

CARACTERISATION DE L'ALEA INONDATION SUR LE TERRITOIRE DES BV HUVEAUNE ET AYGALADES

**Rapport de présentation des modalités de
caractérisation de l'aléa**

SOMMAIRE

PROPOS INTRODUCTIFS	4
Le développement d'une cellule modélisation au sein de la Métropole.....	4
Impact de l'aléa ruissellement sur le territoire métropolitain.....	5
Caractérisation de l'aléa inondation par ruissellement sur le territoire métropolitain.....	6
Présentation du logiciel de modélisation TUFLOW2D	8
Méthodologie de construction du modèle hydraulique bidimensionnel	9
Approche de modélisation retenue	10
Données topographiques de référence	10
Résolution du maillage de calcul.....	12
Façonnage du maillage de calcul.....	14
Hypothèses hydrologiques et paramètres de modélisation	18
Pluviométrie de référence.....	19
Type de pluie	19
Zonage et statistiques pluviométriques de référence	19
Prise en compte de l'impact du réseau d'évacuation des eaux pluviales.....	21
Coefficients de rugosité des sols.....	23
Transformation pluie débit	23
Approche complémentaire spécifique aux bassins versants endoréiques pour la définition de l'aléa de référence	24
Analyses de sensibilité.....	26
Coefficients d'apport et conditions initiales d'humidité.....	26
Test de l'effet d'abattement des réseaux.....	28
Prise en compte des pertes/zones d'engouffrement.....	29
Prise en compte de l'effet du changement climatique	30
VALIDATION DES RESULTATS DU MODELE.....	31
Validation quantitative du modèle hydrologique	33
Vérification de la cohérence bibliographique des coefficients d'apport	35
Validation du comportement hydraulique du modèle	35
Vérification et visites de terrain	40

Comparaison à l'aléa issu des études antérieures	42
POSSIBILITES ET LIMITES	44
SCENARII MODELISES	46
Scénarii modélisés	47
POST-TRAITEMENT DES rESULTATS POUR L'ALEA DE REFERENCE.....	48
CONSTRUCTION DES CARTOGRAPHIES DE L'ALEA RUISSELLEMENT.....	51
Grilles retenues pour les résultats de modélisation	52
annexe 1 : Présentation du progiciel TUFLOW.....	53

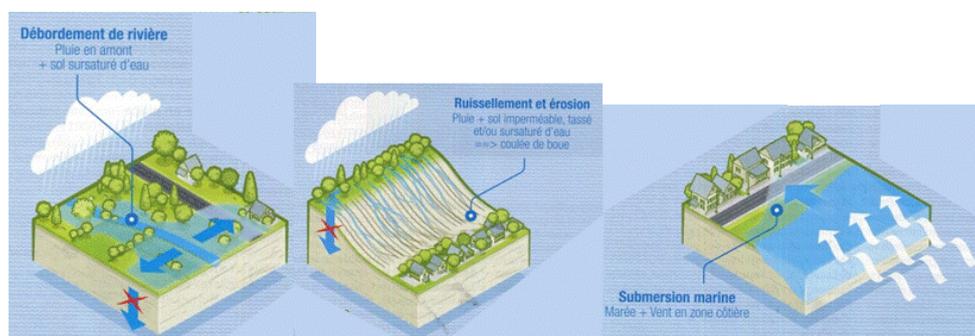
PROPOS INTRODUCTIFS

Le développement d'une cellule modélisation au sein de la Métropole

Afin de mieux anticiper, prévenir les conséquences des inondations notamment par débordement de cours d'eau et de ruissellement¹, la Métropole a souhaité se doter d'une **cellule de modélisation** en capacité de développer des modèles mathématiques permettant d'apprécier les conséquences sur son territoire des pluies et orages intenses appelés à se multiplier dans un contexte de réchauffement climatique sur le bassin méditerranéen.

Cette cellule modélisation, qui rassemble à la fois des agents du Service Gemapi, du Pôle Protection du Cycle de l'Eau (PPCE en charge des problématiques pluviales métropolitaines) et des EPAGEs HuCA et Menelik, a pour principales missions :

- de participer à l'amélioration de la connaissance en matière d'aléa inondation sur le territoire métropolitain quel qu'en soit l'origine (débordement de cours d'eau, submersion marine mais surtout ruissellement) ;



- de développer une expertise en modélisation hydrologique et hydraulique ;
- d'appuyer la cellule de veille hydrométéorologique pour mieux prévenir le risque inondation et favoriser la résilience du territoire.

Depuis l'été 2022, un bulletin de prévision hydrométéorologique quasi bi-hebdomadaire est réalisé en interne par la cellule de modélisation du service Gemapi à destination entre autres de la Cellule de Veille Hydrométéorologique. Elle a pour objectif de cibler et caractériser avec de l'anticipation les périodes à enjeux. Elle vise aussi à accompagner la cellule de veille en période de crise, à des fins argumentaires, pédagogiques, en conformité avec les prévisions réalisées par Météo France. Un autre objectif moins visible et de favoriser un transfert de connaissances en hydrométéorologie, de manière à conférer plus d'autonomie et des techniques d'expertise aux agents de la cellule. Cette production comprend aussi une analyse de sensibilité hydrologique sur le territoire.



2023 a permis le développement de la cellule de modélisation au sein du service Gemapi notamment par l'acquisition de progiciels de modélisation (Tuflow, Hec-Ras, Hec-hms), la participation à des séances de formation.

¹ Le ruissellement désigne tout écoulement de surface en dehors du réseau hydrographique pérenne, quelle que soit l'origine de cet écoulement.

Impact de l'aléa ruissellement sur le territoire métropolitain

Bien que le coût d'un sinistre ruissellement soit inférieur aux coûts imputés aux inondations par débordement, le coût moyen d'un sinistre ruissellement est élevé.

Les sinistres ruissellement sont de natures variées, d'origines diverses. Ils sont liés à des événements exceptionnels, mais aussi à des événements courants.

A cet effet, les Caisses Centrales de Réassurance (CCR) ont publié en octobre 2023 les résultats de leur étude portant sur l'augmentation des coûts liés au réchauffement climatique, en se concentrant sur les trois principaux périls couverts par le régime Catastrophes Naturelles (Cat Nat) : inondation par débordement et ruissellement, submersion marine, sécheresse géotechnique.

Pour le péril « inondation » : le coût moyen annuel devrait augmenter de + 15 % d'ici à 2050 (soit + 148 millions d'euros par an) du fait de l'aléa et de + 38 % (soit + 370 millions d'euros par an) du fait de l'aléa et de l'évolution des enjeux assurés.

60 % des coûts des sinistres inondation sont attribués aux ruissellements.

1/3 des montants des sinistres ruissellement mais 80 % des repères de crues ruissellement dans les zones d'aléa modélisées.

Débordement de cours d'eau	Ruissellement au sens large	
	ruissellement modélisé	hors zones d'aléa modélisées
40 %	20 %	40 %

Répartition de la part des coûts en € des sinistres inondation selon la nature de l'aléa (période 1995 – 2019)

	Débordement	Ruissellement
Particuliers	11 k€	7 k€
Professionnels	35 k€	20 k€
Coût moyen/sinistre	14 k€	8 k€

Coût moyen d'un sinistre par type de risque

Période de retour	sinistres	Coût
< 20 ans	55 %	62 %
20-50 ans	23 %	20 %
50-100 ans	9 %	8 %
100-200 ans	7 %	6 %
> 200 ans	6 %	5 %

Part des sinistres par périodes de retour (période 1995 – 2019)

Quel que soit le scénario RCP du GIEC, les montants des dommages dus aux aléas vont augmenter à horizon 2050 en raison d'une hausse de l'intensité des événements climatiques. En sus, l'accroissement des enjeux assurés à horizon futur, en particulier dans les zones à risques, augmente d'autant plus le coût des dommages.

