



Direction Départementale des
Territoires et de la Mer des
Bouches-du-Rhône

Etude hydraulique sur le bassin
versant de la Cadière et du
Raumartin

**Rapport de Phase 3 :
construction et calage du modèle
hydraulique**

40145 | Mars 2018 | v.1



setec
hydratec



Agence de Vitrolles
5, chemin des Gorges de Cabriès
13127 Vitrolles
T : 04 86 15 62 50
F : 04 86 15 62 48

Directeur d'affaire : OVE
Responsable d'affaire : GFL
N°affaire : 016 40145
Fichier : 40145 CADIERE PHASE 3 modélisation.doc

Version	Date	Etabli par	Vérifié par	Nb pages	Observations / Visa
1	22/03/2018	GFL	BLN	70 (hors annexes)	Création

SOMMAIRE

1	INTRODUCTION.....	8
2	PRESENTATION DU LOGICIEL DE MODELISATION.....	9
2.1	Présentation générale	9
2.1.1	L'interface.....	10
2.1.2	Le moteur de calcul.....	11
2.2	Des schémas de modélisation adaptés aux systèmes étudiés et aux échelles de travail.....	11
2.3	Mise en œuvre et exploitation	13
2.3.1	Flexibilité d'utilisation	13
2.3.2	Traçabilité.....	13
3	CONSTRUCTION DU MODELE.....	14
3.1	Structure du modèle hydraulique	14
3.1.1	Lit mineur.....	14
3.1.2	Lit majeur.....	16
3.2	Couplages.....	20
3.2.1	Couplage 1D-1D.....	20
3.2.2	Couplage 1D-2D.....	20
3.3	Choix des modes de représentation.....	23
3.3.1	Têtes de bassin versant et secteurs urbanisés amont	23
3.3.2	Secteurs urbanisés aval.....	24
3.4	Modélisation des ouvrages singuliers	28
3.4.1	Ouvrages de franchissement	28
3.4.2	Ouvrages souterrains.....	30
3.4.3	Seuils et vannages	30
3.4.4	Les bassins de rétention	31
3.5	Conditions aux limites.....	34
3.6	Prise en compte des murs et infrastructures routières et ferroviaires en remblai	36
4	CALAGE.....	38
4.1	Choix des évènements de calage	38
4.2	Calage de la crue du 22 septembre 1993.....	38
4.2.1	Les données disponibles.....	38
4.2.2	Hyétoigrammes mesurés 22 septembre 1993.....	42
4.2.3	Les points de calage / hydrogrammes / laisse de crue	43
4.3	Vérification du calage avec la crue de septembre 2005	51
4.3.1	Les éléments disponibles.....	51
4.3.2	Les hyétoigrammes 10 septembre 2005	52

4.3.3	Les points de calage / laisses de crue	53
4.4	Vérification du calage avec la crue de Septembre 2009.....	55
4.4.1	Les éléments disponibles.....	55
4.4.2	Les hyétogrammes 18 septembre 2009	56
4.4.3	Les points de calage / hydrogramme.....	56
4.5	Paramètres de calage	57
4.5.1	Les différents paramètres de calage.....	57
4.5.2	Caractéristique des bassins versant actuels	59
4.6	Cartographie de la zone inondable de la crue de calage.....	61
4.7	Fonctionnement hydraulique du bassin versant (Crue de septembre 1993).....	63
4.7.1	Vitrolles – le Parc du Griffon	63
4.7.2	Vitrolles Le vallon de l'Infernet	64
4.7.3	Les Pennes Mirabeau le ruisseau de la Marthe	64
4.7.4	La Cadière entre la traversée de l'A7 et de la voie SNCF.....	64
4.7.5	La Cadière entre la voie ferrée et la D9 (Commune de Saint Victoret).....	65
4.7.6	La Cadière en aval de la D9 (Marignane) et la confluence avec le Raumartin.....	66
4.7.7	Le Raumartin sur les Pennes Mirabeau.....	67
4.7.8	Le Raumartin entre la traversée de l'Autoroute et de la voie SNCF	68
4.7.9	Le Raumartin entre la voie ferrée et Pas des Lanciers	69

ANNEXES

ANNEXE 1 : PRESENTATION DES PRINCIPAUX MODULES D'HYDRA	71
ANNEXE 2 : CARTES DES ZONES INONDABLES DE LA CRUE DE 1993	72

FIGURES

Figure 1 : Schéma de synthèse des domaines de schématisation disponibles et des liaisons hydraulique permettant leur connexion	12
Figure 2 : Emprise du modèle	14
Figure 3 : Exemple de biefs filaires 1D de cours d'eau sous Hydra – secteur de la Marthe.....	15
Figure 4 : exemple de profil en travers modélisé en 1D – section de la Marthe en amont de la confluence – vue vers l'amont	16
Figure 5 : Maillage s'appuyant sur les éléments structurant de la topographie - secteur du Raumartin (amont).....	17
Figure 6 : Maillage dans le cas d'une urbanisation régulière – secteur du Bondon.....	18
Figure 7 : Exemples de liaisons entre deux mailles dont la largeur est réduite par la présence du bâti	19
Figure 8 : Modélisation filaire 1D.....	20
Figure 9 : Modélisation couplée 1D-1D.....	20
Figure 10 : Maillage 2D appuyé sur les limites du domaine 1D (exemple vallon de l'Infernet).....	21
Figure 11 : Exemple de bief 1D immergé dans le maillage 2D (exemple ruisseau de la Marthe)	22
Figure 12 : Exemple de maillage 2D en secteur urbain avec voiries et rues (exemple secteur avenue de Lacanau sur Marignane).....	23
Figure 13 : Exemple de la modélisation filaire 1D de la tête de bassin du ruisseau de la Marthe	24
Figure 14 : Photographie de la chute sur le vallon de l'Infernet	25
Figure 15 : Profil en long de la Cadière du Vallon de l'Infernet jusqu'à son exutoire dans l'Etang du Bolmon.....	26
Figure 16 : Profil en long du Raumartin sur la commune des Pennes-Mirabeau jusqu'à sa confluence avec la Cadière	26
Figure 17 : Profil en long du Bondon depuis l'amont dans les Gorges jusqu'à sa confluence avec la Cadière	27
Figure 18 : Profil en long du Ravin d'Aix en amont du Griffon jusqu'à sa confluence avec le Bondon	27
Figure 19 : Photographies d'un pont sur le Bondon (amont parc du Griffon).....	29
Figure 20 : Représentation du plan topographique du pont sur le Bondon.....	29
Figure 21 : Représentation du pont sur le logiciel Hydra.....	29
Figure 22 : Entrée et sortie de la partie couverte de la cadière dans Marignane.....	30
Figure 23 : la cascade sur la Cadière à Saint Victoret.....	31
Figure 24 : Fonctionnement d'un bassin de rétention type.....	31
Figure 25 : Bassin de rétention à la confluence du vallon de l'Infernet et de la Marthe incluse dans le maillage 2D	32
Figure 26 : Bassin de La Tuilière à Vitrolles représenté par un casier avec un niveau d'eau imposé à l'état initial	32
Figure 27 : légende des figures précédentes sur les bassins de rétention	33
Figure 28 : Les connexions entre les étangs	34

Figure 29 : Niveau marin ente le 9 et le 13 septembre 2005 au marégraphe de Marseille	35
Figure 30 : Principaux remblais identifiés sur le bassin versant.....	37
Figure 31 : Photographie aérienne de 1992 - Marignane (source géoportail)	40
Figure 32 : Photographie aérienne de 2018 - Marignane (source google earth)	40
Figure 33 : Coefficient de ruissellement des sous-bassins versant pour la crue de calage – 22 septembre 1993.....	41
Figure 34 : Pluviométrie du 22 au 23 septembre 1993 à la station d'Aix-Les Milles (source SDEP 1999).....	42
Figure 35 : Hydrogramme mesuré (en bleu) / estimé (en rouge) à la station hydrométrique pour la crue de septembre 1993.....	43
Figure 36 : Pluviométrie du 22-09-93 au 23-09-93 (source Délimitation des zone inondable de la Cadière du Bondon et du Ravin d'Aix – Mairie de Vitrolles - SIB janvier 1998)	45
Figure 37 : Comparaison des hydrogramme de septembre 1993.....	46
Figure 38 : Données de débits jugées incertaine par la gestionnaire	46
Figure 39 : Pluie de calage de septembre 1993.....	48
Figure 40 : Profil en long de la Cadière du vallon de l'Infernet à l'Etang de Berre et ligne d'eau de septembre 1993.....	48
Figure 41 : Zoom sur la partie aval du profil en long de la Cadière.....	49
Figure 42 : tableau des débits issus de la bibliographie.....	50
Figure 43 : Localisation des points stratégiques de comparaison des débits	51
Figure 44 : Comparaison des pluies enregistrées aux postes de Marignane, Aix Les Milles, et Aix en Provence pour l'événement du 10 septembre 2005	53
Figure 45 : Comparaison des laisses de crues relevées (en bleu) aux cotes modélisées (en noir) pour la crue de 2005.....	53
Figure 46 : Localisation des laisses de crues en aval de la voie ferrée sur le Raumartin pour la crue de 2005	54
Figure 47 : Profil en travers au droit du bâtiment et du parking.....	54
Figure 48 : cartographie des laisses de crue et des cotes modélisées sur la Cadière pour la crue de 2005	55
Figure 49 : Comparaison des pluies enregistrées aux postes de Marignane, Aix Les Milles, et Aix en Provence pour l'événement du 18 septembre 2009	56
Figure 50 : Comparaison des hydrogrammes modélisés et estimé de la crue du 18 septembre 2009.	57
Figure 51 : coefficient de ruissellement et temps de concentration à l'état actuel	60
Figure 52 : Découpage en planches du des atlas cartographiques	62
Figure 53 : Fonctionnement hydraulique de la crue de 1993 – secteur du Griffon à Vitrolles	63
Figure 54 : Fonctionnement hydraulique pour la crue de 1993 – A la confluence entre le vallon de l'Infernet et le ruisseau de la Marthe	64
Figure 55 : Fonctionnement hydraulique pour la crue de 1993 sur la Cadière entre l'A7 et la voie ferrée.....	65
Figure 56 : Fonctionnement hydraulique pour la crue de 1993 sur la Cadière entre la voie ferrée et la D9.....	66
Figure 57 : Fonctionnement hydraulique pour la crue de 1993 sur la partie aval de la Cadière... ..	67

Figure 58 : Cartographie des zones inondables sur le secteur amont du Raumartin	67
Figure 59 : Cartographie des zones inondables du Raumartin en amont de l'Autoroute A7	68
Figure 60 : Zones inondables du Raumartin entre l'A7 et la voie ferrée	68
Figure 61 : Les débordements du Raumartin au droit de la voie ferrée	69
Figure 62 : Les débordements du Raumartin en aval de la voie ferrée	69

1

1 INTRODUCTION

Ce rapport correspond au volet hydraulique de l'étude de l'aléa inondation sur le bassin versant de la Cadière et du Raumartin, dont les objectifs sont :

- de définir les limites de la zone inondable pour différents scénarios de crues par débordement des cours d'eau du périmètre d'étude : crue fréquente (période de retour 10 ans), de référence (100 ans) et exceptionnelle,
- de définir les cotes d'eau, les vitesses d'écoulement et les temps de submersion en tout point du périmètre d'étude pour les différents scénarios de crues,
- d'approfondir la connaissance du risque inondation en évaluant notamment les incidences à attendre de défaillances d'ouvrages.

Cette connaissance doit notamment servir à l'élaboration et à la révision des PPRi du bassin versant et à la prise en compte du risque dans les documents d'urbanisme.

L'étude hydraulique s'appuie sur la construction, le calage et l'exploitation de modèles numériques d'écoulements.

Les modèles permettent de représenter précisément les conditions d'écoulements pour différentes situations hydrologiques ; ils s'appuient sur une connaissance fine du territoire :

- un Modèle Numérique de Terrain (MNT) obtenu par méthode LIDAR, qui permet de définir de manière performante (précision altimétrique de 10 cm, précision planimétrique de 20 cm) les côtes du terrain naturel,
- des levés topographiques complémentaires au sol (profils en travers des cours d'eau, ouvrages hydrauliques, ...),
- des enquêtes de terrain, permettant d'apprécier les conditions réelles d'écoulement.

Ce volet hydraulique fait suite au volet hydrologique (phase 3 : hydrologie), qui a permis de définir des données hydrologiques fiables et cohérentes à l'échelle des bassins versants étudiés ; il est décomposé en deux phases :

- construction et calage du modèle hydraulique,
- simulations des crues de projet et cartographie des aléas (phase 4).

2 PRÉSENTATION DU LOGICIEL DE MODÉLISATION

Le modèle numérique des écoulements a été élaboré à partir des levés topographiques mis à disposition et les compléments réalisés dans le cadre de l'étude, avec le logiciel dédié à l'hydraulique fluviale et urbaine HYDRA.



2.1 PRESENTATION GENERALE

Hydra est une plateforme de modélisation hydrologique et hydraulique permettant de faire appel dans un même modèle aux fonctionnalités propres aux réseaux d'assainissement, aux systèmes fluviaux et maritimes afin de répondre aux problématiques complexes d'interconnexion des réseaux de collecte des eaux pluviales et des débordements de surface dans la gestion des inondations des grandes métropoles,

Cette plateforme permet de piloter un moteur de calcul robuste et performant, fruit de 30 ans de développements et d'exploitation, capable de traiter l'ensemble des domaines suivants ainsi que leurs interactions :

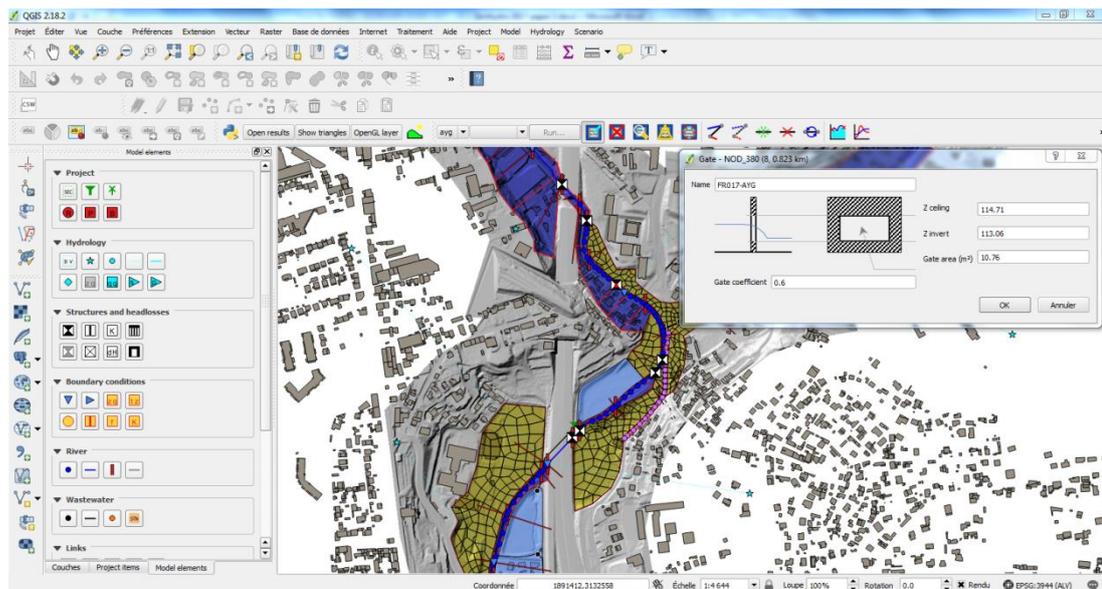
- hydrologie : calculs des lames d'eau précipitées temps réel et prévisions pluviométriques par exploitation d'images radars, modélisation des ruissellements de surface et dans les branches amont de réseaux de collecte,
- modélisation des écoulements et des propagations de crue dans les réseaux d'assainissement, les cours d'eau et les plaines inondables,
- modélisation des interactions entre les débordements de cours d'eau, les débordements de réseaux d'assainissement et les écoulements de surface dans les zones urbaines,
- modélisation des submersions marines, intégrant les effets de marées, de surcotes, de vents et les franchissements d'ouvrages par la houle,
- modélisation des phénomènes transitoires rapides et leurs conséquences : rupture de barrage, fermeture rapide de vannes dans les canaux et formation d'intumescences, formation de mascarets dans les régions estuariennes ...
- modélisation courantologique dans les cours d'eau, les estuaires et régions côtières, simulation des impacts de rejets polluants sur la qualité du milieu récepteur : cours d'eau, estuaires, régions côtières,
- modélisation du transport solide et analyse d'impact des aménagements sur le transport hydro sédimentaire et ses conséquences sur les phénomènes d'incision et d'ensablement dans les cours d'eau.
- analyse locale fine d'ouvrages hydrauliques tels que : seuils déversant, chenaux de décharge, vannages ...
- optimisation de gestion des ouvrages et des grands systèmes hydrologiques et hydrauliques.

2.1.1 L'interface

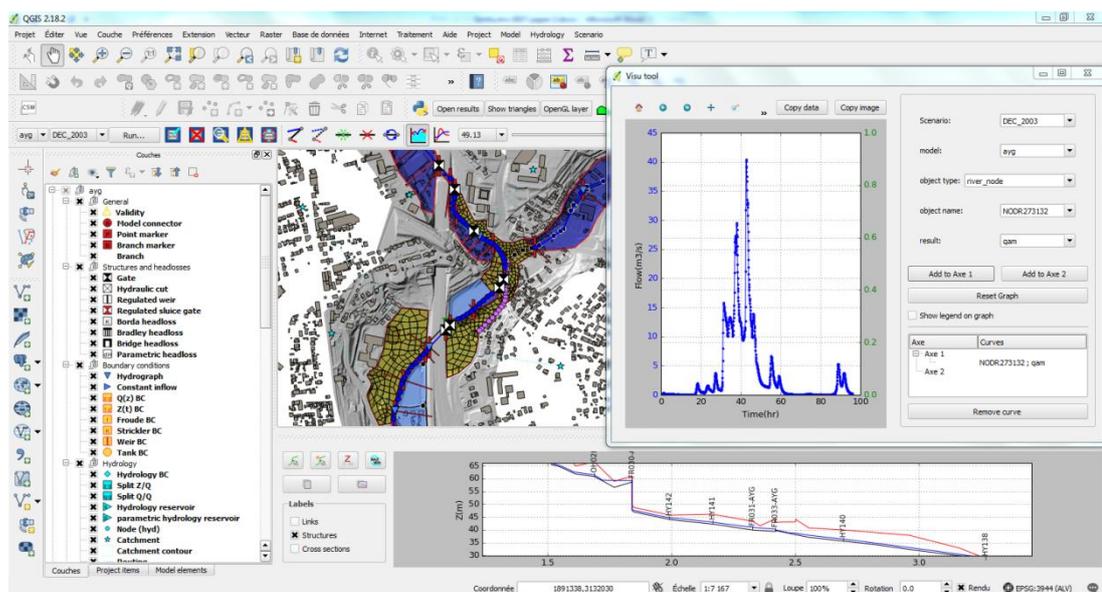
L'interface se présente sous forme d'un Plugin de `QGIS`, SIG (système d'information géographique) libre, multi plateforme, publié sous licence GPL, dialoguant avec une base de données. Les objets de modélisation sont décrits et stockés dans cette base de données, et affichés dans QGIS sous forme de couches.

QGIS dans ce contexte est utilisé comme pré et post-processeur graphique, l'ensemble de ses fonctions restant accessibles à l'utilisateur.

Des outils spécifiques permettent de créer ces objets et d'éditer leurs caractéristiques.



L'interface permet de paramétrer les scénarios de calcul, de lancer les calculs et d'effectuer les traitements des résultats : profils en long de lignes d'eau et de débits, hydrogrammes / limnigrammes sur les nœuds de calcul, cartographie des hauteurs d'eau et des vitesses d'écoulement, points de débordement des réseaux, ...



2.1.2 Le moteur de calcul

Le moteur de calcul est totalement indépendant de l'interface et de l'application Qgis. Il est développé en langages compilés C et Fortran et se compose de fichiers exécutables au format binaire .exe.

Une simulation est lancée via le plug-in de l'interface, qui génère des fichiers d'exports des données tabulaires de la base de données sous-jacente et lance les exécutables en séquence.

Après calcul, les exécutables produisent des fichiers résultats au format binaire et CSV qui sont exploités par les différents outils d'exploitation du plug-in ou des programmes externes spécifiques.

La formulation sous-jacente du moteur de calcul Hydra est fondée sur le concept de discrétisation des équations en volumes finis avec fondamentalement deux familles de termes :

- les termes de volumes et d'inertie attachés aux nœuds de calcul élargis aux objets de stockage.
- les termes d'échanges de flux (débits, quantités de mouvements) entre les nœuds.

A chaque pas de temps les équations discrétisées expriment l'égalité entre les variations des termes de volumes et d'inertie et les flux rentrant et sortant dans chaque nœud.

2.2 DES SCHEMAS DE MODELISATION ADAPTES AUX SYSTEMES ETUDIES ET AUX ECHELLES DE TRAVAIL

Le développement urbain rend de plus en plus complexe la gestion de l'eau et des risques associés. Les métropoles littorales peuvent ainsi être soumises à l'interaction de différents aléas : submersion marine, débordement de cours d'eau, saturation des réseaux d'assainissement pluvial en cas d'événement pluvieux intense entraînant des débordements de surface.

Hydra permet de représenter ces différents phénomènes en un même modèle afin de mettre à disposition de l'ingénieur des outils de compréhension du fonctionnement du système et de lui permettre de proposer et dimensionner des solutions techniques adaptées.

La modélisation numérique est la représentation d'un système physique par une schématisation permettant sa description, sur laquelle sont résolues les équations propres aux phénomènes étudiés. La modélisation revêt ainsi nécessairement un caractère simplificateur de la complexité du système : simplification des caractéristiques géométriques, et simplification des lois physiques associées.

Se pose alors la question des méthodes de schématisation de ces différents systèmes hydrauliques. Alors que les systèmes maritimes peuvent être modélisés par un maillage représentant la bathymétrie (dont la résolution est dépendante de l'échelle de travail), la modélisation des systèmes fluviaux et d'assainissement nécessite de prendre en compte le fonctionnement des singularités que constituent les ouvrages hydrauliques ; l'échelle de travail et les enjeux associés à la modélisation mise en œuvre peuvent par ailleurs amener le modélisateur à simplifier ou affiner la schématisation du système.

Hydra propose ainsi différents schémas de modélisation, adaptés à l'échelle de travail et aux systèmes étudiés, tout en permettant leur couplage :

- filaire, ou unidimensionnel (1D) : les réseaux et cours d'eau (lits mineur et / ou majeur) sont représentés par des sections géométriques agencées le long d'un axe préférentiel d'écoulement ; les vitesses d'écoulement sont imposées le long de cet axe,

- bidimensionnel (2D) : le terrain naturel et / ou la bathymétrie sont schématisés par un maillage triangulaire ou quadrangulaire, chaque maille étant caractérisée par sa surface et la cote moyenne du terrain naturel,
- casiers, délimitant des zones de stockage présentant de faibles vitesses d'écoulement et de faibles variations de hauteurs d'eau, caractérisés par une loi de remplissage cote / volume,
- rues, axes potentiels privilégiés des écoulements dans un environnement urbain dense et/ou régulier, assimilées à un schéma filaire,
- stations de gestion, permettant une description fine des ouvrages hydrauliques complexes,
- bassins versants.

La connexion de ces différents domaines de modélisation (et plus généralement des différents objets de modélisation) est assurée par des liaisons, de natures différentes selon la topographie ou le type d'ouvrage le cas échéant.

Le schéma ci-dessous présente l'ensemble des domaines de schématisation disponibles ainsi que les liaisons hydrauliques permettant leur connexion.

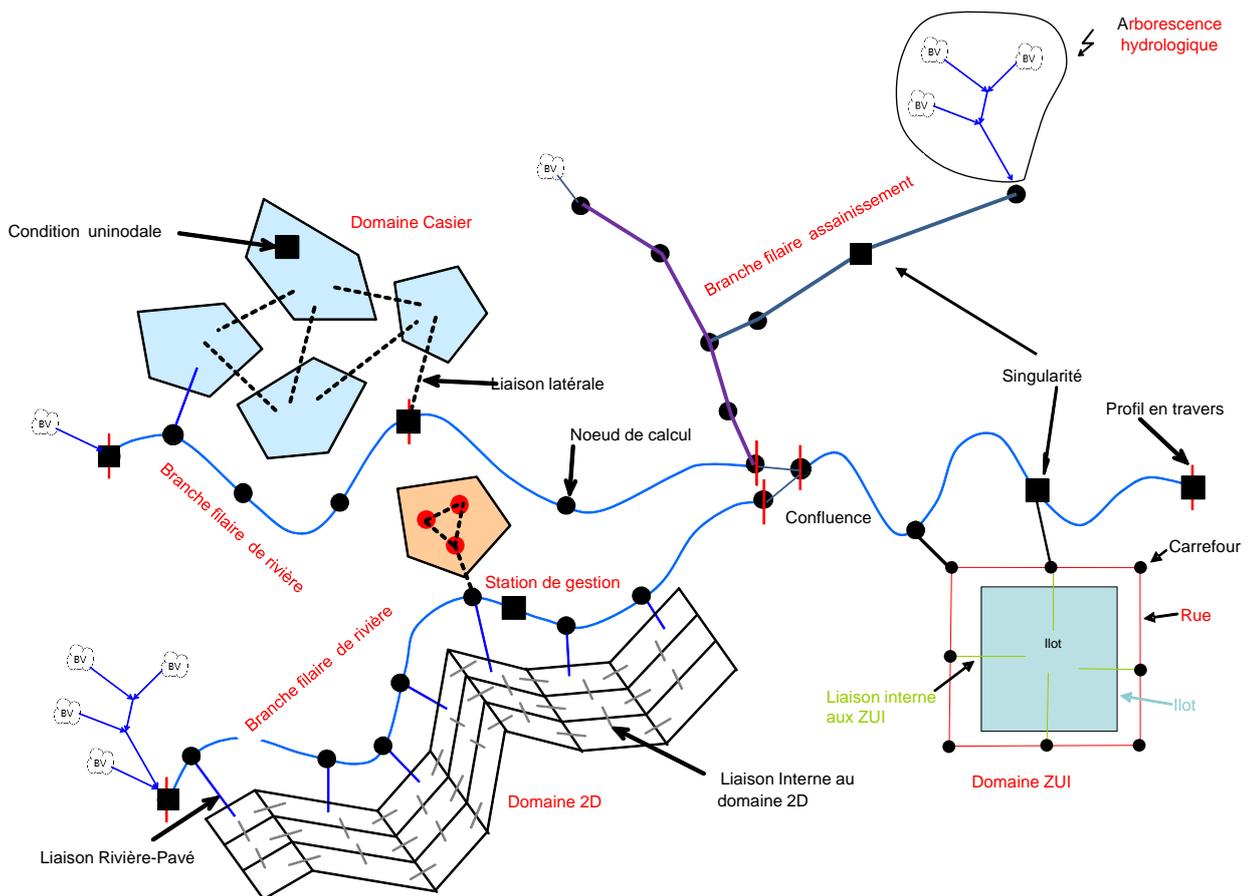


Figure 1 : Schéma de synthèse des domaines de schématisation disponibles et des liaisons hydraulique permettant leur connexion

Dans le cas de schématisations 2D, la représentation des ouvrages et discontinuités par des lois d'écoulement précises permettent de conserver un maillage relativement lâche et d'optimiser les temps de calcul.

