



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

Etude de connaissance de l'aléa
inondation sur le bassin versant des
Aygaldes

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

37502 | Octobre 2017 | v2



setec
hydratec



Agence de Vitrolles
5, chemin des Gorges de Cabriès
13127 Vitrolles
T : 04 86 15 62 45
F : 04 86 15 62 48

Directeur d'affaire :
Responsable d'affaire : BLN
N°affaire : 016 37502
Fichier : 37502_RAP_Phase3_v2.doc

Version	Date	Etabli par	Vérfié par	Nb pages	Observations / Visa
1	10/06/2017	BLN	DUC		Création
2	20/10/2017	BLN	DUC	65	Corrections DDTM13

SOMMAIRE

1	INTRODUCTION.....	6
2	PRESENTATION DU LOGICIEL DE MODELISATION.....	7
2.1	Présentation générale	7
2.1.1	L'interface.....	8
2.1.2	Le moteur de calcul.....	9
2.2	Des schémas de modélisation adaptés aux systèmes étudiés et aux échelles de travail	9
2.3	Mise en œuvre et exploitation	11
2.3.1	Flexibilité d'utilisation	11
2.3.2	Traçabilité.....	11
3	CONSTRUCTION DU MODELE.....	12
3.1	Structure du modèle hydraulique	12
3.1.1	Lit mineur.....	12
3.1.2	Lit majeur.....	15
3.2	Couplages.....	18
3.2.1	Couplage 1D-1D.....	18
3.2.2	Couplage 1D-2D.....	18
3.3	Choix des modes de représentation.....	21
3.3.1	Têtes de bassin versant et secteurs urbanisés amont	21
3.3.2	Secteurs urbanisés aval.....	22
3.4	Modélisation des ouvrages singuliers	23
3.4.1	Ouvrages de franchissement	23
3.4.2	Ouvrages souterrains.....	26
3.4.3	Seuils et vannages.....	26
3.5	Conditions aux limites.....	26
3.6	Zoom sur des secteurs et ouvrages spécifiques.....	28
3.6.1	Les bassins de rétention	28
3.6.2	Le dégrilleur Gèze	31
3.6.3	Zoom sur le secteur L2	32
3.6.4	La carrière de la Malle.....	34
3.6.5	L'ISDND de Septèmes-les-Vallons	35
3.7	Prise en compte des murs et infrastructures routières et ferroviaires en remblai	36
4	CALAGE	38
4.1	Paramètres de calage	38
4.2	Choix des évènements de calage	42
4.2.1	Données disponibles.....	42

4.2.2	Hyéogrammes mesurés	44
4.3	Hydrogrammes résultats	50
4.4	Bilan des volumes calculés	52
4.5	Cartographie de la zone inondable	53
4.6	Fonctionnement hydraulique du bassin versant (Crue de décembre 2003).....	55
4.6.1	Septèmes-les-Vallons - Route de la Télévision	55
4.6.2	Marseille – Picon Busserine.....	55
4.6.3	Marseille – Bvd. Gèze	56
4.6.4	Les Pennes-Mirabeau – confluence Cadenaux / Bédoule	57
4.6.5	Marseille – cours d’Anthoine / rue du Bachas	58

ANNEXES

ANNEXE 1 : PRESENTATION DES PRINCIPAUX MODULES D’HYDRA	60
ANNEXE 2 : CARTES DU MODELE HYDRAULIQUE	61
ANNEXE 3 : CARTES DES ZONES INONDABLES DE LA CRUE DE DECEMBRE 2003.....	64

FIGURES

Figure 1 : Schéma de synthèse des domaines de schématisation disponibles et des liaisons hydraulique permettant leur connexion	10
Figure 2 : Exemple de bief filaire 1D de cours d'eau sous Hydra.....	12
Figure 3 : Exemple de lit mineur de cours d'eau à proximité de la ZAC Sainte-Marthe.....	13
Figure 4 : Exemple de lit mineur modélisé par un collecteur (Plombière / Sainte-Marthe)	14
Figure 5 : Exemples de liaisons entre deux mailles dont la largeur est réduite par la présence du bâti	17
Figure 6 : Exemple de maillage 2D sur des secteurs fortement urbanisés	17
Figure 7 : Modélisation filaire 1D.....	18
Figure 8 : Modélisation couplée 1D-1D.....	18
Figure 9 : Maillage 2D appuyé sur les limites du domaine 1D	19
Figure 10 : Exemple de bief 1D immergé dans le maillage 2D	20
Figure 11 : Exemple de maillage 2D en secteur urbain avec voiries et rues	21
Figure 12 : Profil en long des Aygalades depuis les Pennes-Mirabeau jusqu'à l'exutoire dans le port	23
Figure 13 : Profil en long du Ruisseau de Plombières depuis Four de Buze en amont jusqu'à la confluence avec les Aygalades	23
Figure 14 : Localisation de l'exutoire des Aygalades et du marégraphe de Marseille	27
Figure 15 : Fonctionnement d'un bassin de rétention type.....	28
Figure 16 : Secteur Saint-Barthélémy / Picon / Busserine	32
Figure 17 : Topographie projetée prise en compte sur le secteur L2 (zones en noir et gris).....	33
Figure 18 : Carrière de la Malle.....	34
Figure 19 : Bassin versant de la carrière de la Malle.....	34
Figure 20 : ISDND de Septèmes-les-Vallons.....	35
Figure 21 : Exemple de murette en rive gauche	36
Figure 22 : Principaux remblais identifiés sur le bassin versant.....	37
Figure 23 : Coefficients d'obstruction du maillage 2D.....	39
Figure 24 : Pluviomètres AMP/MP DEAP à proximité du bassin versant.....	44
Figure 25 : Pluviométrie de décembre 2003 : tests de sensibilité avec et sans le poste de Saint Antoine.....	46
Figure 26 : Répartition spatiale de la pluie de décembre 2003 (cumul total en mm).....	47
Figure 27 : Répartition spatiale de la pluie d'octobre 1999 (cumul total en mm)	49
Figure 28 : Hydrogrammes et limnigrammes de la crue de décembre 2003	50
Figure 29 : Hydrogrammes de la crue d'octobre 1999	51
Figure 30 : Découpage en planches du des atlas cartographiques	54

1 INTRODUCTION

Ce rapport correspond au volet hydraulique de l'étude connaissance de l'aléa inondation sur le bassin versant des Aygalades, 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, à la prise en compte du risque dans les documents d'urbanisme, mais également à la mise à jour de la cartographie des surfaces inondables du territoire à Risque Important (TRI) Marseille-Aubagne.

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 2), qui a permis de définir des données hydrologiques fiables et cohérentes à l'échelle des bassins versants étudiés ; il est décomposé en deux phases :

- Phase 3 : construction et calage du modèle hydraulique,
- Phase 4 : simulations des crues de projet et cartographie des aléas.

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 :

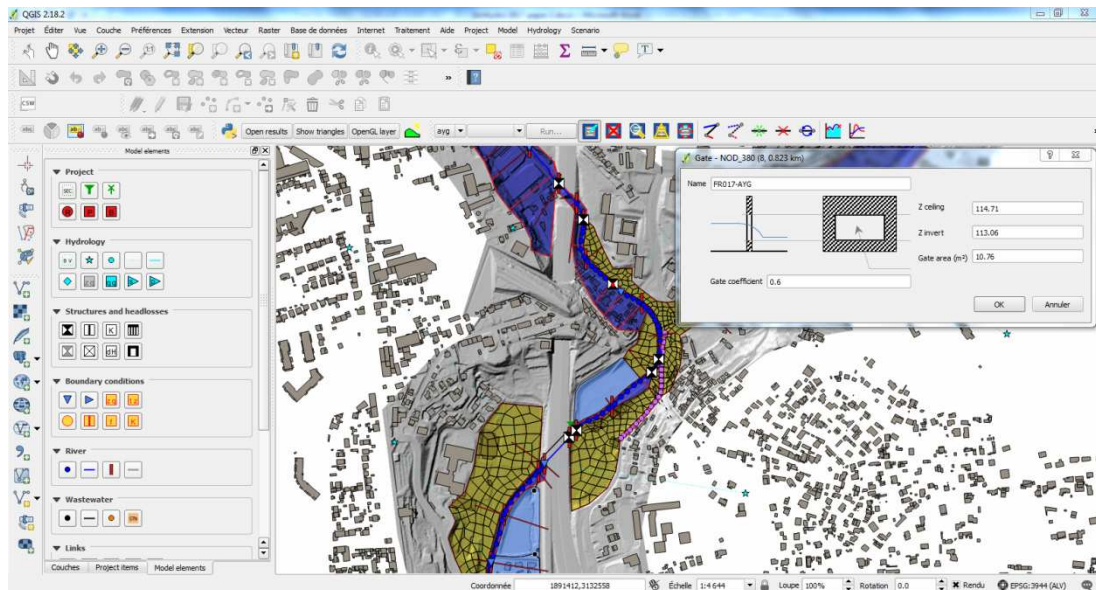
- hydrologie : calculs des lames d'eau précipitées temps réel et prévisions pluviométriques par exploitation d'images radars, modélisation des ruissellements de surface et dans les branches amont de réseaux de collecte,
- modélisation des écoulements et des propagations de crue dans les réseaux d'assainissement, 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

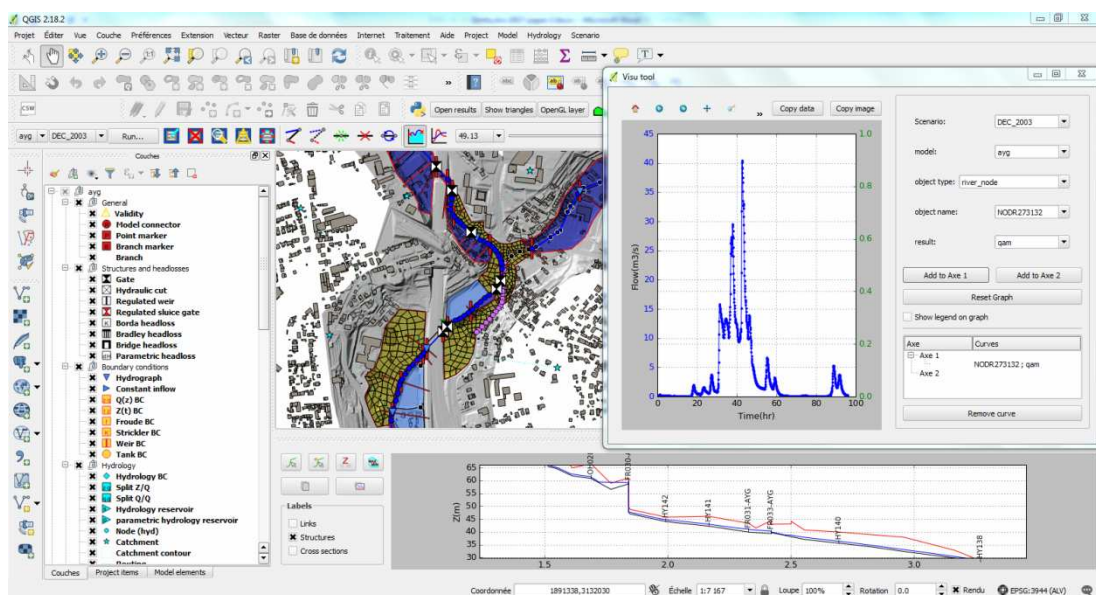
L'interface se présente sous forme d'un Plugin de `QGIS`, SIG (système d'information géographique) libre, multi plateforme, publié sous licence GPL, dialoguant avec une base de données. Les objets de modélisation sont décrits et stockés dans cette base de données, et affichés dans QGIS sous forme de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

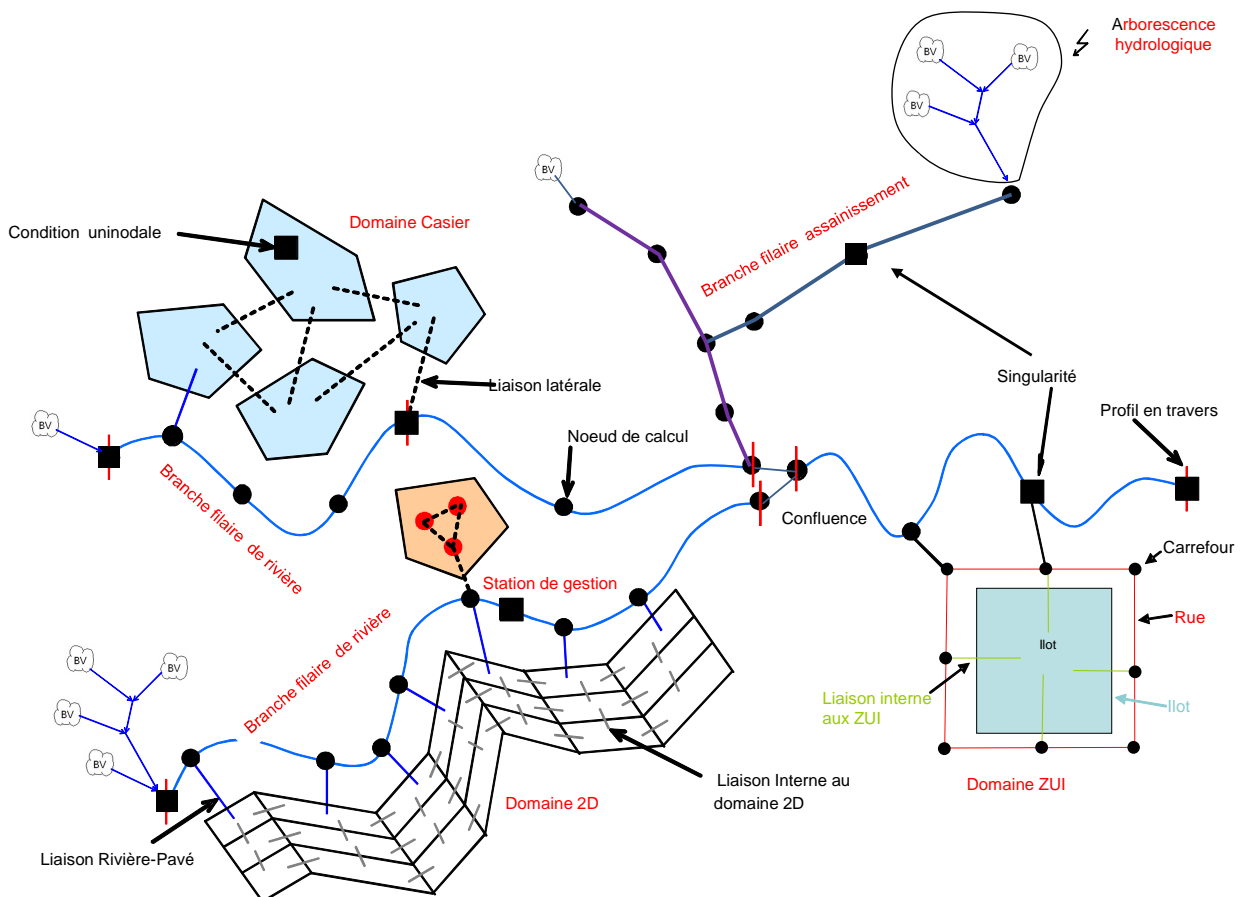


Figure 1 : Schéma de synthèse des domaines de schématisation disponibles et des liaisons hydraulique permettant leur connexion

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.

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 attachés 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 les suivants.

3.1.1 Lit mineur

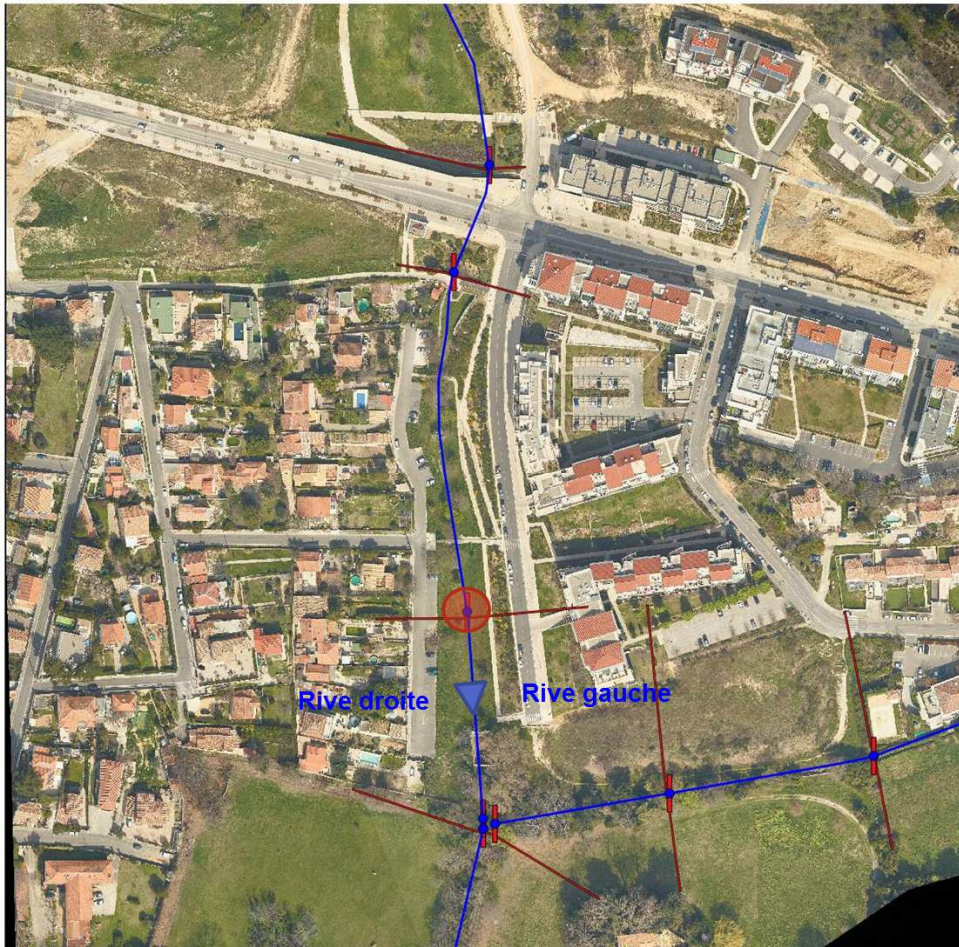
L'ensemble des **lits mineurs** des cours d'eau sera représenté **en 1D** (domaine filaire). Les lits mineurs sont constitué par :

- Des collecteurs fermés ou,
- Des biefs de cours d'eau, canaux ou caniveaux à ciel ouvert.



Figure 2 : Exemple de bief filaire 1D de cours d'eau sous Hydra

Figure 3 : Exemple de lit mineur de cours d'eau à proximité de la ZAC Sainte-Marthe



Vue en plan



Vue vers l'aval

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.

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, murets, ... submersibles.