Période de retour	Évolution des surfaces de ruissellement		Évolution moyenne des débits journaliers sur le modèle pluie-débit		Évolution des surfaces de débordement	
	RCP 4.5 vs climat 2000	RCP 8.5 vs climat 2000	RCP 4.5 vs climat 2000	RCP 8.5 vs climat 2000	RCP 4.5 vs climat 2000	RCP 8.5 vs climat 2000
20 ans	+ 29 %	+ 39 %	+ 4,4 %	+ 0,9 %	+ 0,8 %	+ 3,3 %
50 ans	+ 24 %	+ 37 %	+ 5,6 %	- 0,3 %	+ 1,6 %	+ 2,0 %
100 ans	+ 19 %	+ 33 %	+ 5,8 %	+ 0,1 %	+ 1,8 %	+ 2,0 %
200 ans	+ 12 %	+ 14 %	+ 7,0 %	+ 1,6 %	+ 2,1 %	+ 1,9 %

Évolutions de l'étendue de la surface impactée par le débordement et le ruissellement en France ainsi que des débits entre climat 2000 et climat futur, par période de retour (source CCR, octobre 2023)

Caractérisation de l'aléa inondation par ruissellement sur le territoire métropolitain

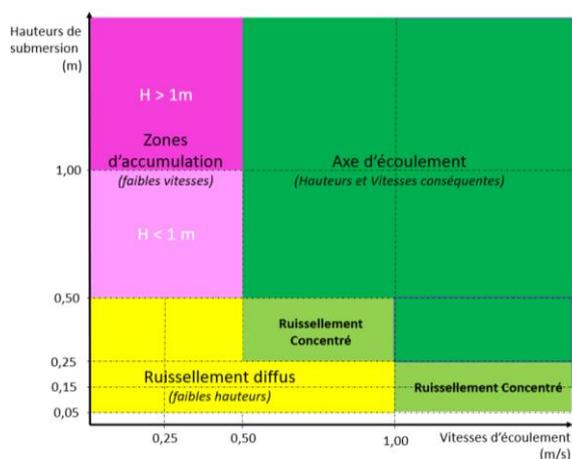
La cellule de modélisation du Service Gemapi a pris en charge la réalisation des études de caractérisation de l'aléa inondation via :

- le lancement d'études spécifiques sur les BV Huveaune, Aygalades (objet de ce rapport), Cadière ou encore à l'échelle des territoires communaux de Châteauneuf le Rouge, Fos sur Mer, Meyreuil, Le Tholonet et Gardanne ;
- le partenariat avec le CEREMA (2023-2026) qui a vocation sur les 92 communes de la Métropole :
 - d'améliorer la connaissance du ruissellement (modélisation globale des process de ruissellement et d'inondation sur le territoire métropolitain à l'horizon 2024/2025),
 - d'évaluer l'impact du changement climatique sur le ruissellement
 - d'évaluer et anticiper l'impact des incendies
 - de développer des applicatifs temps réel pour gestion de crise et d'applicatifs temps différé
 - de valider la stratégie de désimperméabilisation métropolitaine.

Les études engagées permettent de développer le territoire en tenant compte d'une connaissance exhaustive de l'aléa inondation. Les cartographies descriptives obtenues (cartographies établissant les hauteurs et vitesses maximales atteintes pour une pluie de référence) ont vocation à :

- mieux quantifier les conséquences des inondations et d'intégrer les enseignements obtenus aux Plans Communaux de Sauvegarde (PCS) ;
- identifier les secteurs méritant des actions de réduction de vulnérabilité ;
- analyser l'impact et ainsi justifier la mise en œuvre d'actions de réduction de l'aléa (Zones d'Expansion de Crues -ZEC-, travaux de renaturation, désimperméabilisation...) ;
- intégrer ces informations aux documents d'urbanisme (PLUi) ;
- favoriser l'adaptation du territoire aux conséquences du réchauffement climatique et améliorer la prévision des risques ;
- évaluer les conséquences des incendies sur nos territoires (ruissellement accru sur territoire incendié pouvant avoir des incidences sur les enjeux en aval).

Pour apprécier les niveaux d'aléa, une grille d'analyse spécifique a été développée à l'issue de séances de travail rassemblant différents services métropolitains.



Ont ainsi été mis en exergue,

- les zones où le ruissellement est diffus (faibles hauteurs et/ou faibles vitesses d'écoulement max calculées) ;
- les zones de ruissellement concentré où les hauteurs et vitesses max atteintes témoignent d'une concentration des eaux ;
- les axes d'écoulement au sein desquels pour la pluie de référence des hauteurs et vitesses conséquentes sont calculées ;
- les zones d'accumulation où les vitesses d'écoulement apparaissent limitées mais les hauteurs max sont conséquentes.

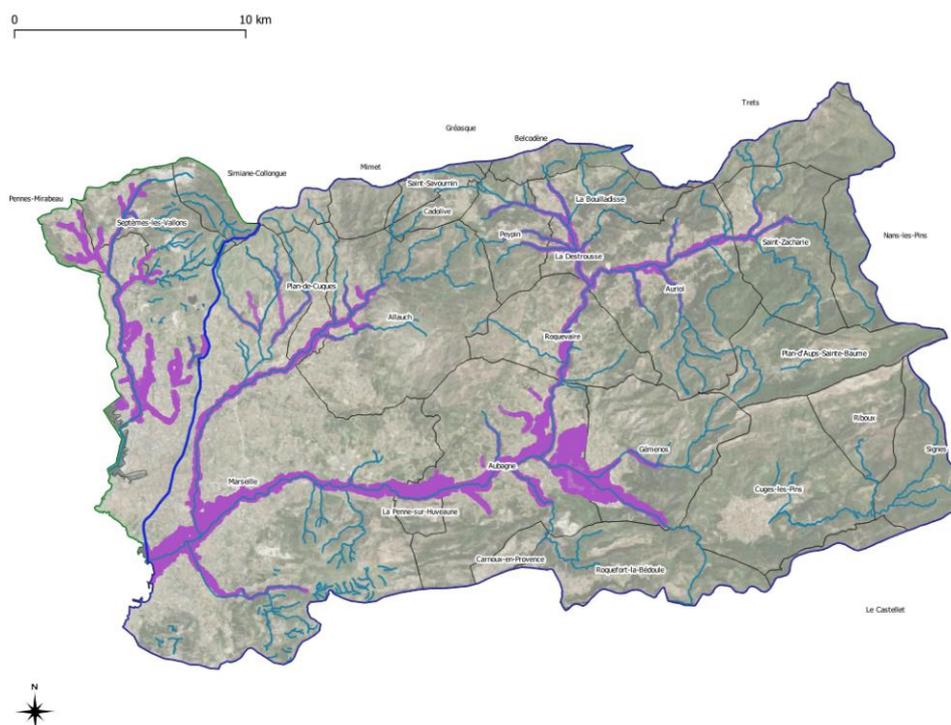
Cette grille d'aléa a été présentée en mars 2023 aux services de l'Etat.

Des groupes de travail sur cette caractérisation de l'aléa ruissellement ont été organisés en janvier, mars et septembre 2023.

Cette démarche volontariste de caractérisation de l'aléa ruissellement sur le territoire métropolitain portée par la Métropole a fait l'objet en 2023 de plusieurs interventions à des colloques spécialisés (CEREMA et GRAIE).

Les phénomènes de ruissellement étudiés dans le cadre des études conduites sur les bassins versants Huveaune et Aygalades correspondent :

- **Aux écoulements en surface, sur un versant**, c'est-à-dire en dehors (en amont) du réseau hydrographique principal, en milieu rural ou urbain ;
 - **Les phénomènes de débordement de cours d'eau** le long des principaux cours d'eau du territoire, déjà cartographiés dans le cadre d'études antérieures (Porter à Connaissance –PAC- Huveaune, études hydrauliques locales dans le cadre du PAPI, ...- voir cartographie ci-dessous délimitant les emprises inondables par débordement de référence) ne **sont donc pas réétudiés** dans le cadre de la présente étude. Les phénomènes de ruissellement pouvant se produire dans leurs lits majeurs sont eux en revanche bien pris en compte.



Cartographie des enveloppes inondables de référence (Q100 – en violet) le long des principaux cours d'eau du territoire (SEPIA CONSEILS, 2023)

- **Un surplus**, lié à la saturation des sols ou des systèmes d'évacuation des eaux pluviales ;
 - Le fonctionnement des réseaux d'évacuation des eaux pluviales et les phénomènes de saturation et de débordements associés ne sont donc pas analysés par la présente étude (ils sont ou seront étudiés dans le cadre des schémas directeurs pluviaux lancés par les différentes collectivités compétentes du territoire).