Une présentation détaillée du logiciel est disponible en annexe 1.

2.3 MISE EN ŒUVRE ET EXPLOITATION

2.3.1 Flexibilité d'utilisation

Hydra offre la possibilité de connecter différents domaines de modélisation (hydrologie, filaire, casier, bi dimensionnel et station de gestion) par le biais de liaisons hydrauliques latérales, de natures différentes selon la topographie ou le type d'ouvrage. Cette conception offre la **possibilité d'étendre ou d'affiner localement le schéma de modélisation d'un modèle existant**.

Hydra dispose d'une fonctionnalité dite de « **Configurations** » qui permet de générer et de tracer des scénarios impliquant des modifications de paramètres géométriques, topographiques et hydrauliques attachées aux objets de modélisation d'un modèle hydraulique donné : coefficients de frottements, cotes de digues, sections de lit mineur, ouverture d'ouvrages hydrauliques, ...

Hydra dispose également d'un module de **gestion de contrôle et de régulation des ouvrages** hydrauliques. Les ouvrages hydrauliques ponctuels modélisés dans Hydra sont paramétrés par défaut dans l'interface de façon à fonctionner en mode local : la plupart des actionneurs sont fixes, d'autres sont mobiles et régulés par rapport à une consigne de déplacement, de niveau ou de débit. L'état des variables géométriques et les consignes de gestion de l'ensemble de ces ouvrages peuvent également être pilotées par un fichier externe contenant un script de programmation plus ou moins complexe totalement interactif avec les algorithmes de calcul hydrauliques du noyau de calcul d'Hydra. Cette possibilité permet de prendre en compte des systèmes d'asservissement complexes, faisant intervenir tout un ensemble de paramètres d'état du système et d'actionneurs, pour lesquels la régulation locale n'est plus adaptée.

Ces caractéristiques d'Hydra offrent à l'utilisateur une très forte souplesse pour faire évoluer un modèle donné :

- Extension par ajout d'éléments complémentaires,
- Intégration d'aménagements hydrauliques tels que des protections rapprochées, le recalibrage d'un cours d'eau, l'abaissement ou la rehausse de cotes de digues, ... et quantification des incidences engendrées,
- Modification des règles de gestion d'ouvrages asservis (modification de la cote de régulation d'un barrage en fonction de la saison par exemple).

2.3.2 Traçabilité

Hydra dispose des fonctionnalités de gestion des scénarios de calcul **garantissant la totale traçabilité des simulations effectuées** ; la topologie du modèle et l'ensemble des paramètres de chaque scénario sont intégrés dans un fichier unique : paramètres numériques, fichiers externes de définition des hydrogrammes d'entrée, ... La gestion des répertoires de stockage des résultats de calcul pour chaque scénario est automatisée, assurant un lien direct entre le fichier « modèle » et les résultats des différents scénarios de calcul.

3 CONSTRUCTION DU MODÈLE

3.1 STRUCTURE DU MODELE HYDRAULIQUE

Les différents types de modélisation proposés sur le secteur d'étude sont décrit dans les paragraphes suivants.

La figure suivante montre une vue d'ensemble du modèle.

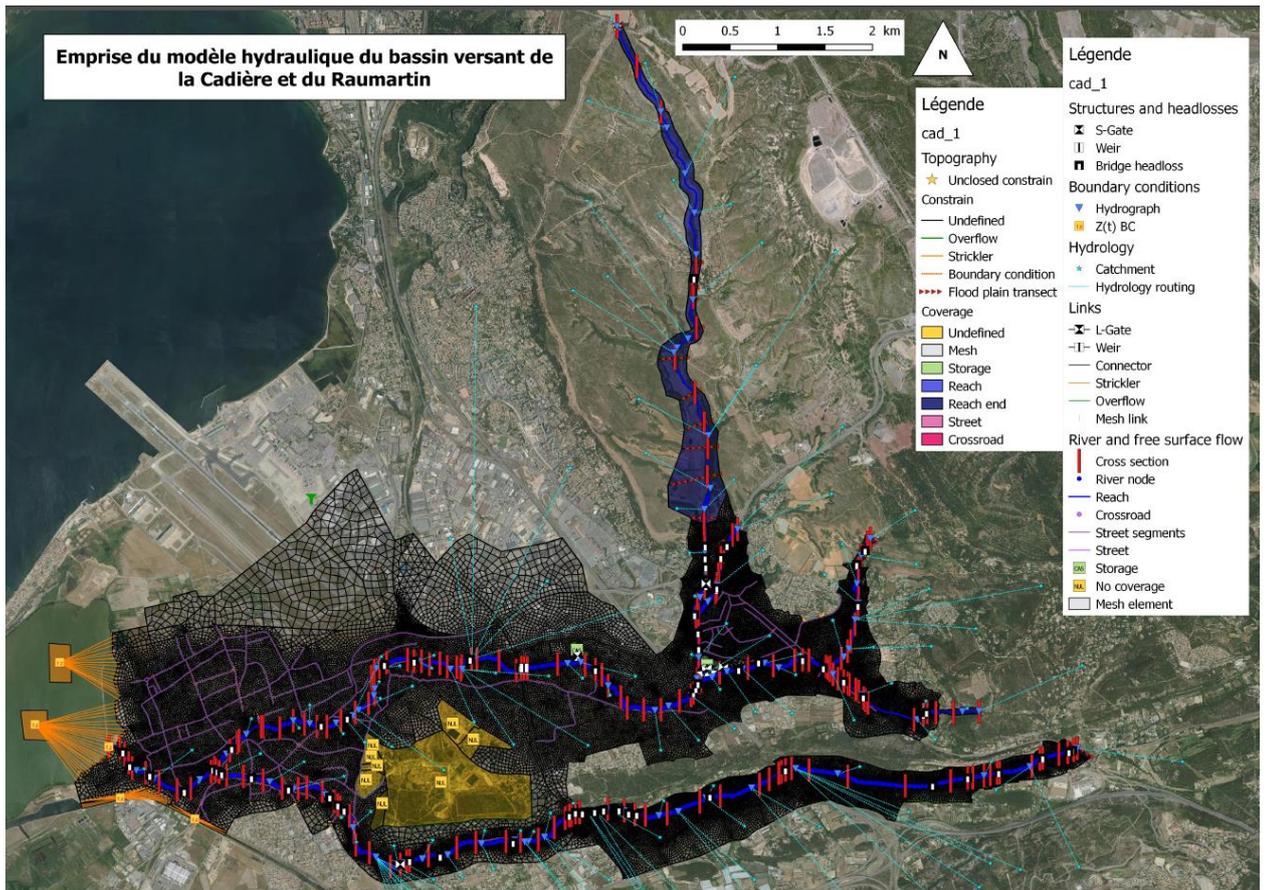


Figure 2 : Emprise du modèle

3.1.1 Lit mineur

L'ensemble des **lits mineurs** des cours d'eau est représenté en **1D** (domaine filaire). Les lits mineurs sont constitués par :

- Des collecteurs fermés sur les parties enterrées (couverture du ruisseau de la Marthe aux Pennes Mirabeau et couverture de la Cadière à Marignane) ou,
- Des biefs ouverts de type cours d'eau.

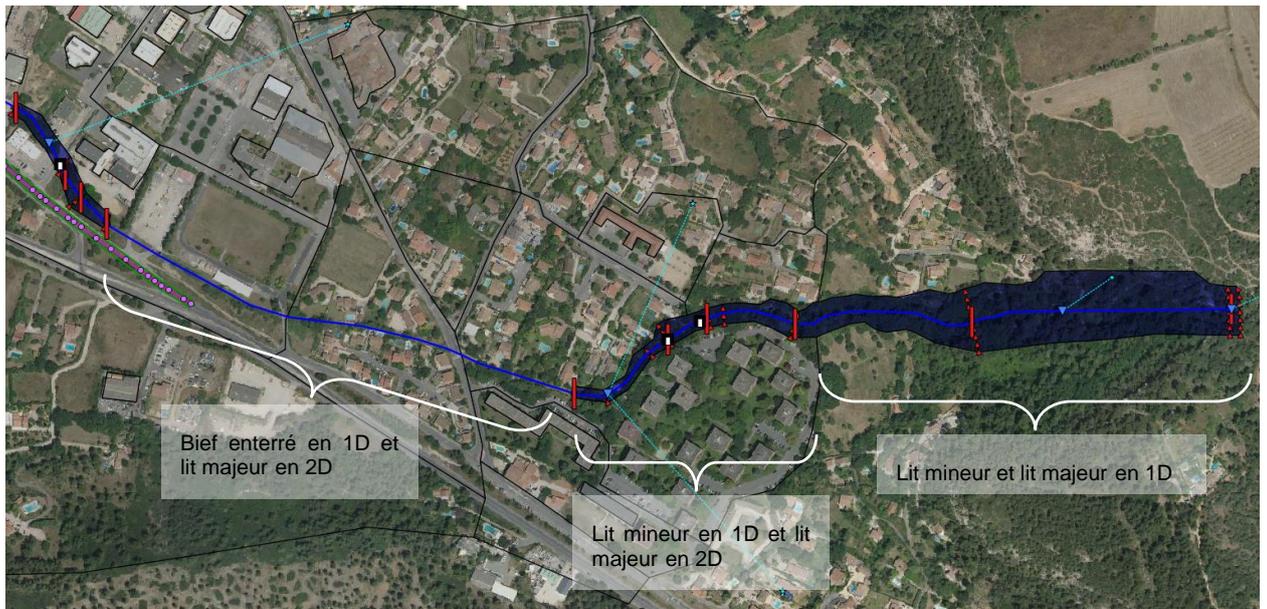


Figure 3 : Exemple de biefs filaires 1D de cours d'eau sous Hydra – secteur de la Marthe



Figure 4 : exemple de profil en travers modélisé en 1D – section de la Marthe en amont de la confluence – vue vers l’amont

3.1.2 Lit majeur

Pour le lit majeur, 2 modes de représentation sont mis en œuvre :

- Maillage 2D,
- Filaire 1D.

La délimitation entre ces deux zones est déterminée après une analyse morphologique du cours d’eau. Le modèle filaire 1D est privilégié lorsque l’écoulement est plutôt mono directionnel dans l’axe du lit mineur. Le modèle 2D est privilégié lorsque l’écoulement est diffus et/ou lorsque le bâti est plutôt dense et fait obstacle à l’écoulement en lit majeur.

Ainsi la modélisation filaire 1D a été limitée aux zones amont des cours d’eau, où les enjeux étaient peu ou pas présents.

a) Maillage 2D

Le domaine 2D comprend une collection de mailles quadrangulaires ou triangulaires, chaque maille étant convertie en interne en un nœud de calcul caractérisé par :

- une cote d’eau Z ,
- les composantes u_x et u_y de la vitesse d’écoulement,
- une capacité de stockage décrite par une cote moyenne de fond Z_f et une surface S .

Le maillage s’appuie notamment sur des limites physiques contraignant les écoulements appelées lignes de contraintes (digues, remblais, ...), la taille des mailles étant définie par le modélisateur en fonction de la précision attendue et de la morphologie de la vallée.

Les liaisons entre les mailles sur les lignes de contraintes sont généralement des lois de seuil, lorsqu'il n'y a pas de ligne de contrainte les liaisons sont caractérisées par un coefficient de frottement.

Les singularités ponctuelles au droit des franchissements routiers ou ferrés sont schématisées par des liaisons spécifiques reliant les mailles amont et aval :

- des lois d'orifice pour les buses et les ponceaux de décharge,
- des lois de seuil pour les routes, chemins, digues, ... submersibles.

b) Prise en compte du bâti

Hydra permet différentes approches pour la **prise en compte du bâti** dans la modélisation mise en œuvre :

- Cas d'une urbanisation **présentant une implantation relativement diffuse** : le maillage s'appuie sur les éléments structurants du terrain naturel (ruptures de pentes, talus) mais pas systématiquement sur les contours des bâtiments (cas de figure réservé aux bâtiments de grande emprise au sol) ; les largeurs disponibles pour l'écoulement sur la frontière des mailles sont corrigées pour tenir compte de l'obstacle créé par le bâti sur la dynamique des écoulements.



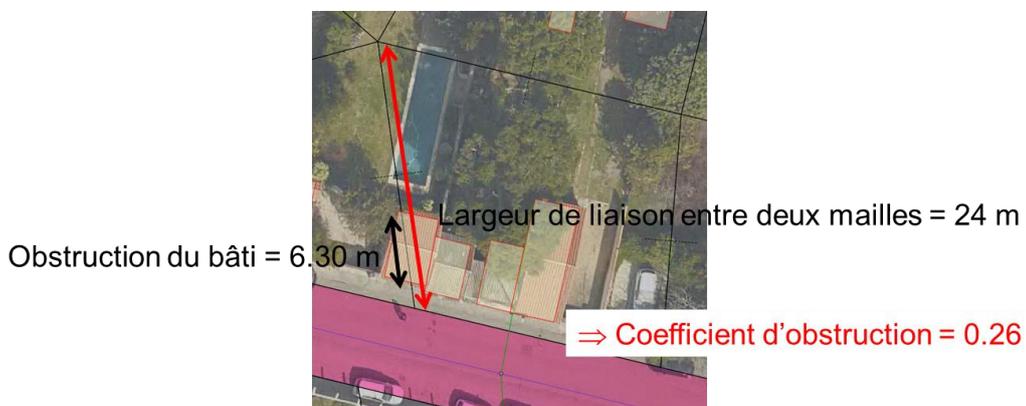
Figure 5 : Maillage s'appuyant sur les éléments structurant de la topographie - secteur du Raumartin (amont)

- Cas d'une **urbanisation régulière** (structurée par un **réseau de voiries régulier**, notamment dans les centres-villes et les zones pavillonnaires : un schéma de modélisation bidimensionnelle spécifique est mis en œuvre :
 - les rues sont des éléments de modélisation à part entière sur lesquelles sont résolues les équations appliquées à la schématisation 1D,
 - les ilots bâtis encadrés par les rues sont couverts par un maillage 2D,
 - les largeurs disponibles pour l'écoulement sur la frontière des mailles (dans les ilots) ou aux frontières rues / mailles 2D sont corrigées pour tenir compte de l'obstacle créé par le bâti sur la dynamique des écoulements.
 - Sur le schéma ci-dessous, les rues sont matérialisées en rose (caractérisées par leur largeur, leur pente entre deux nœuds de calcul et un coefficient de frottement).



Figure 6 : Maillage dans le cas d'une urbanisation régulière – secteur du Bondon

L'obstruction des largeurs disponibles pour l'écoulement à la frontière entre deux mailles pour tenir compte du bâti est limitée à 98%. Cette méthodologie permet de tenir compte des volumes d'eau stockés dans les bâtiments (considérés comme inondables), mais également de l'obstacle qu'ils créent à la dynamique des écoulements.



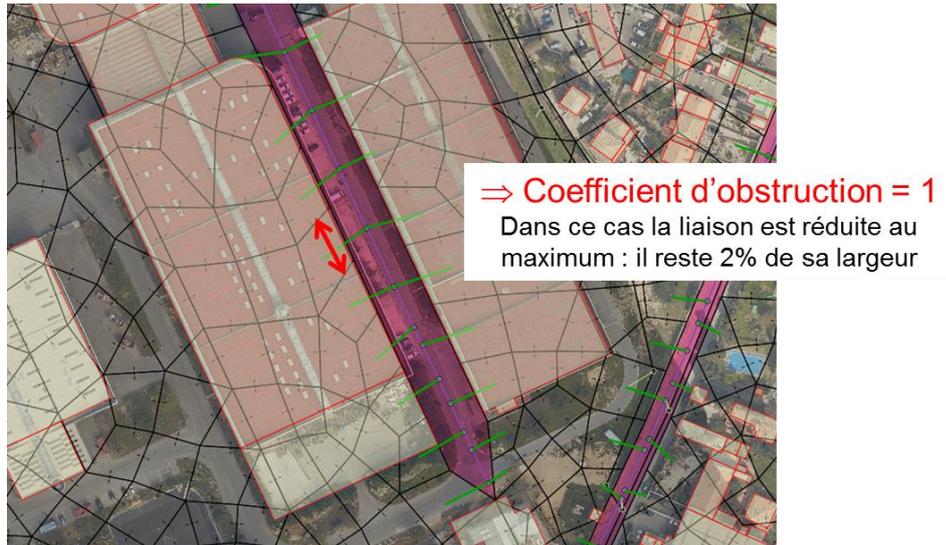


Figure 7 : Exemples de liaisons entre deux mailles dont la largeur est réduite par la présence du bâti

Le **calcul des vitesses** est réalisé en considérant la largeur totale des frontières entre les mailles, et non les largeurs contractées ; cette approche permet de restituer un champ de vitesse moyen à l'échelle de la maille, et de ne pas affecter à l'ensemble de la maille une sur-vitesse localisée (au droit de la frontière); les vitesses sont ainsi cohérentes avec l'échelle de modélisation et la taille des mailles. Pour les bâtiments de taille importante, les frontières des mailles tendent à s'appuyer sur leurs contours ; les vitesses des écoulements les contournant sont alors bien restituées.

3.2 COUPLAGES

3.2.1 Couplage 1D-1D

Lorsque le lit majeur est représenté par un modèle filaire 1D et que le lit mineur est constitué par un bief à ciel ouvert directement intégré au profil en travers du lit majeur. Le modèle est alors constitué de profils en travers complets comprenant le lit mineur et le lit majeur comme indiqué sur la figure ci-dessous :

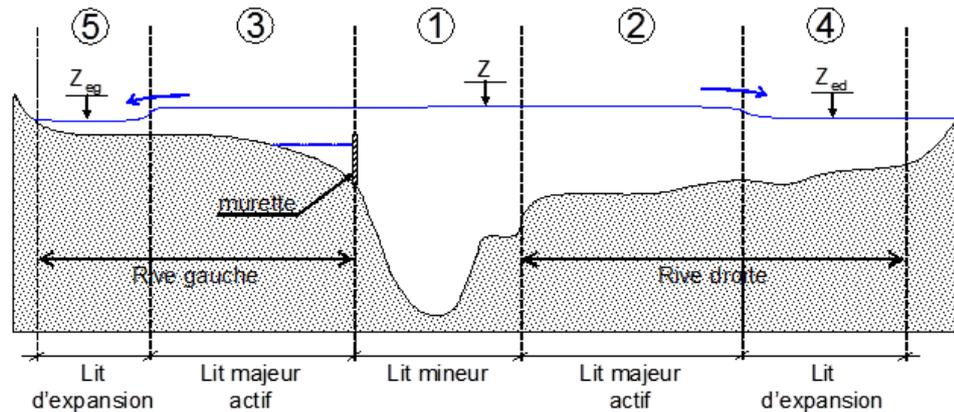


Figure 8 : Modélisation filaire 1D

Lorsque le lit mineur est représenté par un bief de collecteurs fermés on réalise un couplage entre deux biefs filaires 1D, l'un souterrain modélisant le collecteur et l'autre à surface libre modélisant l'écoulement de surface, comme indiqué sur la figure ci-dessous.

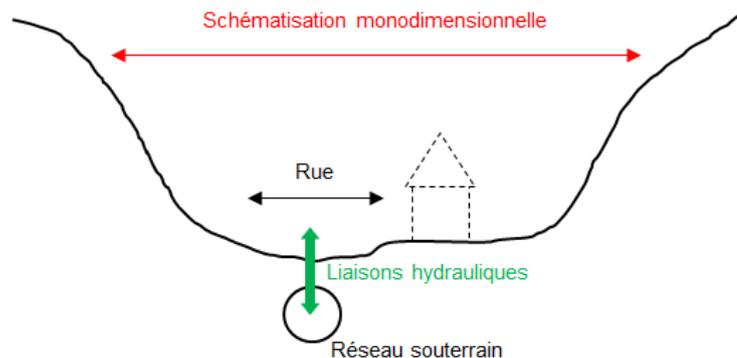


Figure 9 : Modélisation couplée 1D-1D

3.2.2 Couplage 1D-2D

Le maillage 2D est couplé au bief 1D de deux façons :

- Maillage 2D appuyé sur les limites du domaine 1D,
- Bief 1D immergé dans le maillage 2D et/ou vers les Rues.

Ces couplages peuvent être construits :

- au passage d'un lit majeur 1D vers un lit majeur 2D (et inversement), dans l'axe principal de l'écoulement,

- du lit mineur vers le lit majeur (couplage latéral : le lit mineur est modélisé en 1D et le lit majeur en 2D).

Le maillage 2D peut également être couplé aux voiries et rues.

a) Maillage 2D appuyé sur les limites du domaine 1D

Lorsque le cours d'eau est à surface libre les berges de chaque lit de cours d'eau sont connectées au domaine bidimensionnel par l'intermédiaire de liaisons spécifiques apparentées à des déversoirs, la cote et la largeur de chacune étant fonction du profil de la berge. Le maillage 2D est appuyé sur les limites du domaine 1D.

Les liaisons latérales schématisent les capacités de débordement du bief 1D vers le maillage 2D à partir des caractéristiques géométriques de la berge considérée (altimétrie), de la géométrie de chacune des mailles (largeur de contact avec la berge) et de l'occupation du sol (frottement et éventuelle obstruction créée par le bâti).

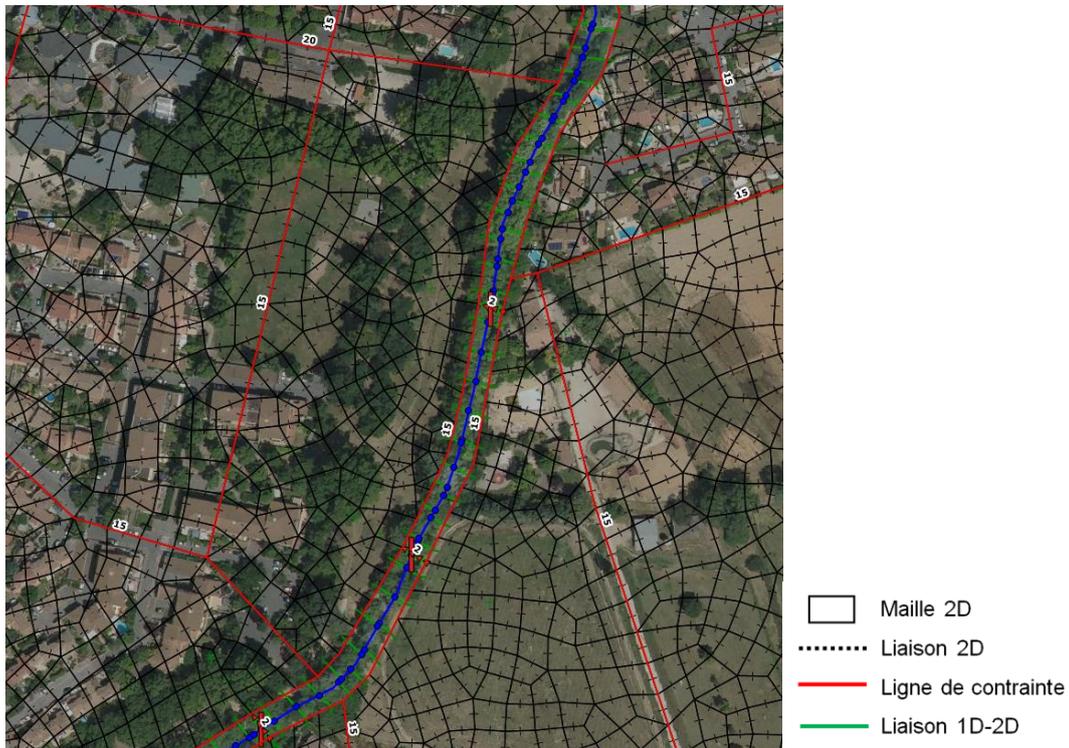


Figure 10 : Maillage 2D appuyé sur les limites du domaine 1D (exemple vallon de l'Infernet)

b) Bief 1D immergé dans le maillage 2D

Lorsque les biefs 1D sont constitués de collecteurs fermés, les débordements potentiels des réseaux sont représentés par des liaisons entre les biefs filaires souterrains et les mailles de surface, au droit des regards. Le bief 1D est immergé dans le maillage 2D.