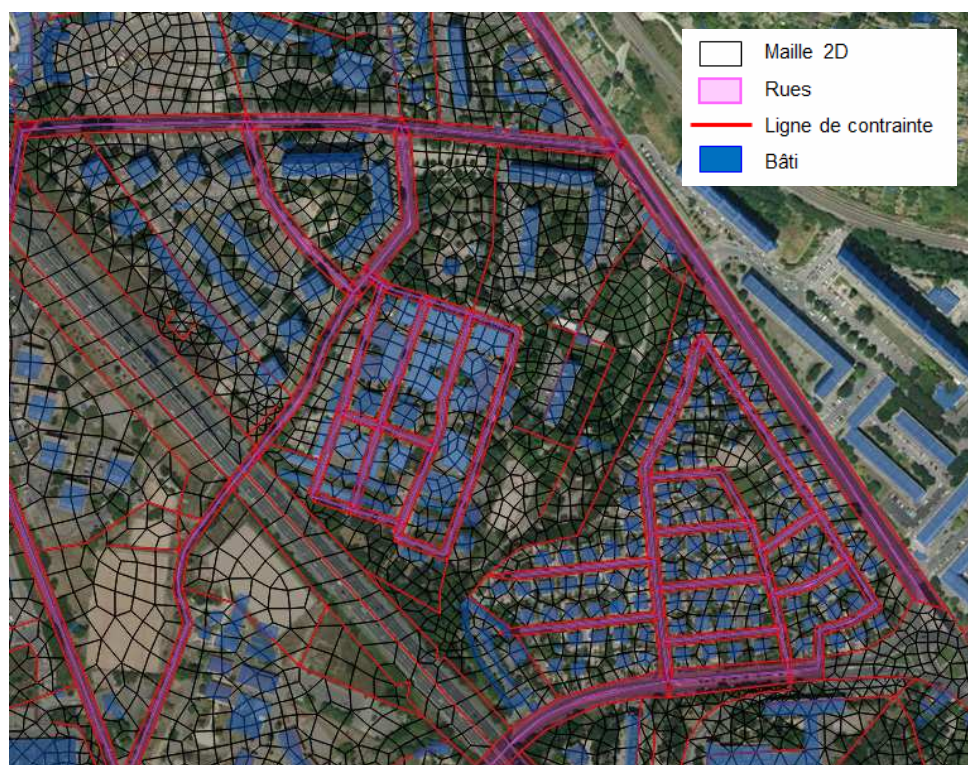
b) Prise en compte du bâti

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

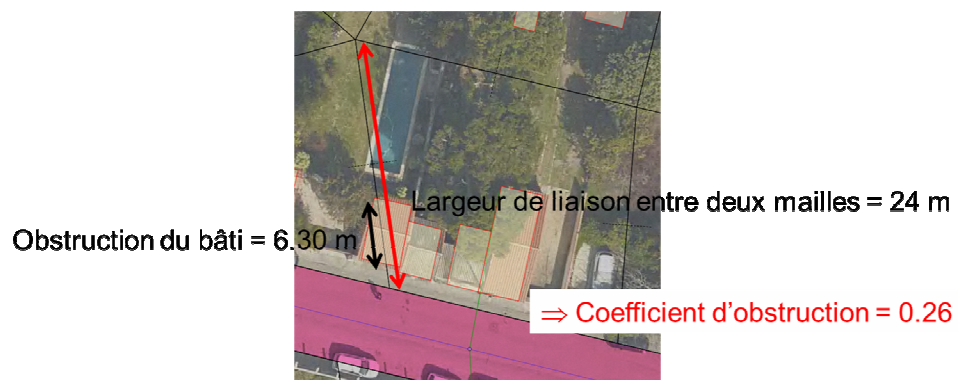
- Cas d'une urbanisation **présentant une implantation relativement diffuse** : le maillage s'appuie sur les éléments structurants du terrain naturel (ruptures de pentes, talus) mais pas systématiquement sur les contours des bâtiments (cas de figure réservé aux bâtiments de grande emprise au sol) ; les 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.



- 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).



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.



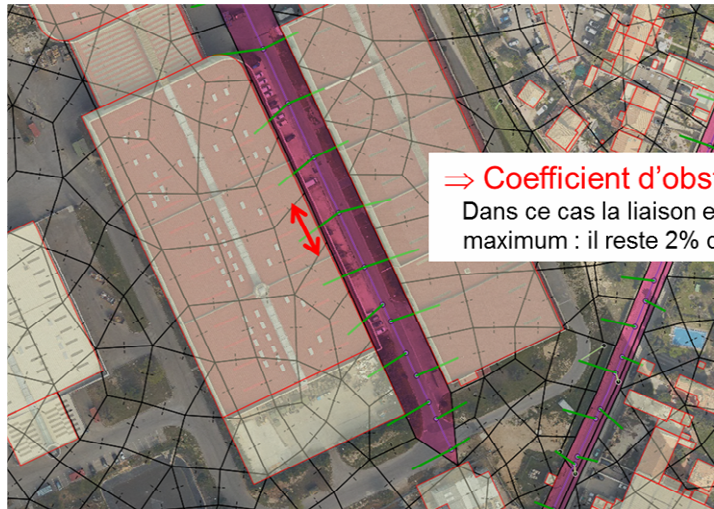
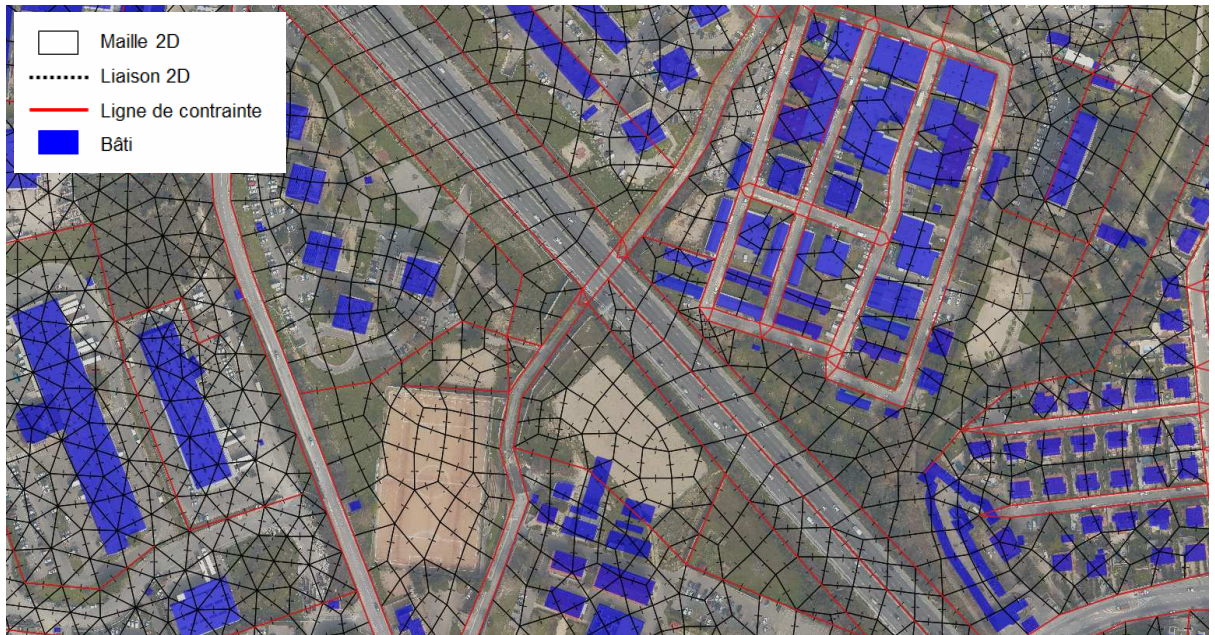


Figure 5 : Exemples de liaisons entre deux mailles dont la largeur est réduite par la présence du bâti

Le **rendu cartographique du champ de vitesse** est ensuite réalisé après calcul 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.

Figure 6 : Exemple de maillage 2D sur des secteurs fortement urbanisés



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 :

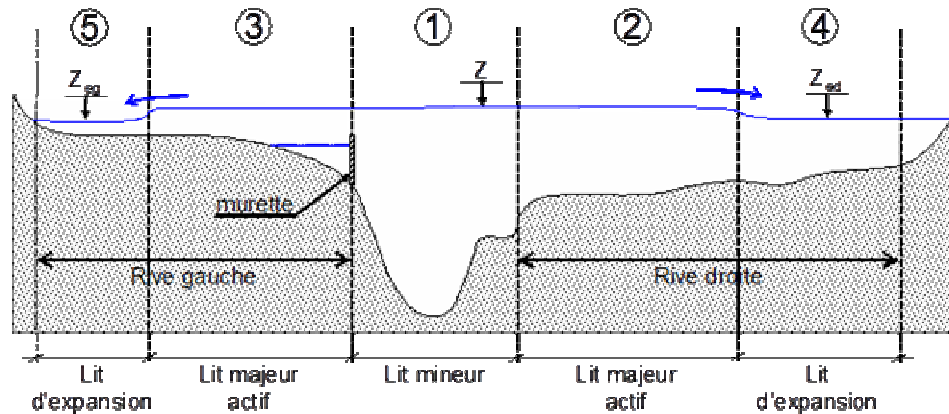


Figure 7 : Modélisation filaire 1D

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.

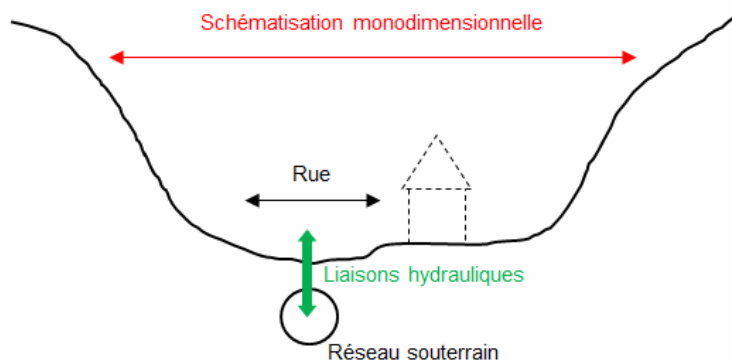


Figure 8 : Modélisation couplée 1D-1D

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).

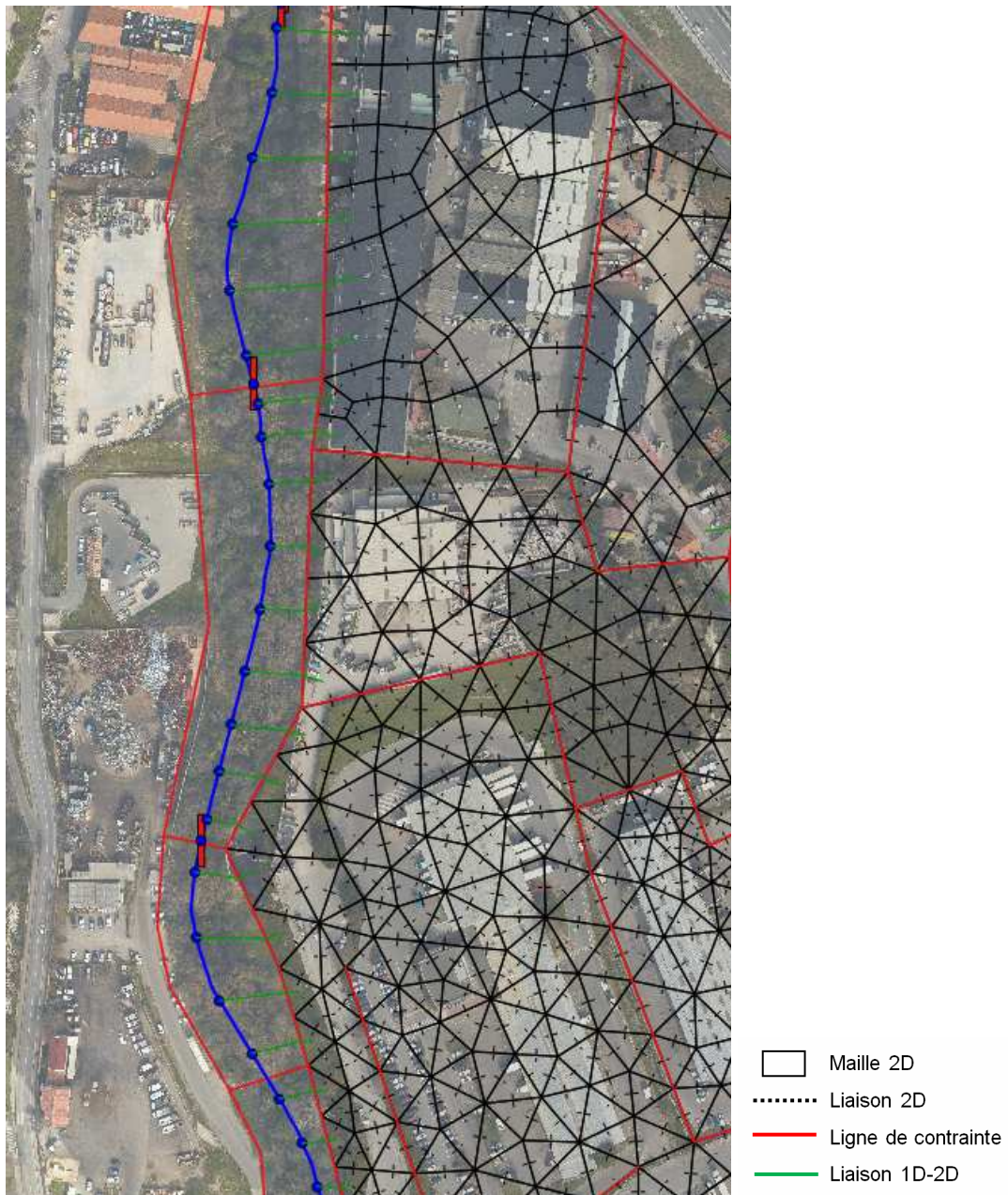


Figure 9 : Maillage 2D appuyé sur les limites du domaine 1D

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.

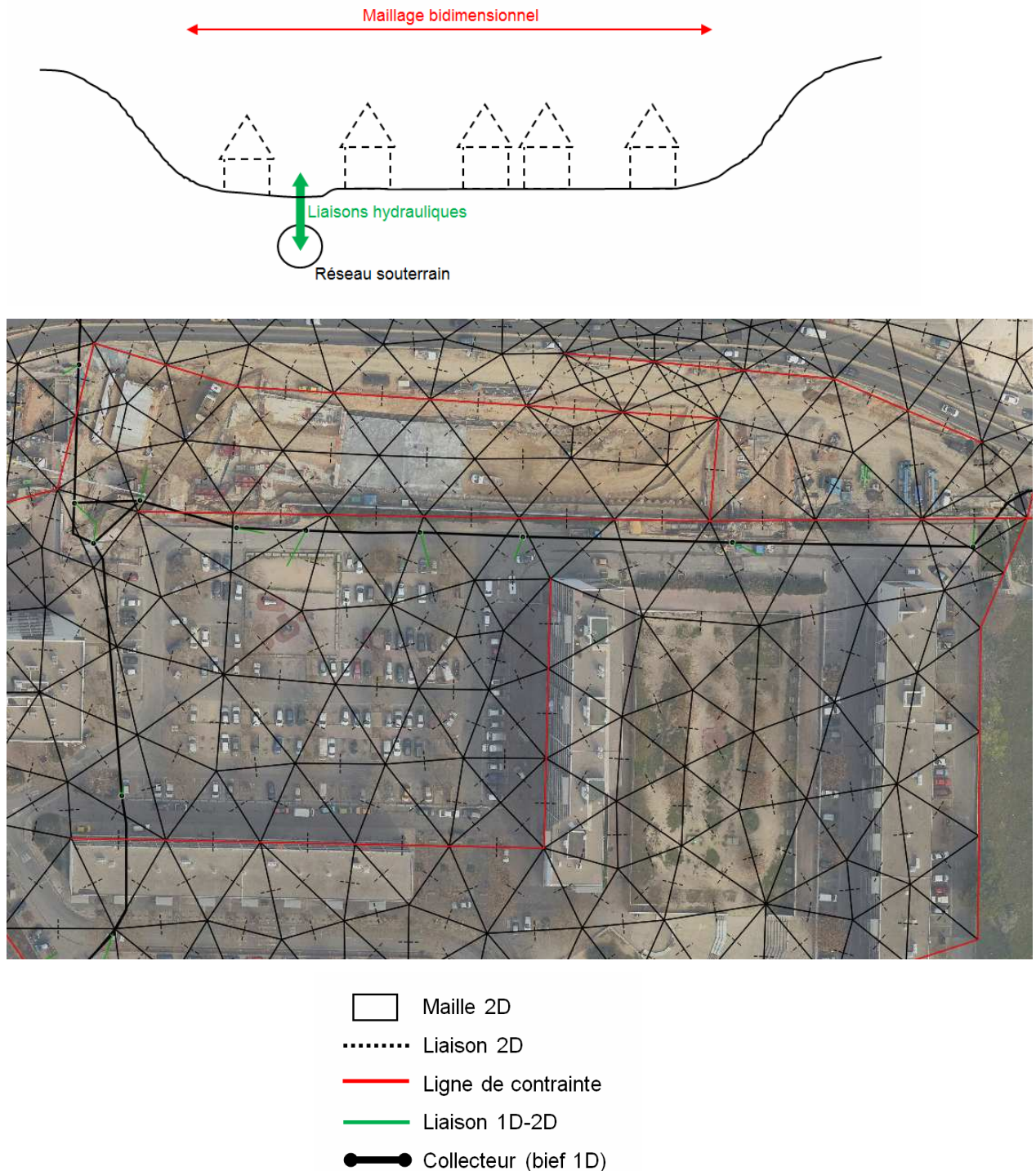


Figure 10 : Exemple de bief 1D immergé dans le maillage 2D

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).

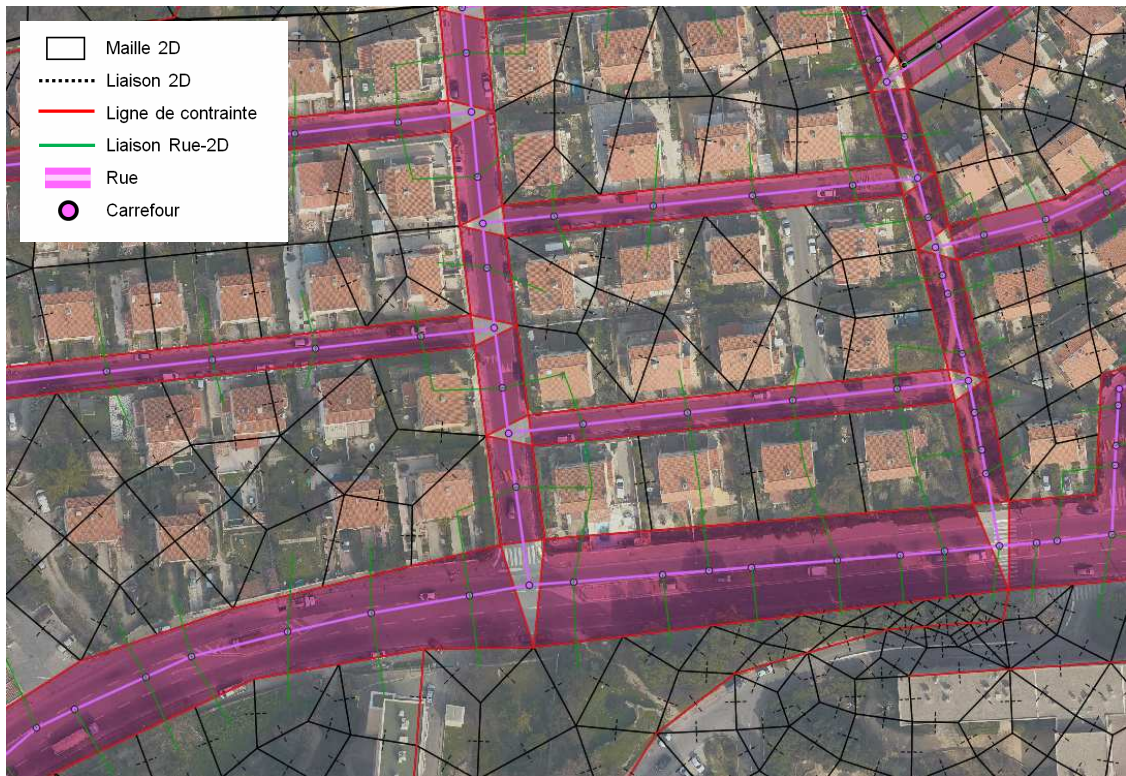


Figure 11 : Exemple de maillage 2D en secteur urbain avec voiries et rues

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.