- **Généré par différentes typologies de pluies** (orages courts et intenses, pluies soutenues hivernales) et contextes d'humidité de sols/saturation des zones karstiques.

Présentation du logiciel de modélisation TUFLOW2D

TufLOW 2D est l'un des logiciels les plus performants du marché en termes de modélisation 1D/2D couplant écoulements en réseaux et modélisation full 2D des écoulements de surface avec une capacité de calcul optimisée, via l'utilisation de la carte graphique des machines de calculs (GPU).

TufLOW2D utilise également la topographie infra-maillages ce qui permet de prendre en compte toutes les spécificités topographiques sans nécessité de descendre à des tailles de mailles trop fines.

A noter également que TUFLOW est interfacé directement avec QGIS via un plug-in open source spécifique ce qui permet à la fois de consulter la structure du modèle, de la modifier et d'analyser les résultats sans besoin de licence (la licence est uniquement nécessaire pour lancer les simulations).

Un document de présentation plus détaillé de TUFLOW2D est disponible en annexe 1.

L'ensemble des fichiers de construction et de résultats du modèle sont restitués au maître d'Ouvrage (MAMP) à l'issue de la présente étude sous un format universel (shapefile, raster, mesh, texte). Ces fichiers peuvent ainsi être lus et exploités avec les solutions SIG classiques et notamment avec le plugin TUFLOW spécifique pour QGIS.

C'est quoi un modèle mathématique d'écoulement ? : Il s'agit en langage courant d'ingénieur généralement d'un progiciel dont le cœur consiste en un programme permettant de résoudre numériquement une ou plusieurs équations, le plus souvent différentielles ou intégrales, mais aussi algébriques, souvent non linéaires. Ils sont basés sur des lois physiques, plus ou moins complexes et approchant plus ou moins la réalité. Le mécanisme de la transformation de la pluie tombant sur un bassin versant en débit à l'exutoire ou la propagation de crues le long d'un tronçon de rivière peuvent être conceptualisés. Il s'agit bien là d'un modèle déterministe, basé sur la loi de continuité.



**METHODOLOGIE DE
CONSTRUCTION DU MODELE
HYDRAULIQUE BIDIMENSIONNEL**

Approche de modélisation retenue

La modélisation des phénomènes de ruissellement nécessite la mise en place d'une approche « full 2D » distribuée.

Avec cette approche la pluie de référence est directement appliquée sur un maillage de calcul 2D, la conversion pluie-débit et les calculs hydrauliques se font à l'échelle de chaque maille. On s'affranchit ainsi d'un prédécoupage du territoire en sous-bassins versants associés à des points d'injection ponctuels.

Cette approche permet d'identifier in fine un aléa (hauteur, vitesse) à tout moment et en tout point de la zone d'étude.

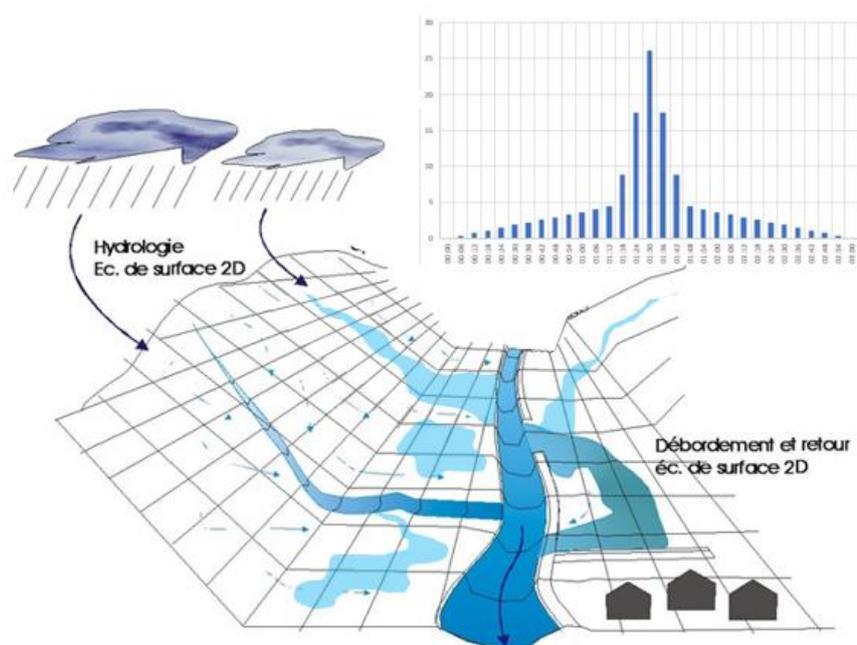


Schéma de principe d'une modélisation FULL 2D distribuée

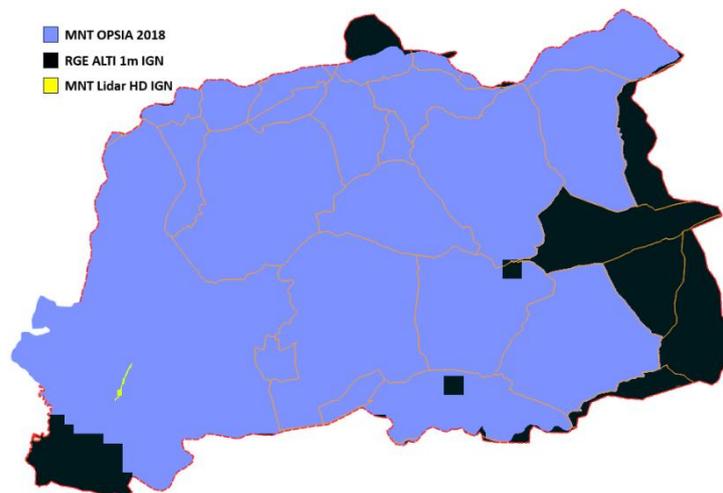
Données topographiques de référence

Le maillage de calcul bi-dimensionnel mis en place à l'échelle du périmètre d'étude s'appuie sur un Modèle Numérique de Terrain (MNT) unifié reconstitué à l'échelle du bassin versant à partir de différentes sources de données assemblées :

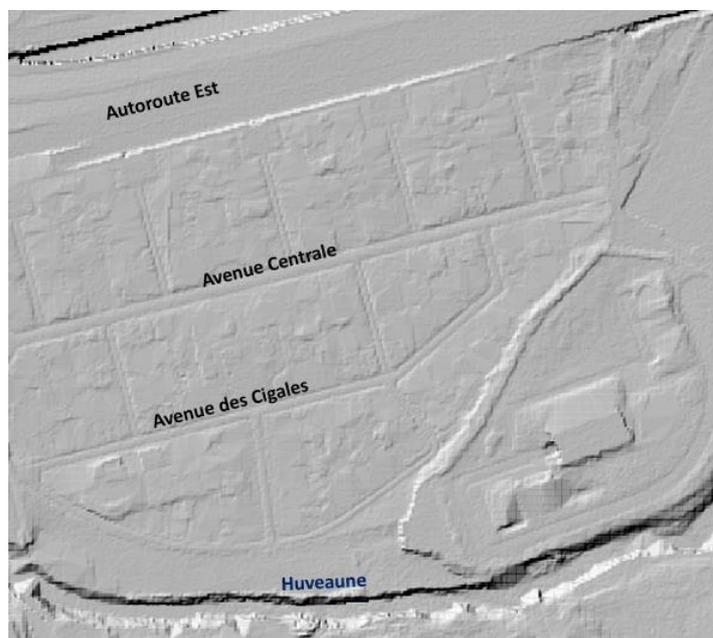
- Le MNT 2018 établis par OPSIA pour la Métropole lorsqu'il était disponible,
- Dans les secteurs non couverts par le MNT OPSIA : le RGE ALTI 1 m de l'IGN (téléchargé en 2022),
- Localement, dans les secteurs dont la topographie avait fortement évolué depuis 2018 comme au droit de la L2 (rocade A507 à Marseille) et dans certains secteurs de moindre ampleur, des « patches » de MNT reconstitués à partir des données du LIDAR HD de l'IGN.