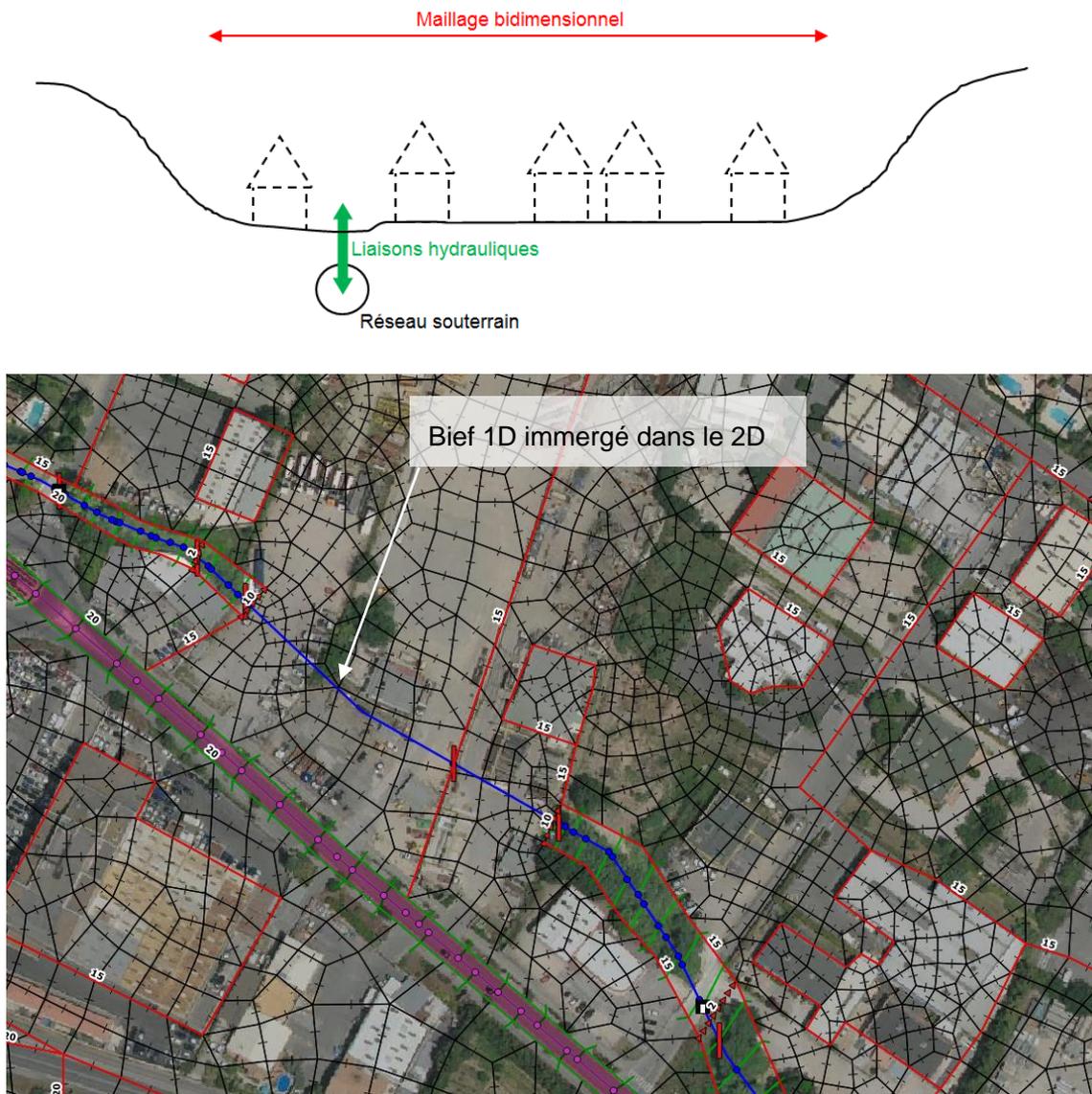


Figure 11 : Exemple de bief 1D immergé dans le maillage 2D (exemple ruisseau de la Marthe)

c) Maillage 2D appuyé sur les voiries et rues

Lorsque que les voiries et rues sont représentées par des éléments « Rues » le maillage 2D est appuyé sur les limites des voiries.

Les liaisons latérales schématisent les capacités de débordement du des voiries vers le maillage 2D à partir des caractéristiques géométriques de la ligne de contrainte et de la géométrie de chacune des mailles (largeur de contact avec la voirie) et de l'occupation du sol (frottement et éventuelle obstruction créée par le bâti).

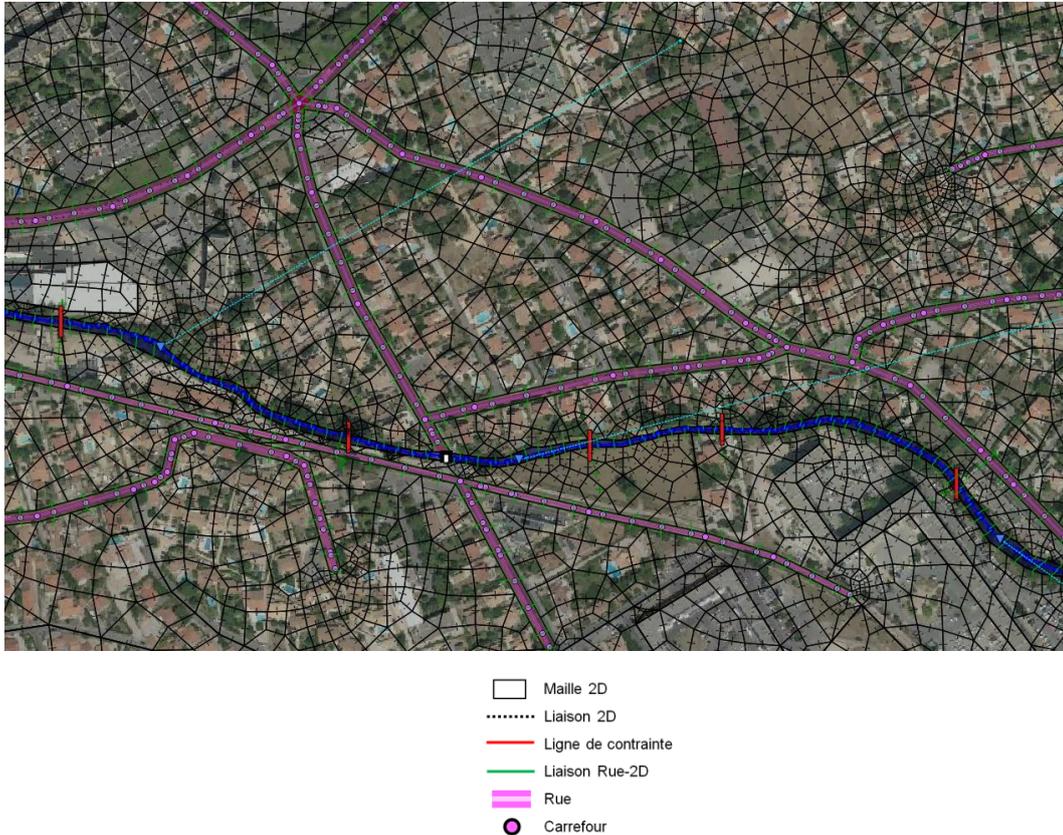


Figure 12 : Exemple de maillage 2D en secteur urbain avec voiries et rues (exemple secteur avenue de Lacanau sur Marignane)

3.3 CHOIX DES MODES DE REPRESENTATION

3.3.1 Têtes de bassin versant et secteurs urbanisés amont

Les secteurs situés en tête de bassin versant sont peu urbanisés et sont situés dans des vallons encaissés présentant des pentes relativement marquées. L'écoulement en cas de crue présente une direction privilégiée dans l'axe du talweg, et les obstacles longitudinaux à même de cloisonner les vallées sont peu nombreux.

Dans ces secteurs, nous avons opté pour une modélisation filaire de la vallée, incluant le lit mineur (filare 1D).

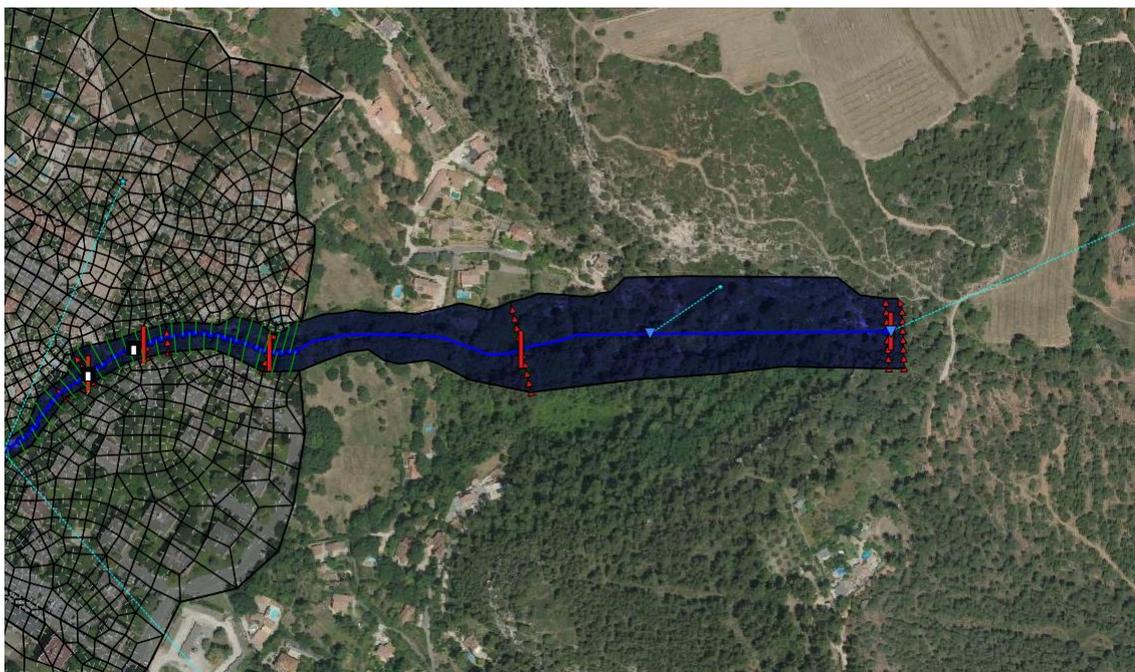


Figure 13 : Exemple de la modélisation filaire 1D de la tête de bassin du ruisseau de la Marthe

3.3.2 Secteurs urbanisés aval

Dans **les zones d'urbanisation dense et régulière**, nous opterons pour la modélisation **2D-Rues** couplée aux biefs filaires 1D du lit mineur.

Dans **les zones d'urbanisation plus ouvertes**, un **schéma 2D** classique sera privilégié, le maillage s'appuyant alors sur les obstacles physiques aux écoulements (bâtis, remblais, ...), couplé aux biefs filaires 1D du lit mineur.

La structure du modèle mis en œuvre est présentée sur les cartes en annexe 2.

La légende permet de distinguer :

- Les biefs 1D de lit mineur de collecteurs fermés,
- Les biefs 1D de lit mineur à ciel ouvert,
- Les biefs 1D de lit majeur,
- Les zones de maillage 2D,
- Les lignes de contraintes,
- Les voiries du domaine 2D.

Le modèle hydraulique couvre l'ensemble des vallées identifiées sur le modèle numérique de terrain issu du levé LIDAR ; les linéaires de cours d'eau ainsi modélisés sont synthétisés dans le tableau et localisés sur les cartes présentées en annexe 2.

Cours d'eau et affluents	Commune	Linéaire modélisé (km)		
		Cours d'eau à ciel ouvert	Cours d'eau « couvert »	Total
Bondon	Vitrolles	7.590		7.590
Ravin d'Aix	Vitrolles	1.105		1.105
Vallon Infernet	Vitrolles	1.605		1.605
Ruisseau de la Marthe	Les Pennes Mirabeau	1.195	0.630	1.825
La Cadière	Vitrolles	4.550		4.550
	Saint Victoret	1.900		1.900
	Marignane	2.690	0.285	2.975
Raumartin	Les Pennes Mirabeau	3.870	0.280	4.150
	Saint Victoret	1.425		1.425
	Marignane	4.630		4.630
TOTAL				31.755

Tableau 1 : Recensement des linéaires de cours d'eau modélisés

La pente moyenne du vallon de l'Infernet est de 1.8%. Elle présente une chute de l'ordre de 2m.



Figure 14 : Photographie de la chute sur le vallon de l'Infernet

La pente du profil en long de la Cadière est comprise entre 1.2% et 0.5% d'amont vers l'aval. Il présente une très nette cassure au niveau de la « cascade » (pK 7).

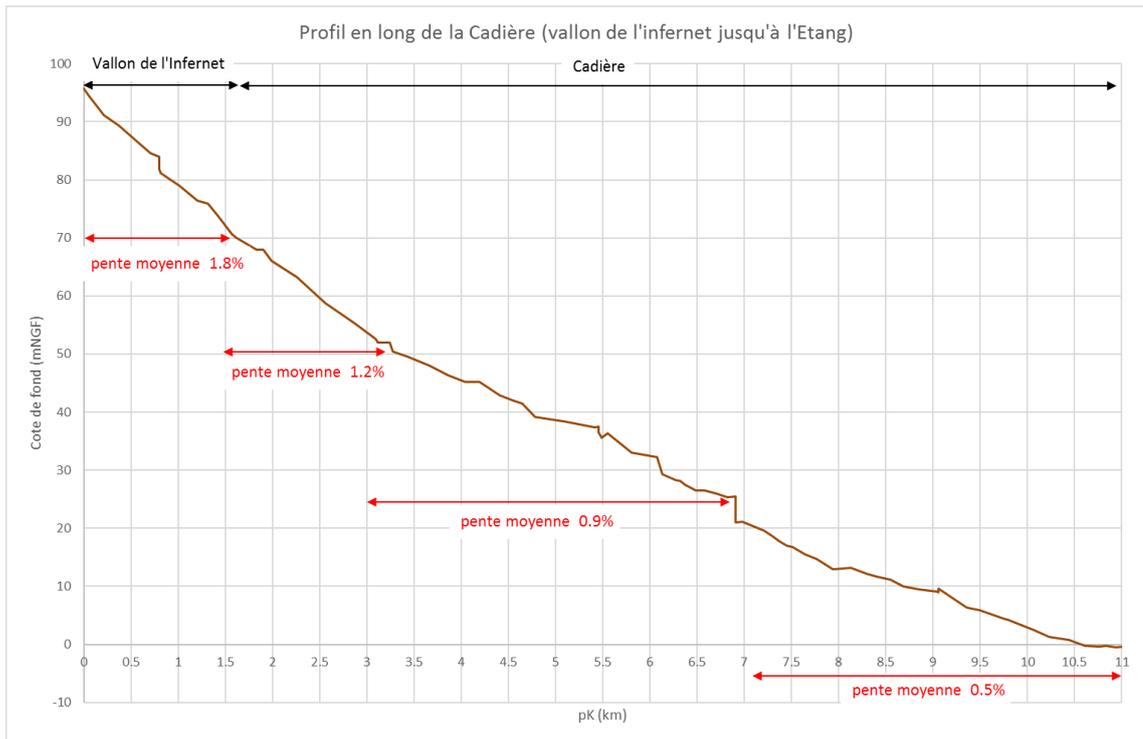


Figure 15 : Profil en long de la Cadière du Vallon de l'Infernet jusqu'à son exutoire dans l'Etang du Bolmon

Le profil du Raumartin est quant à lui relativement homogène avec des pentes moyennes comprises entre 2% en amont et 1% dans sa partie aval.

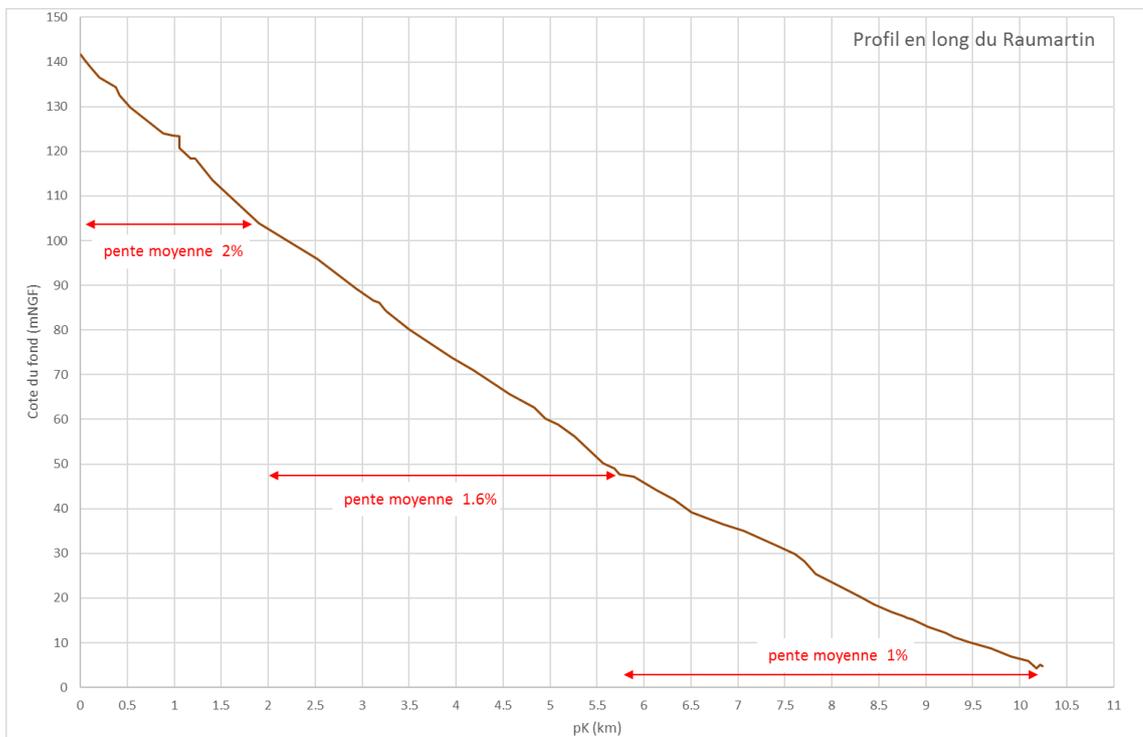


Figure 16 : Profil en long du Raumartin sur la commune des Pennes-Mirabeau jusqu'à sa confluence avec la Cadière

Le profil du Bondon est également relativement homogène avec des pentes moyennes comprises entre 1.6% en amont et 1.1% dans sa partie aval. Il est marqué par un seuil sur sa partie amont situé au milieu des gorges. Sur sa partie aval, le profil en long est également calé par les radiers des nombreux ouvrages traversant le Bondon dans le secteur du Griffon.

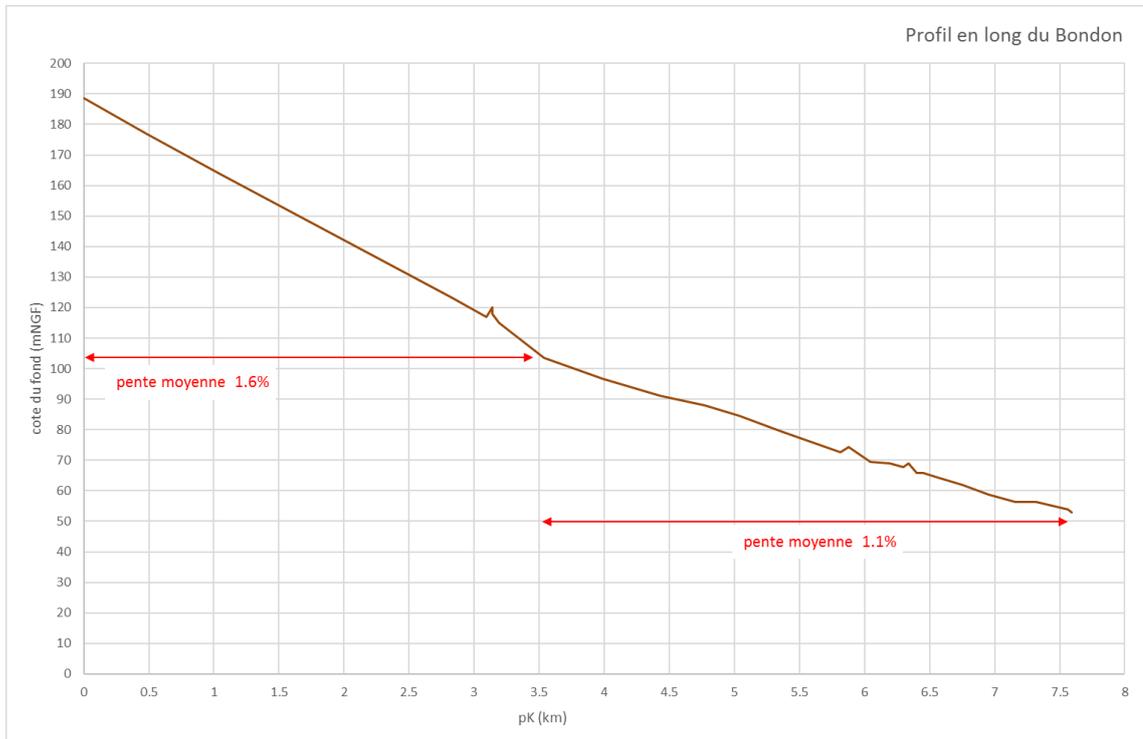


Figure 17 : Profil en long du Bondon depuis l'amont dans les Gorges jusqu'à sa confluence avec la Cadière

Le profil du Ravin d'Aix présente une pente relativement homogène calée localement par les radiers des ouvrages traversant le cours d'eau dans le secteur du Griffon.

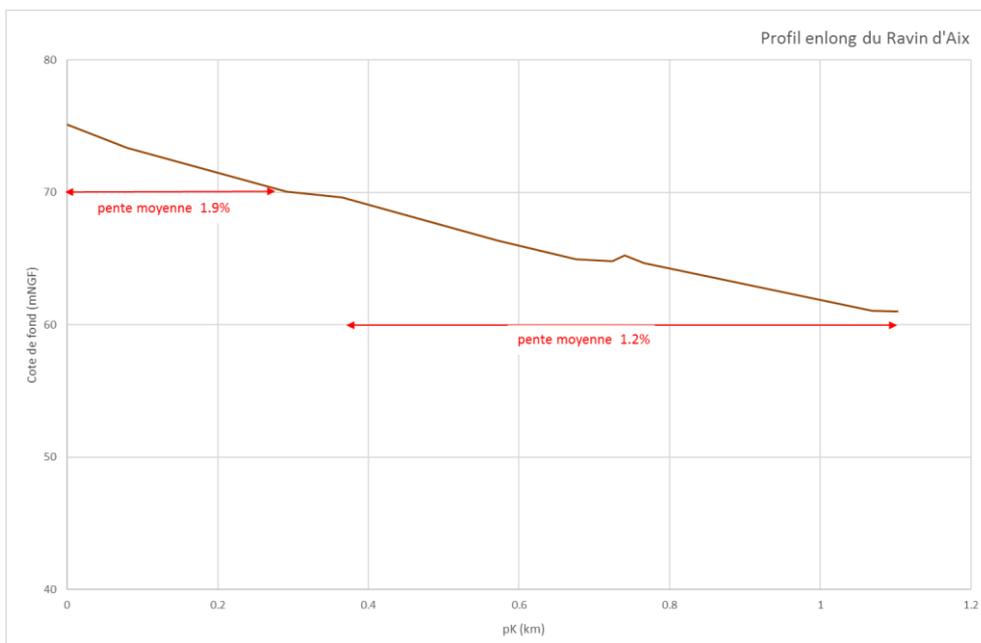


Figure 18 : Profil en long du Ravin d'Aix en amont du Griffon jusqu'à sa confluence avec le Bondon

3.4 MODELISATION DES OUVRAGES SINGULIERS

3.4.1 Ouvrages de franchissement

Les ouvrages de franchissement sont définis par les cotes de radier et de sous-poutre et la section totale.

Les pertes de charge sont calculées par une loi de seuil tant que l'ouvrage n'est pas en charge, et par une loi d'orifice dans le cas contraire.

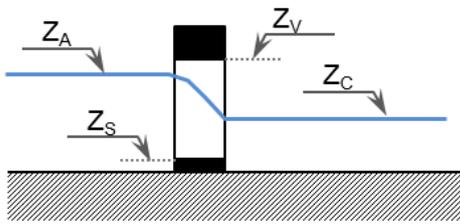
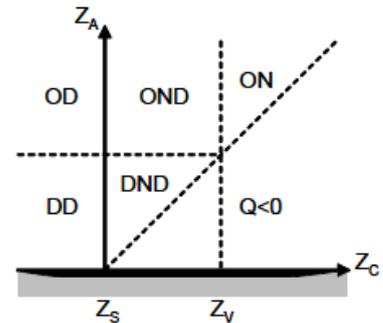


Schéma de fonctionnement



Régimes possibles d'écoulement

Régime d'écoulement	Désignation	Expression pour f
Déversoir dénoyé	DD	$f = C_D (Z_A - Z_S)^{3/2}$
Déversoir noyé – dénoyé	DND	$f = C_D (Z_A - Z_C)^{3/2} + C_N (Z_C - Z_S) (Z_A - Z_C)^{1/2}$
Orifice dénoyé	OD	$f = C_D (Z_A - Z_S)^{3/2} - C_D (Z_A - Z_V)^{3/2}$
Orifice noyé – dénoyé	OND	$f = C_D (Z_A - Z_C)^{3/2} - C_D (Z_A - Z_V)^{3/2} + C_N (Z_C - Z_S) (Z_A - Z_C)^{1/2}$
Orifice noyé	ON	$f = C_N (Z_A - Z_C)^{1/2} (Z_V - Z_S)$
avec $C_D = \frac{2}{3} \mu_D L \sqrt{2g}$ $C_N = \mu_N L \sqrt{2g}$ μ_D : coefficient en régime dénoyé (généralement = 0.6) μ_N : coefficient en régime noyé (généralement = 0.6)		

Lorsque l'ouvrage de franchissement est submersible, l'orifice est complété en parallèle par un élément seuil correspondant à la possibilité d'écoulement sur le tablier défini par une largeur, une cote et un coefficient de seuil.