Les cours d'eau sont soit canalisés en surface, soit enterrés.

Dans ces secteurs, nous opterons pour une modélisation filaire de la vallée, incluant le lit mineur lorsqu'il est à surface libre (filaire 1D), ou couplé à une modélisation filaire des collecteurs souterrains lorsque le cas se présente (couplage 1D-1D).

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 (bâti, remblais, ...), couplé aux biefs filaires 1D du lit mineur.

La structure du modèle mis en oeuvre 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 1.

Cours d'eau et affluents	Commune	Linéaire modélisé (km)		
		Collecteur fermé	Cours d'eau à ciel ouvert	Total
Aygalades	Marseille	2.6	6	8.6
Affluents Aygalades	Marseille	2.1	0.3	2.4
Lions	Marseille	6.3		6.3
Tuves	Marseille	2.6	2.4	5
Plombières	Marseille	5.6	0.4	6
Four de Buze	Marseille	0.4	1.2	1.6
Bois Chenu	Marseille		1.2	1.2
Sainte-Marthe	Marseille	4.4	0.7	5.1
Caravelle	Septèmes-les-Vallons / Marseille	3.9	3.9	7.8
Bedoule	Septèmes-les-Vallons	1.6	1.3	2.9
Cadeneaux	Les Pennes Mirabeau	1.4	3.6	5
Matelots	Les Pennes Mirabeau	0.3	0.2	0.5
Val sec	Les Pennes Mirabeau	1	0.3	1.3
Gavotte	Les Pennes Mirabeau / Marseille	0.1	0.7	0.8
TOTAL				54.5 km

La pente moyenne des deux principaux cours d'eau est relativement forte. Le profil des Aygalades présente une très nette cassure au niveau de la « cascade ».

Le profil du ruisseau de Plombière est quant à lui relativement homogène.

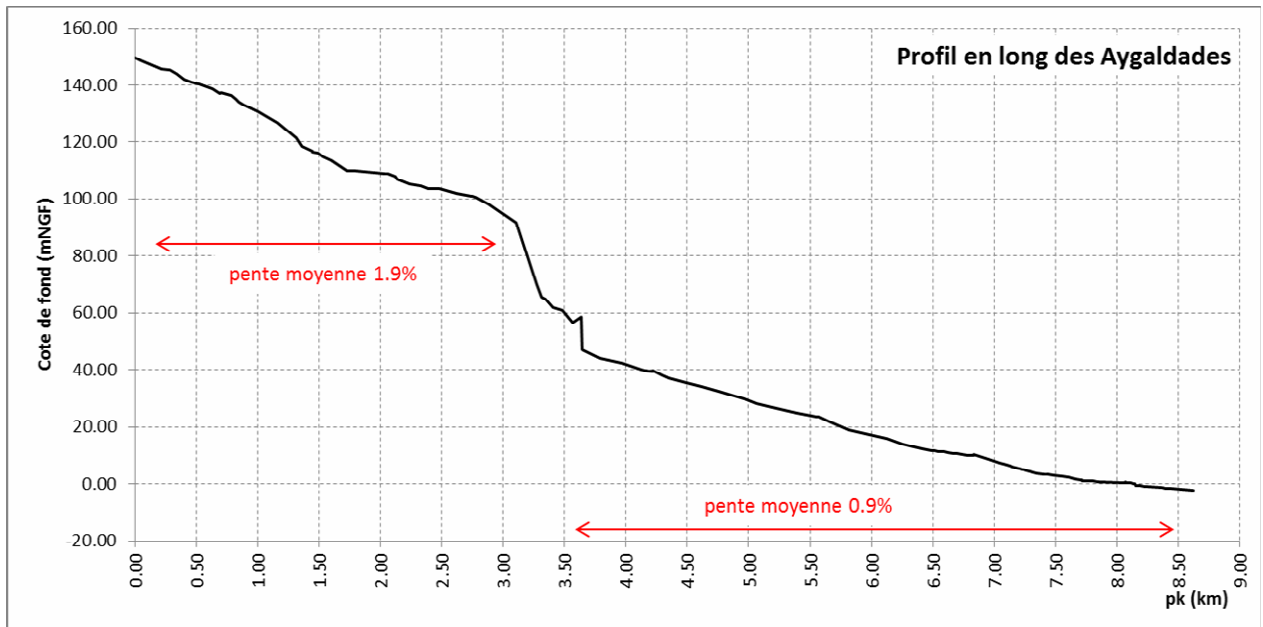


Figure 12 : Profil en long des Aygalades depuis les Pennes-Mirabeau jusqu'à l'exutoire dans le port

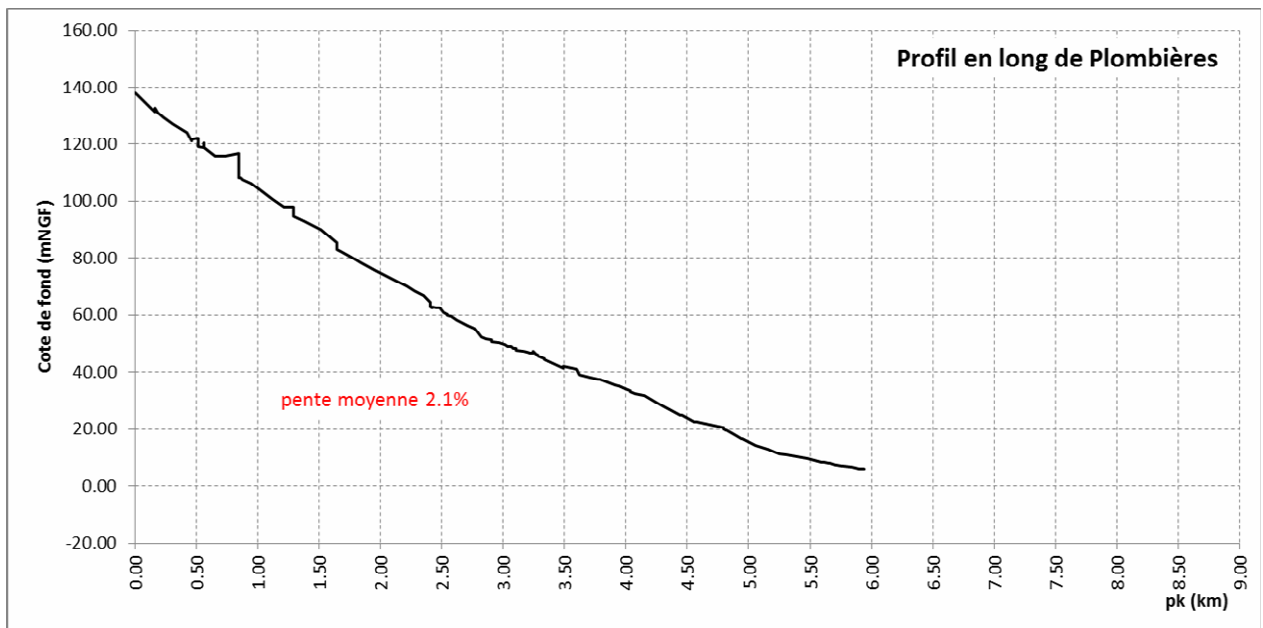


Figure 13 : Profil en long du Ruisseau de Plombières depuis Four de Buze en amont jusqu'à la confluence avec les Aygalades

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.

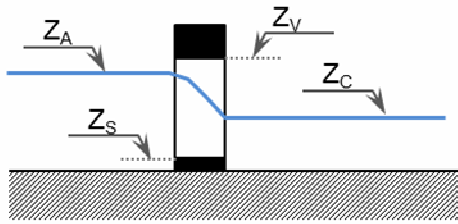
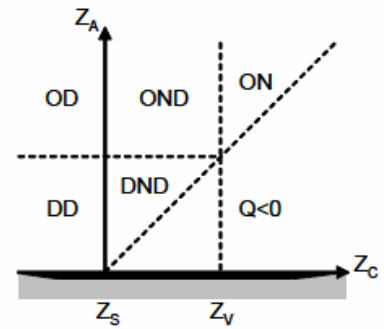


Schéma de fonctionnement



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)		

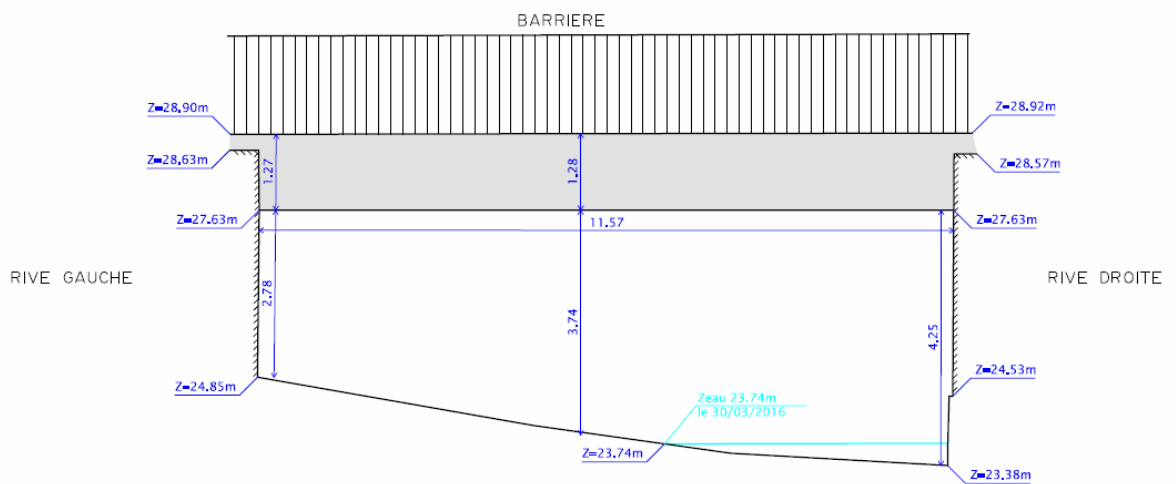
Lorsque l'ouvrage de franchissement est submersible, l'orifice est complété en parallèle par un élément seuil correspondant à la possibilité d'écoulement sur le tablier défini par une largeur, une cote et un coefficient de seuil.

Exemple d'ouvrage modélisé sur le lit mineur :

Vue Amont



Plan topographique :



Ouvrage modélisé :

Name:

Z ceiling:

Z invert:

Gate area (m²):

Gate coefficient:

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.

3.4.3 Seuils et vannages

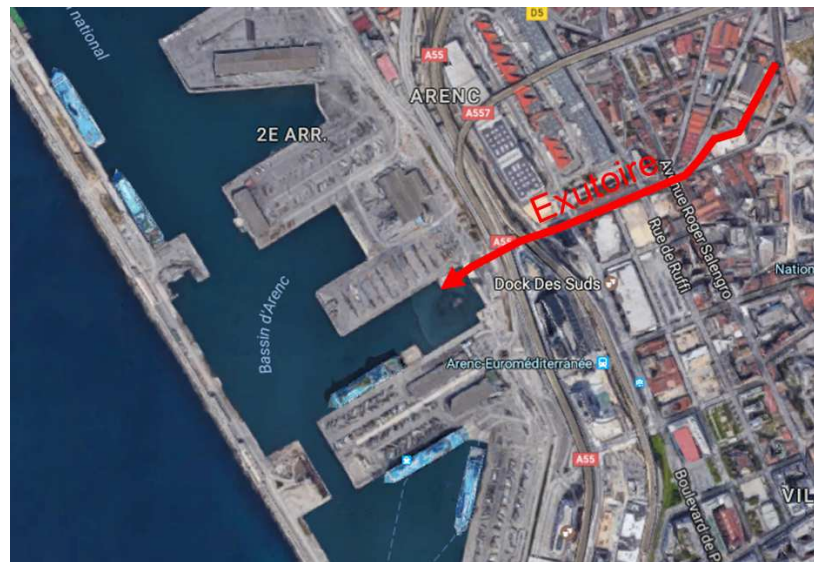
Les seuils frontaux et latéraux sont modélisés par des lois de seuil.

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.

3.5 CONDITIONS AUX LIMITES

La condition limite aval correspond au niveau marin à l'exutoire des Aygalades dans le Bassin d'Arenc du Grand Port Maritime de Marseille.



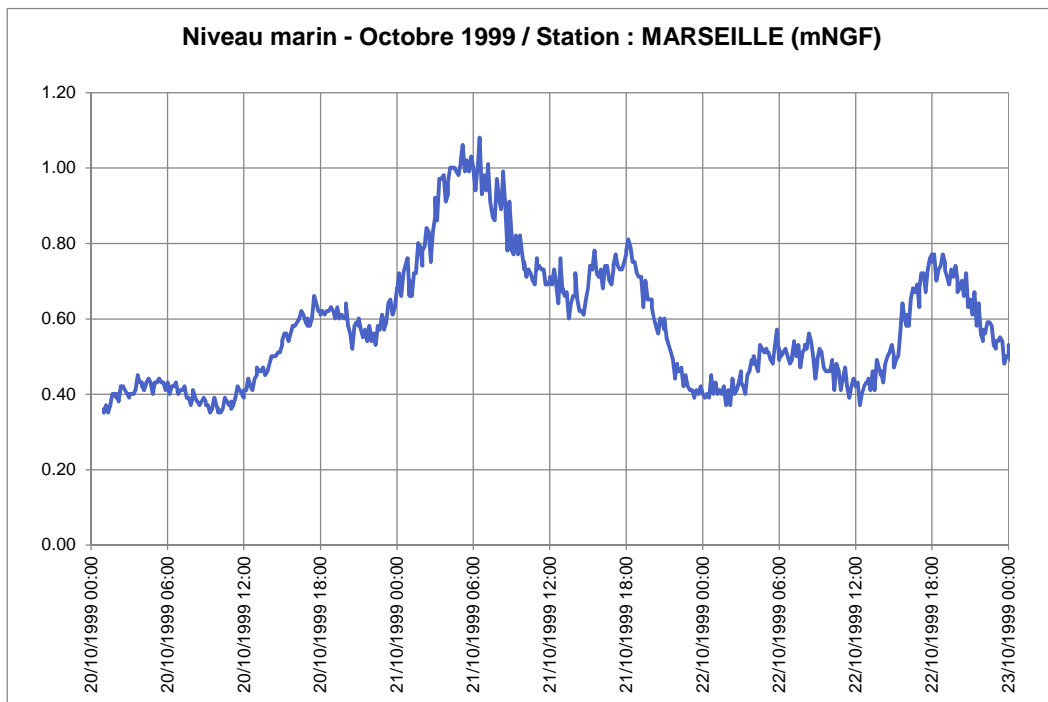
Le niveau marin à Marseille est relevé en continu au marégraphe (code : IF000364) situé au sud de l'exutoire et à l'extérieur des digues. Le zéro hydrographique du marégraphe est calé à la cote -0.32 mNGF.

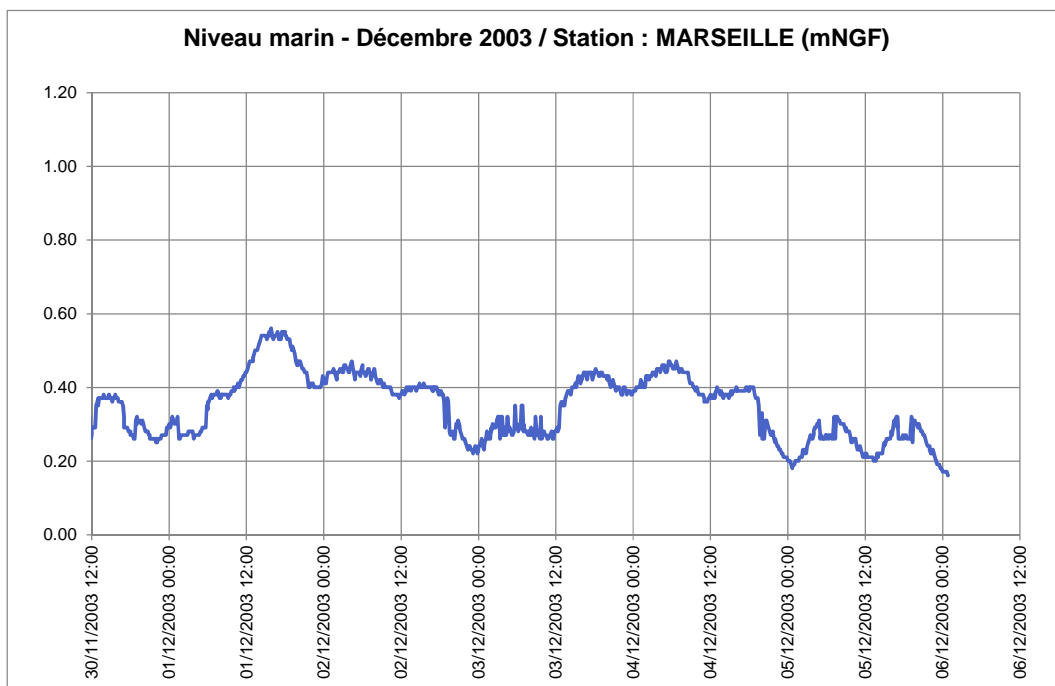
Le niveau de plus haute mer astronomique mesuré à ce marégraphe est de 0.64 m soit un niveau de +0.32 mNGF. C'est le niveau moyen qui est pris en compte dans la modélisation hors contrainte aval supplémentaire (changement climatique, tempête, houle, etc...).



Figure 14 : Localisation de l'exutoire des Aygalades et du marégraphe de Marseille

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) :





Pour ces deux crues, un niveau aval constant représentatif du niveau marin sur la durée de l'événement simulé a été retenu. Il est calculé comme la moyenne sur 12 heures au moment du pic de la crue soit :

- +0.47 mNGF pour la crue de décembre 2003,
- +0.90 mNGF pour la crue d'octobre 1999.

3.6 ZOOM SUR DES SECTEURS ET OUVRAGES SPECIFIQUES

3.6.1 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 des Aygaldes ou de ses affluents.

Tous les ouvrages de rétention implantés sur les cours d'eau modélisés ou en aval immédiat de bassin versant modélisés sont intégrés dans le modèle ; ils sont détaillés en page suivante.