La résolution planimétrique de ce MNT est de 1 point tous les mètres et sa précision altimétrique est minimum de l'ordre de 15 à 30 cm.

Ce MNT permet de représenter fidèlement la présence de remblais d'infrastructures routières ou ferroviaires, les éléments de topographie urbaine, les zones de cuvettes en point bas, et la délimitation des cours d'eau.



Donnée topographique de référence pour la construction du MNT unifié à l'échelle de l'emprise de la zone d'étude (source : SEPIA)



Mise en évidence de la précision du MNT 1 mètre (source : SEPIA)

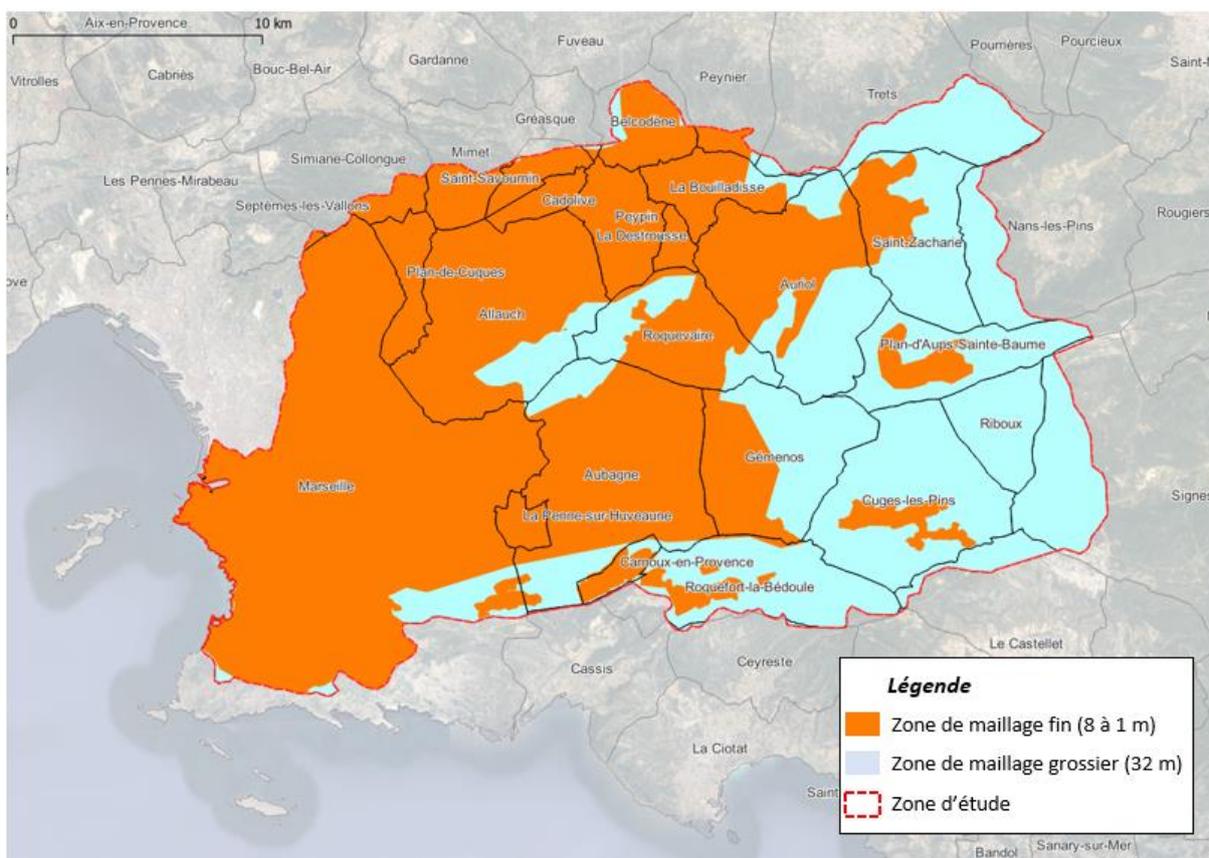
Résolution du maillage de calcul

Le bassin versant d'étude a été subdivisé en 5 sous-modèles qui représentent une superficie totale de 613 km² dont 318 km² de modélisation fine sur les secteurs à enjeux (zones urbanisées, zones de développement urbains futures, et secteurs identifiés par la Métropole comme prioritaires).

Les 295 km² restants font l'objet d'un maillage de calcul « lâche » afin de prendre en compte l'ensemble des zones d'apports amont.

Le maillage de calcul 2D présente dès lors une double résolution :

- Un maillage de calcul de résolution très fine (de 1 à 8 m) a été mis en place sur l'ensemble des secteurs à enjeux. Cette résolution fine permet de représenter précisément la dynamique des écoulements et l'emprise des zones inondables et donc de cartographier les hauteurs de submersion, vitesses d'écoulement et l'aléa ;
- Un maillage plus « lâche » (32 m à 16 m) a été mis en place sur les zones d'apport amont sans enjeux.



Identification des zones de maillage fin et grossier (SEPIA Conseils, 2023)



Illustration de la finesse du maillage de calcul en zone urbanisée (Roquevaire)

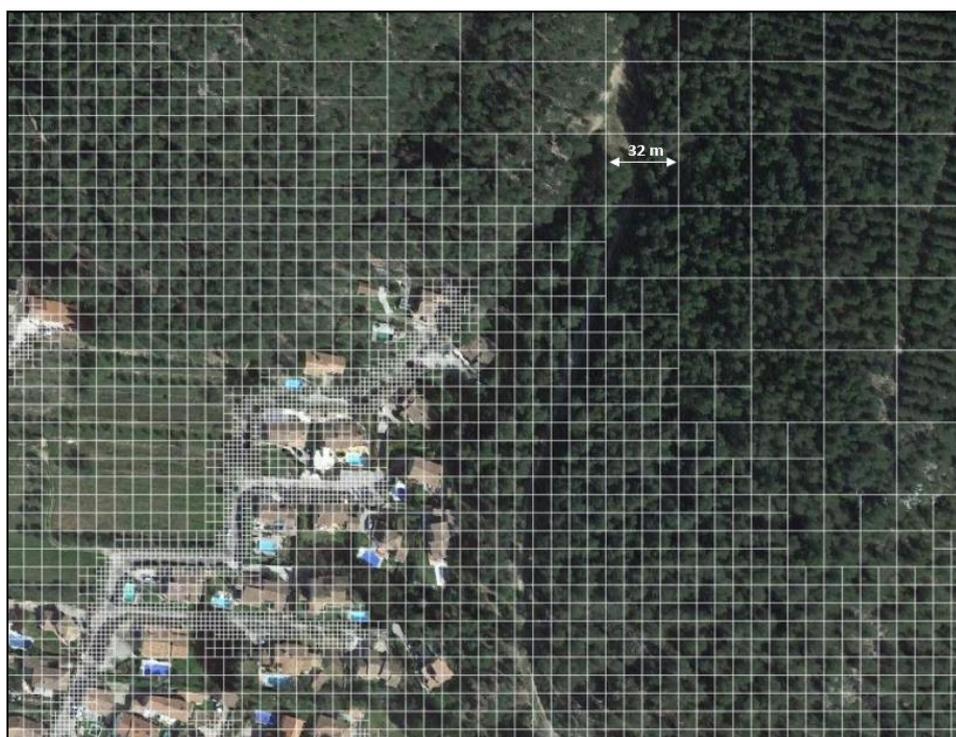


Illustration des différentes résolutions du maillage de calcul entre les zones à enjeux et les bassins versants amont (Saint-Zacharie)

A noter que le modèle prend en considération la topographie infra-maille qui permet de valoriser le MNT à sa résolution (ici 1 mètre) quelle que soit la taille des mailles de calcul. Cela signifie que la loi hauteur-volume de chaque maille ainsi que les profils en travers des faces des mailles gérant les échanges de maille à maille s'appuient bien sur la résolution 1 m du MNT.