Exemple d'ouvrage modélisé sur le lit mineur :

VUE AMONT



VUE AVAL



Figure 19 : Photographies d'un pont sur le Bondon (amont parc du Griffon)

Plan topographique :

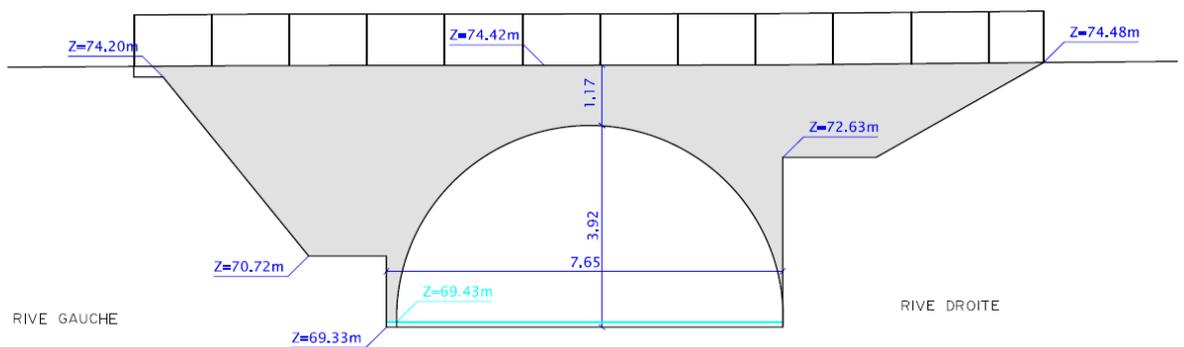


Figure 20 : Représentation du plan topographique du pont sur le Bondon

Ouvrage modélisé :

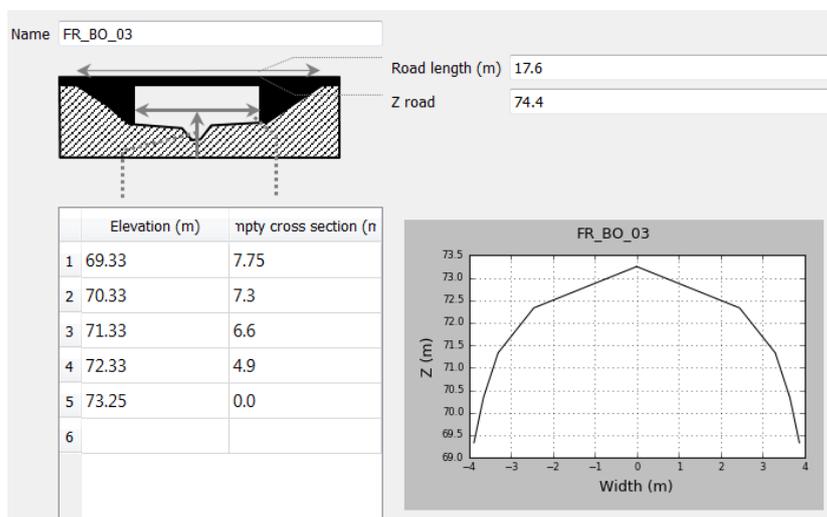


Figure 21 : Représentation du pont sur le logiciel Hydra

3.4.2 Ouvrages souterrains

Les collecteurs souterrains sont modélisés par des sections paramétriques fermées ; HYDRA utilise la méthode de la fente de Preissmann pour résoudre les équations de Barré de Saint Venant.

Une perte de charge à l'entonnement est ajoutée, sous la même forme que les ouvrages de franchissement.

Les photographies suivantes montrent l'entrée et la sortie de l'ouvrage souterrain sur le Cadière qui traverse Marignane.

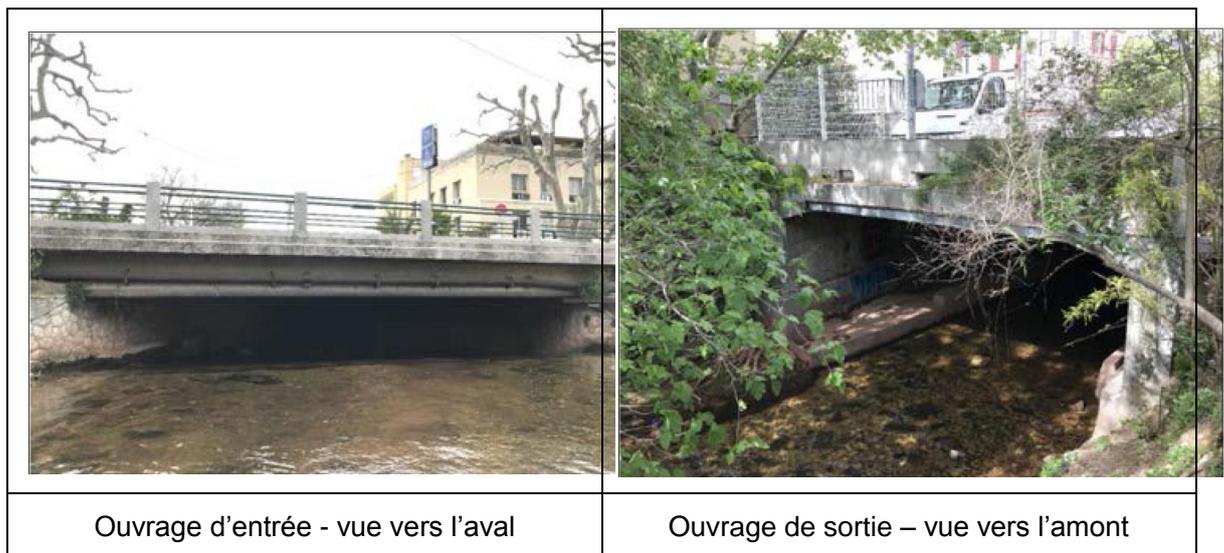


Figure 22 : Entrée et sortie de la partie couverte de la cadière dans Marignane.

3.4.3 Seuils et vannages

Les seuils frontaux et latéraux sont modélisés par des lois de seuil.

Les vannages sont modélisés par des lois mixtes seuil (tant que l'ouvrage n'est pas en charge) / orifice.

Ces ouvrages peuvent être asservis à une cote ou un débit de consigne.

Sur la Cadière on notera notamment dans la traversée de Saint Victoret avec le seuil de la Cascade.

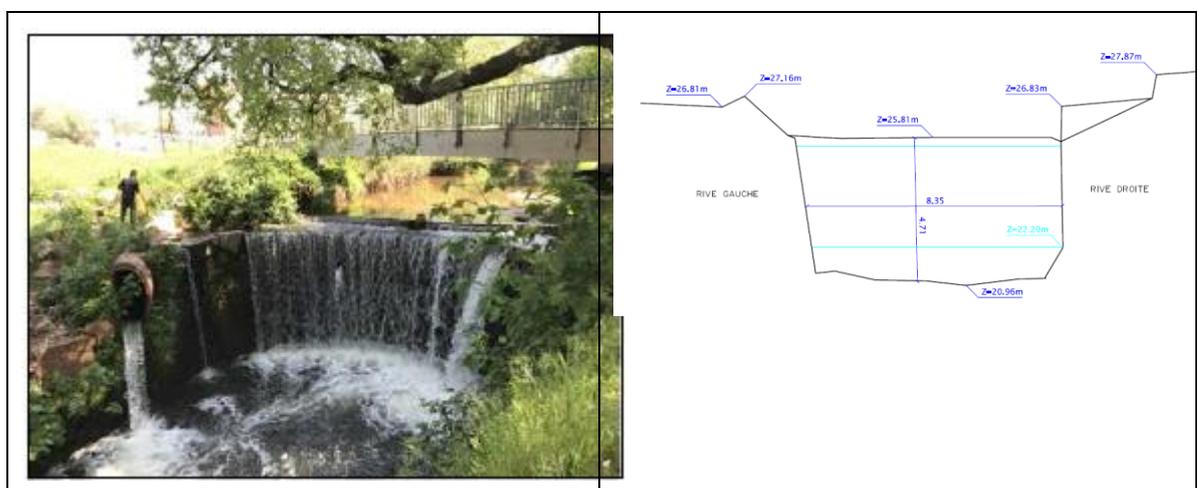


Figure 23 : la cascade sur la Cadière à Saint Victoret

3.4.4 Les bassins de rétention

Le modèle prend en compte un certain nombre de bassins de rétention lorsqu'ils sont implantés directement sur le cours d'eau de la Cadière ou de ses affluents.

Les ouvrages de rétention modélisés sont :

- Le bassin du Griffon
- Le bassin à la confluence entre la Marthe et L'Infernet
- Le bassin de la Tuillère
- Le Bassin de l'Anjoly

La structure type des éléments modélisés pour représenter les bassins de rétention est la suivante :

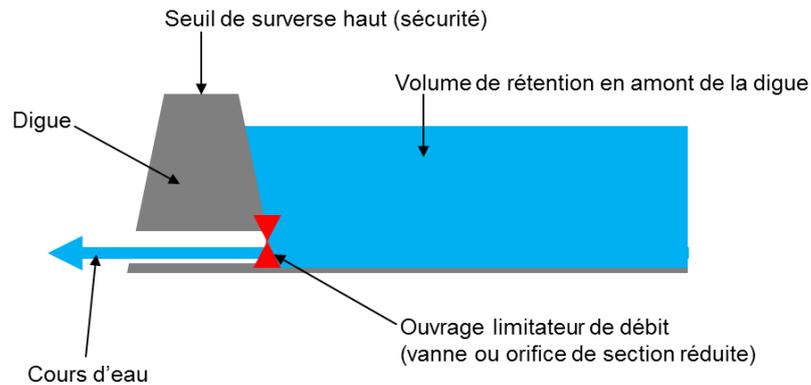


Figure 24 : Fonctionnement d'un bassin de rétention type

Selon le fonctionnement hydraulique du bassin de rétention, nous avons adapté sa modélisation.

En effet lorsque le cours d'eau traverse le bassin de rétention, comme pour le bassin du Griffon ou celui de la confluence de la Marthe avec l'Infernet, le bassin a été représenté en 2D, avec un maillage fin, des liaisons sur versante en haut des berges et un ouvrage aval sur le cours d'eau jouant le rôle d'ouvrage de régulation.

Lorsque les apports du bassin de rétention est un chenal d'aménagé de la Cadière ou le réseau pluvial, le bassin de rétention a été représenté par un casier avec une alimentation (cours d'eau ou écoulements de surface), les ouvrages de régulation aval et seuil déversoir.

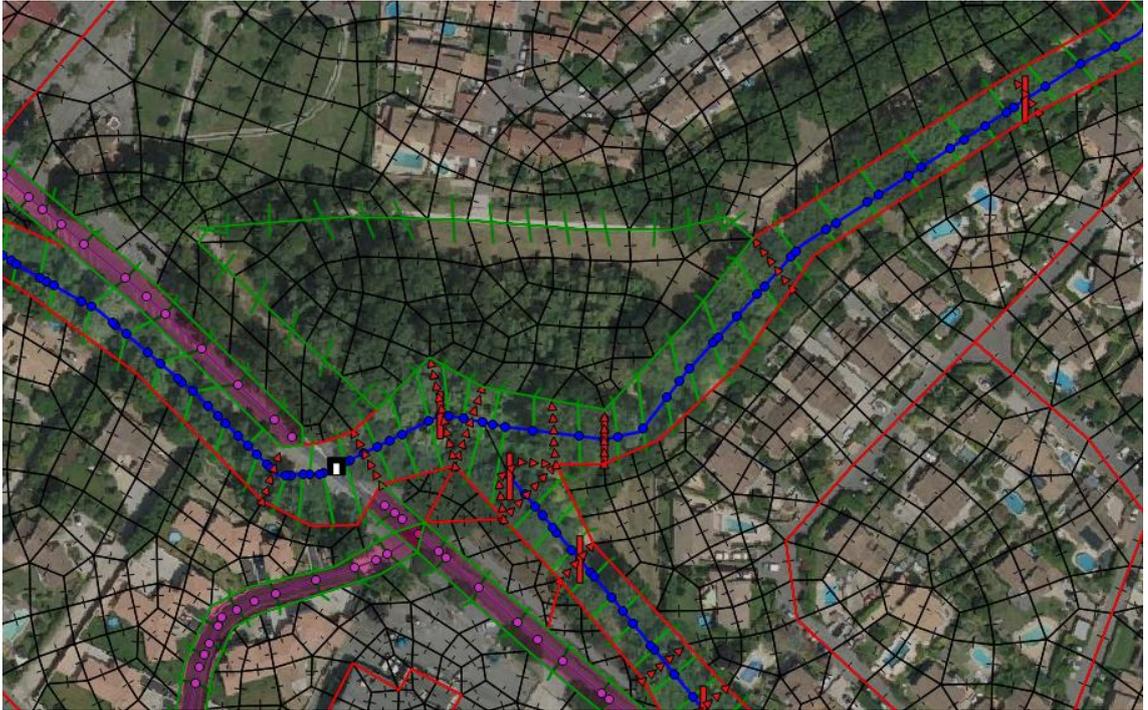


Figure 25 : Bassin de rétention à la confluence du vallon de l'Infernet et de la Marthe incluse dans le maillage 2D



Figure 26 : Bassin de La Tuilière à Vitrolles représenté par un casier avec un niveau d'eau imposé à l'état initial

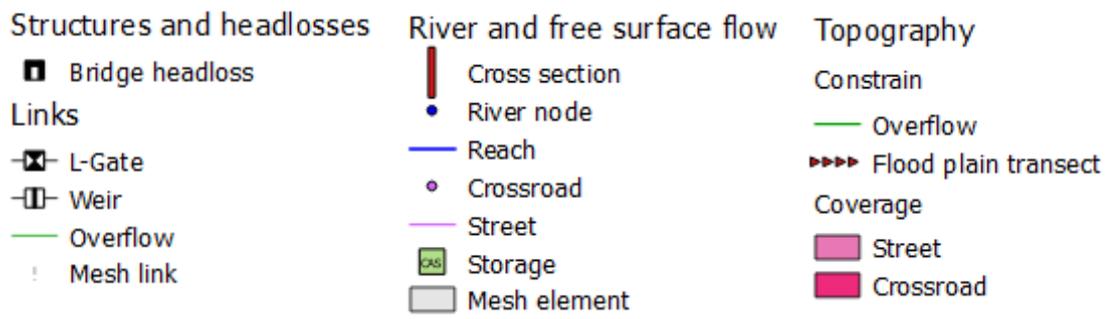


Figure 27 : légende des figures précédentes sur les bassins de rétention

3.5 CONDITIONS AUX LIMITES

La condition aux limites aval correspond au niveau de l'Étang du Bolmon, exutoire de la Cadière.

Au regard des connexions existantes entre les étangs du Bolmon et l'Étang de Berre, qui sont présentées dans la cartographie suivante, nous pouvons supposer que le niveau de l'étang du Bolmon sera pris égal à celui de l'Étang de Berre.



Figure 28 : Les connexions entre les étangs

Dans la première phase de l'étude nous avons mené une recherche bibliographique sur le niveau de l'Étang de Berre ainsi que sur les niveaux marins au niveau des marégraphes de Fos sur Mer et de Marseille.

Cette analyse a permis de mettre en évidence que

- La réponse de l'étang de Berre aux fluctuations de la pression atmosphérique est moins rapide que celle de la mer ouverte (effet du filtre constitué par le canal de Caronte),
- Le marnage de l'étang était inférieur à celui observé en mer ouverte (étude sur 9.5 mois en 1998)
- Le niveau marin pris dans les études antérieures sur le secteur d'étude (études hydrauliques et maritimes) est de 0.5mNGF, ce qui correspond au niveau haut observé entre janvier et octobre 2017.

Ainsi, malgré l'atténuation possible du marnage entre l'Étang de Berre et la mer, un niveau constant de l'Étang de Berre et donc de l'Étang du Bolmon de 0.5mNGF permet :

- D'être sécuritaire tout en restant cohérent avec la réalité,
- D'être cohérent avec les études antérieures,

Ainsi la condition aval du modèle sera prise constante à la cote 0.5mNGF.

Pour les crues de calage, le niveau réel mesuré au marégraphe a été extrait de la base de données du SHOM (Service Hydrographique et Océanographique de la Marine). Seules les données pour la crue du 10 septembre 2005 ont pu être récupérées :



Figure 29 : Niveau marin entre le 9 et le 13 septembre 2005 au marégraphe de Marseille

Pendant l'événement le niveau marin au niveau du marégraphe de Marseille est compris entre 0.30mNGF et 0.25mNGF. Ainsi pour cette crue, le niveau aval sera pris constant à 0.30mNGF, qui est représentatif du niveau marin au moment du pic de crue.

Remarque sur l'étude hydraulique des Aygalades :

Trois hypothèses de niveau aval ont été testées lors des phases de calage du modèle. Elles n'ont qu'une faible influence sur le périmètre de la zone inondée pour l'aléa de référence. En conséquence, et par continuité avec l'étude hydraulique qui a été conduite dans le cadre du PPRI sur l'Huveaune, un niveau marin de **+1.50 mNGF** sera pris en compte de la crue de référence et la crue décennale. S'agissant de la crue exceptionnelle, un niveau marin de **+2.10 mNGF** sera pris en compte (surcote marine + changement climatique).

3.6 PRISE EN COMPTE DES MURS ET INFRASTRUCTURES ROUTIERES ET FERROVIAIRES EN REMBLAI

Dans le lit majeur, le maillage s'appuie notamment sur des limites physiques contraignant les écoulements ou lignes de contraintes (digues, remblais, ...), la taille des mailles étant définie par le modélisateur en fonction de la précision attendue et de la morphologie de la vallée.

Les singularités ponctuelles au droit des franchissements routiers ou ferrés sont schématisées par des liaisons spécifiques reliant les mailles amont et aval :

- des lois d'orifice pour les buses et les ponceaux de décharge,
- des lois de seuil pour les routes, chemins, digues, murets, ... submersibles.

Les infrastructures routières et ferroviaires en remblai sont donc prises en compte par les lignes de contraintes et singularités associées en cas d'ouvrage submersible ou d'ouvrages de décharge.

La carte page suivante permet de localiser les principaux remblais identifiés sur le bassin versant, avec notamment :

N°	Identification
1	Le remblai du bassin du Griffon et de la D9
2	Le remblai de la route D113 sur la commune des Pennes Mirabeau
3	Le remblai créé par l'autoroute A7
4	Le remblai de l'échangeur des Pennes (Autoroute A 7 / A 55)
5	Le remblai de la voie SNCF à Saint Victoret
6	Le remblai du croisement des route D9 / D20

Tableau 2 : Identification des principaux remblais

Les murs de séparation et murs de clôture ne sont pas pris en compte dans le modèle, et sont donc considérés comme « transparents ».

Les murs et murettes des cours d'eau ne sont pas non plus pris en compte pour les simulations de l'aléa de référence.



Figure 30 : Principaux remblais identifiés sur le bassin versant

4 CALAGE

Le calage consiste à ajuster les paramètres du modèle de sorte à retrouver par le calcul les niveaux de crues observés :

- Coefficients d'imperméabilisation,
- Coefficients du modèle pluie-débit : coefficients de ruissellement et temps de réponse des bassins versants,
- Coefficients de Strickler (de frottement) caractérisant les rugosités des lits mineurs et lits majeurs,
- Adaptation du choix de structure du modèle : 1D ou 2D,
- Ouvrages singuliers, fonctionnement des ouvrages de rétention.

Le calage du modèle s'appuie sur la comparaison des mesures et observations et des résultats des simulations des différentes crues historiques modélisées.

4.1 CHOIX DES EVENEMENTS DE CALAGE

Trois crues sont choisies pour le calage du modèle :

- 22-23 septembre 1993 : crue historique ayant marqué les esprits, plus forte crue connue sur le bassin versant, crue débordante, crue comportant des éléments historiques (rapport d'analyse de la crue et cartographies, laisses de crue), en outre de nombreuses études ont utilisé cette crue comme crue de calage.
- 10 septembre 2005 : crue récente, nous ne disposons pas de mesures de débits cependant, nous disposons de laisses de crue, de photographies, d'un rapport de l'analyse de la crue et une cartographie des débordements sur la commune de Marignane. Cette crue est moins importante que la crue de 1993 toutefois elle a la particularité d'avoir eu un impact majoritairement sur le bassin versant du Raumartin.
- 16 et 18 septembre 2009, crue récente dont la pluie est comparable à l'événement de 2005, nous avons peu d'éléments sur cet événement, toutefois nous disposons des mesures de débit à la station hydrométrique.

Pour prendre en compte les pluies enregistrées dans le modèle, nous avons utilisé les données relevées aux pluviomètres de Marignane et des Milles.

4.2 CALAGE DE LA CRUE DU 22 SEPTEMBRE 1993

4.2.1 Les données disponibles

Les éléments utilisés pour le calage de la crue de septembre 1993 sont :

- Les pluies à la station des Milles et de Marignane,
- L'hydrogramme de la station hydrométrique, le pic de crue a été reconstitué par l'exploitant de la station, car cette dernière ne l'a pas mesuré,
- Les laisses de crue fournies par la DDTM 13,
- L'étude sur le ruissellement de Vitrolles pour le secteur du Bondon et du ravin d'Aix, la cartographie de l'aléa sur ces deux cours d'eau est basée sur cette pluie,

Les laisses de crue existantes pour la crue de septembre 1993 sont listées dans le tableau ci-après :

Nom_riv	Date_crue	Lame_eau	Prec_plani	Nature
cadière, la (ruisseau)	22/09/1993	2.35	Grande	Laisse crue
cadière, la (ruisseau)	22/09/1993	3.5	Moyenne	Laisse crue
cadière, la (ruisseau)	22/09/1993	2.25	Grande	Laisse crue
cadière, la (ruisseau)	22/09/1993	2.85	Grande	Laisse crue
cadière, la (ruisseau)	22/09/1993	3.1	Grande	Laisse crue
cadière, la (ruisseau)	22/09/1993	-0.4	Grande	Hauteur d'eau constatée
cadière, la (ruisseau)	22/09/1993	0.5	Grande	Hauteur d'eau constatée
cadière, la (ruisseau)	22/09/1993	2	Grande	Laisse crue
cadière, la (ruisseau)	22/09/1993	0.7	Moyenne	Laisse crue
cadière, la (ruisseau)	22/09/1993	2.85	Grande	Laisse crue
cadière, la (ruisseau)	22/09/1993	0.36	Grande	Laisse crue
cadière, la (ruisseau)	22/09/1993	0.4	Grande	Laisse crue
cadière, la (ruisseau)	22/09/1993	3.5	Grande	Laisse crue
cadière, la (ruisseau)	22/09/1993	0.9	Moyenne	Hauteur d'eau constatée
cadière, la (ruisseau)	22/09/1993	0.7	Moyenne	Hauteur d'eau constatée
cadière, la (ruisseau)	22/09/1993	0.5	Moyenne	Hauteur d'eau constatée
cadière, la (ruisseau)	22/09/1993	2.9	Moyenne	Laisse crue
cadière, la (ruisseau)	22/09/1993	1	Moyenne	Laisse crue

Tableau 3 : liste des repères de crue du 22 septembre 1993

Nous ne disposons pas du niveau marin pour cet événement, nous l'avons fixé à 0.5mNGF (niveau moyen annuel).

La pluie intervient après un épisode de sécheresse, toutefois la forte intensité de cet événement a contribué à saturer les sols au cours de l'épisode pluvieux. Les coefficients de ruissellement modélisés représentent donc les caractéristiques du sol saturé.

Dans le cadre du calage sur cet événement les coefficients de ruissellement sur la partie urbaine de Marignane et Saint Victoret ont été réduits de 10% à 20% par rapport aux coefficients déterminés à partir de l'occupation du sol actuelle. En effet depuis 1993, l'urbanisation de ces secteurs a augmenté comme le montre les photographies aériennes suivantes datées de 1992 et 2018 :



Figure 31 : Photographie aérienne de 1992 - Marignane (source géoportail)

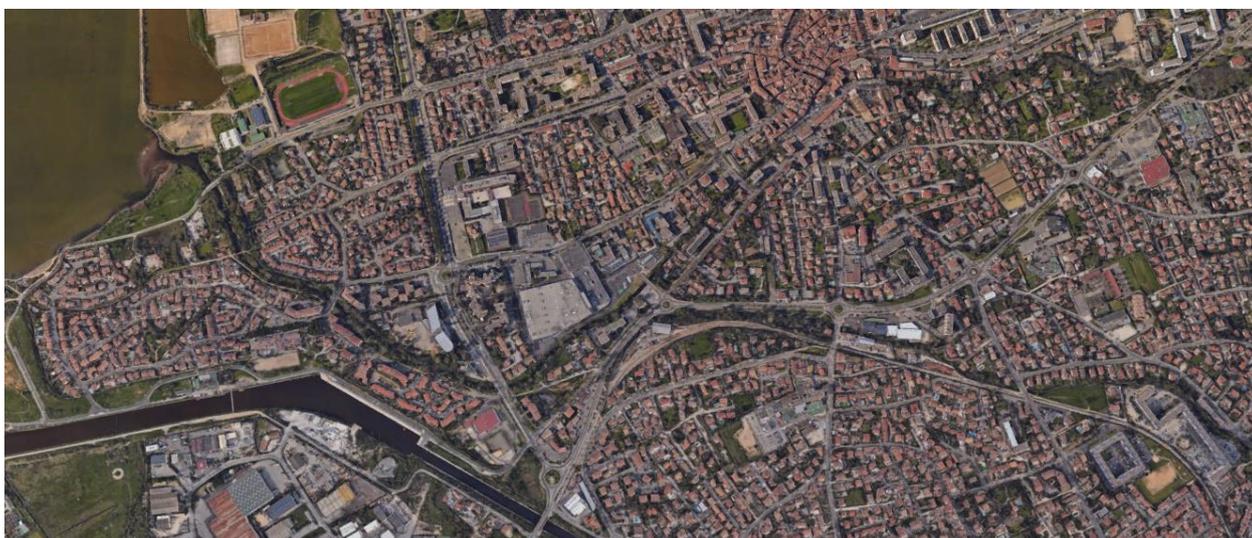


Figure 32 : Photographie aérienne de 2018 - Marignane (source google earth)

La cartographie suivante présente les coefficients de ruissellement pris pour le calage de la crue de septembre 1993 :

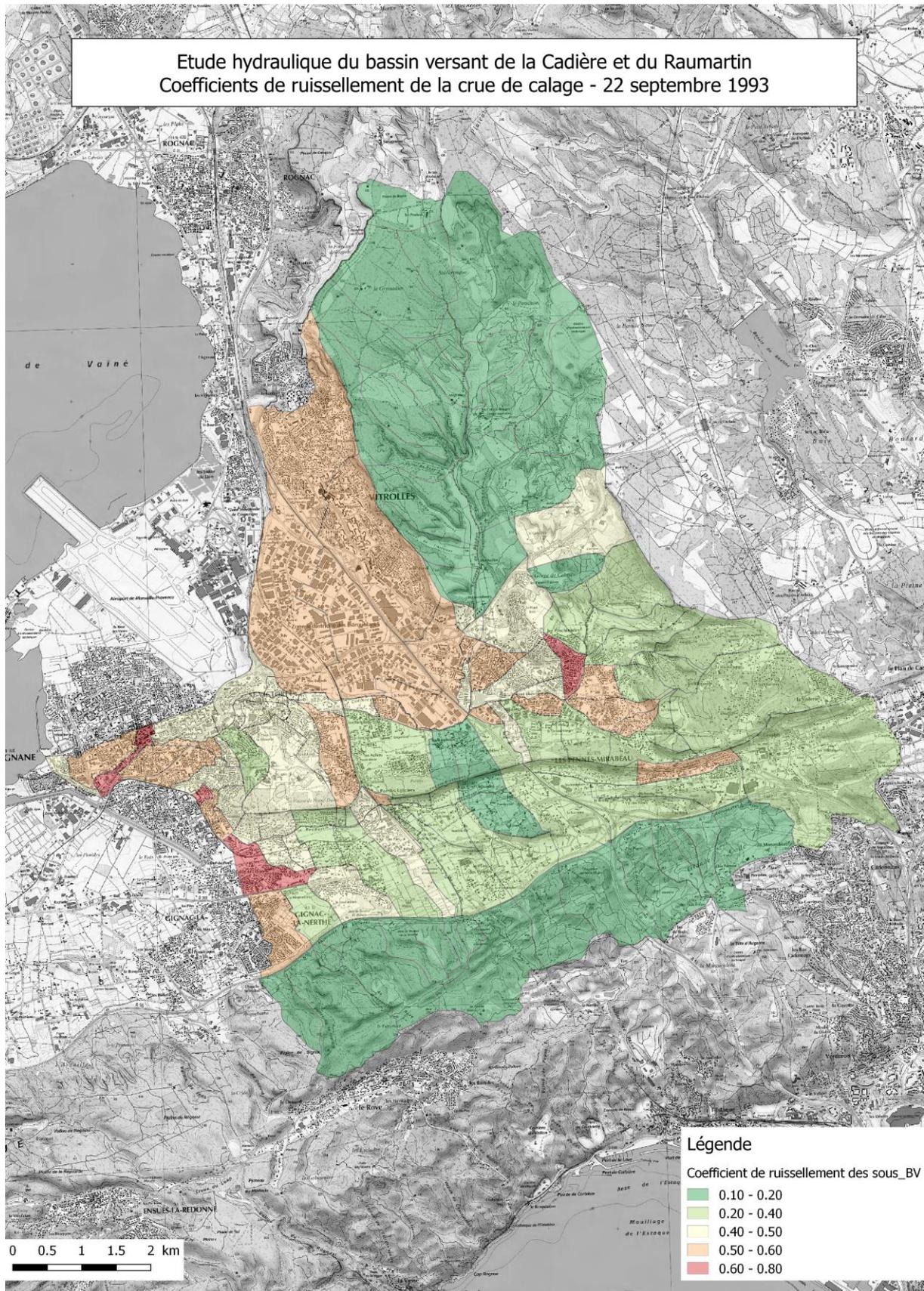


Figure 33 : Coefficient de ruissellement des sous-bassins versant pour la crue de calage – 22 septembre 1993

4.2.2 Hyétoigrammes mesurés 22 septembre 1993

La pluviométrie de l'événement du 22 septembre 1993 à la station d'Aix Les Milles est représentée dans les graphiques suivants.