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

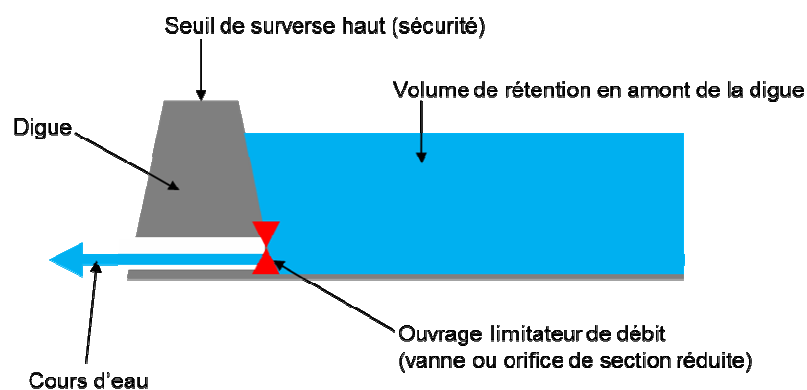


Figure 15 : Fonctionnement d'un bassin de rétention type

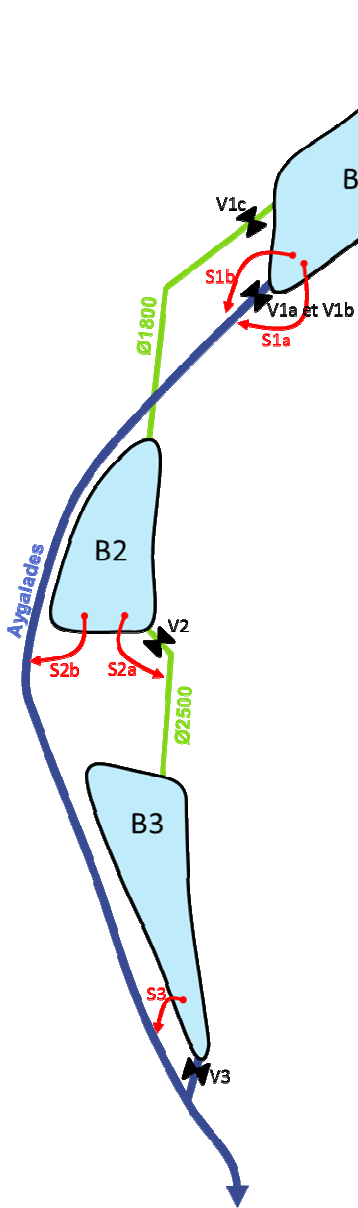
Les différents ouvrages pris en compte dans le modèle sont les suivants :

Identifiant	Commune	Vallon / cours d'eau	Cote de fond (mNGF)	Cote de surverse (mNGF)	Volume (m ³) (au niveau de la surverse)	Ouvrage limitateur	
Bassin de Fabregoules B1	Septème-les-Vallons	Vallon de Fabregoules	228.30	229.00	2 000	Seuil haut vers B2	
Bassin de Fabregoules B2	Septème-les-Vallons	Vallon de Fabregoules	223.35	225.50	7 700	DN 300	
Retenue collinaire de Rougière	Septème-les-Vallons	Vallon de Rougière			7 100		Amont tronçon modélisé
Bassin triangle autoroutier	Septème-les-Vallons	Bédoule	212.00	213.50	3 300		Amont tronçon modélisé
Cossimo	Les Pennes-Mirabeau	Cadeneaux			490		Amont tronçon modélisé
Gedimat	Les Pennes-Mirabeau	Cadeneaux	180.40	182.20	2 500	0.7 x 0.7 m	
Cimetière	Les Pennes-Mirabeau	Cadeneaux			220		Amont tronçon modélisé
Sauges	Les Pennes-Mirabeau	Cadeneaux	198.60	202.20	3 300	0.5 x 0.5 m	
Bouroumettes	Les Pennes-Mirabeau	Cadeneaux	202.80	204.70	1 700	0.3 x 0.4 m	
Boli	Les Pennes-Mirabeau	Val sec	187.10	189.90	10 000	0.3 x 0.45 m	
Giono	Les Pennes-Mirabeau	Matelots	174.70	176.60	7 800	DN 500	
Résidence Murmure des eaux	Marseille	Four de Buzé	131.54	134.00	650	1.5 x 1.5 m	
Résidence l'échiquier	Marseille	Four de Buzé	119.00	120.20	800	0.6 x 0.2 m	
ZAC Sainte-Marthe	Marseille	Bois chenu	102.00	107.25	10 000	DN 600	
Bassin de Chaillan B1	Marseille	Aygalades	109.11	112.11	10 500	2.0 x 1.0 m et DN1800	
Bassin de Chaillan B2	Marseille	Aygalades	103.60	106.68 et 107.30	7 800	2.0 x 0.5 m	
Bassin de Chaillan B3	Marseille	Aygalades	102.80	105.50	9 800	2.0 x 0.5 m	

La capacité totale de l'ensemble des ouvrages de rétention est de l'ordre de **90 000 m³**.

Remarque : les bassins de rétention Rougière et Sainte-Marthe ont été réalisés après la crue de 2003, ils ne sont donc pas pris en compte dans le modèle pour les crues de calage (1999 et 2003).

Les **bassins de Chaillan** sont au nombre de trois et fonctionnent en parallèle du cours d'eau des Aygalades, ils sont alimentés en cascade depuis le bassin B1 en amont :



Le ruisseau des Aygalades entre dans le bassin B1. Le remplissage est contrôlé par les vannes V1a, V1b et V1c.

Le débit par la vanne V1c alimente le bassin B2 via un collecteur Ø1800.

Le débit par les vannes V1a et V1b est dirigé vers le ruisseau en aval.

Deux seuils S1a et S1b permettent de surverser vers les Aygalades lorsque le niveau maximum de remplissage est atteint.

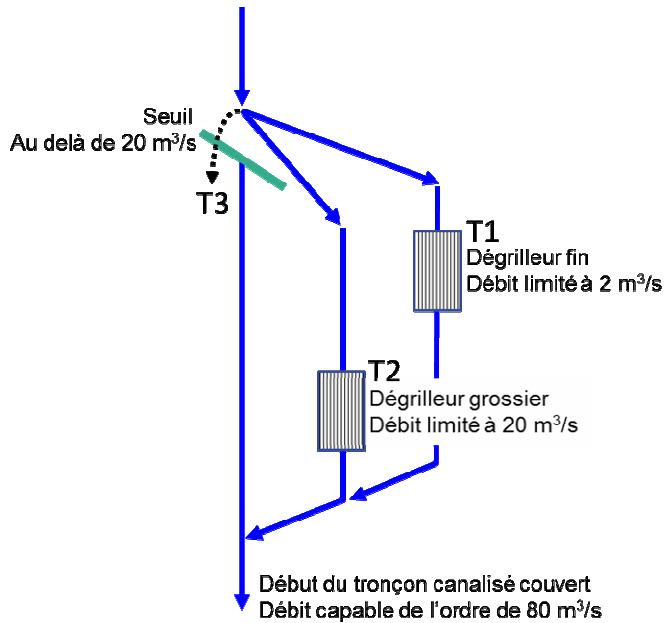
Le remplissage du bassin B2 est contrôlé par la vanne V2, qui permet d'alimenter le bassin B3 par un collecteur Ø2500. Deux seuils S2a et S2b permettent de surverser vers le Ø2500 et les Aygalades aval lorsque le niveau maximum de remplissage est atteint.

Le remplissage du bassin B3 est contrôlé par la vanne V3. Le seuil S3 permet de surverser vers les Aygalades aval lorsque le niveau maximum de remplissage est atteint.

Lors des événements de décembre 2003, les trois bassins ont été totalement remplis et les bassins B2 et B3 ont surversé vers les Aygalades.

3.6.2 Le dégrilleur Gèze

Le dégrilleur est situé juste en aval du boulevard du Capitaine Gèze il permet le dégrillage fin et grossier des eaux des Aygaldes entre 0 et 20 m³/s. Entre 0 et 2 m³/s les débits sont orientés via le chenal T1 vers le dégrilleur fin, entre 2 et 20 m³/s les débits sont orientés vers le dégrilleur grossier via le chenal T2, au-delà de 20 m³/s les débits sont orientés vers l'aval des Aygaldes via le chenal T3 par un seuil mobile. En aval de ce point le débit capable du tronçon est estimé à 80 m³/s.



3.6.3 Zoom sur le secteur L2

A Marseille, le secteur Saint-Barthélemy/Picon/Busserine, situé autour du boulevard Salvador Allende, l'avenue Raimu et le chemin de Sainte-Marthe est actuellement en pleine mutation urbaine. Plusieurs projets de renouvellement urbain ainsi que la construction du tronçon de la L2 sous le boulevard Salvador Allende sont engagés et vont engendrer des fortes modifications de la topographie et des réseaux souterrains.

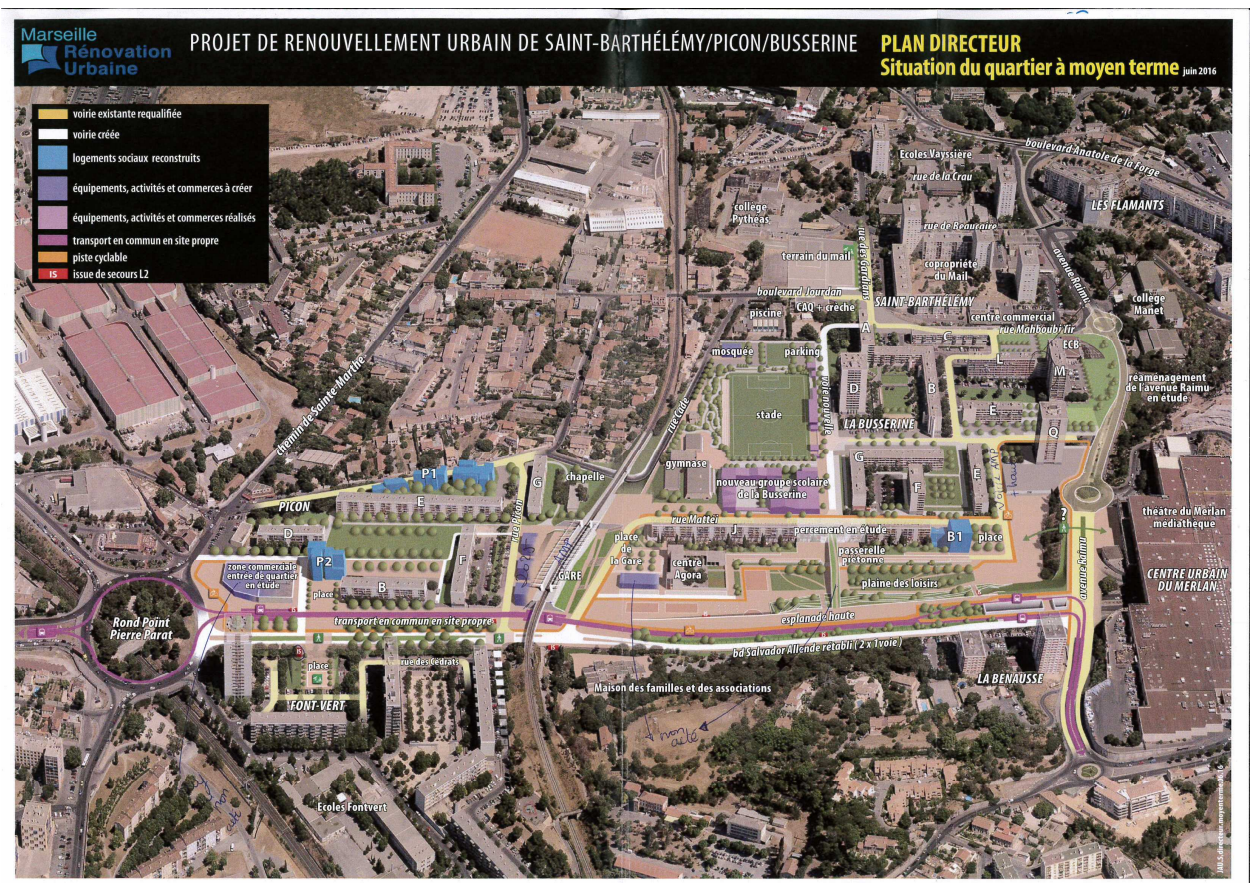
Le périmètre concerné est présenté sur la carte ci-après.

Ces modifications sont susceptibles d'impacter le fonctionnement hydraulique du secteur et notamment du ruisseau de Sainte-Marthe (sous le chemin de Sainte-Marthe) et du ruisseau de Plombières (sous l'avenue Raimu et le boulevard Salvador Allende).

Les modifications à court et moyen termes du secteur, tant au niveau de la topographie et de l'implantation des bâtis que du réseau eaux pluviales et des ruisseaux sont donc prises en compte pour établir les cartes de l'aléa inondation.

La DDTM13 a ainsi confié à Egis Ville et Transports en concertation avec Marseille Rénovation Urbaine (Ville de Marseille) une mission de synthèse de l'ensemble des données topographiques à prendre en compte dans le modèle hydraulique.

Figure 16 : Secteur Saint-Barthélemy / Picon / Busserine



L'ensemble des données prises en compte sont :

- Réseau eaux pluviales recalibré dans l'emprise du projet : branche Plombières, branche Sainte-Marthe, Avenue Raimu,
- Réseau eaux pluviales du franchissement de L2,
- Topographie projetée à fin des travaux.

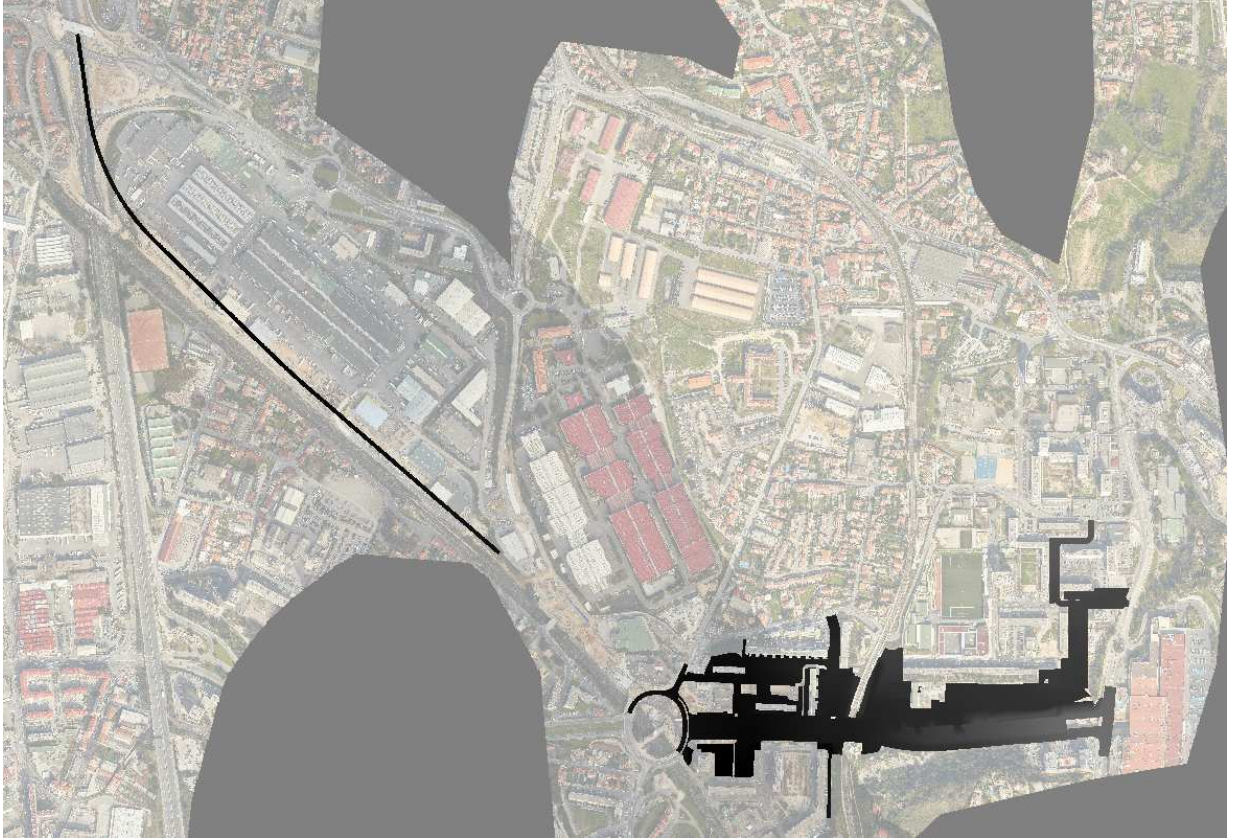


Figure 17 : Topographie projetée prise en compte sur le secteur L2 (zones en noir et gris)

Ces données étant postérieures aux crues de calage elles ne sont pas prises en compte dans le modèle qui a servi au calage.

3.6.4 La carrière de la Malle

La carrière de la Malle est située à Septèmes-les-Vallons en amont du bief modélisé du Vallon de Fabregoule. La carrière de La Malle draine un bassin versant de 400 hectares (surface carrière et bassins versant amont).

Les eaux pluviales de la carrière sont récupérées dans un bassin de décantation et un bassin de pompage d'une capacité de stockage de 250 000 m³.

Une station de pompage (1 000 m³/h) permet alors de pomper les eaux décantées vers un deuxième ouvrage de rétention de 150 000 m³ (Lac de pêche), lorsque cet ouvrage est plein le débit est pompé vers le Vallon de Fabregoule.

On considère donc dans la modélisation que la Vallon de Fabregoule est alimenté par le bassin versant de la carrière lorsque le volume d'apport est supérieur à 400 000 m³, le débit vers le vallon est limité au débit de pompage soit 280 l/s.

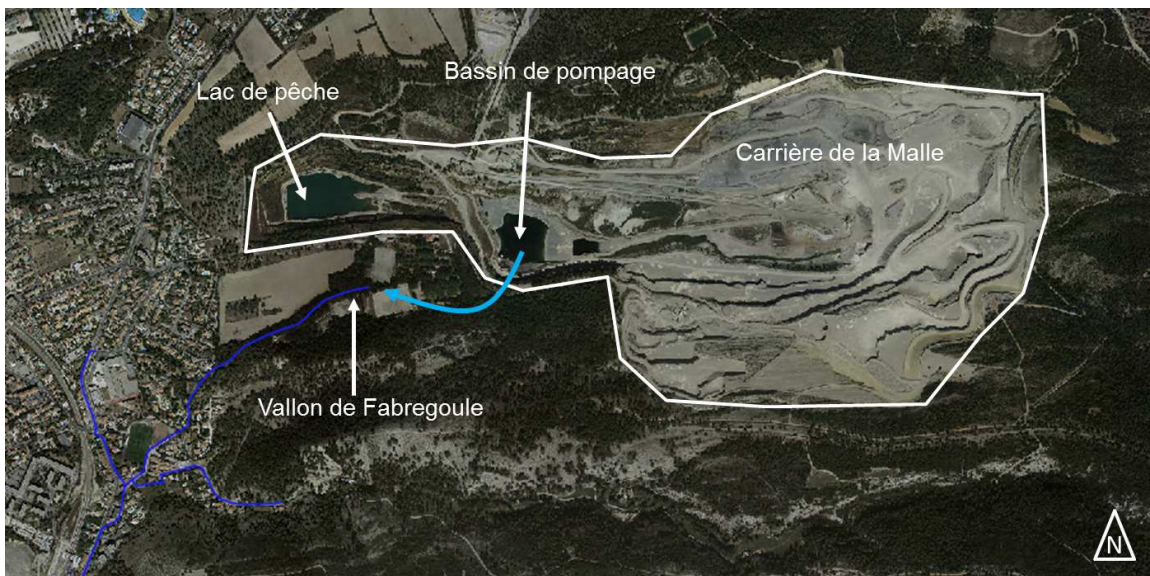


Figure 18 : Carrière de la Malle

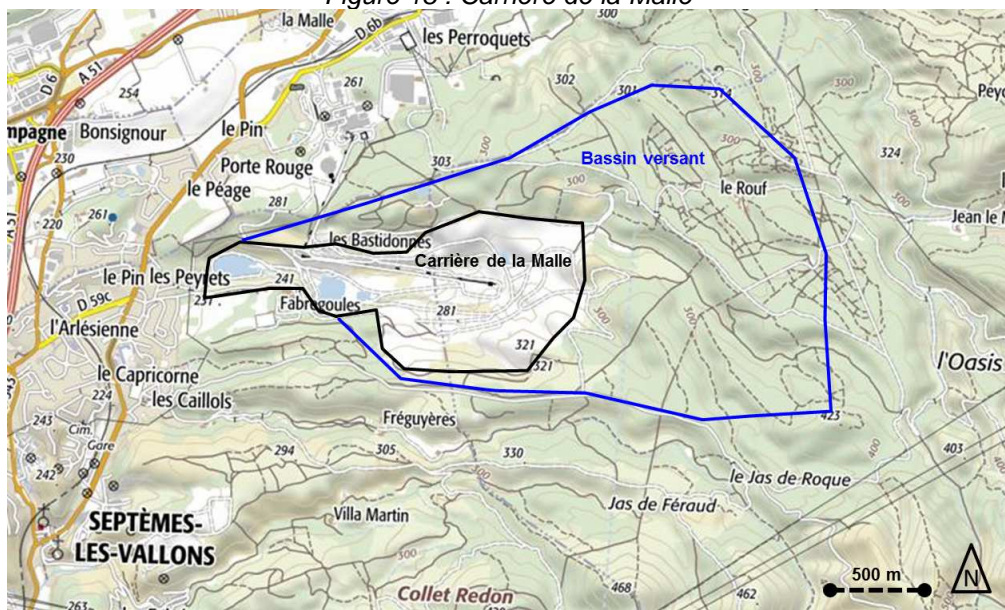


Figure 19 : Bassin versant de la carrière de la Malle

3.6.5 L'ISDND de Septèmes-les-Vallons

L'installation de stockage des déchets non dangereux (ISDND) de Septèmes-les-Vallons est située en amont du bief modélisé du Vallon des Tuves. Elle s'étend sur une surface de 44 hectares.

