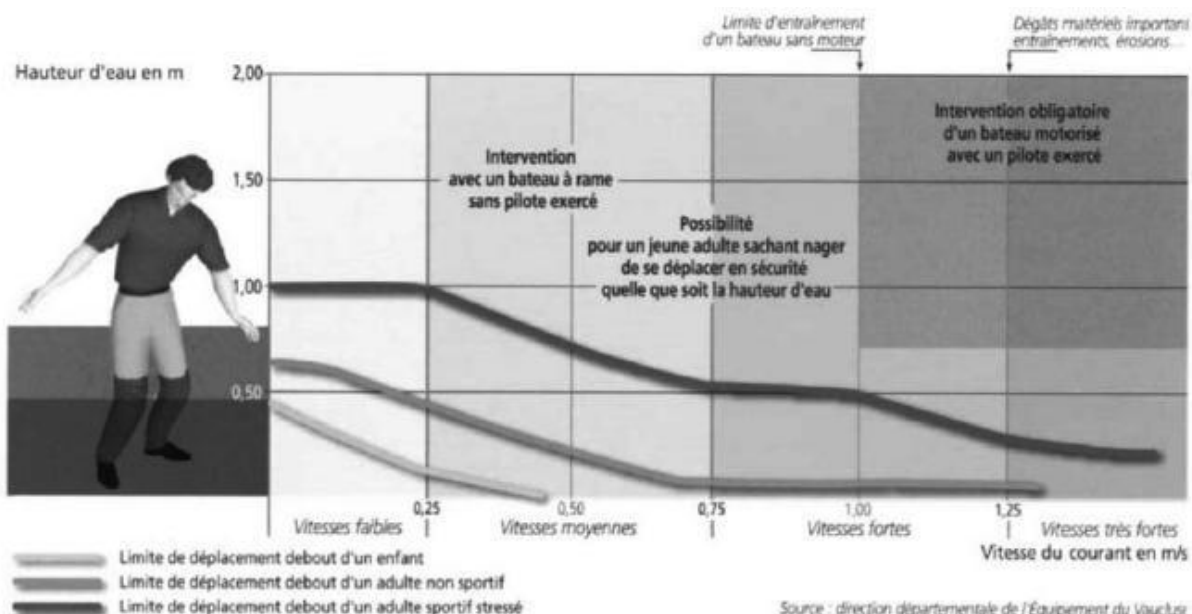


Figure 16 : limites de déplacements dans l'eau

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.

3.5 Les résultats fournis

Les annexes cartographiques fournies (Annexe 2), synthétisent les résultats obtenus sur la commune, au 1/5000 pour la crue de référence.

Les résultats concernant les autres crues de projet sont fournis sur le support USB joint à la présente étude.

De manière générale, sur la commune de Saint Zacharie, l'Huveaune dans sa partie amont engorgée ne déborde pas. La route nationale reste hors d'eau.

Plus en aval des débordements ont lieu au secteur resserré du pont de la RD480 (au niveau du centre ancien de la commune) qui forme un verrou hydraulique.

En aval les inondations s'élargissent dans la plaine et se généralisent en rives gauches et droites, inondant les lotissements. Le confluent avec le Fenouilloux dans ce secteur inonde d'autant plus la zone. De nombreuses habitations sont touchées.

Le Fenouilloux dans sa partie amont déborde peu en emprise, mais la route RD85 est submergée et donc impraticable.