Les 3 stations de mesures situées à proximité du bassin versant (Aix En Provence, Aix Les Milles et Marignane) ont présenté des dysfonctionnements pendant l'épisode pluvieux. Les données ont donc été reconstituées par Météo France.

La pluie à la station d'Aix Les Milles est représentative de l'événement sur le bassin versant et permet d'être cohérent avec les hypothèses hydrologiques de l'étude du SDEP de Vitrolles et notamment sur les bassins versant du Bondon et du Ravin d'Aix

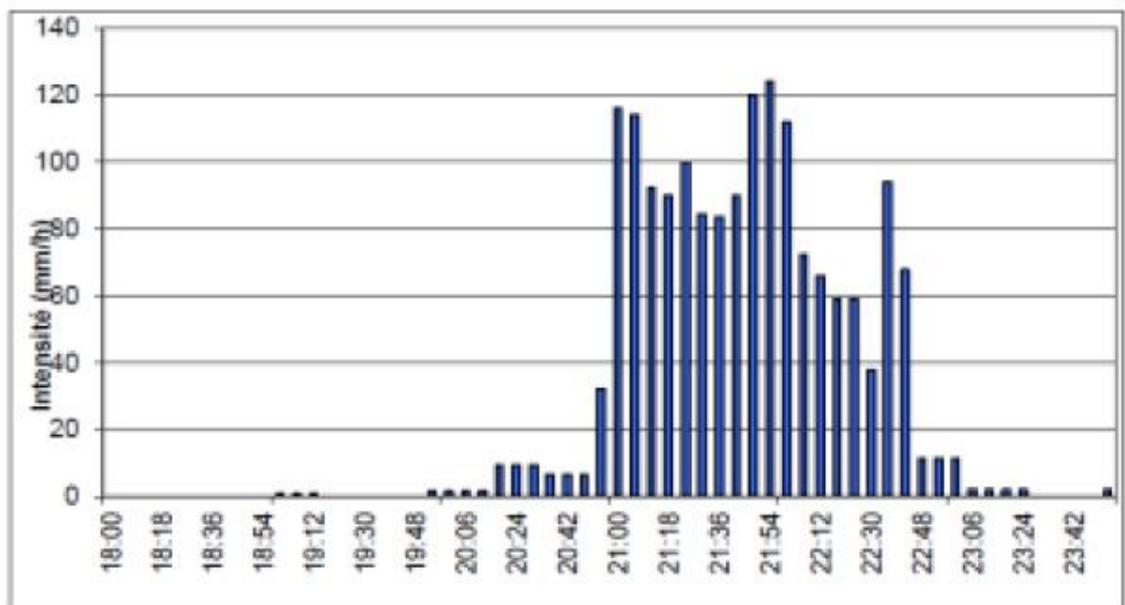
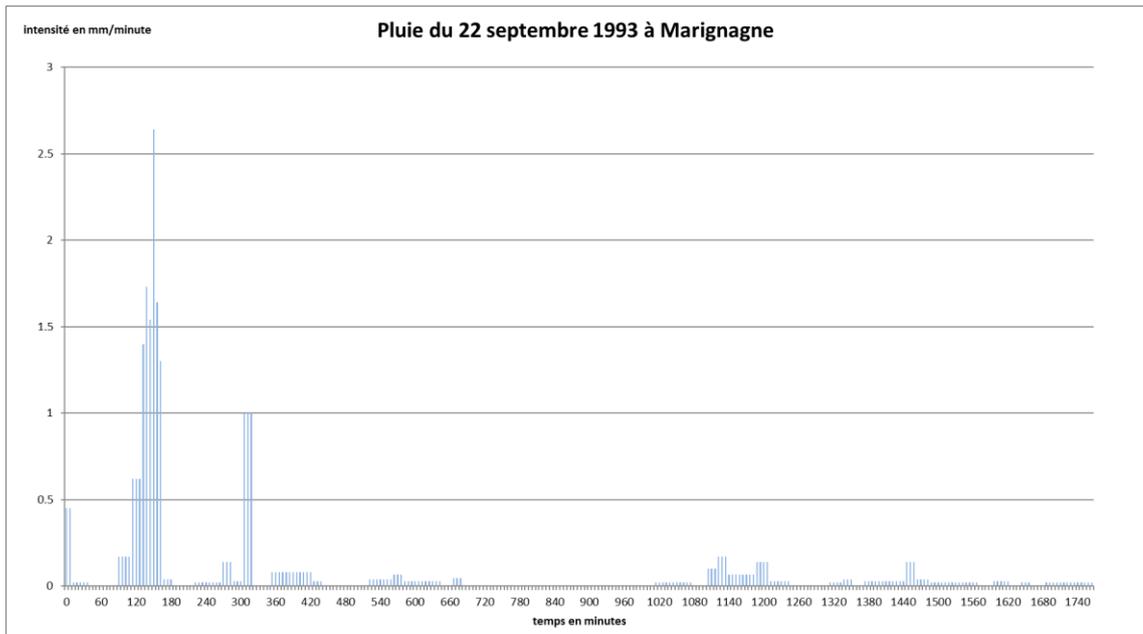


Figure 2 – Pluviométrie du 22 (8h00) au 23 septembre (8h00) 1993 à la station d'Aix-Les Milles (Source : « Etablissement d'une cartographie réglementaire des ZI de la Touloubre » - Sogréah - 1999)

Figure 34 : Pluviométrie du 22 au 23 septembre 1993 à la station d'Aix-Les Milles (source SDEP 1999)

La pluie de Marignane a été reprise de l'étude hydraulique de la Cadière, du Bondon et du ravin d'Aix pour la commune de Vitrolles réalisée par le SIB en juillet 1997.



L'analyse de l'événement dans le cadre de l'étude de la « délimitation des zones inondables – La cadière La bondon et le Ravin d'Aix » (Commune de Vitrolles - SIB janvier 1998), il est précisé que la pluie s'est décalée spatialement de l'Ouest vers l'Est. Ce déplacement de l'orage a vraisemblablement diminué l'impact de la crue en aval de Vitrolles car les points de débits des zones rurales et urbaines n'étaient pas concomitantes. C'est ce qui se retrouve dans la forme de l'hydrogramme estimé à la station hydrométrique.

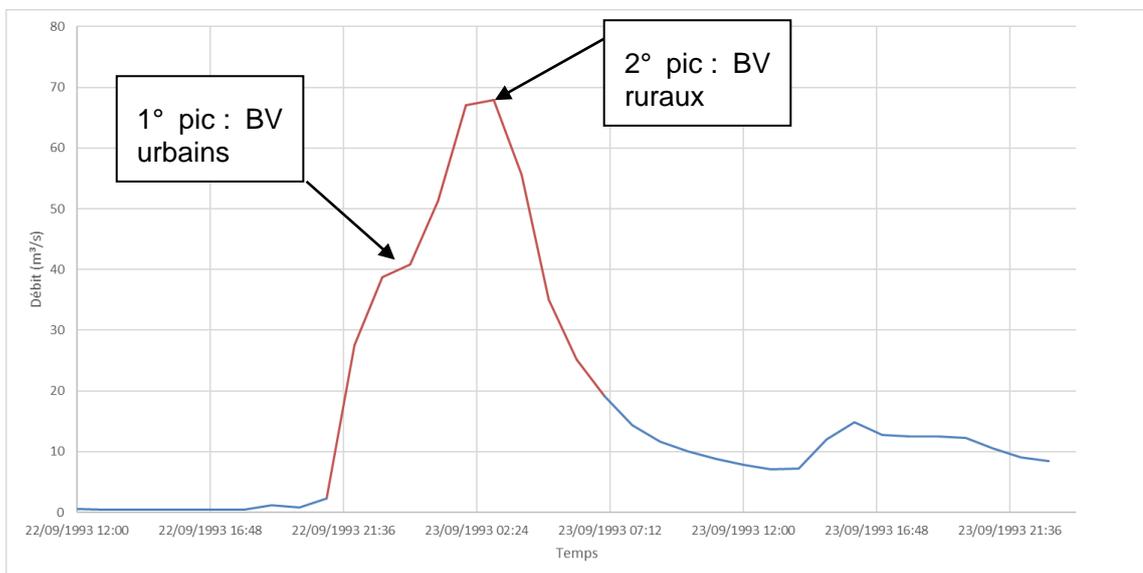


Figure 35 : Hydrogramme mesuré (en bleu) / estimé (en rouge) à la station hydrométrique pour la crue de septembre 1993

4.2.3 Les points de calage / hydrogrammes / laisse de crue

a) Les tests

Afin de reproduire la forme d'hydrogramme estimé, représentative de l'événement de septembre 1993, nous avons réalisé plusieurs tests de pluie :

- Test 1 : la pluie enregistrée à la station de Marignane au pluviomètre de Marignane

Nous savons par témoignage de MétéoFrance que la station de Marignane a connu des problèmes d'enregistrement pendant l'évènement ; les données retrouvées dans l'étude de 1997 a toutefois permis de tester cette pluie afin d'analyser la réponse du bassin versant.

- Test 2 : la forme de la pluie d'Aix les Milles au pluviomètre de Marignane

Le second test a conduit à modifier la forme de la pluie en prenant en compte la pluie enregistrée à Aix Les Milles. Toutefois la pluie a été réduite afin de considérer la disparité spatiale de l'évènement puisque la pluie enregistrée sur Marignane et les éléments retrouvés sur l'évènement de 1993 indiquent des intensités moindres.

Station\Durée	48h	24h	6h	3h	1h	30min	6min
Aix-Galice	255.0	222.0	218.2	206.8	129.9	70.7	12.8
Aix-Les Milles	232.7	189.0	178.2	169.4	100.8	53.0	12.4
Marignane	147.0	115.0	104.6	83.0	73.2	53.6	15.8
La Fare	139.4	103.8	93.8	92.2	81.2	53.6	13.0
Salon	108.2	54.2	45.4	44.2	32.2	26.4	7.6
Quantiles 100 ans Marignane	-	203	152	131	109	58	14

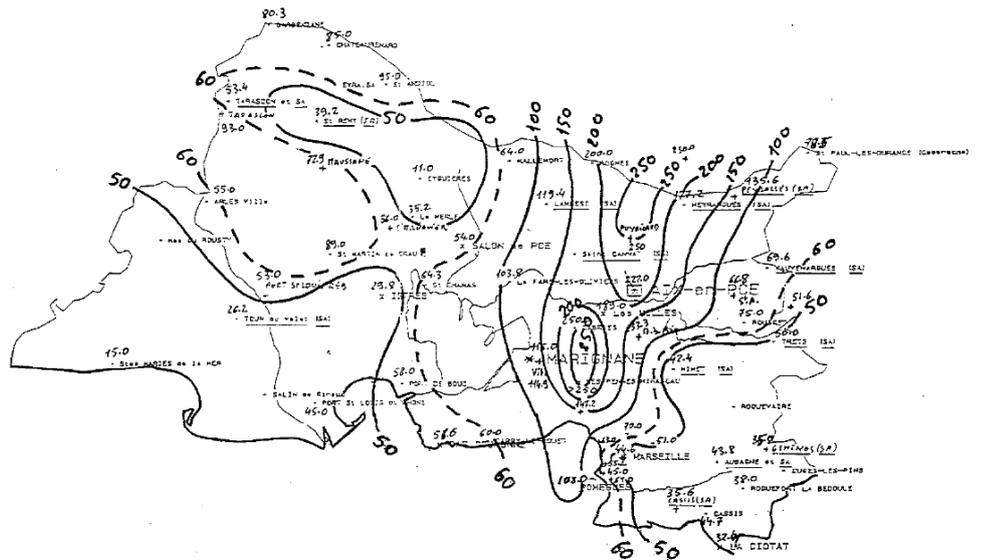
Tableau 2 : Valeurs maximales enregistrées lors de la pluie du 22 et 23 septembre 1993 (Source : Météo France)

- Test 3 : La pluie de la forme d'Aix Les Milles au pluviomètre de Marignane et la pluie d'Aix les Milles à la Station d'Aix Les milles

Au regard des deux tests précédents et afin de représenter au mieux l'hydrogramme, il semble nécessaire de représenter d'avantage la disparité spatiale de l'évènement. Nous avons donc injecté deux pluies d'intensité différentes mais de forme identique. Le Logiciel calcule ensuite un hyétogramme par bassin versant issu de la pondération (par la distance) entre les deux stations de Marignane et des Milles. Les deux pluies ont été injectées avec un décalage de 60min entre la pluie de Marignane et d'Aix Les Milles

- Test 4 : La pluie de la forme d'Aix Les Milles aux pluviomètres de Marignane et en amont du Bondon

Afin d'affiner l'hydrogramme et de se rapprocher de la réalité, nous avons réalisé un dernier test. En effet, d'après la cartographie de la pluviométrie du 22/09/1993 au 23/09/1993, le maximum de la pluie (250mm) était centré sur l'amont du bassin versant du Bondon, entre Marignane et Aix Les Milles.



PLUVIOMETRIE du 22-09-93 (8^h) AU 23-09-93 (8^h HL)

□ - C.M.I.A./SE
 □ - C.D.M. 13
 x - STATIONS METEOROLOGIQUES ET SEMAPHORES
 * - POSTES CLIMATOLOGIQUES SA - STAT.AUTIO

RESEAU CLIMATOLOGIQUE DEPARTEMENTAL
 DES BOUCHES DU RHONE 93

Figure 36 : Pluviométrie du 22-09-93 au 23-09-93 (source Délimitation des zone inondable de la Cadière du Bondon et du Ravin d'Aix – Mairie de Vitrolles - SIB janvier 1998)

Nous avons donc créé un pluviomètre fictif en amont du bassin versant du Bondon afin d'injecter une pluie de la forme de la pluie enregistrée à Aix Les Milles mais avec des intensités plus importantes. Nous avons conservé un décalage des pluies de 60min entre la station de Marignane et la station fictive.

b) Les hydrogrammes

La figure suivante représente les hydrogrammes résultats des différents test de modélisation et l'hydrogramme estimé au droit de la station de mesure de la Banque hydro.

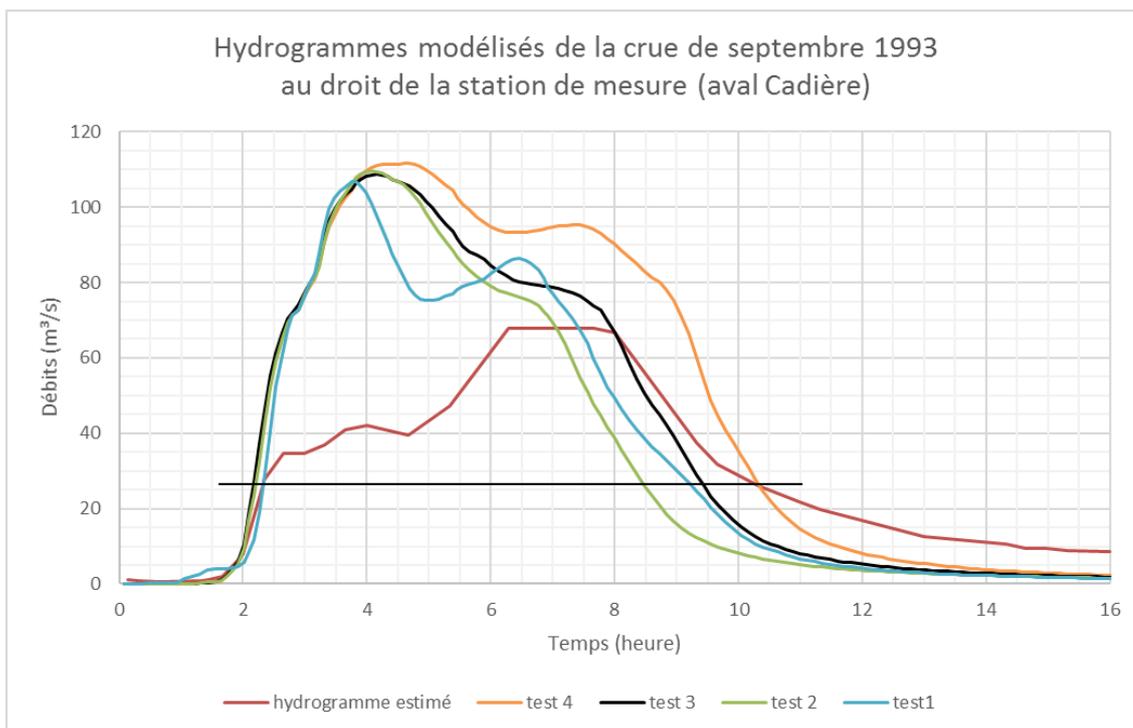


Figure 37 : Comparaison des hydrogramme de septembre 1993

La station de mesure a connu des problèmes d'enregistrement dès que le débit était au-dessus de 26m³/s. Le gestionnaire précise que les valeurs de débits indiquées au-dessus de 26m³/s sont jugées fortement incertaines. La figure suivante, issue de la banque Hydro précise le type d'incertitude indiquée par le gestionnaire :

22/09/1993 21:57	7
22/09/1993 22:00	8.06
22/09/1993 22:20	27 #
22/09/1993 22:20	27.4 #
22/09/1993 22:39	34.5 #
22/09/1993 22:59	34.7 #
22/09/1993 23:19	36.8 #
22/09/1993 23:39	40.9 #
23/09/1993 00:00	42.2 #
23/09/1993 00:40	39.5 #
23/09/1993 01:20	47.3 #
23/09/1993 02:17	68 #
23/09/1993 02:19	68 >
23/09/1993 02:39	68 >
23/09/1993 03:00	68 >
23/09/1993 03:20	68 >
23/09/1993 03:40	68 >
23/09/1993 04:00	66.7 #
23/09/1993 05:19	37.4 #
23/09/1993 05:39	31.7 #
23/09/1993 06:20	26 #
23/09/1993 07:00	21.7

: valeur 'estimée' (mesurée ou reconstituée) que le gestionnaire juge incertaine

> : valeur inconnue forte

Figure 38 : Données de débits jugées incertaine par la gestionnaire

Quelques soit la pluviométrie injectée dans le modèle, les hydrogrammes résultant de la modélisation hydraulique donnent des débits maximums plus important que l'hydrogramme estimé.

Un calcul de la section de plein bord au droit de la station, sur la base de la topographie actuelle permet d'estimer un débit de l'ordre de 105m³/s. Les hydrogrammes modélisés présentent des débits maximums entre 106 et 111m³/s. En outre, au vu des différents éléments bibliographiques, le secteur devait être débordant. Ce qui justifierai le débit de plein bord sur ce secteur. L'hydrogramme estimé par la banque hydro semble donc avoir fortement sous-estimé le débit de pointe.

Quelques soit la pluie injectée les hydrogrammes présentent tous un premier pic plus intense que le second pic. Ces deux pics sont donc liés à la réaction du bassin versant :

- Un premier pic lié à la réaction de la partie urbaine située en aval du bassin versant
- Un second pic lié à la réaction de la partie rurale situé en amont du bassin versant.

La comparaison des hydrogramme permet de faire ressortir les éléments suivants :

- Test 1 : Le premier test, basé sur la pluie de Marignane à la station de Marignane, présente deux pics bien marqués.
- Test 2 : Le deuxième test, basé sur la pluie d'Aix Les Milles injectés à Marignane, présente deux pics moins distincts et une décrue rapide
- Test 3 : Le troisième test, basé sur la pluie d'Aix Les milles injectée à Marignane et à Aix Les Milles, montre une réponse plus longue de la partie rurale amont, ce qui conduit à augmenter le temps de base de l'hydrogramme
- Test 4 : Le quatrième test, basé sur la pluie d'Aix Les Milles, injectée à Marignane et en amont du bassin versant avec une plus forte intensité, présente un hydrogramme de forme similaire au précédent (test 3) mais avec des débits plus importants liés à l'intensité plus forte de la pluie. Le temps de base est identique à l'hydrogramme estimé mais la décrue est légèrement plus rapide.

Au regard des incertitudes sur les pluies (problème d'enregistrement sur le pluviomètre de Marignane) et sur l'hydrogramme estimé, il semble que l'hydrogramme du test 3 soit le plus représentatif de l'événement et de la réaction du bassin versant de la Cadière et du Raumartin : pluie de la forme d'Aix Les Milles au pluviomètre de Marignane corrigé de l'intensité atteinte lors de l'événement et la pluie d'Aix les Milles à la Station d'Aix Les milles (voir graphique ci-après).

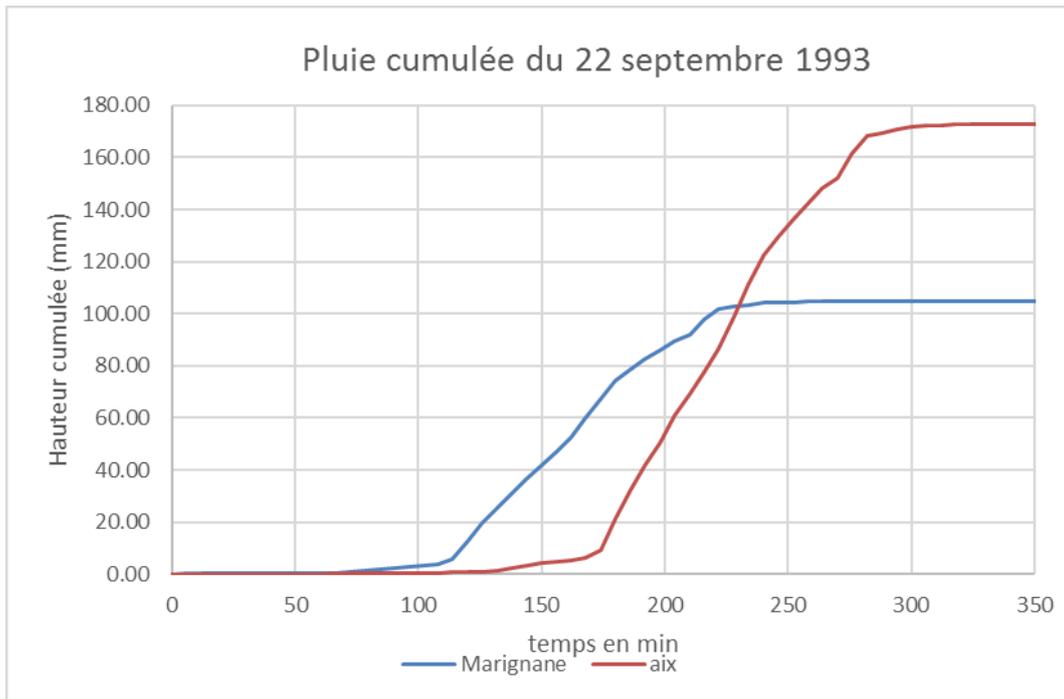


Figure 39 : Pluie de calage de septembre 1993

c) Les laisses de crues

Sur la base du scénario de pluie retenu (test 3) et afin de caler les paramètres nous avons comparé les éléments suivants :

- La ligne d'eau avec les laisses de crue dans le lit mineur de la Cadière
- Les hauteurs d'eau calculés en lit majeur avec les laisses de crues en lit majeur

La figure suivante permet de comparer la ligne d'eau obtenue avec les laisses de crues.