L'ISDND est conçue, d'une part, pour que les eaux de ruissellement extérieures à l'ISDND ne traversent pas l'installation, d'autre part, pour que les eaux de ruissellement internes soient stockées en totalité à l'intérieur de l'installation.

Les eaux de ruissellement extérieures à l'ISDND sont donc orientées vers le thalweg naturel du bassin versant par des murets et fossés d'isolement.

Les eaux de ruissellement internes sont stockées dans des ouvrages de rétention situés sur le périmètre intérieur de l'installation jusqu'à une période de retour de 10 ans.

Dans le modèle hydraulique, le bassin versant du vallon des Tuves est découpé en deux sous-bassins versant :

- ISDND : le débit d'apport passe par un bassin de rétention correspondant au volume de la pluie décennale (de l'ordre de 23 000 m³), au-delà de ce volume les eaux pluviales se dirigent normalement vers le Vallon des Tuves.
- Hors ISDND : aucun ouvrage particulier modélisé.

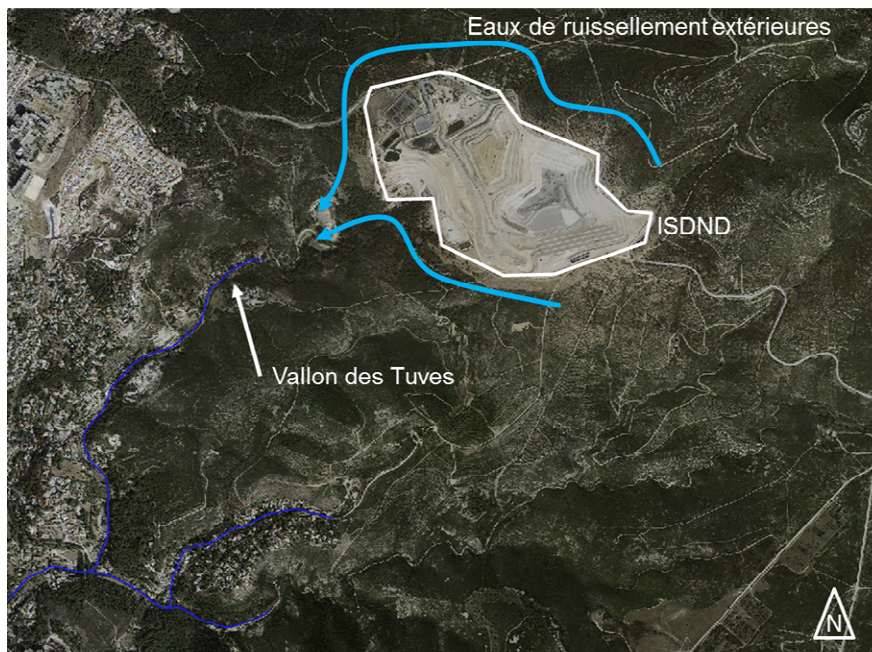


Figure 20 : ISDND de Septèmes-les-Vallons

3.7 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.

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.

Par contre, ils sont pris en compte pour la crue de calage de 2003 car aucun dysfonctionnement n'a été signalé sur ces ouvrages lors de ces événements. Dans ce cas, ils sont pris en compte comme **cote de débordement** vers le lit majeur rive gauche et/ou rive droite :

- lorsque le lit majeur est modélisé en 2D, le calage des cotes de débordement 1D/2D sont calées à la cote de crête des murets,
- lorsque le lit mineur est modélisé en 1D, la cote de la murette (rive gauche et/ou rive droite) est spécifiée à chaque profil en travers ; tant que cette cote n'est pas atteinte dans le lit mineur, le lit majeur n'est pas mis en eau.

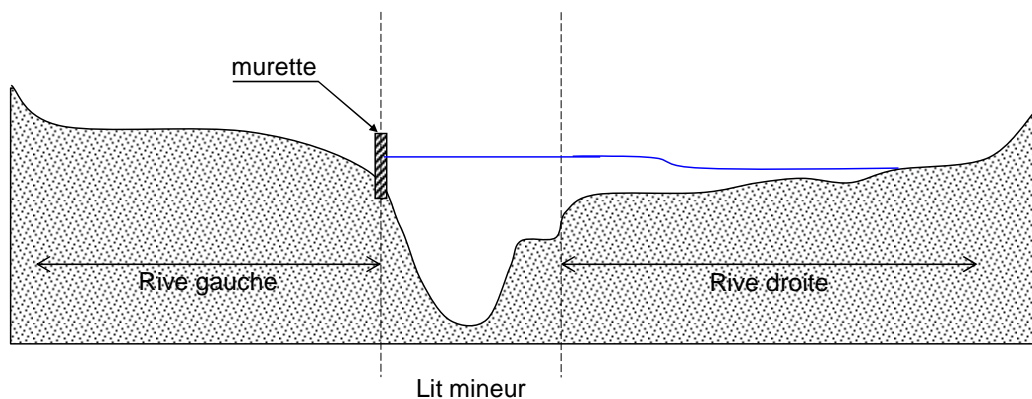


Figure 21 : Exemple de murette en rive gauche

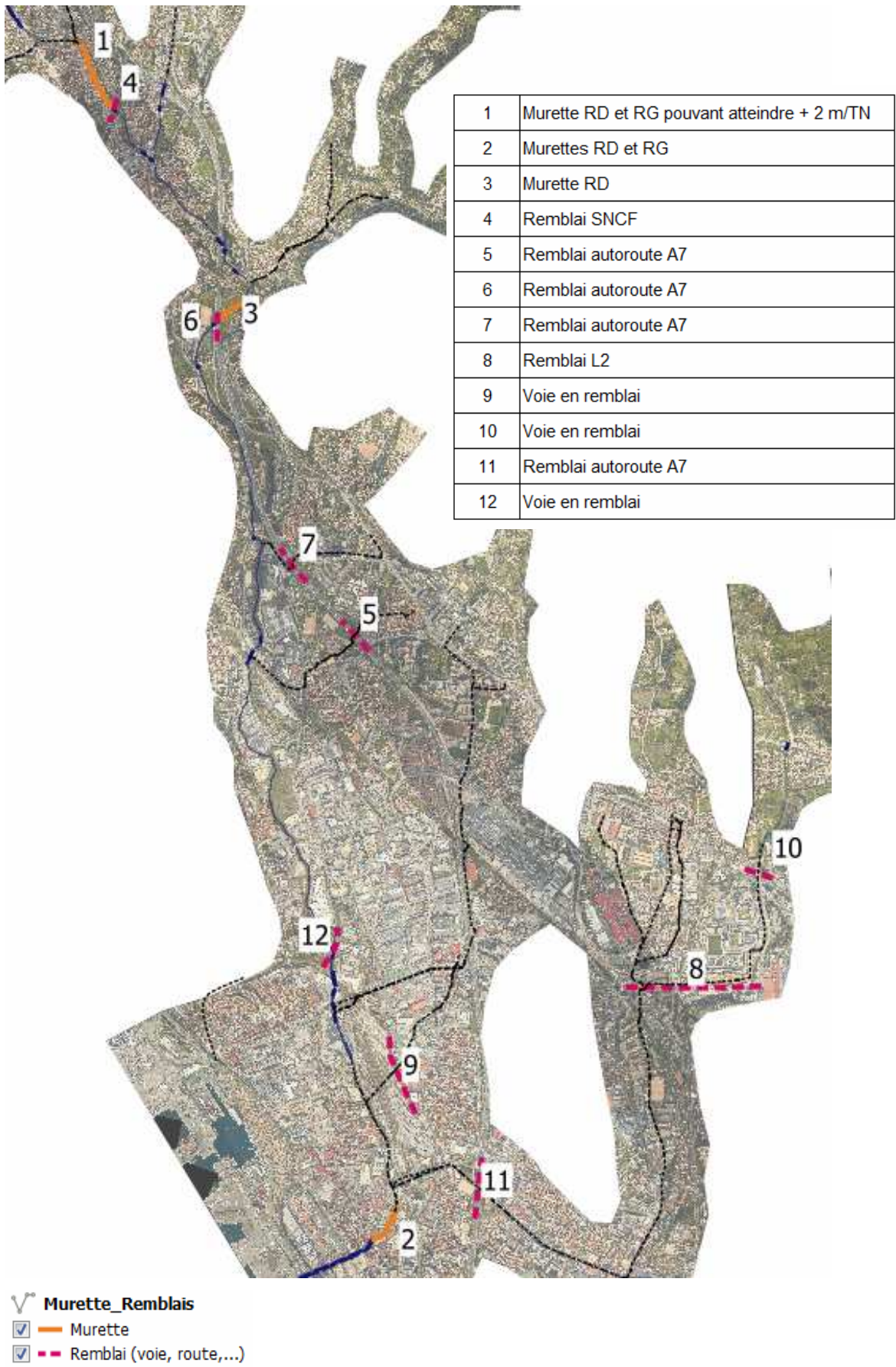


Figure 22 : Principaux remblais identifiés sur le bassin versant

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 PARAMETRES DE CALAGE

Les paramètres de calage sont principalement :

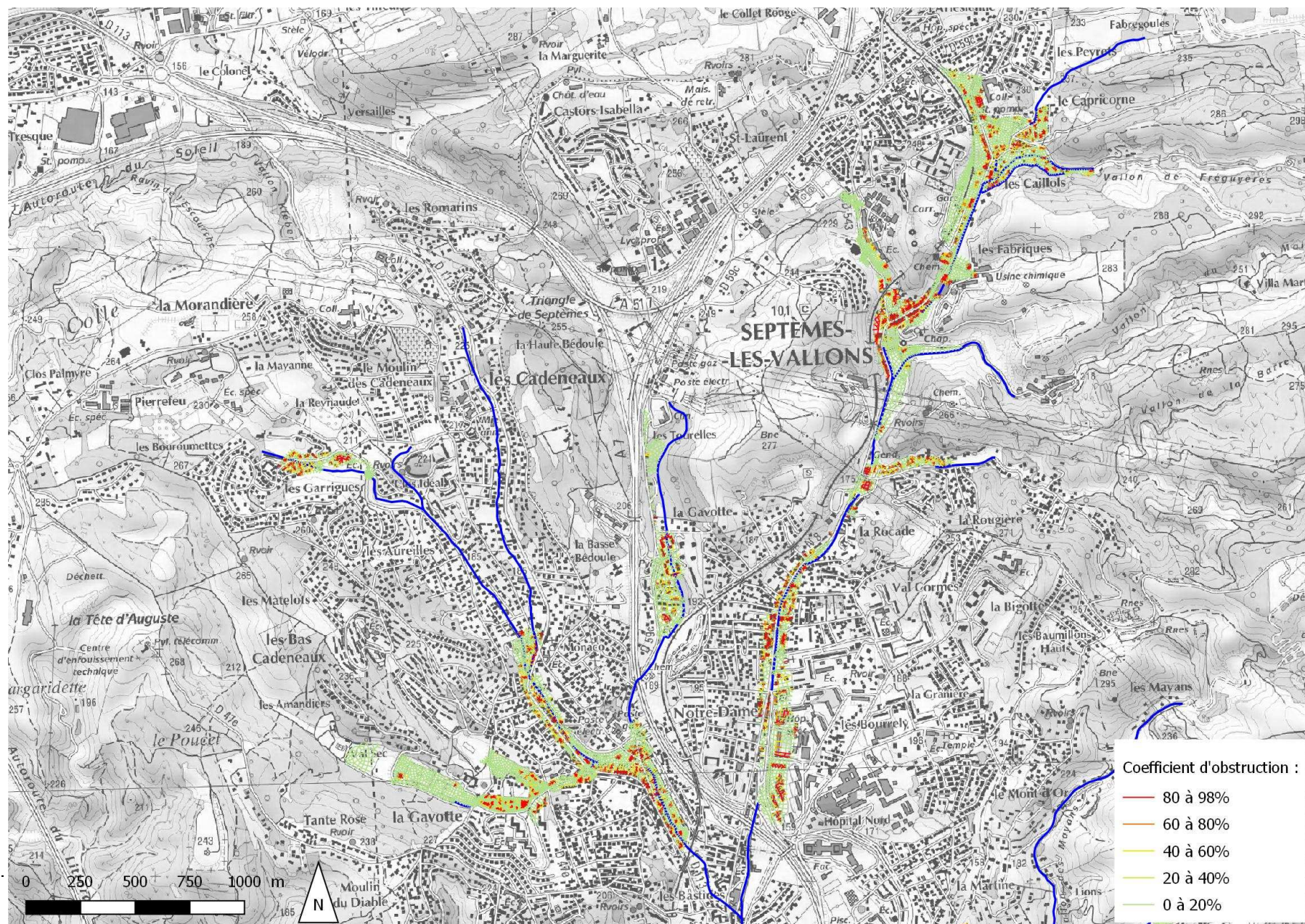
- Les coefficients de rugosité (Strickler) en lit mineur et en lit majeur,
- Les coefficients de seuils noyés / dénoyés,
- Les pertes de charge des ouvrages de franchissement,
- La régulation des ouvrages asservis (bassins d'orage notamment) ;

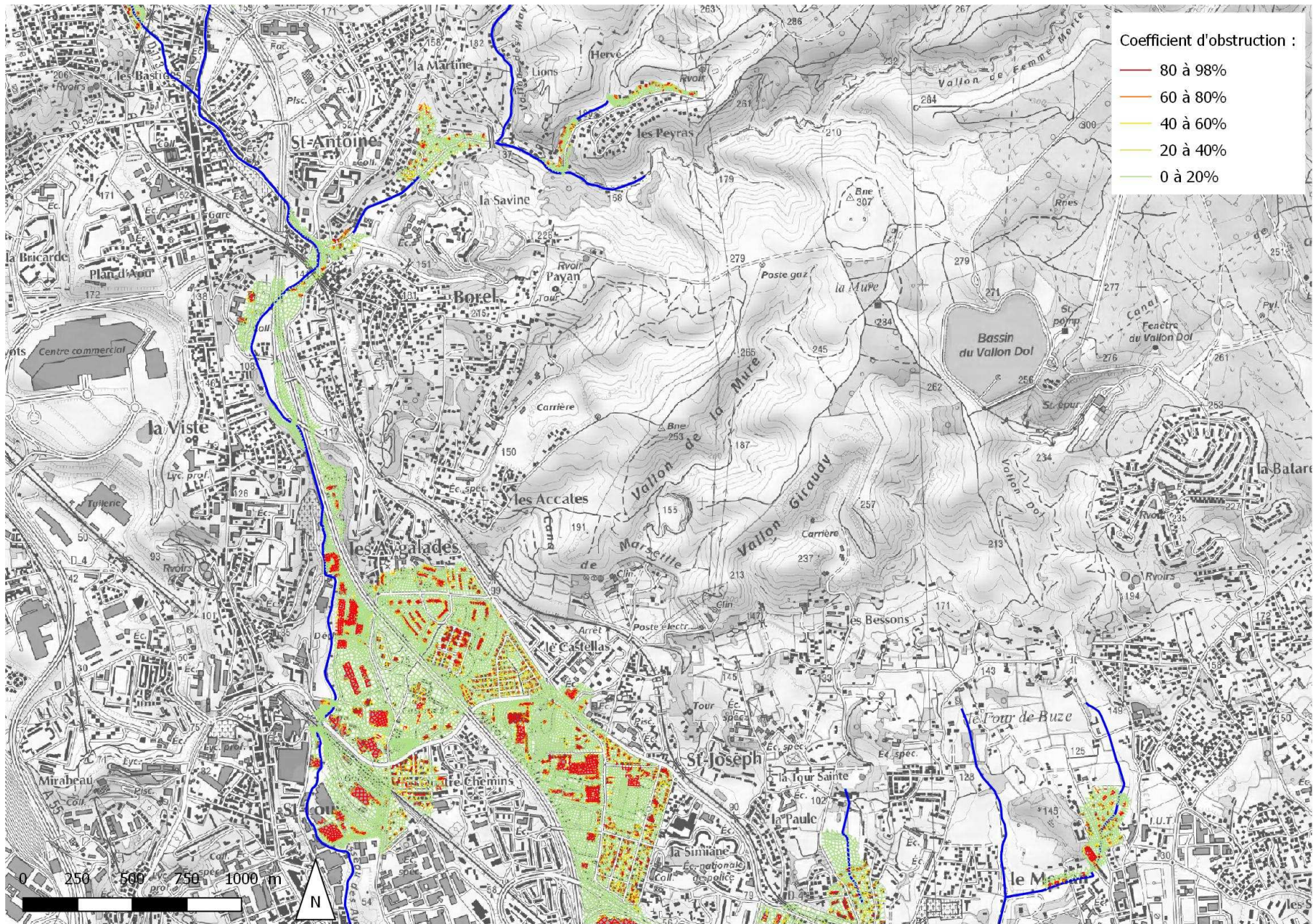
Les coefficients de Strickler retenus sur l'ensemble du modèle sont compris entre :

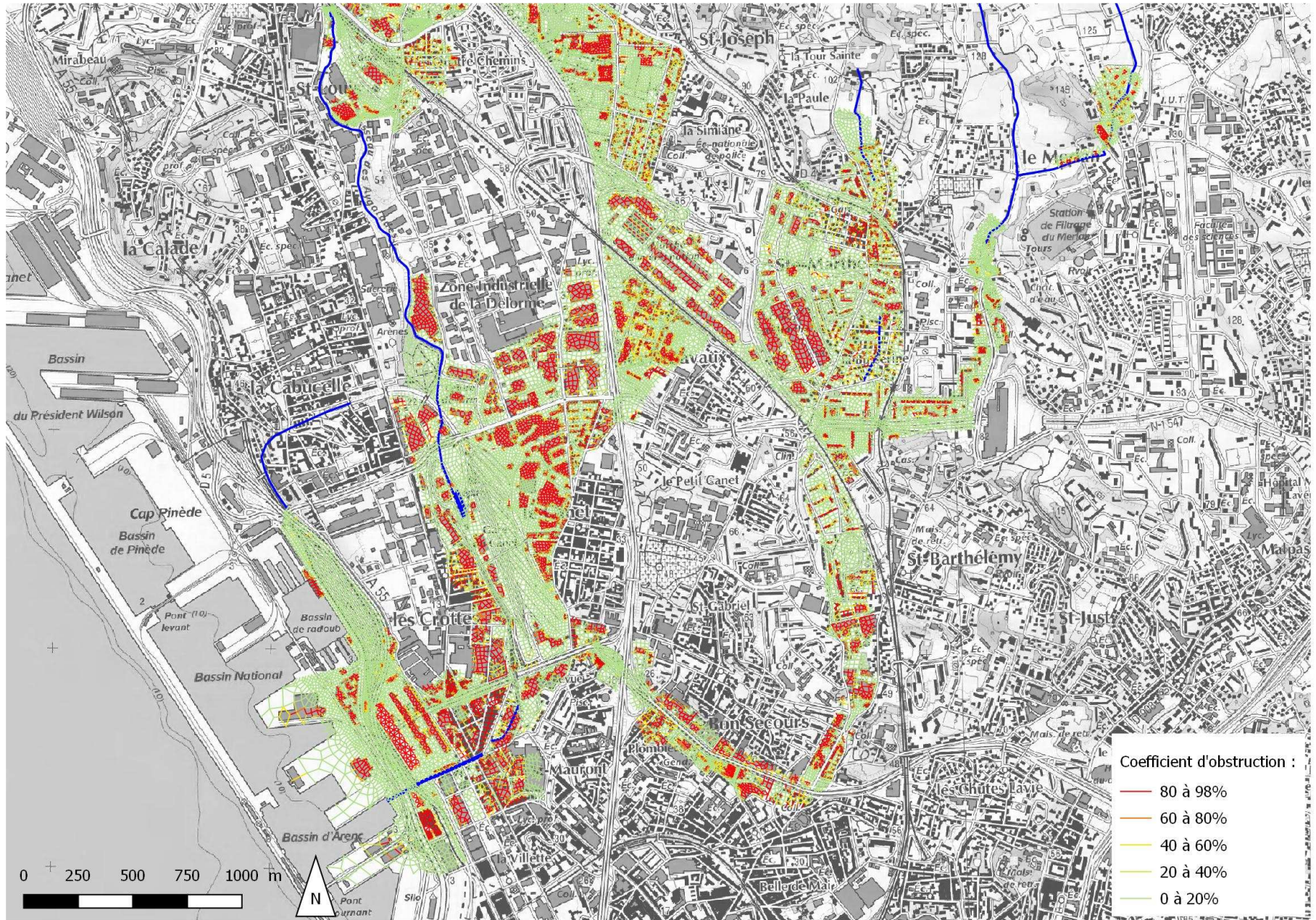
- **23 et 27 pour les lits mineurs à ciel ouverts,**
- **50 et 60 pour les parties souterraines et canalisées,**
- **30 à 40 pour les voiries modélisées par des éléments « Rues »,**
- **8 et 15 pour le lit majeur.**

En complément des coefficients de Strickler, les cartes ci-après représentent les coefficients d'obstruction pris en compte dans le modèle. Ils traduisent également la « rugosité » du lit majeur et des champs d'écoulement.