Principe d'échantillonnage infra-maille

Façonnage du maillage de calcul

Le maillage de calcul bi-dimensionnel prend en compte les éléments suivants :

- **L'effet d'obstacle des bâtiments** : les bâtiments sont intégrés directement dans le maillage de calcul comme des obstacles étanches aux ruissellements avec une hauteur max unitaire de 4 m. Des toitures à 2 ou 4 plans (typiques du territoire) sont recrées de façon à répartir la pluie qui tombe sur le bâtiment de part et d'autre de l'obstacle ;

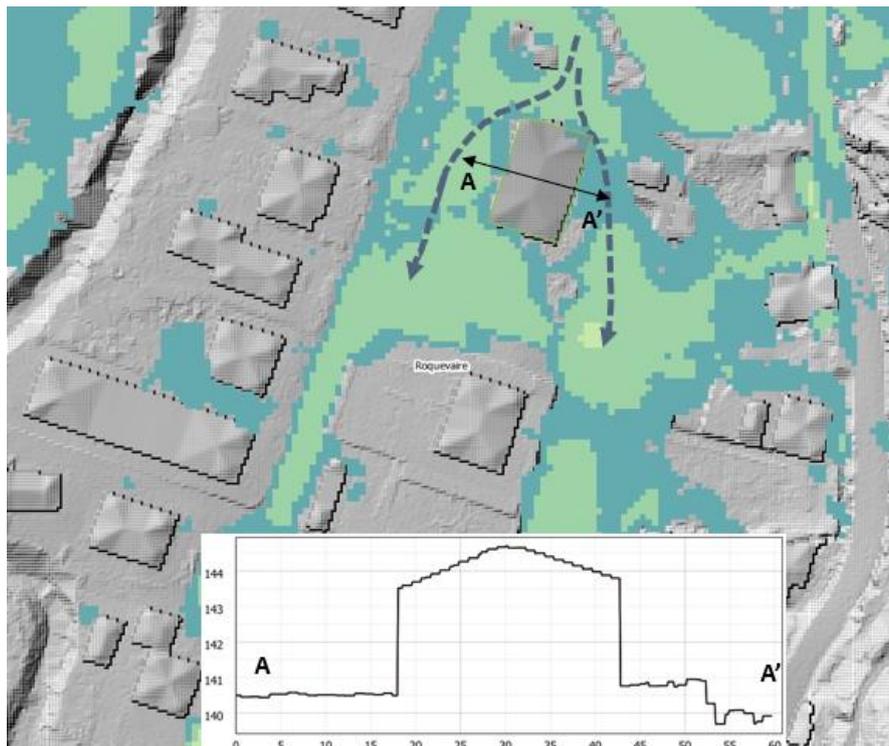


Illustration de la prise en compte de l'effet d'obstacle du bâti à Roquevaire (Source : SEPIA Conseils)

- **La dynamique d'écoulement préférentiel le long des voiries** : cela permet de bien représenter les écoulements dans les rues et les interfaces avec les parcelles adjacentes qui en milieu urbain présentent très souvent un mur/muret, ou une haie d'enceinte faisant obstacle aux écoulements. Cet effet de blocage partiel est pris en compte dans le modèle :
 - **Soit directement dans la topographie** lorsque ces obstacles sont identifiables via le MNT (notamment pour les trottoirs) ;

- **Soit par ajustement de la rugosité** à l'interface entre les voiries et les parcelles par traitement SIG spécifique.

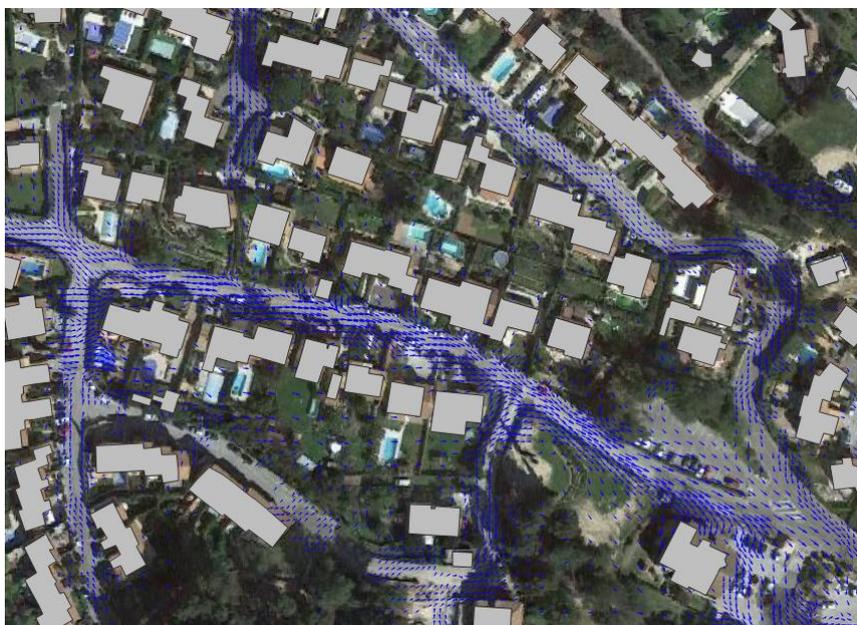
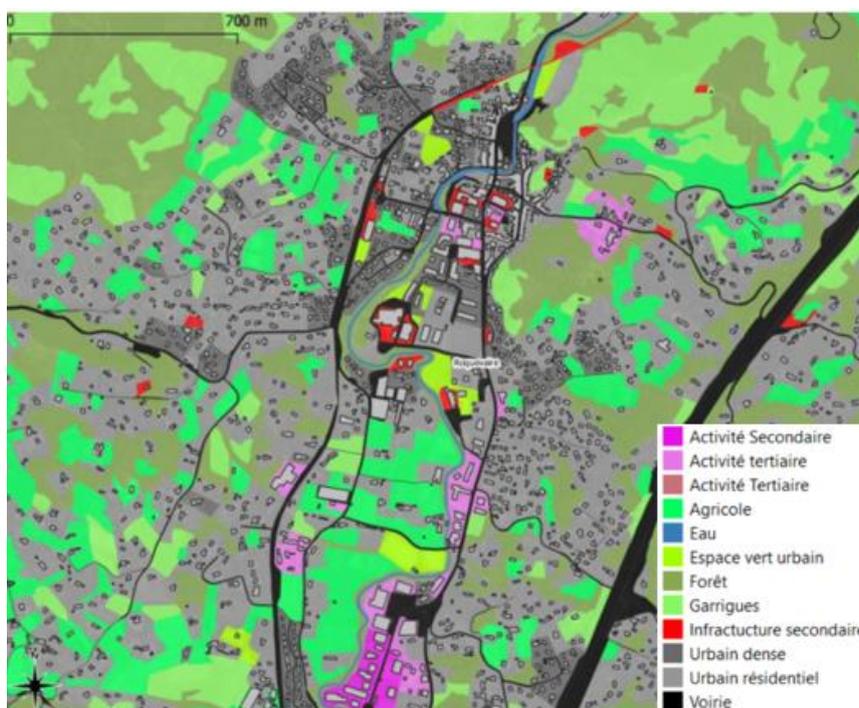


Illustration de la dynamique d'écoulement préférentielle le long des voiries

- **L'occupation des sols** afin de définir des coefficients de rugosité et d'infiltration des sols standards (ajustés lors de la phase de validation du modèle) les données de références utilisées sont le Mode d'Occupation des Sols (MOS) lorsque celui-ci était disponible (sur périmètre Métropole), à défaut les données Corine Land Cover ont été retenues ;