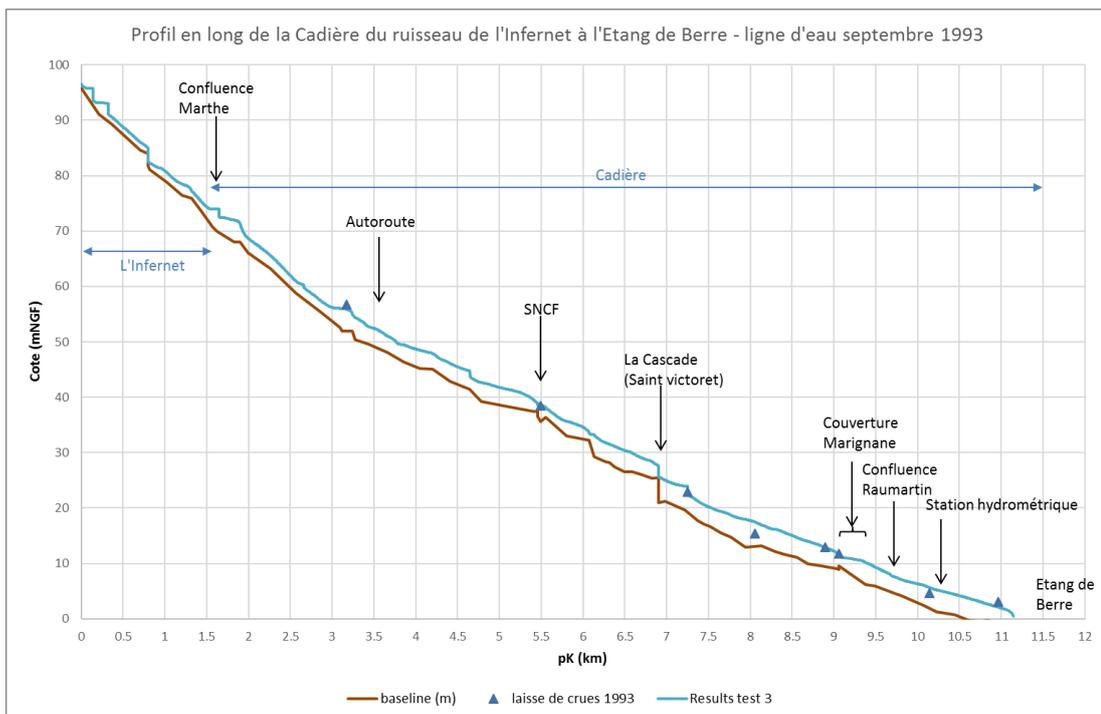


Figure 40 : Profil en long de la Cadière du vallon de l'Infernet à l'Etang de Berre et ligne d'eau de septembre 1993

Les laisses de crues sont principalement présentes dans le cours de la Cadière sur le secteur aval. La figure suivante présente donc un zoom de la partie aval de la Cadière.

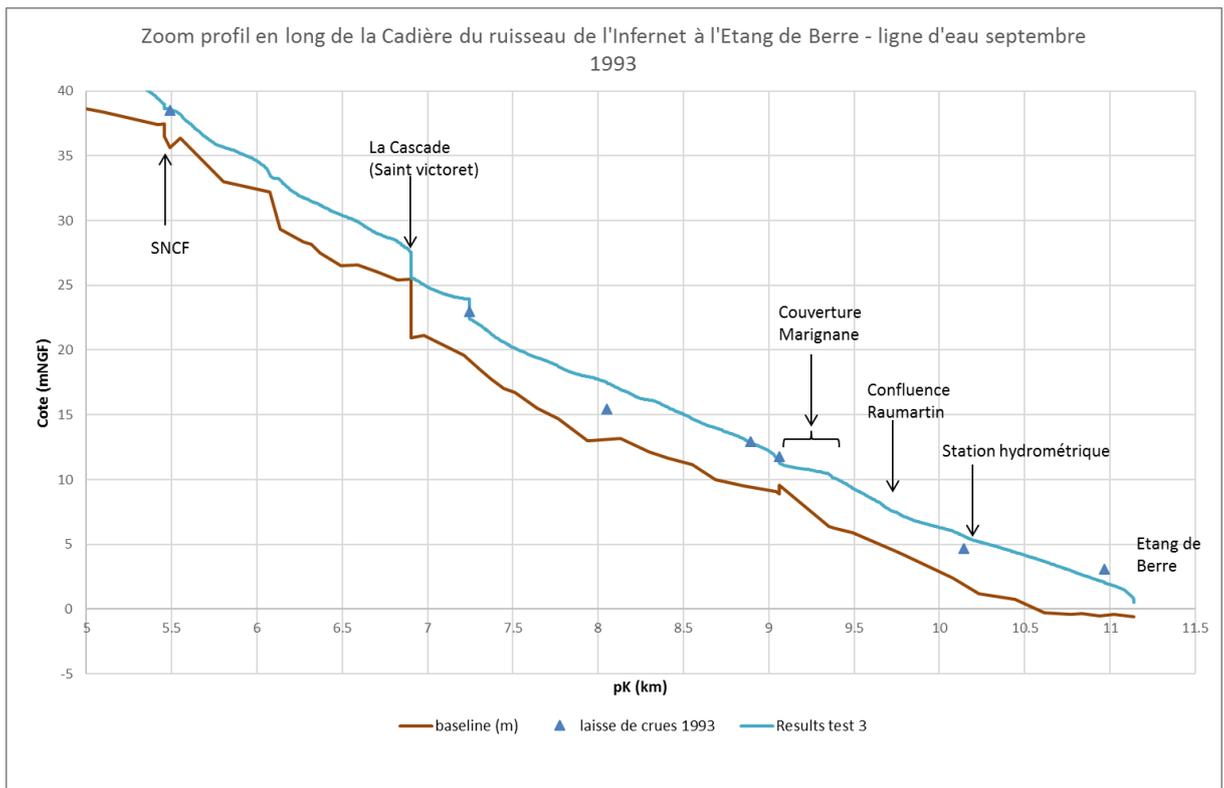


Figure 41 : Zoom sur la partie aval du profil en long de la Cadière

Le profil en long est relativement bien calé sur les laisses de crues.

Des laisses de crues ont également été relevées dans le lit majeur. Globalement la modélisation est cohérente avec les lames d'eau relevées sur site. Des différences de l'ordre de 10cm sont observables. Localement, les différences peuvent atteindre une trentaine de centimètres. Ces différences peuvent s'expliquer par :

- L'accumulation d'eau dans un bâtiment ou effet de remous sur la façade du bâtiment : ces deux phénomènes peuvent entraîner un exhaussement artificiel de la laisse de crue, non représenté dans la modélisation.
- La précision de la localisation de la laisse de crue sur les zones où la topographie est accidentée (forte variation) et particulièrement au niveau des parois des bassins de rétention.
- La présence d'embâcle au niveau d'un ouvrage augmentant ainsi la ligne d'eau, les débordements et ainsi les hauteurs d'eau en lit majeur (exemple de la buse de RD9 sur le Bondon qui présentait un embâcle lors de l'événement)
- La non représentation dans le modèle des ruissellements pluviaux pouvant augmenter localement le niveau des bassins de rétention (bassin de rétention de Saint Victoret / bassin de rétention entre la Marthe et l'Infernet)

Remarque sur le bassin de rétention à la confluence de la Marthe et de L'Infernet : afin d'obtenir des débordements sur la digue rive droite et sur la route, pour se rapprocher des laisses de crue, nous avons réalisé un test de modélisation en augmentant de façon raisonnable le coefficient de ruissellement des bassins versant naturels. Cette modification n'a qu'un impact limité, ce qui confirmerai sur ce secteur l'importance de la contribution des ruissellements.

Certaines laisses de crues représentent le contour de l'inondation. Elles sont représentées avec une lame d'eau de 0. Globalement la modélisation représente correctement l'emprise de la zone inondable de la crue de 1993.

Les cartographies sont détaillées en annexe et dans la chapitre 4.7 : Fonctionnement hydraulique du bassin versant (Crue de septembre 1993).

d) Comparaison des débits

Dans l'analyse bibliographique nous avons réalisé un tableau récapitulatif des débits ; il est rappelé ci-dessous.

Etude	Année	Commune	Cours d'eau	Q2ans	Q5ans	Q10ans	Q50ans	Q100 ans	Q 1993	Surface du bassin versant (km ²)
SDEP Vitrolles	2013	Vitrolles	Bondon						72.4	16.9
Schéma directeur communautaire	1998	territoire MPM	Bondon	5.8	7.7	9.3	16.7	24.9		16.55
Etude Hydraulique - La Cadière Le Bondon le ravin d'aix	1997	Vitrolles	Bondon						60.3	(amont A7)
Schéma de cohérence hydraulique et sanitaire communautaire	2008	territoire MPM	Cadière	19-26	29-41	31-52	47-75			72.4
Schéma de cohérence hydraulique et sanitaire communautaire	2008	territoire MPM	Cadière			50	100	141		73
Schéma directeur communautaire	1998	territoire MPM	Cadière	33.1	45.9	53.9	86.7	129		72.09
Etude Hydraulique - La Caidère Le Bondon le ravin d'aix	1997	Vitrolles	Cadière						28.9	(amont A7)
Etude Hydraulique - La Caidère Le Bondon le ravin d'aix	1997	Vitrolles	Cadière						89.2	au franchissement de l'A7
Etude Hydraulique - La Caidère Le Bondon le ravin d'aix	1997	Vitrolles	Cadière						73.8	pont SNCF
Schéma directeur communautaire	1998	territoire MPM	Marthe	2.3	3.5	4.4	10.8	13.9		3.55
Schéma de cohérence hydraulique et sanitaire communautaire	2008	territoire MPM	Raumartin			21	31	47		25.2
Schéma de cohérence hydraulique et sanitaire communautaire	2008	territoire MPM	Raumartin			8	29	46		
Schéma directeur communautaire	1998	territoire MPM	Raumartin	11.3	16.5	19.3	30.9	46		25.2
SDEP Vitrolles	2013	Vitrolles	Ravin d'Aix						16.6	2.26
Schéma directeur communautaire	1998	territoire MPM	Ravin d'Aix	2.2	3.5	5.4	10.7	13.7		3.29

Figure 42 : tableau des débits issus de la bibliographie

Les débits issus de la modélisation sont donc comparés à ceux issus de la bibliographie au niveau de secteurs stratégiques. Il ressort de l'analyse des hydrogrammes de la modélisation les éléments suivants :

- Le débit maximal du Bondon pris en amont de sa confluence avec la Cadière (amont A7) est de 55m³/s. Ce débit est inférieur au débit obtenu dans le cadre du SDEP de Vitrolles. Cette différence s'explique par des coefficients de ruissellement sur le bassin versant du Bondon de l'ordre de 45%. Nous trouvons que ces coefficients sont assez forts et ne représentent pas forcément l'aspect rural du bassin versant. Nous avons donc fait le choix de prendre des coefficients de ruissellement plus réalistes compris entre 10 et 20%. On remarque que le débit obtenu par modélisation est proche de celui de l'étude de 1997, qui annonçait un débit en amont de l'A7 de 60.3m³/s.
- Le débit maximal du ravin d'Aix en aval du parc du Griffon, (en amont de l'ouvrage) est de 18.2m³/s, ce débit représente les apports du ravin d'Aix mais ne considère pas les débordements du Bondon qui s'écoulent vers le Ravin d'Aix. Dans le SDEP de Vitrolles se débit est de 16.6m³/s. Le débit modélisé est donc cohérent avec le SDEP de Vitrolles.
- Le débit maximal de la Cadière au droit du passage de l'Autoroute A7 est de 87.4m³/s. Ce débit était estimé à 89.2m³/s dans l'étude 1997.
- Le débit maximal de la Cadière au droit du passage de la voie SNCF est de 40.8m³/s. L'ouvrage est limitant ce qui entraîne de nombreux débordements qui retournent au cours d'eau en aval de la traversée de la voie SCNF en empruntant le passage du boulevard Robert Ferrisse. Les débits transitant par cette traversée sont de l'ordre de 33.7m³/s. en faisant la somme des débits au droit de la voie SNCF le débit maximal de la Cadière est alors de l'ordre de 74.5m³/s, ce qui est cohérent avec l'étude de 1997 qui annonçait un débit de 73.8m³/s.

Le tableau suivant récapitule la comparaison des débits pour la crue de 1993

Secteur	Q bibliographique	Source	Q modélisation
Bondon amont A7	87.2 m ³ /s	SDEP Vitrolles 2014	55 m ³ /s
	60.3 m ³ /s	Etude 1997	
Ravin d'Aix aval parc du Griffon	16.6 m ³ /s	SDEP Vitrolles 2014	18.2 m ³ /s
Cadière traversée A7	89.2 m ³ /s	Etude 1997	87.4 m ³ /s
Cadière Pont SNCF	73.8 m ³ /s	Etude 1997	74.5 m ³ /s

Tableau 4 : Comparaison des débits aux points stratégiques

La cartographie suivante localise les points stratégiques où les débits ont été comparés avec les données de la bibliographie.

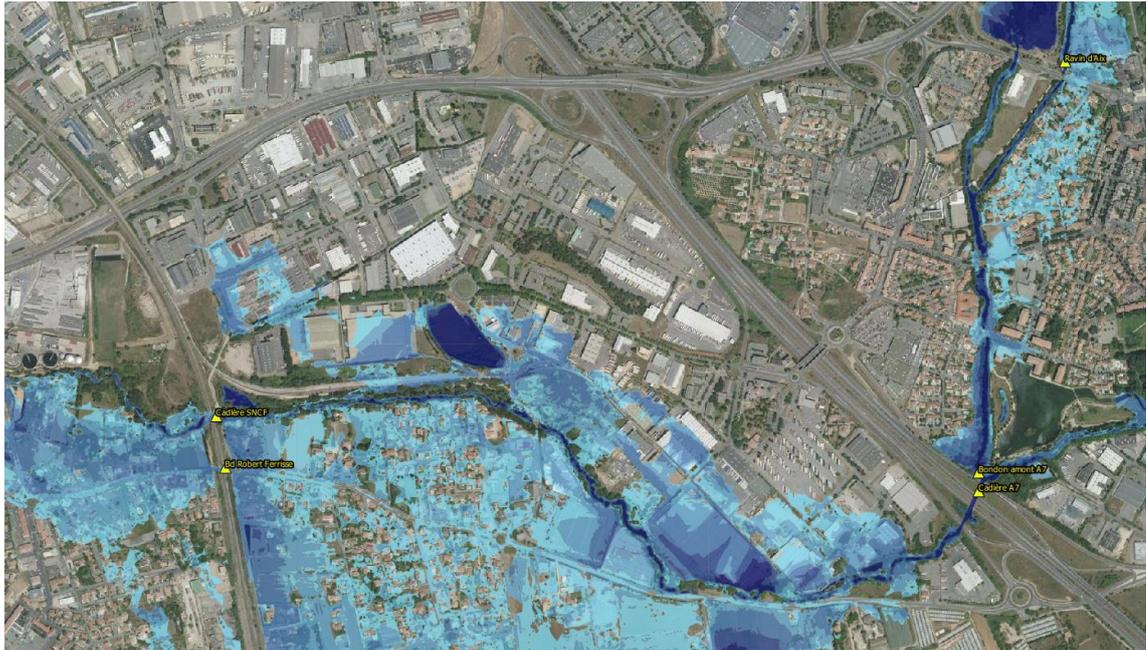


Figure 43 : Localisation des points stratégiques de comparaison des débits

Ainsi, les débits issus de la modélisation sont relativement cohérents avec les débits historiques.

4.3 VERIFICATION DU CALAGE AVEC LA CRUE DE SEPTEMBRE 2005

4.3.1 Les éléments disponibles

Les éléments utilisés pour le calage de la crue du 10 septembre 2005 sont :

- Les pluies de Marignane et d'Aix les Milles
- Les laisses de crue fournies par la DDTM13
- Rapport sur la crue de 2005 sur la commune de Marignane (SOGREAH 2005)
- Le niveau marin pour cet événement a été mesuré à 0.3mNGF

Les laisses de crue existantes pour la crue de septembre 2005 sont listées dans le tableau ci-après :

Nom_riv	Date_crue	Lame_eau	Prec_plani	Nature
raumartin, le (ruisseau)	10/09/2005	0.3	Grande	Laisse crue
raumartin, le (ruisseau)	10/09/2005	0.2	Grande	Laisse crue
raumartin, le (ruisseau)	10/09/2005	0.9	Grande	Laisse crue
raumartin, le (ruisseau)	10/09/2005	1	Grande	Laisse crue
raumartin, le (ruisseau)	10/09/2005	0.25	Grande	Laisse crue
raumartin, le (ruisseau)	10/09/2005	0.5	Moyenne	Laisse crue
raumartin, le (ruisseau)	10/09/2005	0.3	Moyenne	Laisse crue
raumartin, le (ruisseau)	10/09/2005	0.3	Grande	Laisse crue
raumartin, le (ruisseau)	10/09/2005	0.3	Moyenne	Laisse crue
raumartin, le (ruisseau)	10/09/2005	0.8	Moyenne	Laisse crue
raumartin, le (ruisseau)	10/09/2005	2.1	Moyenne	Laisse crue
raumartin, le (ruisseau)	10/09/2005	0.3	Grande	Laisse crue
raumartin, le (ruisseau)	10/09/2005	0.5	Grande	Laisse crue
raumartin, le (ruisseau)	10/09/2005	0.2	Moyenne	Laisse crue
cadière, la (ruisseau)	10/09/2005	0.7	Moyenne	Laisse crue
cadière, la (ruisseau)	10/09/2005	0.5	Grande	Laisse crue
cadière, la (ruisseau)	10/09/2005	0.4	Grande	Laisse crue

Tableau 5 : liste des repères de crue, 10 Septembre 2005

On constate également que les jours précédents cet évènement, de nombreuses précipitations ont très probablement contribué à saturer une partie des sols ce qui a probablement conduit à une apparition plus rapide du ruissellement. Les coefficients de ruissellement représentent donc l'occupation du sol comparable à celle d'aujourd'hui et la saturation des sols.

4.3.2 Les hyétogrammes 10 septembre 2005

Les hyétogrammes de la pluie du 10 septembre 2005 est représenté sur le graphique suivant. Le poste d'Aix Les Milles enregistre un pic maximal d'intensité de même ordre de grandeur que la station de Marignane et un cumul de pluie plus important.

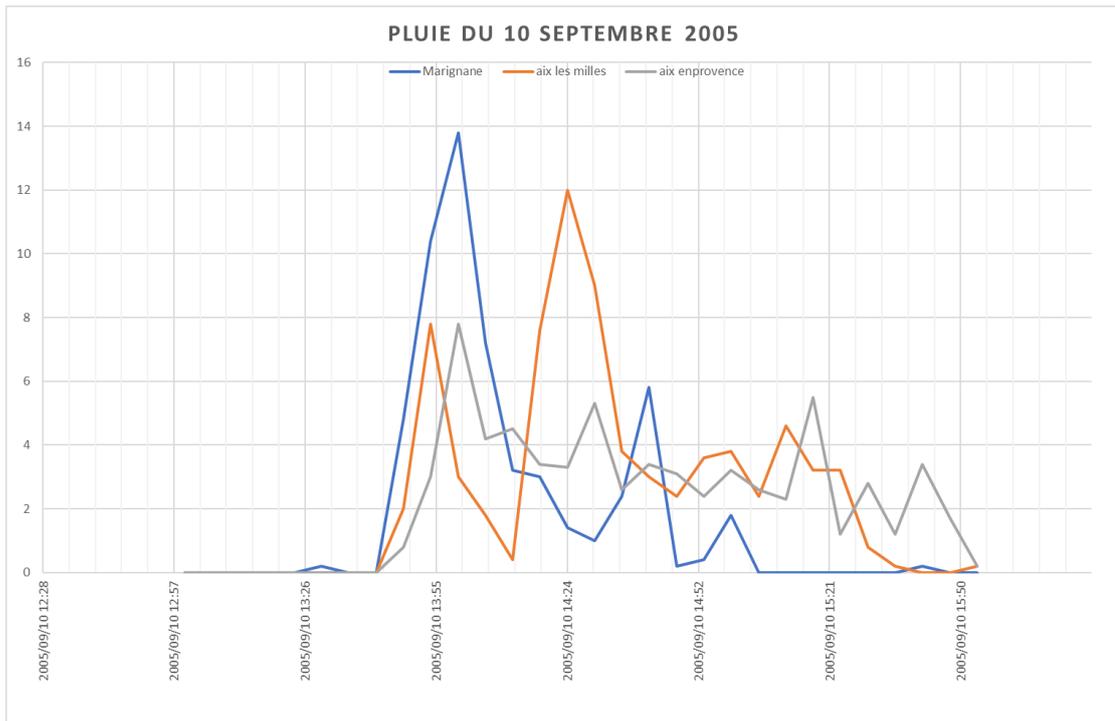


Figure 44 : Comparaison des pluies enregistrées aux postes de Marignane, Aix Les Milles, et Aix en Provence pour l'événement du 10 septembre 2005

Nous avons injecté ces deux hyétogrammes aux pluviomètres correspondants.

4.3.3 Les points de calage / laisses de crue

Les laisses de crues ont été principalement relevées dans le lit majeur du Raumartin. La cartographie suivante représente donc les débordements en lit majeur pour la crue de septembre 2005. Les hauteurs d'eau obtenues sont comparées aux laisses de crues.

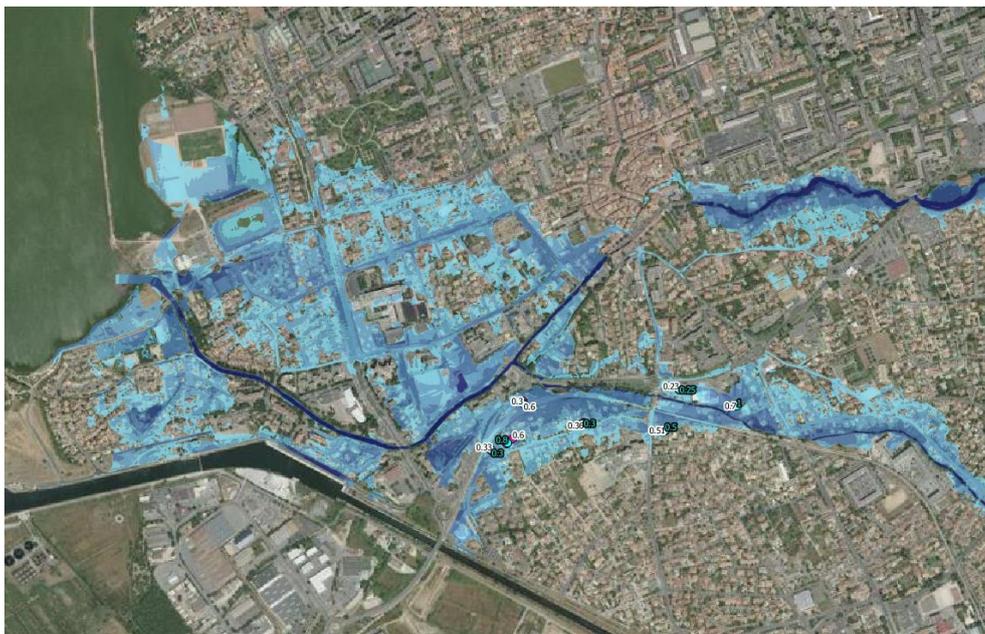


Figure 45 : Comparaison des laisses de crues relevées (en bleu) aux cotes modélisées (en noir) pour la crue de 2005

De manière générale, la modélisation donne des hauteurs d'eau de même ordre de grandeur que les laisses de crue. On notera deux secteurs où les hauteurs d'eau obtenues diffèrent du terrain :

- Sur le Raumartin, en aval de la voie ferrée, des débordements en rive gauche entraînent des inondations de 20 à 30cm. La modélisation montre des inondations moins importantes en emprise et en hauteur d'eau. Les fiches de laisses de crues, sur ce secteur ont également identifié la crue d'un des affluents du Raumartin (le ruisseau de Fondouille) ainsi que des apports par le réseau pluvial sur certains secteurs. Or la modélisation ne représente pas les débordements de ces affluents et ni le ruissellement pluvial, ce qui peut expliquer les différences observées.

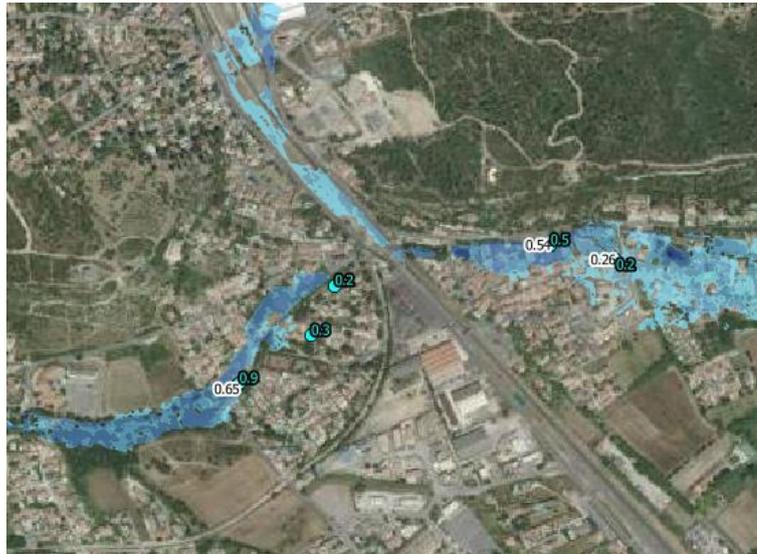


Figure 46 : Localisation des laisses de crues en aval de la voie ferrée sur le Raumartin pour la crue de 2005

- Sur la Cadière, en aval de l'autoroute, des débordements en rive droite entraînent des inondations entre 40 et 50cm d'après les laisses de crues (hauteurs maximales relevées). La modélisation présente des hauteurs d'eau plus importantes. Le MNT présente des points bas au droit des laisses de crue relevées. Ces points bas ne sont pas cohérents avec le terrain puisqu'on se situe sur des parkings.