Figure 23 : Coefficients d'obstruction du maillage 2D







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

4.2 CHOIX DES EVENEMENTS DE CALAGE

Deux crues sont choisies pour le calage du modèle :

- Décembre 2003 : crue récente ayant marqué les esprits, crue débordante, crue comportant le plus d'éléments historiques : comptes rendus, photos, mesures, laisses de crue,
- Octobre 1999 : crue récente dont le débit mesuré à la station Gèze est relativement important, mais inférieur à celui de la crue de 2003.

4.2.1 Données disponibles

Les éléments dont nous disposons pour le calage de la crue de décembre 2003 sont :

- Rapport d'orage du SERAMM : hydrogrammes, photos,
- Laisses de crue : 6 repères de crue levés dans le cadre de la phase 1b en 2016,
- Film de la crue dans le Vallon de la Télévision (Septèmes-les-Vallons)

Pour la crue d'octobre 1999 :

- Rapport d'orage du SERAMM : hydrogrammes,
- Niveau marin relevé au marégraphe de Marseille (voir paragraphe précédent sur les conditions limites aval).

Les repères de crue levés dans le cadre de la présente étude et ceux issus du rapport d'orage de décembre 2003 sont listés dans le tableau ci-après :

ID	Source	Observation	Cote mesurée	Source valeur mesurée
R01	Repère levé en 2016 Voir fiche rapport phase 1		175.26	
R06		L'eau passe en partie basse du portail, H environ 50 cm / TN	215.1	
R02			193.1	
R03			151.43	
R04			113.71	
R05			2.34	
Orage2003-01	Rapport d'orage de décembre 2003 Pas d'indication précise de la méthode de mesure de la valeur mesurée		151.38	Sur plan PDF
Orage2003-02			144.85	Sur plan PDF
Orage2003-03			144.5	Sur plan PDF
Orage2003-04			137.75	Sur plan PDF
Orage2003-05			135.87	Sur plan PDF
Orage2003-06			125.41	Sur plan PDF
Orage2003-07			118.37	Sur plan PDF
Orage2003-08			114.8	Sur plan PDF
Orage2003-09		Incohérent amont / aval	111.73	Sur plan PDF
Orage2003-10		Bassin 1 rempli jusqu'au seuil	112.1	Déduit du MNT et du rapport d'orage
Orage2003-11			108.48	Sur plan PDF
Orage2003-12			66.05	Sur plan PDF
Orage2003-13		Ecoulement sur le seuil du bassin	107.35	Déduit du MNT et du rapport d'orage
Orage2003-14		Le bassin déborde sur le seuil	105.7	Déduit du MNT et du rapport d'orage
Orage2003-15			42.7	Sur plan PDF
Orage2003-16			17.05	Sur plan PDF
Orage2003-17			13.38	Sur plan PDF
Orage2003-18			Lecture mire 3.90 / fond	ND

Tableau 1 : liste des repères de crue, décembre 2003

4.2.2 Hyétogrammes mesurés

Le secteur d'étude est couvert par un réseau de pluviographes de la DEAP AMP/MP (voir carte ci-dessous) permettant la restitution de fichiers de mesures pluviométriques au pas de temps 6 min exploité par le Seramm.

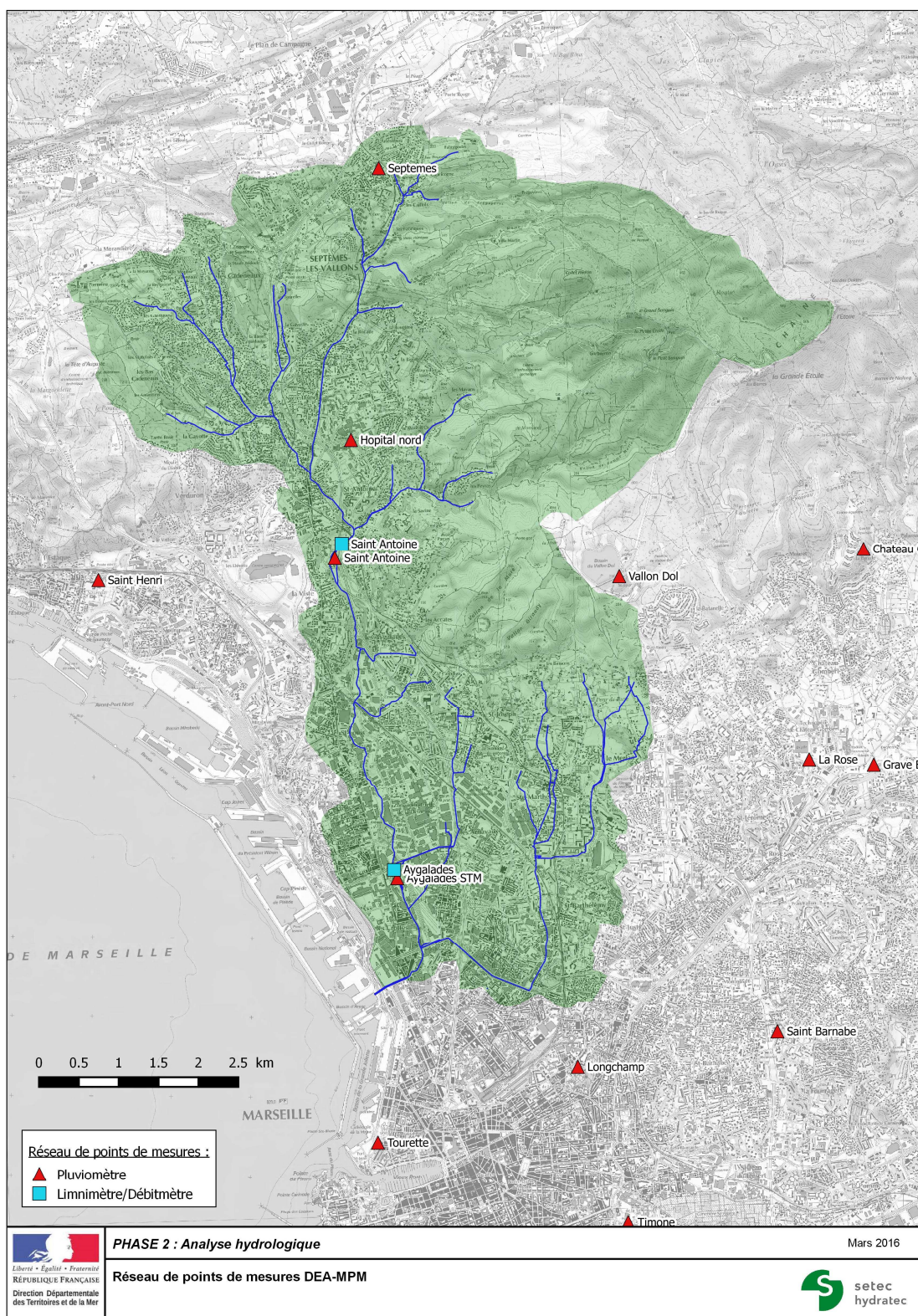
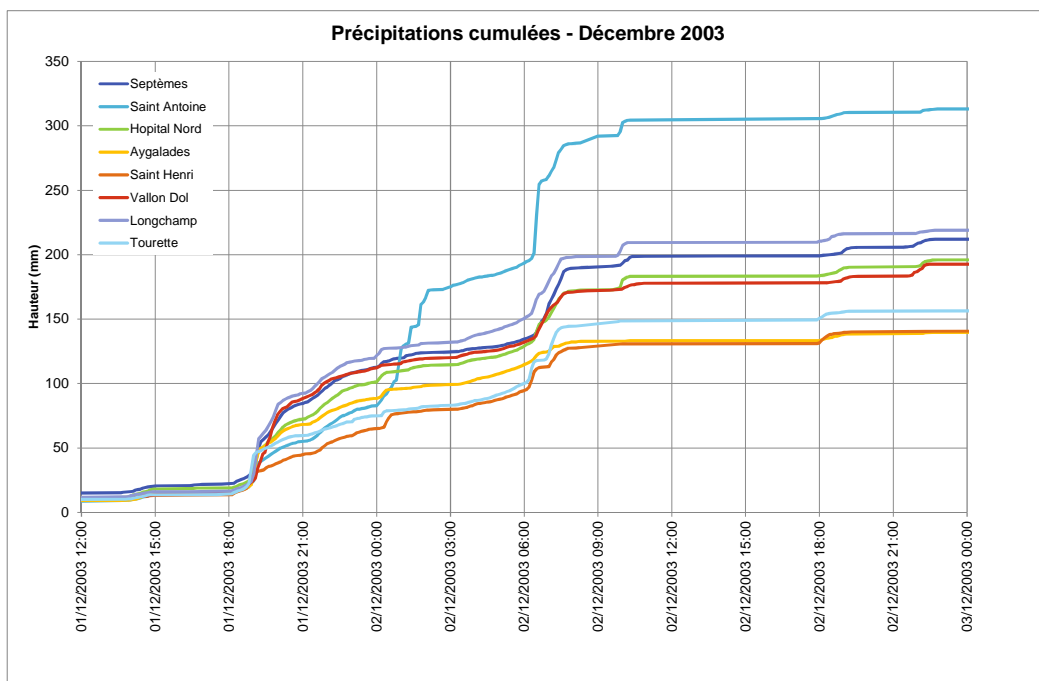
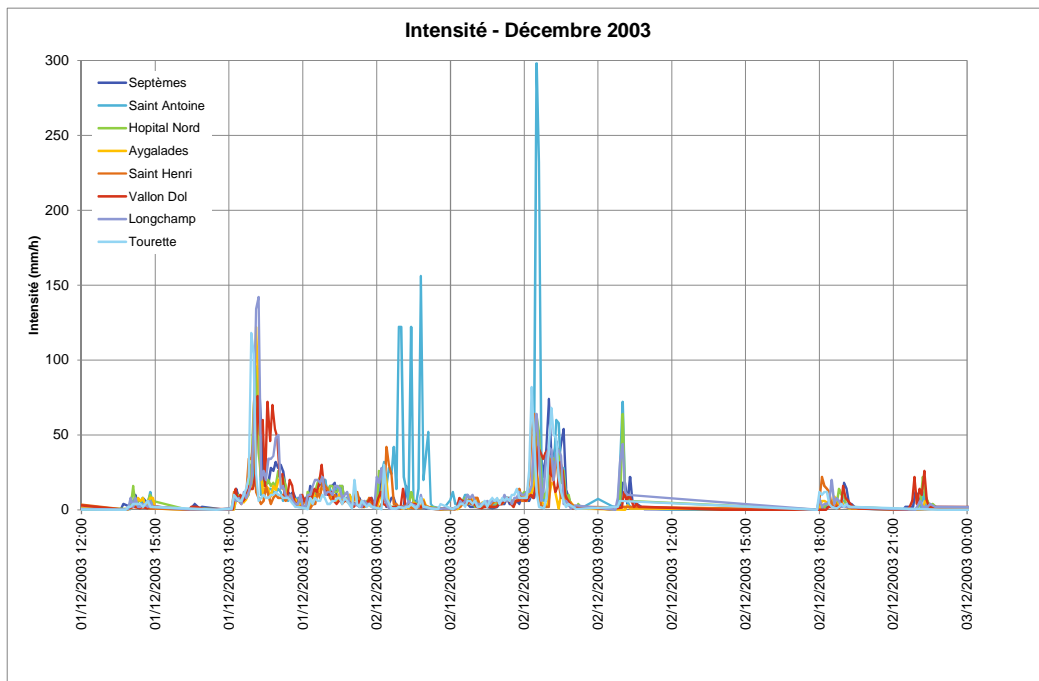


Figure 24 : Pluviomètres AMP/MP DEAP à proximité du bassin versant

Les hyétogrammes mesurés sur les 8 pluviomètres du bassin versant des Ayalades pour la crue de décembre 2003 sont représentés ci-dessous :



On note que pour cet épisode le cumul relevé à la station Saint-Antoine est supérieur de +50% environ par rapport aux autres stations. Il présente par ailleurs plusieurs « oscillations » en milieu d'évènement qui n'ont pas été mesurées sur les autres postes.

Des tests de sensibilité ont été menés sur le modèle hydraulique, montrant que la prise en compte de ce pluviomètre génère un pic de crue au niveau du point de mesure Ayalades qui n'a pas été mesuré dans la même ampleur.

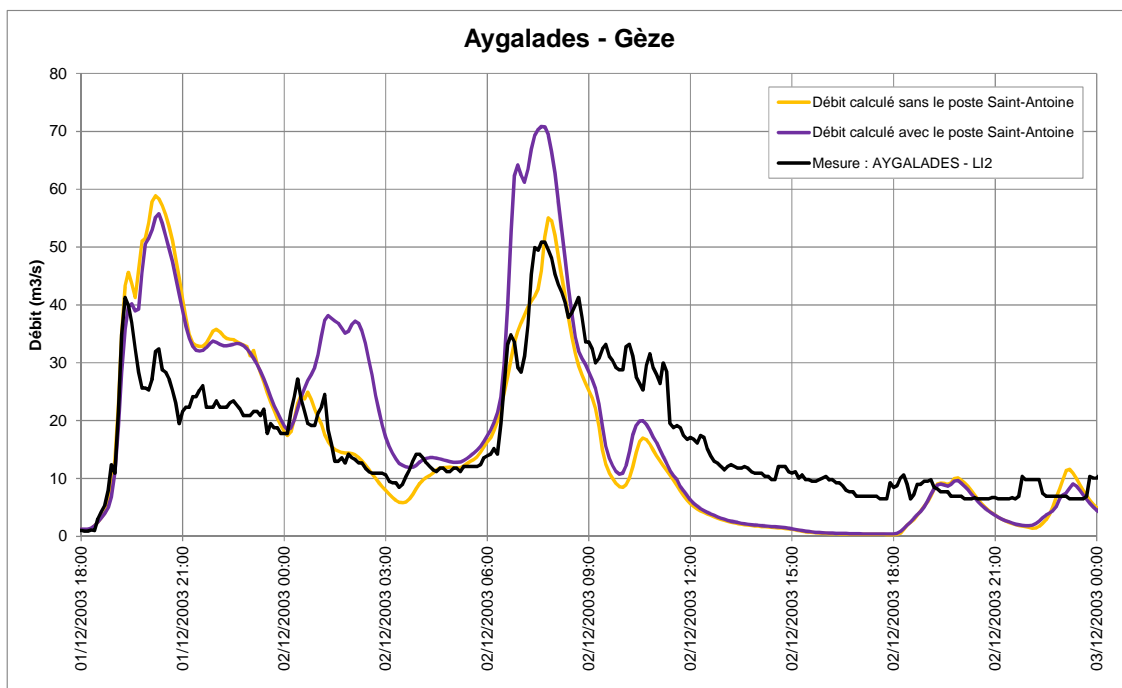


Figure 25 : Pluviométrie de décembre 2003 : tests de sensibilité avec et sans le poste de Saint Antoine

Les mesures à ce poste ne sont donc pas prises en compte pour les calculs de la crue de calage.

Le cumul total des précipitations pour cet événement est compris entre 150 et 200 mm selon les postes pris en compte (voir carte de répartition spatiale de la pluie ci-après).