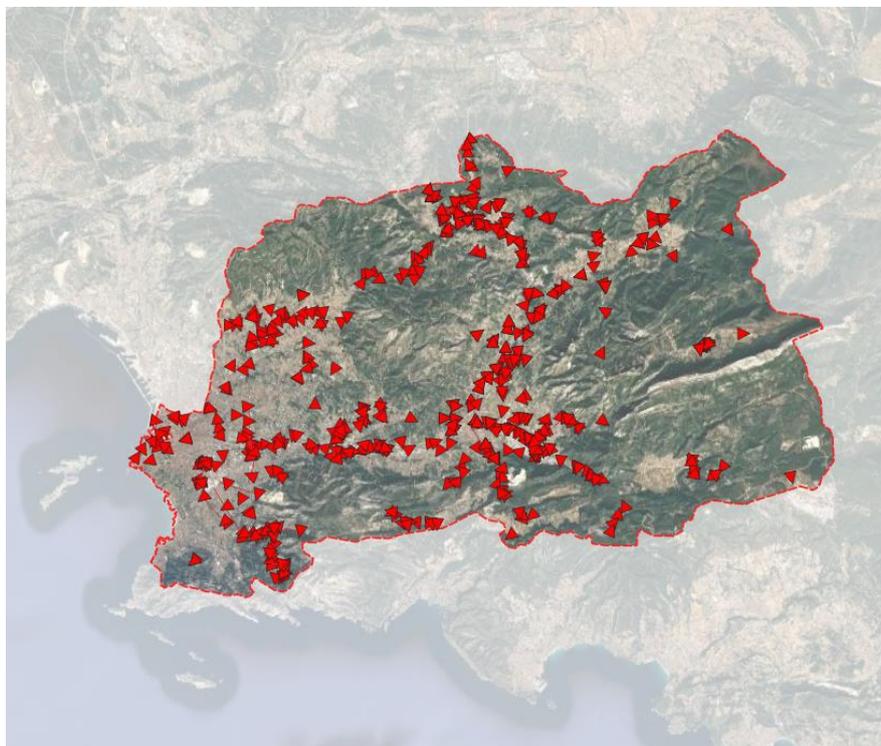


Occupation des sols au sein de la zone de modélisation 2D fine (Roquevaire)

- **Les ouvrages de traversée sous remblais** pour assurer la continuité hydraulique des écoulements (cours d'eau, trémie, passage vélo ou piétons, etc.). Au total ce sont plus de 600 ouvrages on fait l'objet d'investigation sur le bassin versant de l'Huveaune et environ 500 ont été intégrés au modèle.



Ajout de conduites au niveau des passages sous remblai (Roquevaire)



Localisation des ouvrages de passage intégrés au modèle

- **Les remblais** pour affiner le niveau des mailles, ce qui permet de prendre en compte les effets de blocage ou d'accumulation potentielle en arrière de remblais et de bien représenter la surverse potentielle de ces ouvrages.

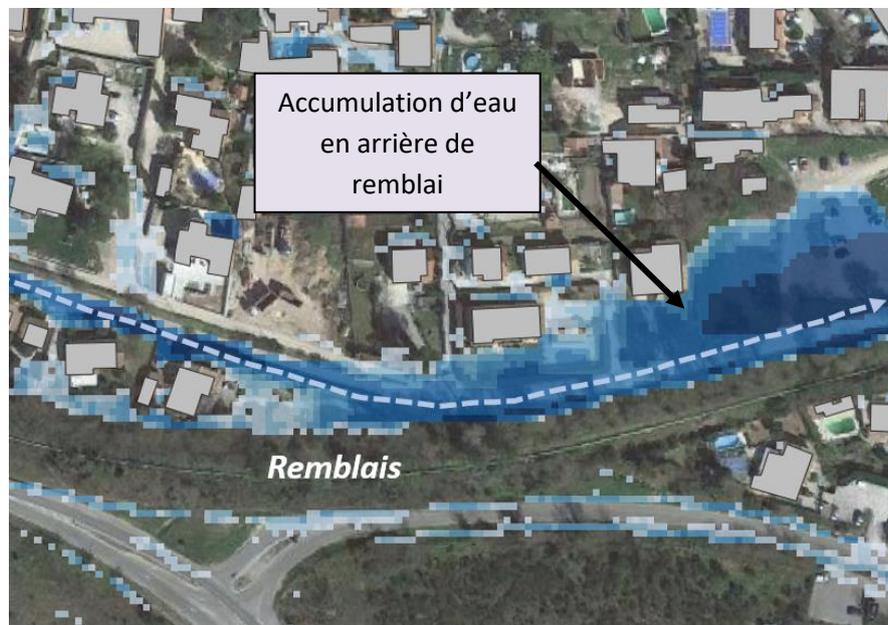


Illustration de la prise en compte des remblais



HYPOTHESES HYDROLOGIQUES ET PARAMETRES DE MODELISATION

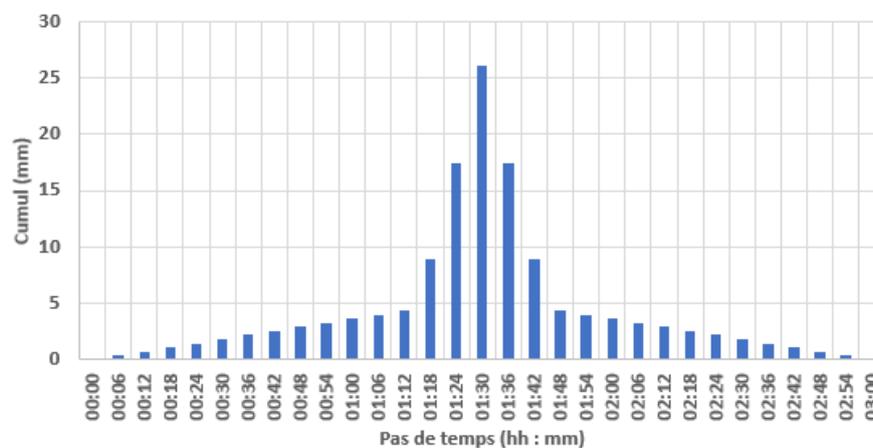
Pluviométrie de référence

Type de pluie

Le choix a été fait de s'appuyer sur la pluie de projet utilisée dans le cadre des modélisations préliminaires du ruissellement mises en œuvre pour le PLUI du Pays d'Aubagne par ARTELIA en 2022.

Cette pluie projet double triangle (durée totale de 3h avec période intense centrée de 30 minutes) discrétisée au pas de temps 6 minutes est particulièrement adaptée dans la mesure où :

- Elle présente un profil de cellule orageuse aux caractéristiques typiques du climat méditerranéen du bassin versant de l'Huveaune.
- Elle présente une dynamique et des durées cohérentes avec les temps de concentration des sous bassins versants à l'origine de l'aléa ruissellement.



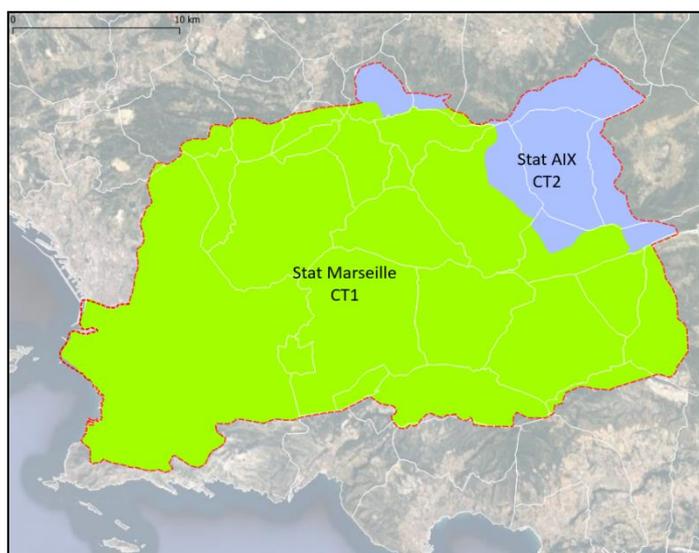
HyétoGramme de la pluie de référence centennale sur le secteur CT1 (Marseille)

Zonage et statistiques pluviométriques de référence

Les statistiques de référence utilisées pour la construction des hyétoGrammes sont issues de l'étude de référence menée par EGIS en août 2022 pour PPCE (Métropole).

Afin de tenir compte de la disparité spatiale du régime des précipitations, 2 zones de pluviométries distinctes ont été définies. Sur chacune de ces 2 zones, les hyétoGrammes de pluie ont été construits en se basant des cumuls statistiques différents :

- La zone CT1 (Marseille) ;
- La zone CT2 (Aix) : elle ne concerne que la frange nord-est de la zone modélisée dans le sous-modèle CT4. Elle a été définie à partir de l'étude EGIS et ajustée sur des critères hydrologiques et orographiques (en concertation avec AMP).