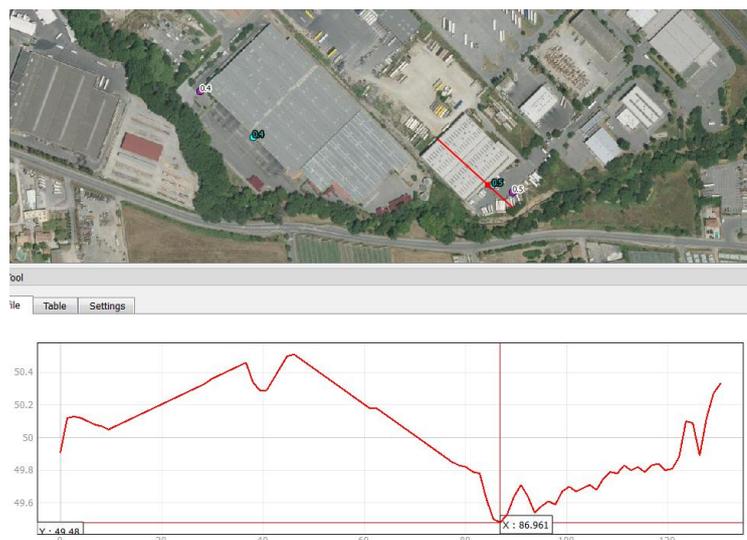


Figure 47 : Profil en travers au droit du bâtiment et du parking

Au droit de la laisse de crue, les hauteurs d'eau modélisées sont donc plus importantes. Afin de s'affranchir de cet artéfact, nous avons regardé le niveau d'eau à proximité des laisses de crue sur les parkings. La figure suivante localise les hauteurs d'eau cohérentes avec les laisses de crue.

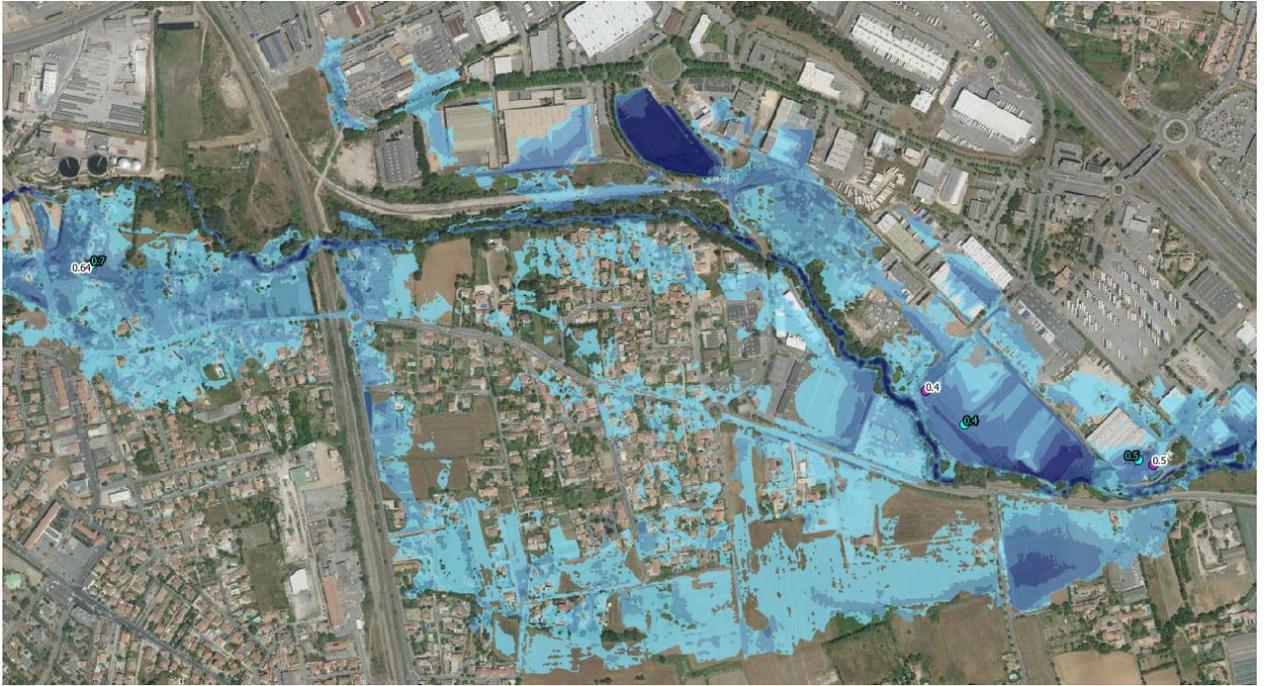


Figure 48 : cartographie des laisses de crue et des cotes modélisées sur la Cadière pour la crue de 2005

- Toutefois en aval du secteur précédent, au lieu-dit de la Terre du Pré une laisse de crue relève une hauteur d'eau maximale de 0.7m. La modélisation est conforme à la laisse de crue avec une hauteur d'eau de 0.66m.
- Une laisse de crue est dans le lit mineur du Raumartin au lieu-dit Pont amont cité Florida avec une hauteur d'eau de 2.1m. La modélisation au droit du pond donne une hauteur d'eau de 2.65m soit 55cm plus haut que la laisse de crue.

4.4 VERIFICATION DU CALAGE AVEC LA CRUE DE SEPTEMBRE 2009

4.4.1 Les éléments disponibles

Les éléments utilisés pour le calage de la crue du 16 et 18 septembre 2009 sont :

- La pluie à la station de Marnane
- La pluie à la station d'Aix Les Milles
- L'hydrogramme de la station hydrométrique.

On constate que les jours précédents cet évènement, de nombreuses précipitations ont très probablement contribué à saturer une partie des sols. Comme pour la crue précédente (2005), les coefficients de ruissellement ont été déterminés afin de représenter la saturation des sols.

4.4.2 Les hyétogrammes 18 septembre 2009

La pluie du 18 septembre 2009 intervient après les fortes pluies du 16 septembre. L'analyse des données enregistrées laissent penser que l'orage était localisé sur la partie aval du bassin versant. Ainsi la station de Marignane serait plus représentative de l'évènement sur le bassin versant et plus particulièrement sur le secteur aval. Le hyétogramme de Marignane utilisé pour le calage du modèle est représenté dans la figure suivante.

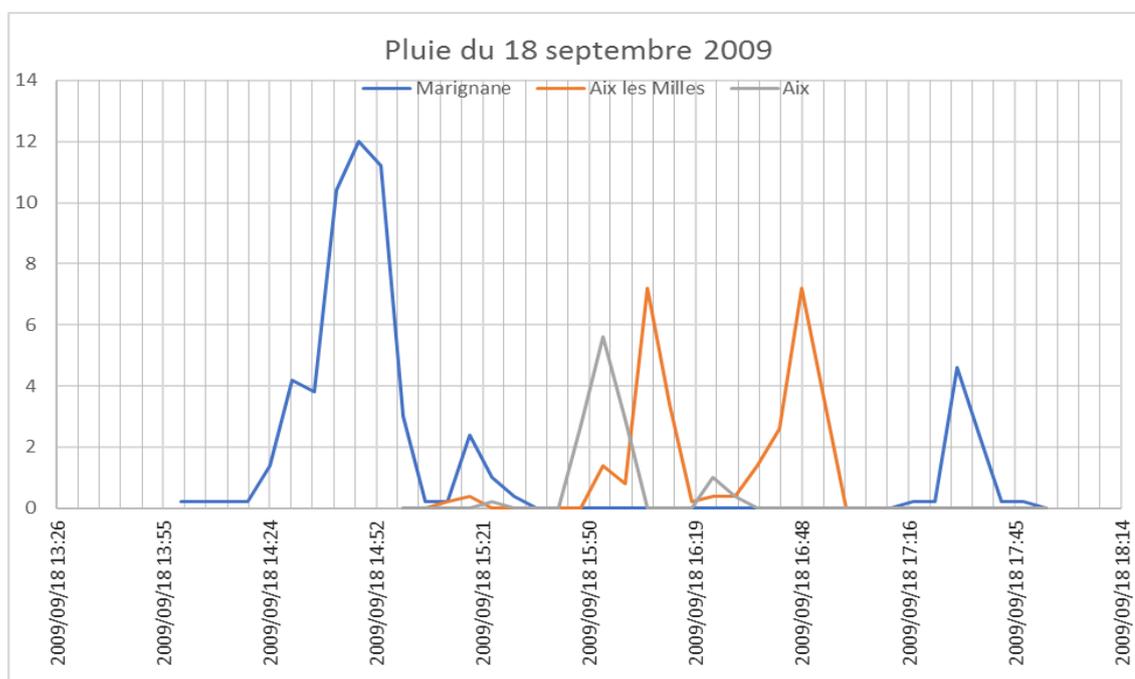


Figure 49 : Comparaison des pluies enregistrées aux postes de Marignane, Aix Les Milles, et Aix en Provence pour l'évènement du 18 septembre 2009

Comme précédemment, nous avons injecté ces deux hyétogrammes aux pluviomètres correspondants, afin de les comparer aux laisses de crues disponibles.

4.4.3 Les points de calage / hydrogramme

La figure suivante représente les hydrogrammes résultats des deux scénarios modélisés au droit de la station Hydrométrique de la Banque Hydro :

- 2009 a : seule la pluie de Marignane a été injectée sur le pluviographe de Marignane,
- 2009 b : les pluies de Marignane et d'Aix Les milles ont été injectées aux pluviographes correspondants.

Quelques soit la pluie injectée la réponse est similaire. Toutefois la pluie sur Aix Les Milles étant moins importante le scénario comprenant les deux pluviographes semble donc plus proche de la réalité.

L'hydrogramme résultant de la modélisation présente deux phases :

- La première partie qui représente la réponse du bassin versant urbain aval,
- La seconde partie qui représente la réponse du bassin rural amont.

L'hydrogramme représente donc bien la réponse de l'ensemble du bassin versant.

Bien que les débits maximums soient plus forts que l'hydrogramme estimé, en décrue le modèle représente bien la décrue avec une première partie de décrue rapide puis une décrue plus lente.

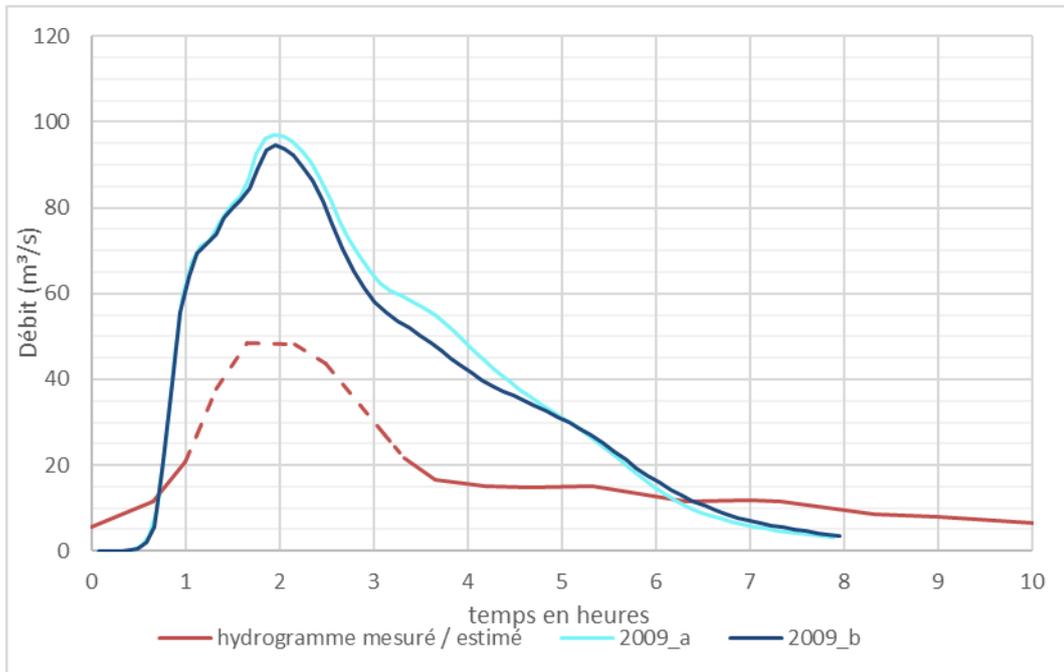


Figure 50 : Comparaison des hydrogrammes modélisés et estimé de la crue du 18 septembre 2009.

4.5 PARAMETRES DE CALAGE

4.5.1 Les différents paramètres de calage

Les paramètres de calage sont principalement :

- Les coefficients de rugosité (Strickler) en lit mineur et en lit majeur,
- Les coefficients de seuils noyés / dénoyés,
- Les pertes de charge des ouvrages de franchissement,
- La régulation des ouvrages asservis (bassins d'orage notamment) ;

Les coefficients de Strickler retenus sur l'ensemble du modèle en situation actuelle sont compris entre :

- **Entre 18 et 25 pour les lits mineurs à ciel ouvert :**
 - o Le coefficient de 18 a été sélectionné pour représenter un lit étroit avec de la végétation, il caractérise majoritairement les cours d'eau dans leur partie amont, secteur peu urbanisé et naturel,
 - o Le coefficient de 25 a été sélectionné pour représenter un lit plus large, entretenu, avec des berges présentant peu de végétation, il caractérise majoritairement les cours d'eau en aval du Bassin versant (La Cadière et le Raumartin) dans les parties urbanisées,

- Sur la partie médiane des cours d'eau, le coefficient de 20 a été choisi afin de représenter des berges plus entretenues ou moins végétalisées ou des cours d'eau un peu plus large,
- Localement le coefficient a été légèrement augmenté (22/23) afin de représenter des aménagements de berges (enrochement) ou un élargissement (absence de méandres), particulièrement dans les traversées de zones industrielles.
- **entre 30 et 60 sur les parties souterraines et canalisées :**
 - le coefficient de 30 a été pris pour les ouvrages traversant le cours d'eau sur une longue distance et notamment le passage de la voie SNCF sur la Cadière et sur le Raumartin),
 - Le coefficient de 60 a été sélectionné pour représenter les ouvrages en béton traversant des zones urbanisées (les parties enterrées sur le ruisseau de la Marthe, la couverture de la Cadière à Marignane).
- **12 pour le lit majeur,**
- **40 pour les rues.**

Le tableau ci-dessous donne des valeurs de coefficients de Strickler moyens pour différents types de lits mineurs et de lits majeurs (source Ven Te Chow, *Open-Channel Hydraulics*, McGraw-Hill, 1959).

		Coefficient de Strickler
Canal / canalisation béton lisse		83
Lit mineur artificialisé, fond de gravier et berges	Béton	50
	Enrochements liés	43
	Enrochements	30
Lit mineur rivières naturelles	Berges peu végétalisées, rectiligne	33
	Berges peu végétalisées, avec méandres	25
	Méandres et végétalisation	20
	Méandres et végétation dense	10
Lit majeur	Pâturages	29
	Champs labourés	25
	Végétation clairsemée	20
	Végétation dense	14
	Forêt	10

Tableau 6 : valeurs de coefficients de Strickler moyens pour différents types de lits mineurs et de lits majeurs (source Ven Te Chow, *Open-Channel Hydraulics*, McGraw-Hill, 1959).

4.5.2 Caractéristique des bassins versant actuels

Les bassins versant sont caractérisés notamment par leur coefficient de ruissellement et par leur temps de concentration.

Les coefficients de ruissellement des bassins versant sont issus de l'analyse de l'imperméabilisation et de l'occupation du sol dans l'état actuel.

Le logiciel de modélisation calcul le lag time de chaque bassin versant. Afin de déterminer le temps de concentration des bassins versants la formule suivante a été appliquée :

$$t_{lag} = 0.6 \times t_c$$

Avec t_{lag} : le lag time (en min) donné par la modélisation

t_c : le temps de concentration (en min)

Il a été déterminé à partir de la pluie de 2005 (scénario avec deux pluviographes).

Les temps de concentration sont globalement compris entre 10 et 30min pour les sous-bassin versants ruraux et inférieurs à 10min pour les bassins versants urbains.

La cartographie suivante représente donc les coefficients de ruissellement et le temps de concentration pour chaque sous-bassin versant. Afin de faciliter la compréhension de la carte, les temps de concentration des petits sous-bassin versants, inférieur à 5min, ne sont pas affichés.

Etude hydraulique du bassin versant de la Cadière et du Raumartin
Coefficients de ruissellement à l'état actuel
et temps de concentration des sous-bassins versants

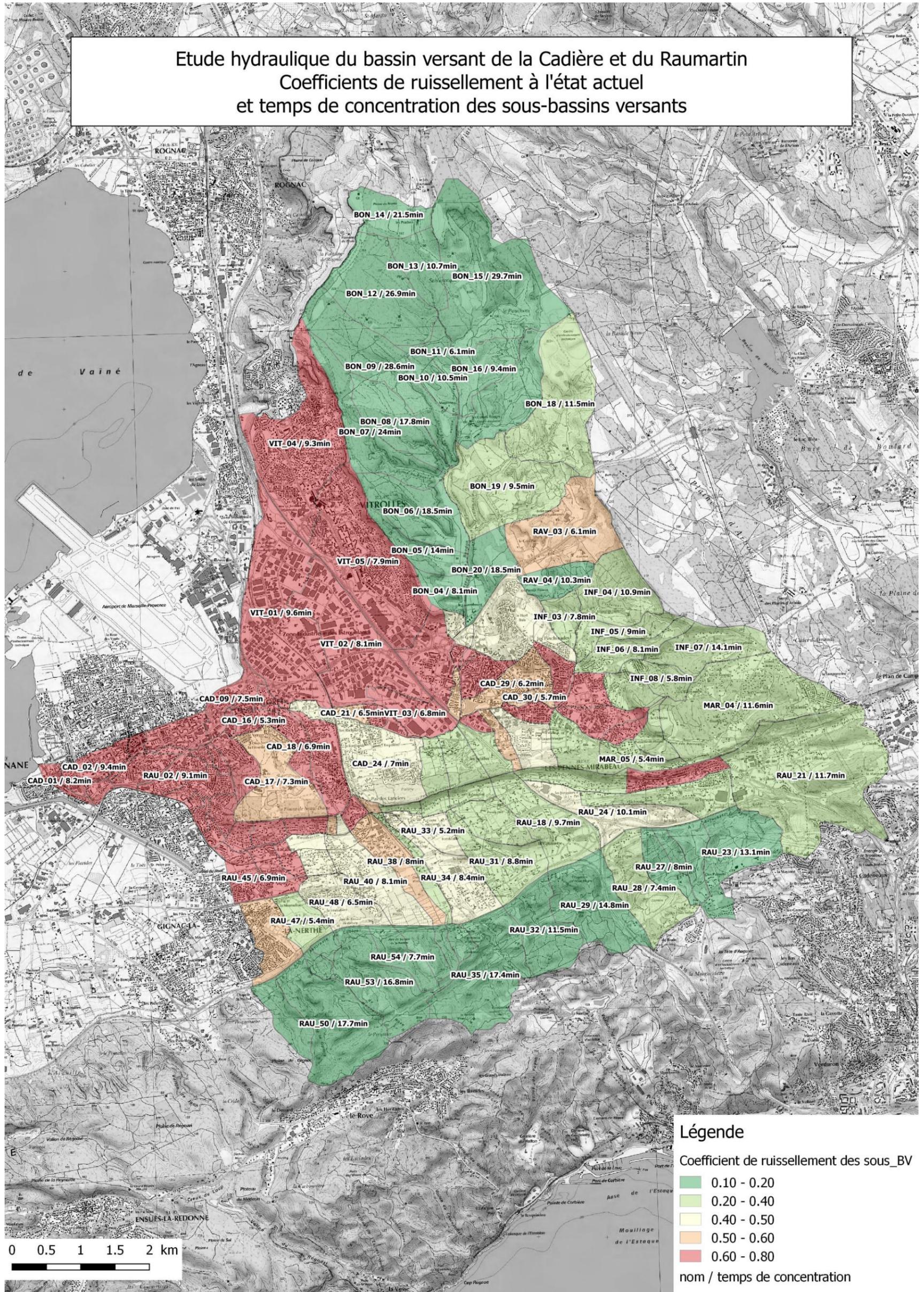


Figure 51 : coefficient de ruissellement et temps de concentration à l'état actuel

4.6 CARTOGRAPHIE DE LA ZONE INONDABLE DE LA CRUE DE CALAGE

La cartographie de la zone inondable de la crue du 22 septembre 1993 est présentée en annexe 2. Les repères de crue sont également représentés avec indication de la cote calculée et mesurée.

Le plan de découpage en planches de l'atlas est présenté page suivante. On retrouve par cours d'eau les N° suivants :

- Le Raumartin : N°1 à 6,
- Le ruisseau de la Marthe : N° 7,
- Le ruisseau de l'Infernet : N° 15
- La Cadière : N°8 à 14.
- Le Bondon et le Ravin d'Aix : N°16 et 17

Etude hydraulique de la Cadière et du Raumartin
Découpage de l'atlas cartographique de la crue de septembre 1993

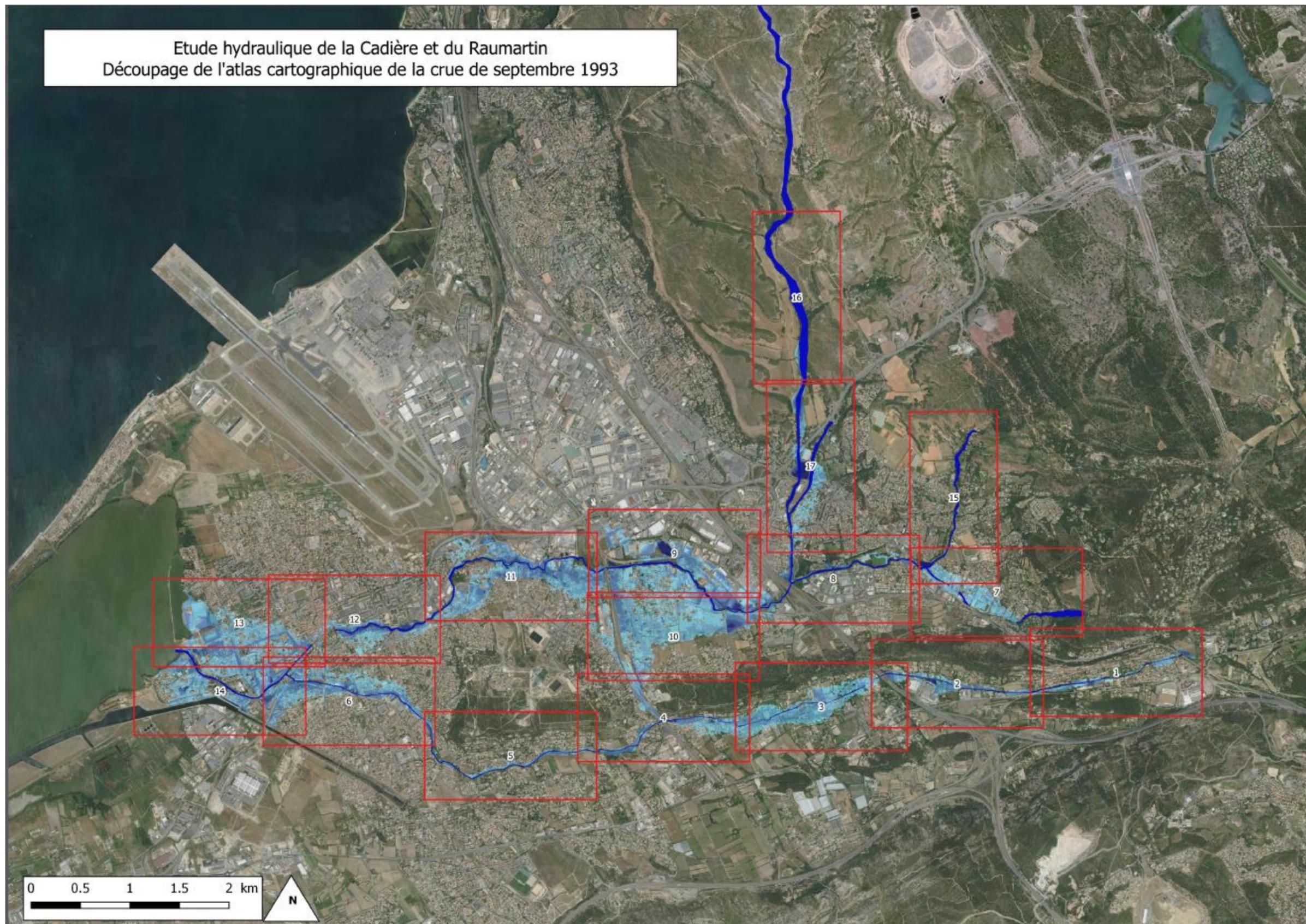


Figure 52 : Découpage en planches du des atlas cartographiques

4.7 FONCTIONNEMENT HYDRAULIQUE DU BASSIN VERSANT (CRUE DE SEPTEMBRE 1993)

Les figures ci-après présentent quelques zooms de l'atlas des zones inondables de la crue du 22 septembre 1993.

4.7.1 Vitrolles – le Parc du Griffon

Les premiers débordements sont observés en rive gauche du bondon en amont de la traversée de la RD9. Ces débordements inondent les champs puis les constructions en amont de la traversée de la route de la Seds.

L'ouvrage de traversée de la RD9 est limitant et entraîne des débordements en rive gauche et en rive droite. Pendant la crue, un embâcle a été identifié dans l'ouvrage, ce qui a contribué à augmenter les débordements.

Les débordements surversent sur la RD9 avec une lame d'eau de l'ordre de 35cm.

Dans le Parc du Griffon, le Bondon déborde largement. Le bassin se remplit. Les eaux surversent sur le seuil alimentant le ravin d'Aix. Ces nombreux apports ne peuvent être supportés par le gabarit du ravin d'Aix ce qui entraîne les nombreux débordements en rive gauche du ravin d'Aix en direction du collège. Les eaux surversent ensuite sur l'avenue Jean Monnet inondant la rive gauche du Rain d'Aix puis du Bondon jusqu'au bassin de la Tuillière.