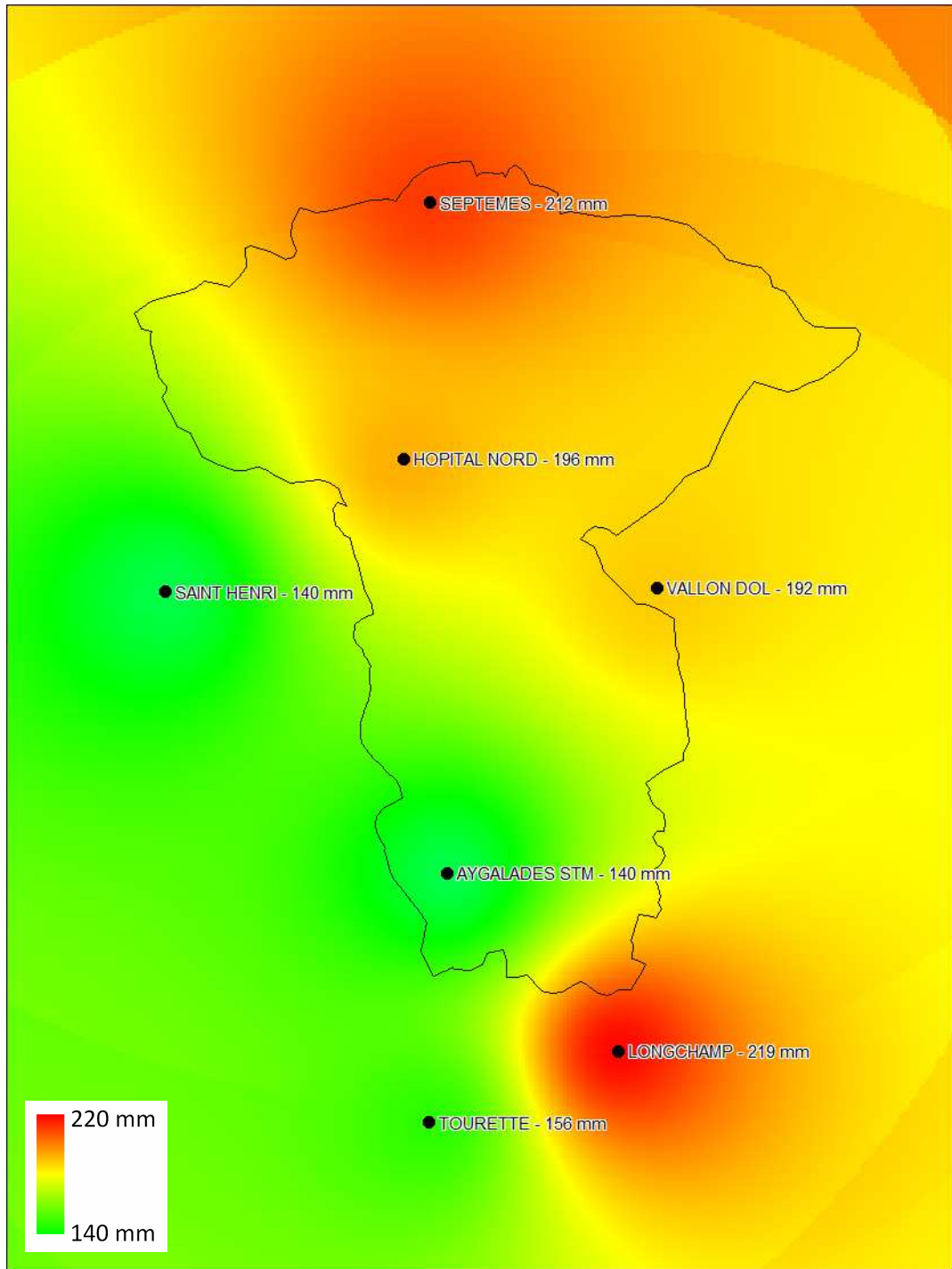
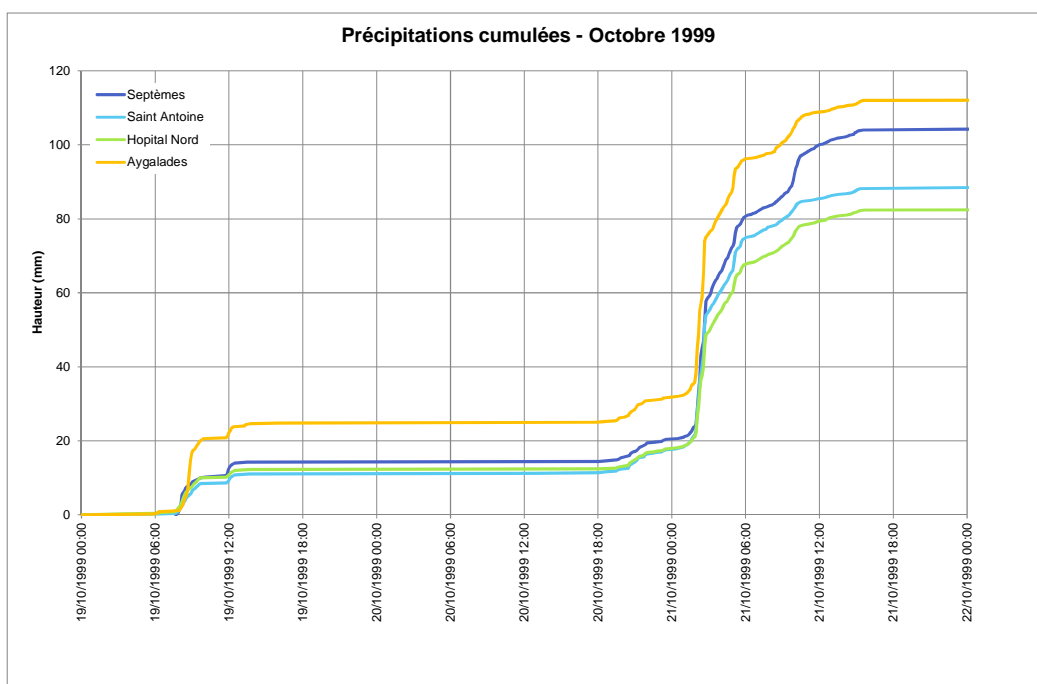
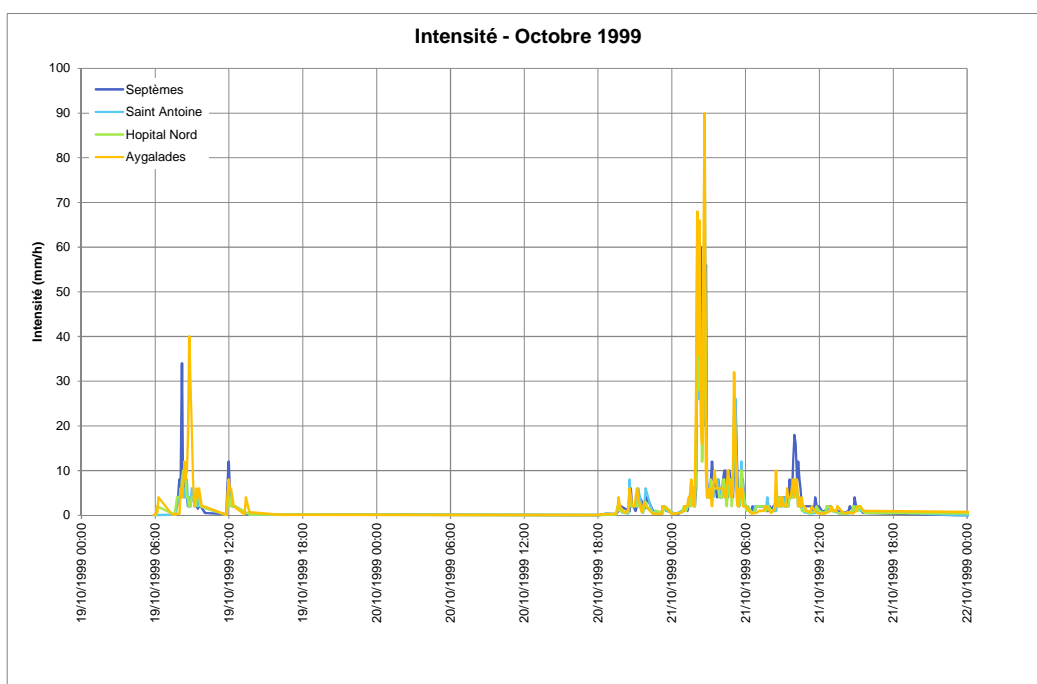


Figure 26 : Répartition spatiale de la pluie de décembre 2003 (cumul total en mm)

Les hyétogrammes mesurés sur les 4 pluviomètres du bassin versant des Ayalades en service lors de la crue d'octobre 1999 sont relativement cohérents et sont représentés ci-dessous :



Le cumul total pour cet évènement est compris entre 80 et 110 mm selon les postes (voir carte de répartition spatiale de la pluie ci-après).

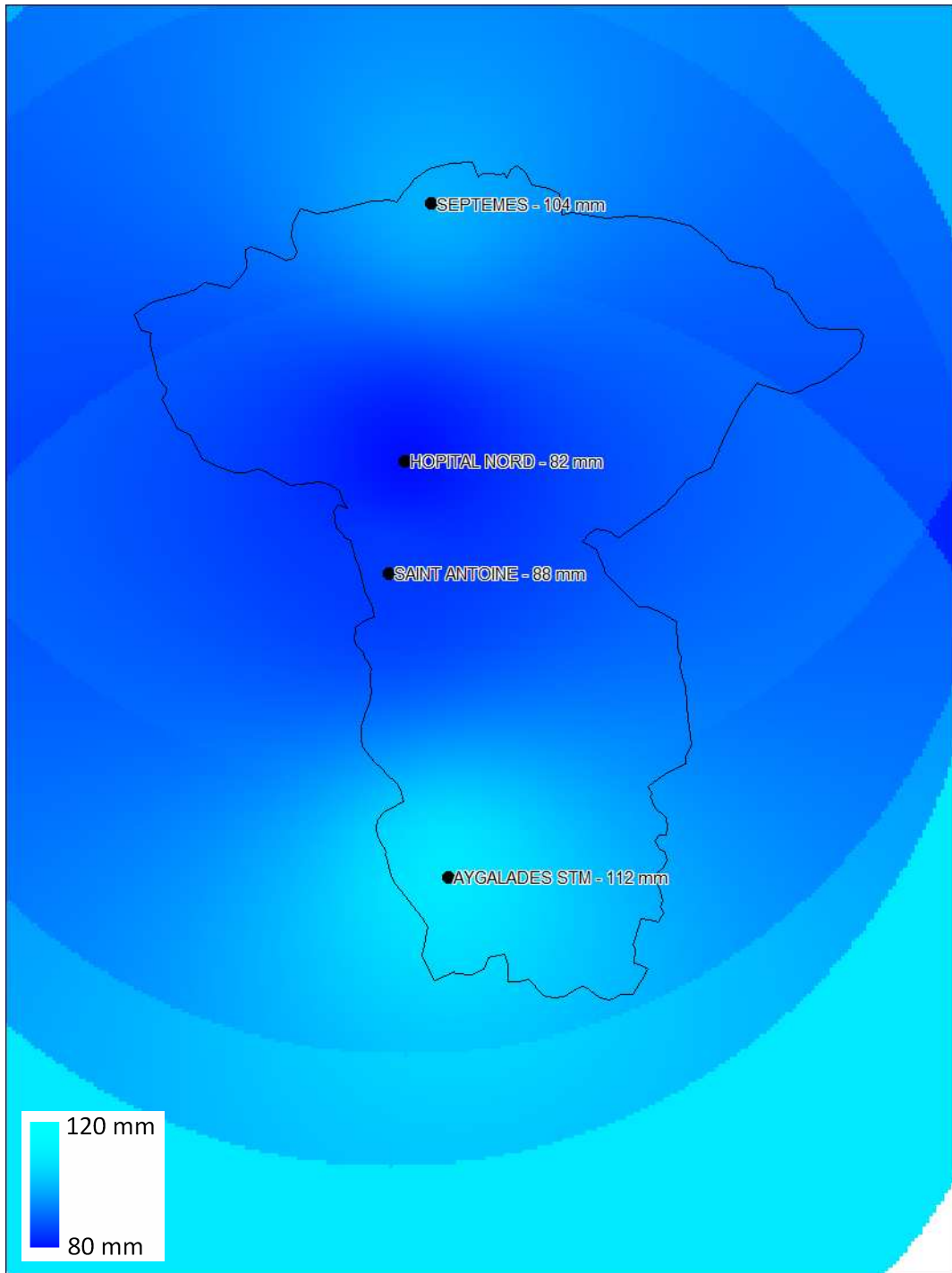


Figure 27 : Répartition spatiale de la pluie d'octobre 1999 (cumul total en mm)

4.3 HYDROGRAMMES RESULTATS

Les graphiques suivants présentent les hydrogrammes et limnigrammes calculés comparés aux valeurs mesurées pour les deux crues de calage aux points « Aygalades » (au niveau du bvd Gèze), « Plombières » (sur le tronçon en amont immédiat à la confluence avec les Aygalades), « Gavotte » (sur la Gavotte à la limite entre Les Pennes-Mirabeau et Marseille) et « St-Antoine » (au niveau de la vanne de régulation sur les Aygalades) :

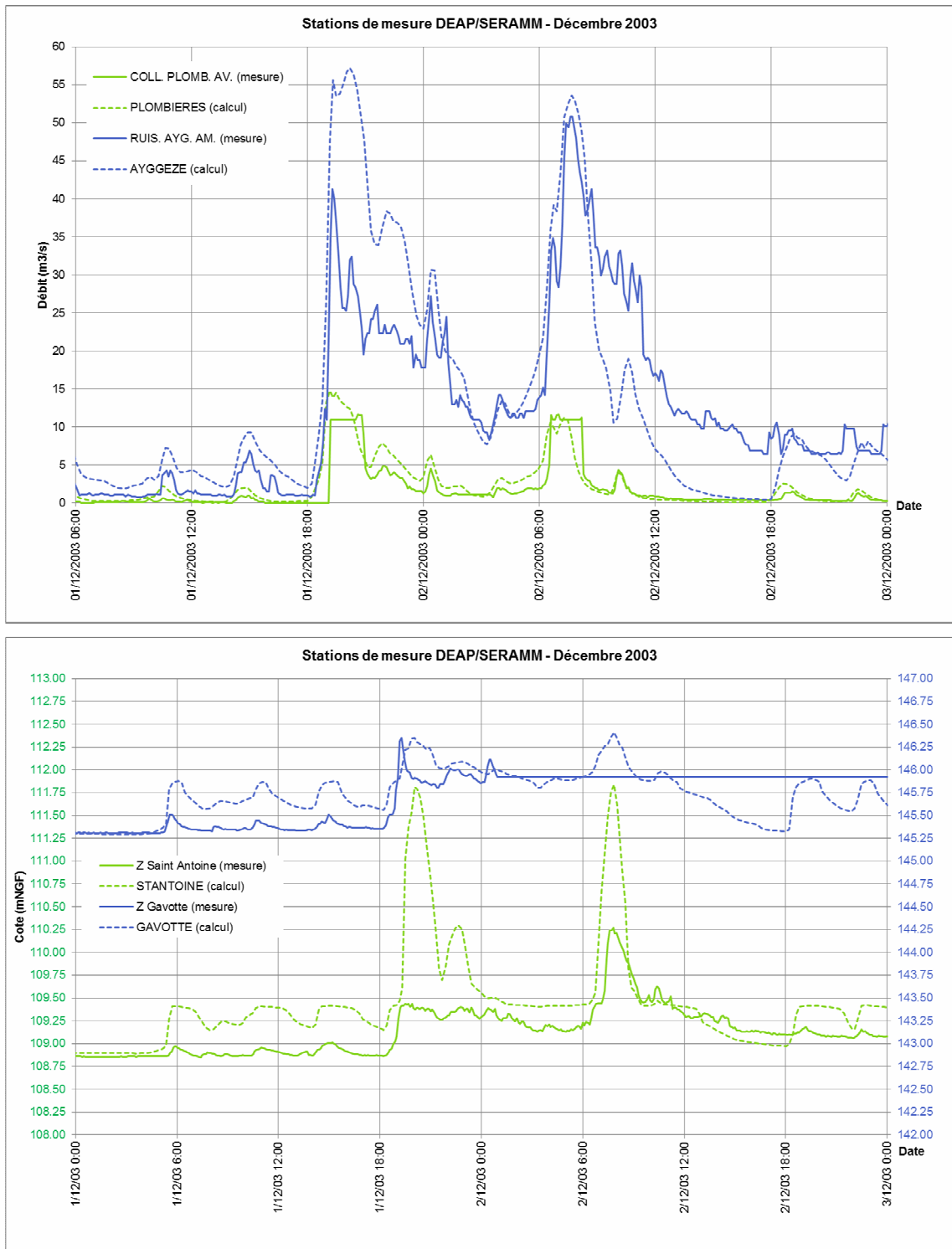


Figure 28 : Hydrogrammes et limnigrammes de la crue de décembre 2003

Commentaires :

- La dynamique de la crue est globalement bien reproduite et les temps de réponse sont bien reproduits par le modèle.
- L'hydrogramme mesuré à la station Gèze fait apparaître un deuxième pic de crue plus fort que le premier. Le modèle est plutôt bien calé sur le deuxième pic et surestime le premier pic. Cependant, les relevés aux pluviographes font apparaître un premier pic de pluie plus fort que le second.
- Au niveau du point Saint-Antoine, la sonde est placée en aval de la vanne de régulation sur le cours d'eau. Lors de l'évènement pluvieux le bassin a débordé, le niveau calculé par le modèle en aval de la vanne est donc proche du niveau haut du bassin (112.00 mNGF) alors que le niveau mesuré reste autour de 110.25 mNGF au maximum. La configuration locale de l'implantation de la sonde et non reproduite par le modèle est probablement à l'origine de cet écart.

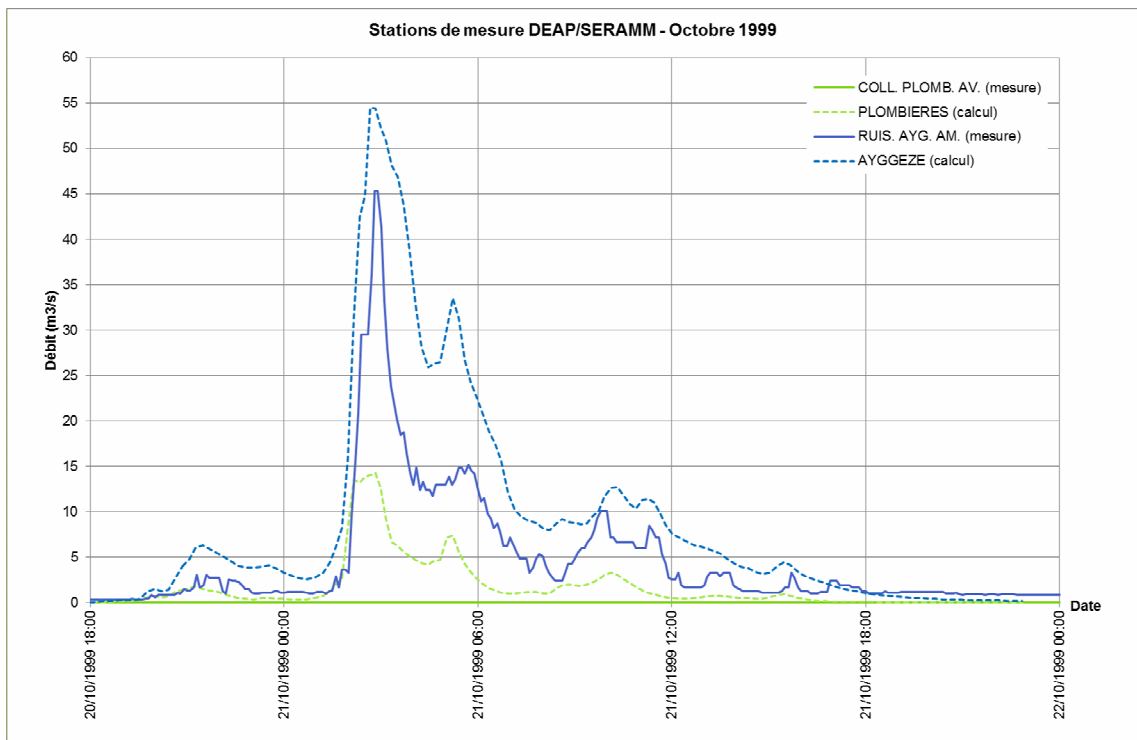


Figure 29 : Hydrogrammes de la crue d'octobre 1999

La mesure sur le collecteur de Plombières est défaillante. A Gèze, le calcul surestime de 20% le débit de pointe ; il tend également à surestimer les volumes écoulés sur la phase de décrue.

Il ressort de ces deux analyses que la genèse des crues majeures des Aygaldes reste, malgré le caractère très urbanisé du bassin versant, sensible au niveau de saturation préalable des sols au passage d'un évènement pluvieux intense. Les éléments de calage disponibles ne permettent cependant pas d'affiner ce paramétrage du modèle, qui tend ainsi à être globalement trop réactif sur les premières pointes pluviométriques. Ceci va cependant dans le sens de la sécurité, et n'a qu'une faible influence sur la simulation des crues fortes, qui ne peuvent être générées que par des évènements à même de saturer les sols.