Délimitation des secteurs de pluviométrie de référence homogène

■ Référence pluviométrique CT1

Tableau 16 - Cumuls pluviométriques de référence sur le secteur "CT1"

Durée (min)	T = 1 an	T = 2 ans	T = 5 ans	T = 10 ans	T = 20 ans	T = 50 ans	T = 100 ans
30	21.4	25.9	37	43.8	51.9	65.4	77.7
60	26	31.2	44.3	53.1	63.3	80.7	96.4
120	31.6	37.6	53.1	64.3	77.1	99.6	119.6
180	35.4	42	59.1	71.9	86.6	112.6	135.7
360	43	50.5	70.8	87.1	105.5	138.9	168.3
720	52.2	60.9	84.9	105.6	128.6	171.4	208.9
1440	61.7	70.2	100.1	127.4	158.9	208.3	259.2

■ Aix-en-Provence

Tableau 17 - Cumuls pluviométriques de référence sur le secteur "Aix"

Durée (min)	T = 1 an	T = 2 ans	T = 5 ans	T = 10 ans	T = 20 ans	T = 50 ans	T = 100 ans
30	18.5	23.2	28.6	33.9	39.2	46.3	51.8
60	24.1	30.5	40.8	49.2	57.7	69.6	79.2
120	29.4	34.9	53	65.1	77.6	95.6	111
180	32.1	40.2	57.6	70.6	84	103.3	119.9
360	37.1	51	66.4	81.2	96.3	117.9	136.6
720	46.1	58.4	77.4	92.6	108.3	128.9	146.7
1440	57.7	67.3	90	106.1	122.4	142.5	159.4

Cumuls statistiques de référence pour la construction des pluies de projet

Cette pluie de référence a été appliquée uniformément sur l'intégralité des secteurs modélisés afin de reproduire en chaque point les conséquences potentielles de la survenue d'un tel événement pluvieux.

Il convient de garder à l'esprit que :

- La modélisation proposée n'a pas vocation à reproduire de manière réaliste les débordements le long des grands cours d'eau du territoire dont le régime hydrologique, la dynamique de crues et la superficie des bassins d'apports ne sont pas compatibles avec la durée de pluie simulée (d'où l'exclusion des principaux cours d'eau de l'emprise de modélisation) => pas e

valorisation des résultats obtenus pour les principaux fleuves (Huveaune, Aygalades) et affluents (Jarret, Fauge...);

- Les résultats obtenus montrent l'impact d'une telle pluie homogène en tout point du territoire. Toutefois, un épisode d'une telle intensité aurait une extension plus limitée dans la réalité et n'impacterait donc qu'une partie du territoire.

Prise en compte de l'impact du réseau d'évacuation des eaux pluviales

La modélisation mise en place n'intègre pas directement les réseaux enterrés d'évacuation des eaux pluviales (séparatif ou unitaire) dans la mesure que la complétude et la précision hétérogène des données disponibles rend très complexe cette intégration pour un impact relativement limité sur l'aléa associé à la pluie de référence. En effet, l'objectif principal du modèle est bien de caractériser les écoulements exceptionnels, résultant d'une pluie de période de retour largement supérieure à la période de retour de dimensionnement de ces réseaux.

Ces derniers n'en représentent pas moins une certaine capacité de drainage qui va permettre d'absorber une partie des fortes pluies jusqu'à saturation.

Afin de tenir compte de cet impact des réseaux d'évacuation des eaux pluviales, des pertes continues ont été appliquées sur les surfaces de toitures et de voiries dans les secteurs concernées par un réseau de drainage.

Les hypothèses suivantes ont été retenues en accord avec le service GEMAPI de la Métropole sur la base de tests de sensibilité :

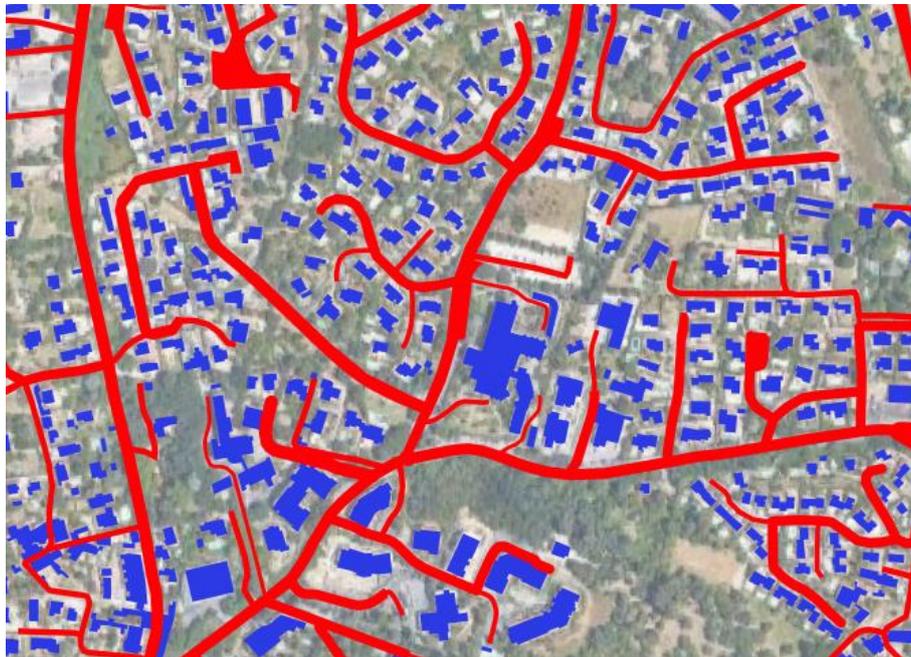
- Dans les zones couvertes par un réseau, en dehors du centre-ville de Marseille :
 - Sur les toitures : absorption de 20 mm/h (pour tenir compte des dispositifs de GEP à la parcelle et des descentes de gouttières directement connectées au réseau) ;
 - Sur les voiries et parkings : absorption de 10 mm/h ;
- Dans le centre urbain dense de Marseille (zone unitaire) : sur les toitures, voiries et parkings, absorption de 30 mm/h pour tenir compte du surdimensionnement des réseaux et du dispositif de collecte.

En dehors de ces surfaces, au niveau des espaces urbains mixtes, des espaces verts, des versants d'apport naturels et agricoles, ces pertes n'ont pas été appliquées.

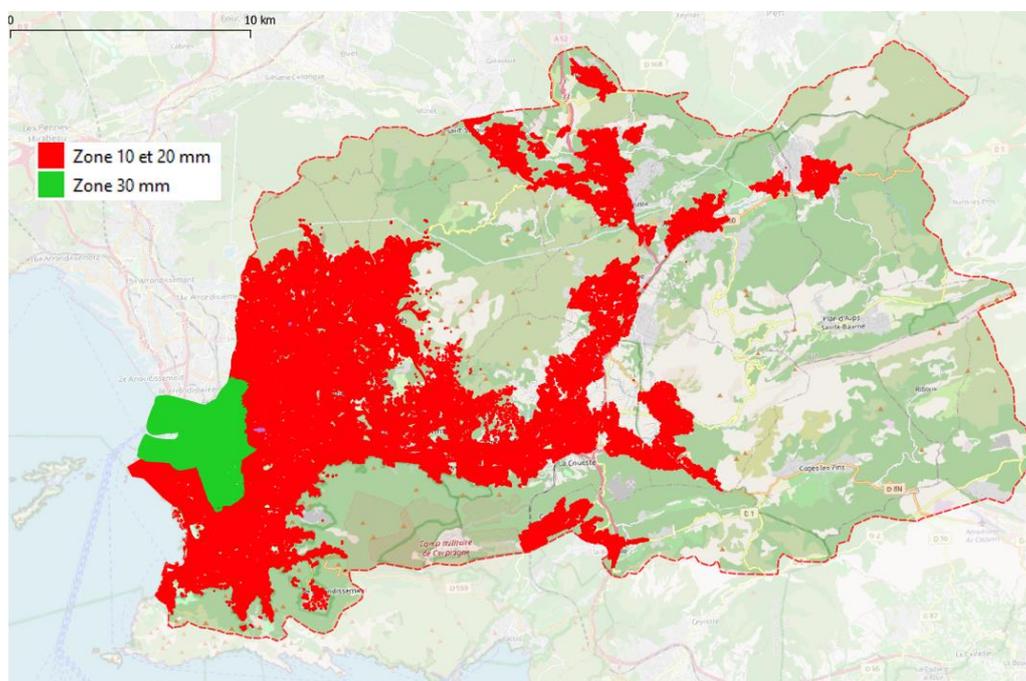
Ces valeurs ont été calées à partir de simulations itératives (cf. 0) sur un secteur test et validée par la Métropole. Elles sont par ailleurs cohérentes avec :

- La valeur de référence indiquées par la DDT du Var pour la capacité de collecte d'un réseau urbain en conditions « normales » qui est estimée à 0,4 mm/min soit 24 mm/h.