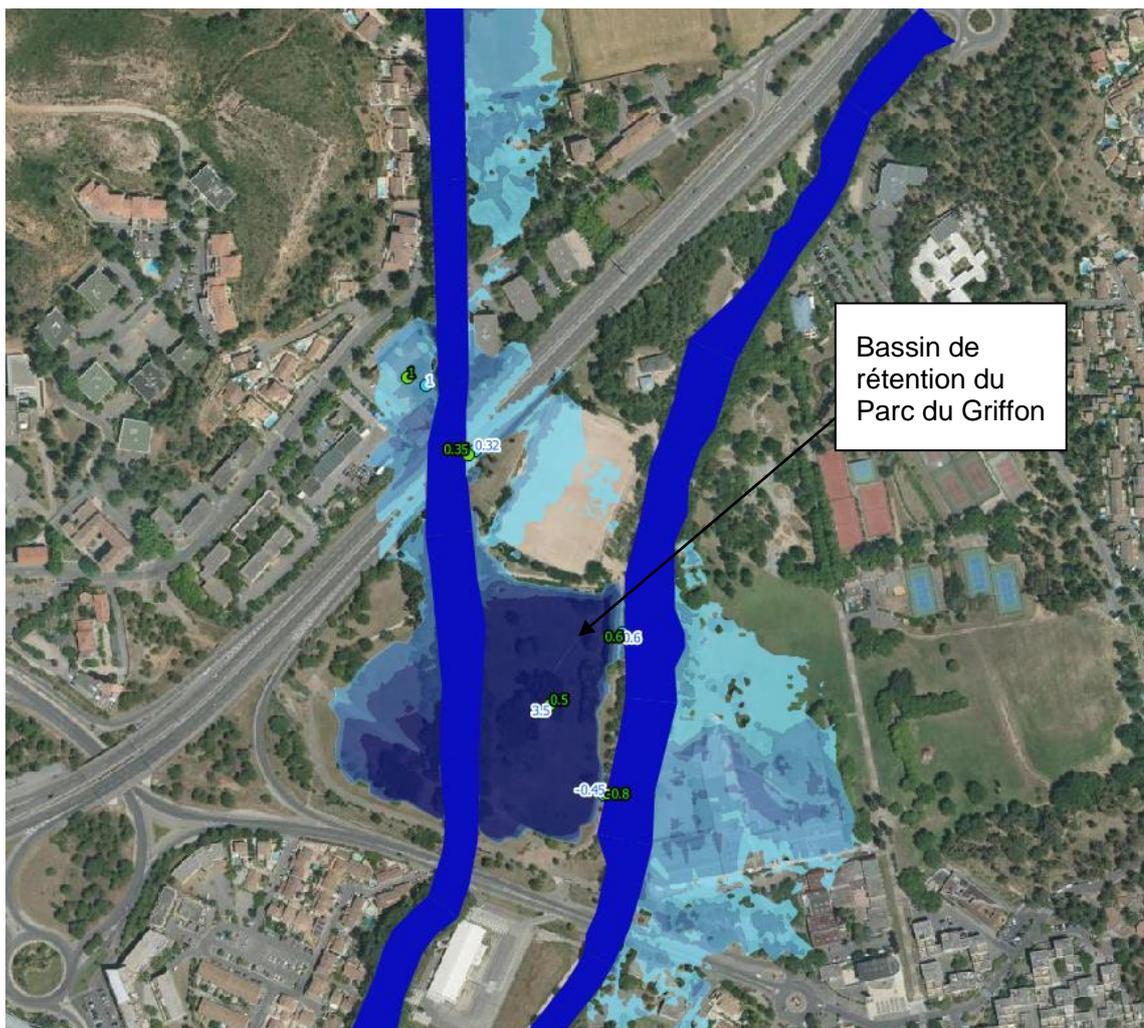


Figure 53 : Fonctionnement hydraulique de la crue de 1993 – secteur du Griffon à Vitrolles

4.7.2 Vitrolles Le vallon de l'Infernet

Le vallon de l'Infernet ne présente pas de débordement pour cet événement.

4.7.3 Les Pennes Mirabeau le ruisseau de la Marthe

Dans sa partie naturelle, le ruisseau de la Marthe contient les écoulements de cet événement. Dès qu'on rentre dans la partie urbanisée, le cours d'eau présente des recalibrages et de nombreux ouvrages qui contraignent le lit mineur. On observe donc des débordements en rive droite du ruisseau de la Marthe.

En amont de la couverture du ruisseau, les débordements inondent également la rive gauche jusqu'à la confluence avec le ruisseau de l'Infernet.

Le bassin à la confluence est rempli. La modélisation ne présente pas de débordement du bassin.

En aval de ce secteur, l'ouvrage traversant de l'avenue du Maréchal de Lattre de Tassigny a entraîné des débordements en amont de l'ouvrage. L'avenue étant en remblai sur ce secteur, elle a entraîné l'accumulation des volumes débordés sur les quartiers habités.

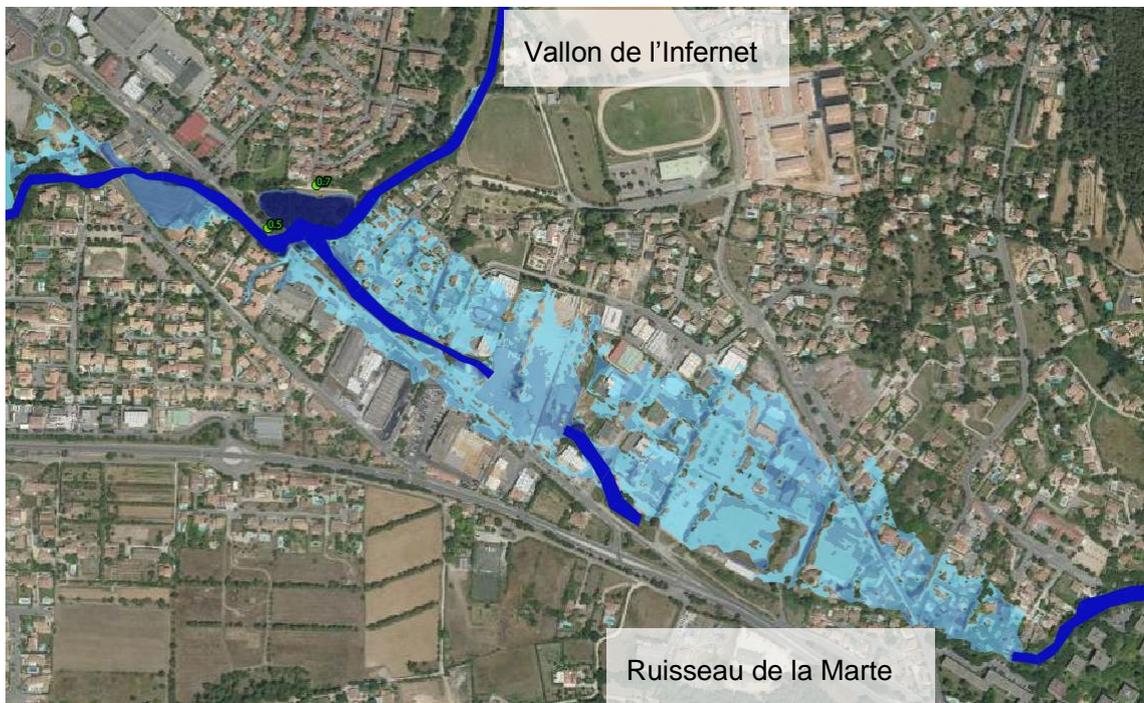


Figure 54 : Fonctionnement hydraulique pour la crue de 1993 – A la confluence entre le vallon de l'Infernet et le ruisseau de la Marthe

4.7.4 La Cadière entre la traversée de l'A7 et de la voie SNCF

La capacité de l'ouvrage de traversée de l'A7 est insuffisante pour cet événement ce qui a entraîné des débordements en rive droite du Bondon. L'autoroute en remblai a contribué à bloquer les volumes débordés sur les constructions en rive droite du Bondon.

En aval de la traversée de l'A7, le faible gabarit de la Cadière entraîne de nombreux débordements en rive droite et en rive gauche. En rive gauche, on repère sur la cartographie des zones inondables suivant un axe d'écoulement, identifié lors des reconnaissances. Les volumes débordés sont stockés en amont de la voie SNCF qui, sur ce secteur est en remblai. Les eaux transitent donc par l'ouvrage sous la voie SNCF et une partie des

débordements par les traversées et plus particulièrement sur la voirie D47. Les laisses de crues prouvent le passage d'écoulements avec lame d'eau de l'ordre de 50cm sur la voirie.

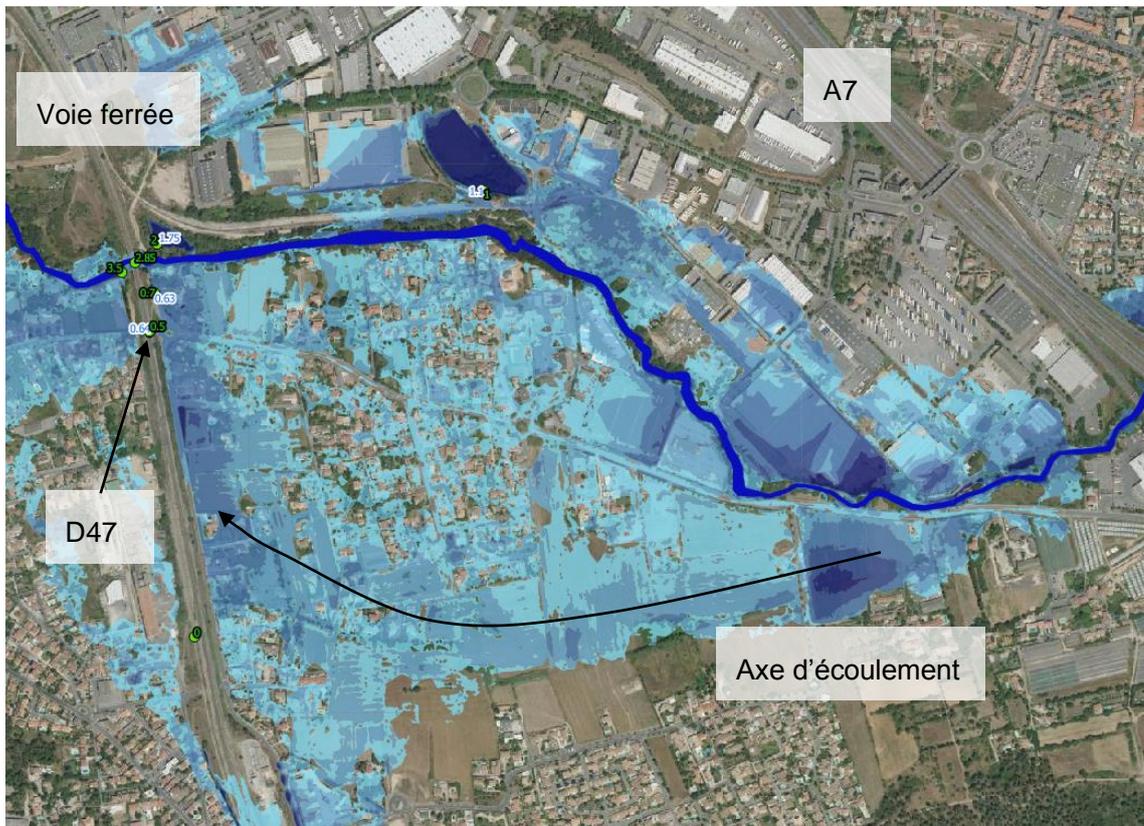


Figure 55 : Fonctionnement hydraulique pour la crue de 1993 sur la Cadière entre l'A7 et la voie ferrée

4.7.5 La Cadière entre la voie ferrée et la D9 (Commune de Saint Victoret)

En aval de la voie ferrée les écoulements débordent majoritairement en rive gauche. Ces débordements rejoignent les écoulements en provenance de la RD47.

Ces écoulements rejoignent le cours d'eau en aval de la rue de la Glacière (aval de la STEP), ce qui entraîne des débordements supplémentaires en rive droite.

Sur le secteur Sainte Marie Saint Jean à Saint Victoret les débordements rive gauche, prennent une direction nord est / sud ouest, en empruntant la voirie, ils sont déconnectés du cours d'eau. L'ensemble des débordements transitent alors sous l'ouvrage de l'avenue de l'Europe.

Des débordements sont importants en rivegauche et en rive droite, en amont de l'ouvrage de la D9.

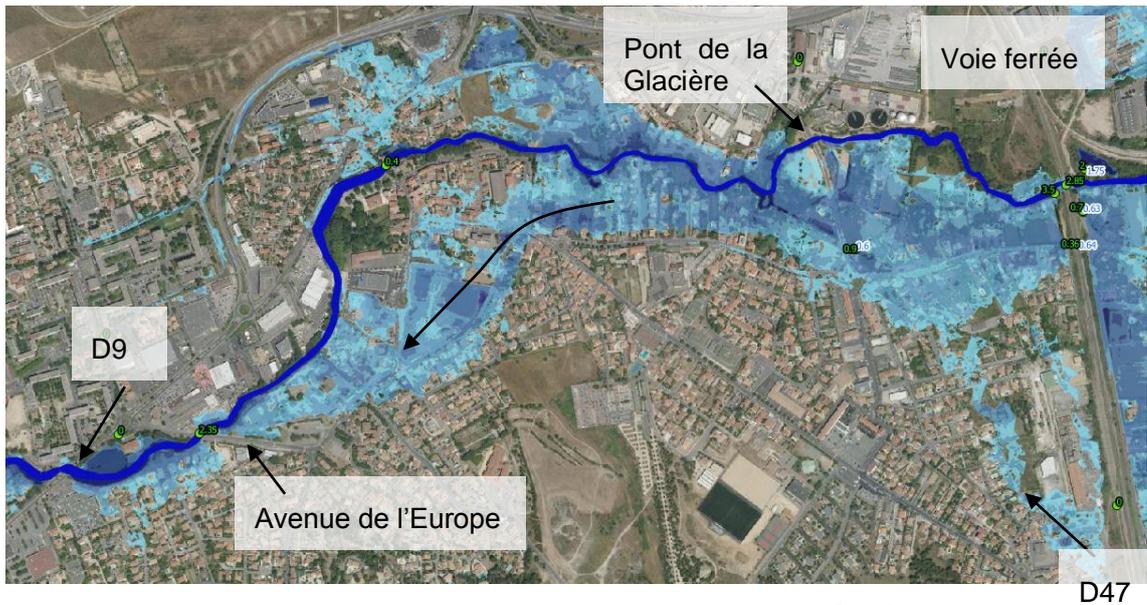


Figure 56 : Fonctionnement hydraulique pour la crue de 1993 sur la Cadière entre la voie ferrée et la D9

4.7.6 La Cadière en aval de la D9 (Marignane) et la confluence avec le Raumartin

En aval de la D9 et en amont de la couverture, le cours d'eau et la couverture du cours d'eau dans la traversée de Marignane, ne permettent pas le transit du débit de l'événement. Des débordements sont donc observés en rive droite et en rive gauche. Ces débordements s'étalent dans la zone urbaine en empruntant également les voiries comme axes d'écoulement préférentiels.

En aval de la couverture les débordements rive droite s'orientent vers l'étang de Berre vers l'Ouest. Ils sont déconnectés du cours d'eau. Seule une partie de ses débordements retournent dans le cours d'eau en amont de l'avenue du Général De Gaulle.

Les débordements rive gauche, quant à eux, sont plus faibles. Ils sont augmentés par les débordements rive droite du Raumartin.

En amont de l'avenue du Général De Gaulle on note un retour d'eau dans la Cadière, des débordements rive gauche du Raumartin. En effet les débordement rive gauche du Raumartin en amont de la confluence prennent une direction nord-est/ sud-ouest. Une partie des écoulements retournent à la Cadière alors qu'une autre partie surversent dans le Canal du Rove

En aval de la traversée de l'avenue du Général De Gaulle, les débordements rive gauche rejoignent le canal du Rove par des ouvrages d'assainissement pluviaux.

Le secteur des Paluds est également inondé par des débordements de la Cadière. En fonction de la topographie du secteur, ces écoulements rejoignent le canal du Rove ou directement l'Etang de Berre.

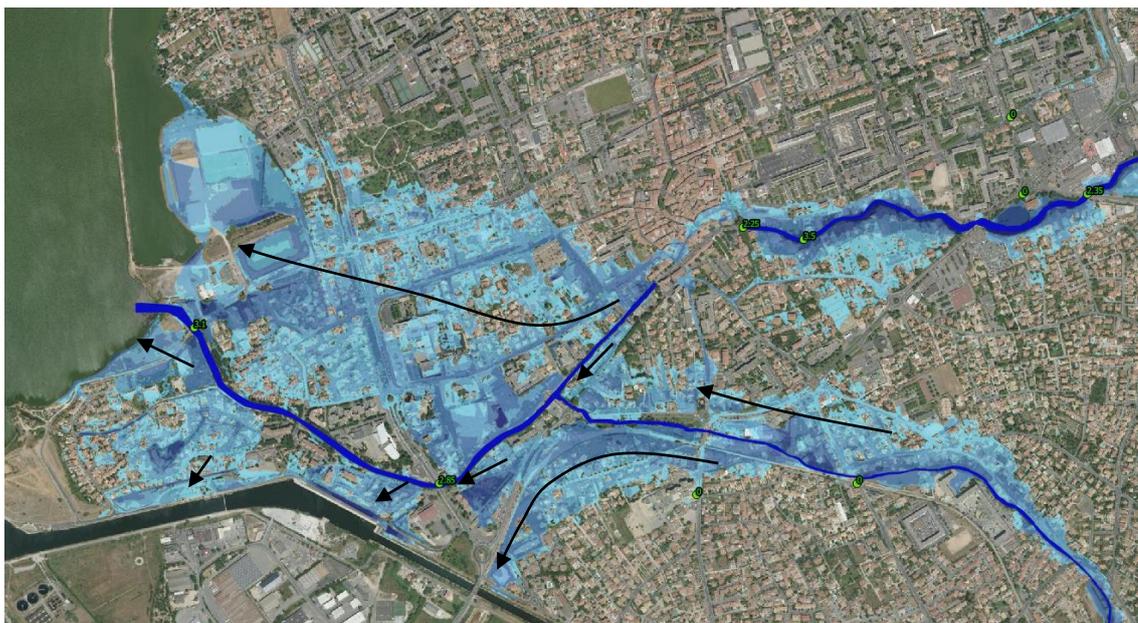


Figure 57 : Fonctionnement hydraulique pour la crue de 1993 sur la partie aval de la Cadière

4.7.7 Le Raumartin sur les Pennes Mirabeau

Le Raumartin déborde en rive droite et en rive gauche. Ces débordements restent localisés aux abords du cours d'eau, puisque la configuration en vallée ne permet l'étalement des eaux. Les volumes débordés s'accumulent ensuite aux points bas topographiques ou derrière des remblais.



Figure 58 : Cartographie des zones inondables sur le secteur amont du Raumartin

Sur le secteur des Jonquiers (en amont de l'A7), les débordements s'étaient en rive droite et en rive gauche inondant les entreprises du secteur.

L'ouvrage de traversée de l'A7 est limitant pour cet événement puisqu'il crée une perturbation entraînant des débordements en rive gauche et en rive droite.



Figure 59 : Cartographie des zones inondables du Raumartin en amont de l'Autoroute A7

4.7.8 Le Raumartin entre la traversée de l'Autoroute et de la voie SNCF

En aval de l'A7, les débordements sont beaucoup plus importants que dans la partie amont. La topographie du secteur permet l'étalement des débordements en rive droite et en rive gauche.

L'ouvrage traversant la voie ferrée est limitant il entraîne des débordements en amont de l'ouvrage majoritairement en rive gauche.

Sur ce secteur la voie ferrée est en déblais, les débordements rive gauche surversent sur la voie au droit de l'ouvrage et suivent ensuite la voie ferrée en direction du nord-ouest. Lorsque la voie ferrée ressort du secteur en déblai, les écoulements s'orientent vers le nord vers le lit majeur de la Cadière, en amont et en aval de la voie ferrée.

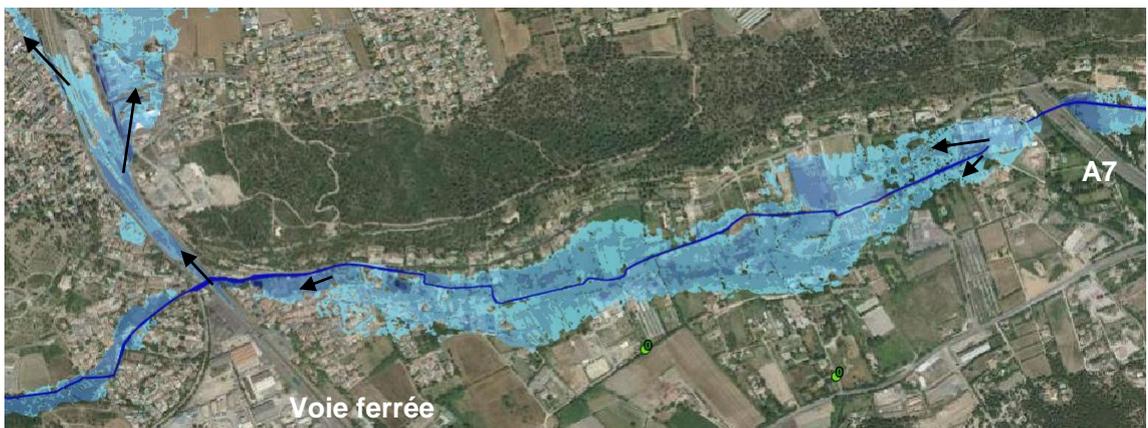


Figure 60 : Zones inondables du Raumartin entre l'A7 et la voie ferrée

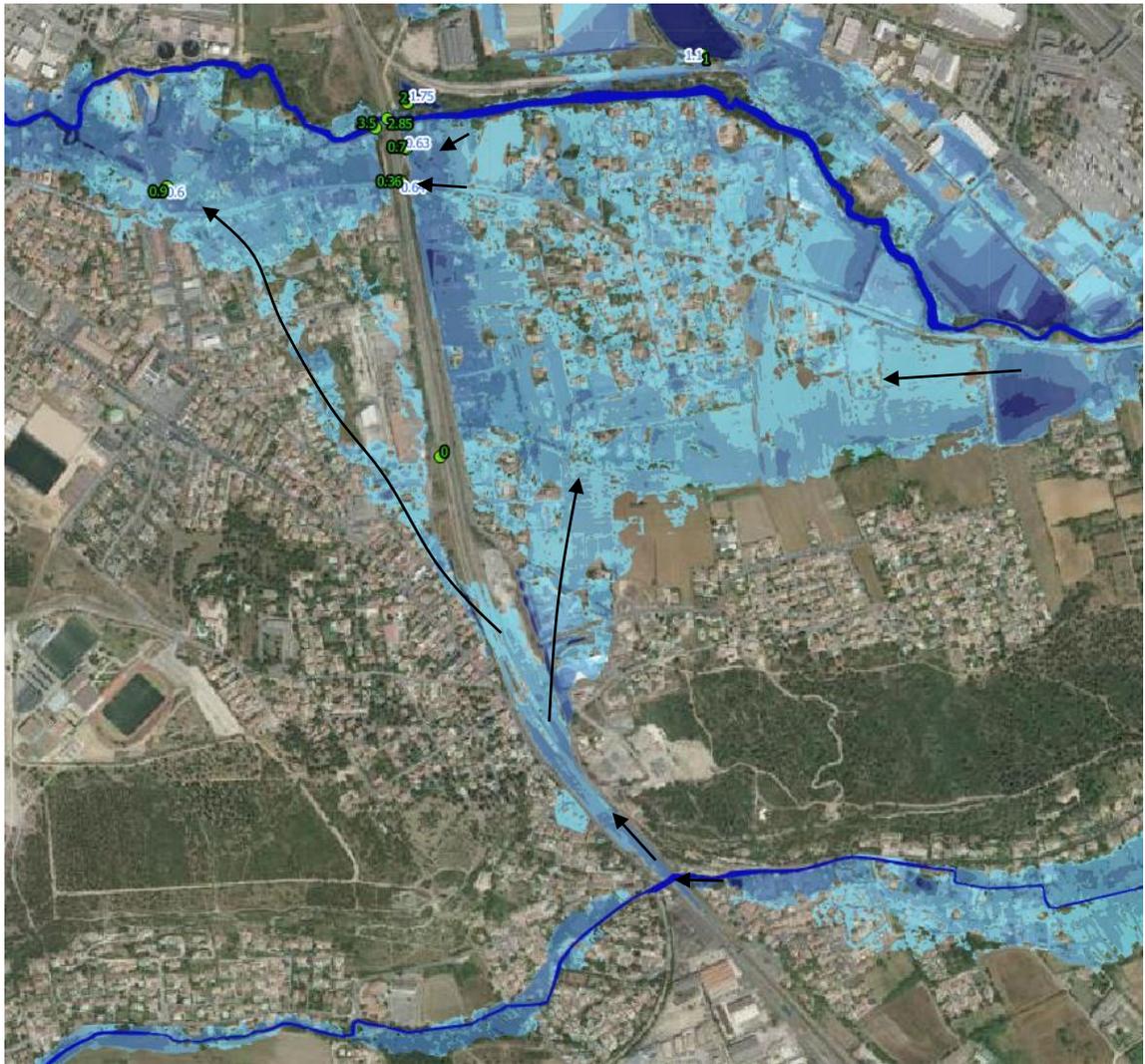


Figure 61 : Les débordements du Raumarzin au droit de la voie ferrée

4.7.9 La Raumarzin entre la voie ferrée et Pas des Lanciers

Les débordements sont relativement limités en rive droite et en rive gauche. La largeur inondée est de l'ordre de 40m pouvant localement atteindre 70m en aval de la voie ferrée.



Figure 62 : Les débordements du Raumarzin en aval de la voie ferrée

ANNEXES

ANNEXE 1 : PRESENTATION DES PRINCIPAUX MODULES D'HYDRA

ANNEXE 2 : CARTES DES ZONES INONDABLES DE LA CRUE DE 1993