Bilan de volumes au point de mesure Gèze sur les Aygaldes :

Crue	Date	Volume mesuré (m³)	Volume calculé (m³)
Décembre 2003	01/12/2003 18:00 à 02/12/2003 03:00	650 000	1 000 000
	02/12/2003 03:00 à 02/12/2003 15:00	912 000	740 000
Octobre 1999	21/10/1999 00 :00 à 21/10/1999 09 :00	350 000	675 000

4.4 BILAN DES VOLUMES CALCULES

Crue	Décembre 2003	Octobre 1999
<i>Date début</i>	<i>01/12/2003 6:00</i>	<i>20/10/1999 18:00</i>
<i>Date fin</i>	<i>04/12/2006 6:00</i>	<i>22/10/1999 22:00</i>
Volume total ruisselé (m ³)	3 550 000	1 900 000
Volume total à l'exutoire (m ³)	3 210 000	1 740 000
Volume transité en amont des bassins de Chaillan (m ³)	1 600 000	700 000

Rappel : le volume maximum des bassins de Chaillan est de 90 000 m³

4.5 CARTOGRAPHIE DE LA ZONE INONDABLE

La cartographie de la zone inondable de la crue de décembre 2003 est présentée en annexe 2. Les repères de crue sont également représentés avec indication de la cote calculée et mesurée.

La légende est la suivante :

Légende :

Repères de crue :

Cote mesurée / Cote calculée

★ Témoignage / Observation

★ Repère de crue coté

Lit mineur :

■ Lit mineur aérien

▭ Bief couvert

— Profil en travers

Réseau pluvial :

— Collecteur pluvial (ouvert)

---- Collecteur pluvial (fermé)

Regard du réseau pluvial :

• Point de débordement

Hauteur d'eau :

■ inférieure à 25 cm

■ entre 25 et 50 cm

■ entre 50 cm et 1 m

■ entre 1 m et 1.5 m

■ supérieure à 1.5 m

Vitesse :

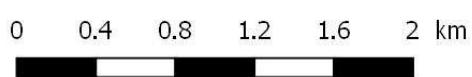
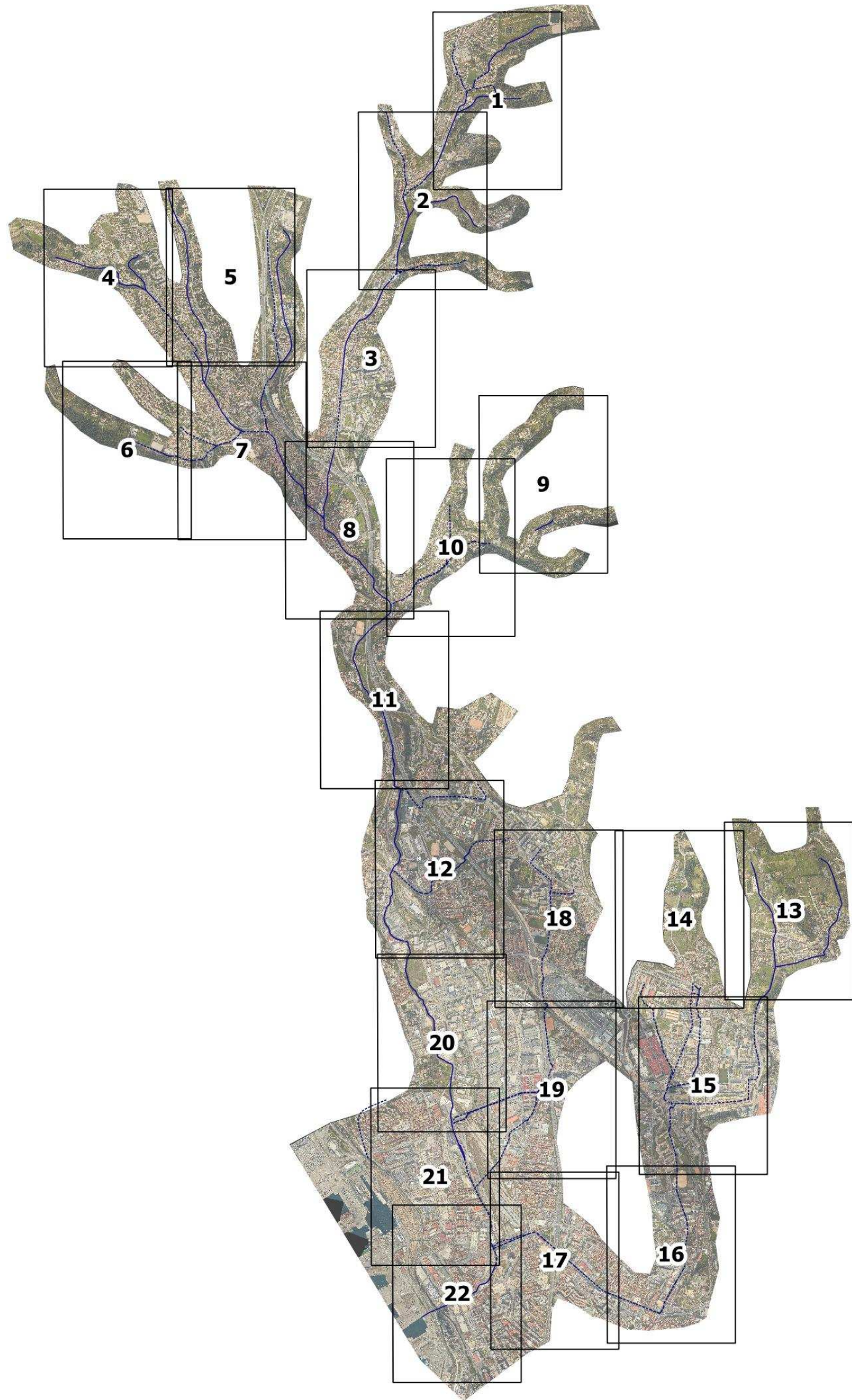
↑ inférieure à 0.5 m/s

↑ entre 0.5 et 1 m/s

↑ supérieure à 1 m/s

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

- Septèmes-les-Vallons : N°1, 2, 3, 5, 7 et 9,
- Les Pennes-Mirabeau : N°4, 5, 6 et 7,
- Marseille : N°8 à 22.



Découpage en planches
Mise à jour : Mai 2017

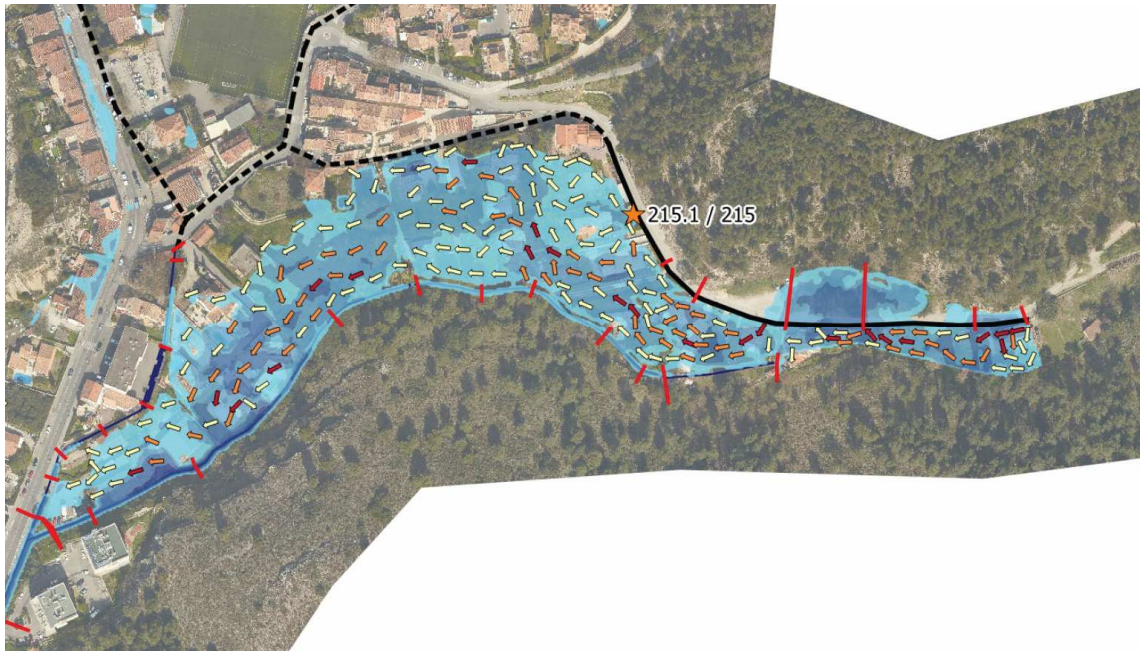


Figure 30 : Découpage en planches du des atlas cartographiques

4.6 FONCTIONNEMENT HYDRAULIQUE DU BASSIN VERSANT (CRUE DE DECEMBRE 2003)

Les figures ci-après présentent quelques zooms de l'atlas des zones inondables de la crue de décembre 2003.

4.6.1 Septèmes-les-Vallons - Route de la Télévision



Un apport important provient du vallon en amont de la route (à l'est) et s'écoule sur la voie vers l'ouest. Les écoulements de surface se dirigent vers le fond de vallon en passant par les propriétés.

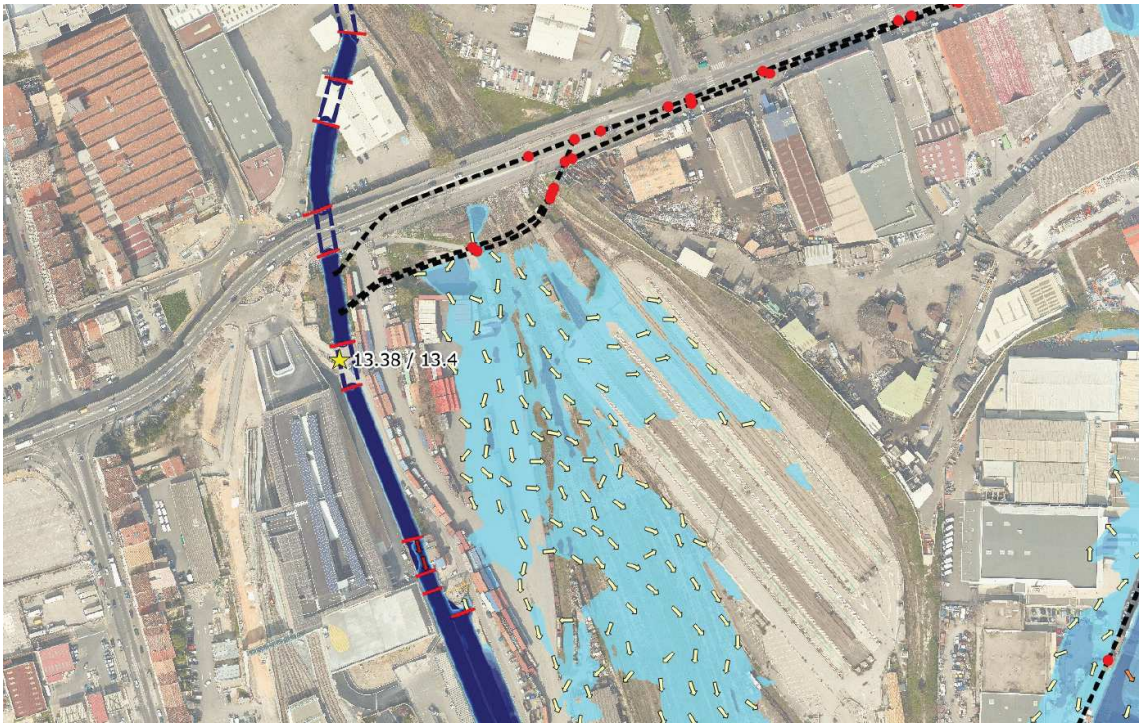
4.6.2 Marseille – Picon Busserine



Le réseau pluvial côté Sainte Marthe (à l'ouest) et côté Plombières (à l'est) est saturé et déborde sur les voiries. Les écoulements de Plombières se dirigent vers l'ouest en longeant le bvd. Allende sur un axe est-ouest (future L2). Les écoulements de Sainte Marthe se dirigent vers le sud et inondent un point bas situé au niveau du centre commercial (au nord du bvd. Allende).

Les écoulements se dirigent ensuite vers le sud en passant par la résidence Fontvert.

4.6.3 Marseille – Bvd. Gèze



Le canal des Aygalades fonctionne mais ne déborde pas. Des débordements peuvent être constatés sur les réseaux eaux pluviales environnants.

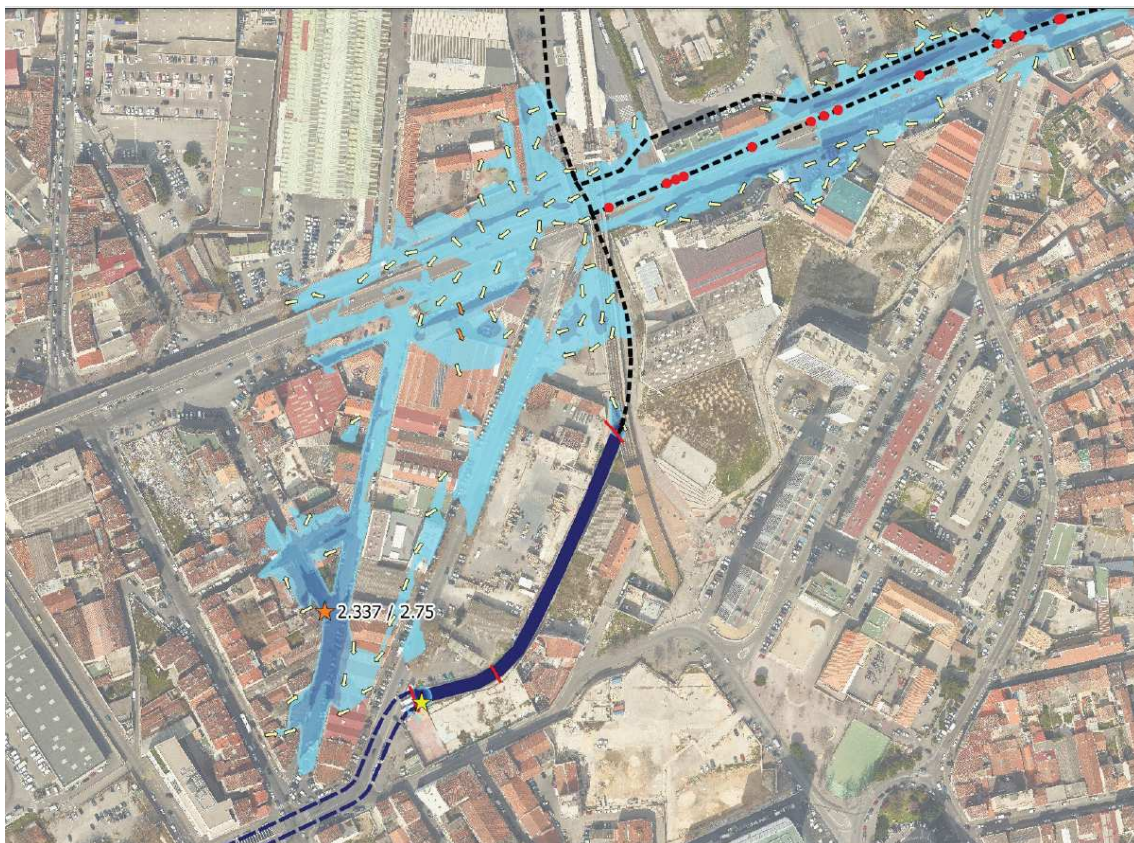
4.6.4 Les Pennes-Mirabeau – confluence Cadeneaux / Bédoule



Sur ce secteur, les Cadeneaux et la Bédoule passent d'une zone à ciel ouvert à un collecteur enterré. Sur les deux branches les collecteurs sont sous-dimensionnés. Les réseaux débordent donc rapidement sur les voiries.

Les écoulements provenant de l'ouest (Cadeneaux) et du nord (Bédoule) se dirigent vers l'aval des Cadeneaux au sud est.

4.6.5 Marseille – cours d'Anthoine / rue du Bachas



La rue du Bachas est inondée par débordement du canal des Ayalades, qui peut surverser au niveau de l'entonnoir vers le tronçon couvert et par les écoulements sur le bvd. Lesspes qui est inondé par débordement du réseau de Plombières.

ANNEXES

ANNEXE 1 : PRESENTATION DES PRINCIPAUX MODULES D'HYDRA

ANNEXE 2 : CARTES DU MODÈLE HYDRAULIQUE

Légende

Modèle Aygalades

Singularités

- ☒ Vanne plate
- ☒ Vanne régulée
- ☒ Coupure hydraulique
- ▮ Seuil
- ▮ Perte de charge Borda
- ▮ Perte de charge Bradley
- ▮ Pont et ouvrages de décharge
- ▮ Perte de charge paramétrique
- ▮ Marqueur de point

Conditions limite

- ▼ Hydrogramme
- ▶ Débit constant
- zq Débit / Cote
- tz Cote / Temps
- f Froude
- K Strickler
- ▮ Seuil
- Bassin
- Raccord modèle

Hydrologie

- ◆ Condition limite aval
- zq Répartition Cote / Débit
- qq Répartition Débit / Débit

- ▶ Réservoir
- ▶ Réservoir à débit paramétré
- Noeud hydrologique
- ★ Centroïde de bassin versant
- ▭ Contour de bassin versant
- Routage hydrologique
- Connecteur hydrologique

Liaisons

- ☒ Vanne
- ☒ Vanne régulée
- ▮ Seuil
- ▮ Perte de charge Borda
- ▶ Pompage
- ▶ Pompage par dérivation
- ▮ Seuil fusible
- Connecteur
- Liaison Strickler
- Liaison poreuse
- Débordement
- Débordement des réseaux
- Liaison du maillage 2D

Rivières et cours d'eau

- ▮ Profil en travers
- Noeud
- Bief
- Carrefour

- Segment de rue
- Rue

Lignes de contraintes

- Type non spécifié
- Débordement
- ▶▶▶ Profil en travers
- Strickler
- ▭ Maille 2D
- CAS Casier
- ▭ Domaine 2D
- NUL Non couvert par le modèle

Réseau

- Regard
- Tronçon
- ▮ Marqueur de point
- Noeud de station de gestion
- ▭ Station de gestion

Zonages

- ▭ Non défini
- ▭ Maillage 2D
- ▭ Casier
- ▭ Bief
- ▭ Confluence
- ▭ Rue
- ▭ Carrefour

**ANNEXE 3 : CARTES DES ZONES INONDABLES DE LA CRUE DE
DECEMBRE 2003**

Légende :

Repères de crue :

Cote mesurée / Cote calculée

★ Témoignage / Observation

★ Repère de crue coté

Lit mineur :

■ Lit mineur aérien

▭ Bief couvert

— Profil en travers

Réseau pluvial :

— Collecteur pluvial (ouvert)

---- Collecteur pluvial (fermé)

Regard du réseau pluvial :

• Point de débordement

Hauteur d'eau :

■ inférieure à 25 cm

■ entre 25 et 50 cm

■ entre 50 cm et 1 m

■ entre 1 m et 1.5 m

■ supérieure à 1.5 m

Vitesse :

↑ inférieure à 0.5 m/s

↑ entre 0.5 et 1 m/s

↑ supérieure à 1 m/s