- La valeur de référence² de l'agence environnementale anglaise qui indique 12 mm/h pour la prise en compte des réseaux de drainage urbain dans les modélisations hydrauliques.



Surfaces de toitures et de voiries prises en compte de l'effet d'abattement des réseaux (Marseille 13011)



Zones avec abattement de la pluie sur les surfaces de toitures et voiries

² What is the Risk of Flooding from Surface Water map ? April 2019- Environment Agency

Coefficients de rugosité des sols

Des coefficients de rugosité pour la modélisation de l'aléa ruissellement ont été définis sur la base de l'occupation des sols des bassins versants à partir des valeurs classiques de la littérature et de nos propres retours d'expérience en la matière. Ils ont été ajustés de façon à obtenir une réponse hydraulique satisfaisante.

Coefficient de rugosité par type d'occupation des sols

Type d'occupation des sols	Coefficient de Strickler ($m^{1/3}/s$)
Forêt	10
Prairie - Garrigue	25
Agricole	20
Espace vert urbain	14
Zone urbaine et zone résidentielle	25
Zone d'activité et infrastructures secondaires	14
Voiries	40

Coefficient de rugosité par type d'occupation des sols

Transformation pluie débit

La transformation de la pluie nette en pluie brute repose sur une hypothèse de capacité d'infiltration constante pendant la pluie. La pluie est abattue d'une intensité constante correspondant à la capacité d'infiltration de la surface sur laquelle elle précipite. Ainsi le coefficient de ruissellement instantané dépend de la différence entre la capacité d'infiltration et l'intensité de la pluie. Ce type de simplification hydrologique est adapté à la modélisation d'un événement type orage unique intense tel que l'on souhaite modéliser dans le cadre de l'étude.

Les coefficients d'infiltration des sols sont définis de façon à obtenir des coefficients d'apports :

- Cohérents et adaptés à la pédologie et au type de sols ;
- Qui soient dans les gammes de coefficients d'apport classiquement utilisées dans les modélisations hydrologiques basés sur la littérature et notre expérience.

Type d'OS	GAMMES DE COEFFICIENTS D'APPORT					
	Petites pluies (<10 ans)		Pluies moyenne à fortes (<50 ans)		Pluies exceptionnelles (> 50 ans)	
	Conditions normales	Conditions défavorables	Conditions normales	Conditions défavorables	Conditions normales	Conditions défavorables
Agricole	0 à 15 %	10 à 25 %	15 à 25 %	25 à 35 %	25 à 35 %	35 à 45 %
Naturel (forêt, garrigue)	0 à 5 %	0 à 15 %	5 à 15 %	15 à 25 %	15 à 25 %	25 à 35 %
Espaces urbains non imperméabilisés (espaces verts, jardins, friches)	5 à 20 %	15 à 30 %	20 à 30 %	30 à 40 %	30 à 40 %	40 à 50 %
Imperméable (toitures et voiries)	100%*	100%*	100%*	100%*	100%*	100%*

* Avant prise en compte des réseaux

Tableau des gammes de coefficients d'apport retenus après ajustement

Ces paramètres hydrologiques ont fait l'objet d'une validation itérative sur la base d'analyse des résultats du modèle (cf. **Erreur ! Source du renvoi introuvable.**).

NB : les coefficients d'infiltration paramétrés dans le modèle TUFLOW (fichier Materials) sont adaptés à la pluie de projet de référence (forme, intensités) et calés de façon à obtenir les coefficients d'apport ci-dessus. Pour modéliser des formes de pluies différentes, ils doivent être adaptés.

Approche complémentaire spécifique aux bassins versants endoréiques pour la définition de l'aléa de référence

A la demande des Communes et du service GEMAPI de la Métropole, une approche hydrogéomorphologique complémentaire dite « de remplissage » a été menée sur les communes de Plan d'Aups (Sainte Beaufort) et de Cuges les Pins.

Ces communes présentent la spécificité de se trouver dans des bassins versants endoréiques spécifiques des secteurs karstiques. Ces formations géologiques aussi appelées « polje » sont des cuvettes topographiques de grande ampleur, sans exutoire surfacique naturel direct. L'eau qui ruisselle s'accumule au fond de la cuvette qui se vidange par évaporation et infiltration dans le karst (en partie à travers les embuts karstiques).

L'objectif de cette approche « remplissage » est d'évaluer l'aléa dans le fond de la cuvette topographique en cas de pluie extrême à fort cumul : 400 mm en 24 h soit environ 1,5 fois la pluie centennale (stat CT1).

Pour cela la méthodologie appliquée a été la suivante :

- 1) Délimitation de la surface du bassin versant endoréique « S »
- 2) Calcul d'un coefficient d'apport moyen sur le bassin versant à partir des données d'occupation du sol et des coefficients calés pour la pluie centennale « C »
- 3) Calcul du volume ruisselé « V » = S x C
- 4) Calcul de la loi hauteur (m NGF) / volume (m³) de la cuvette topographique à partir du MNT et identification de la cote de remplissage correspondant au volume ruisselé « V »

5) Cartographie de la hauteur d'aléa à partir de la différence entre la cote de remplissage et le MNT

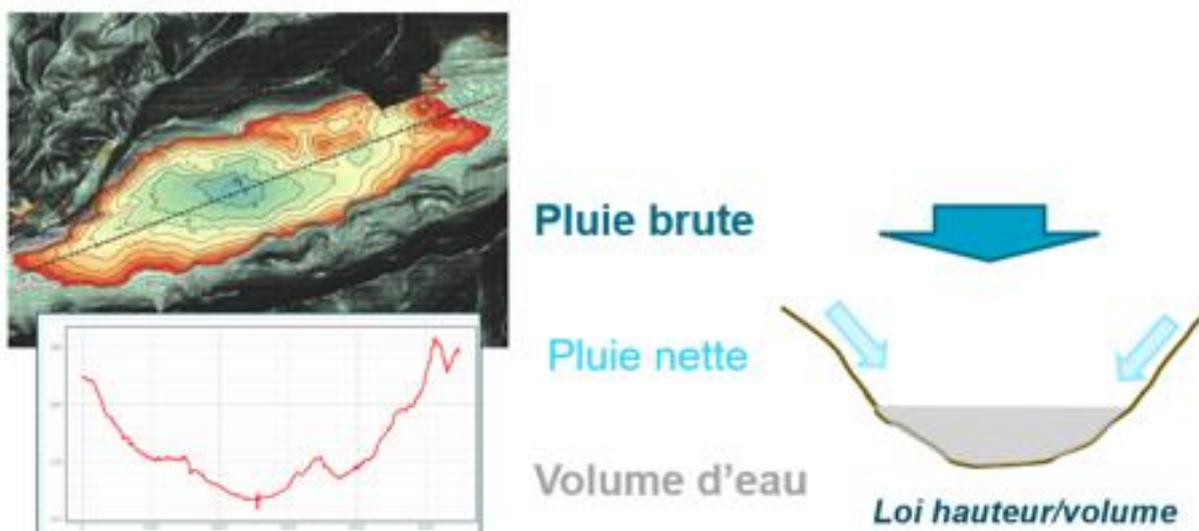
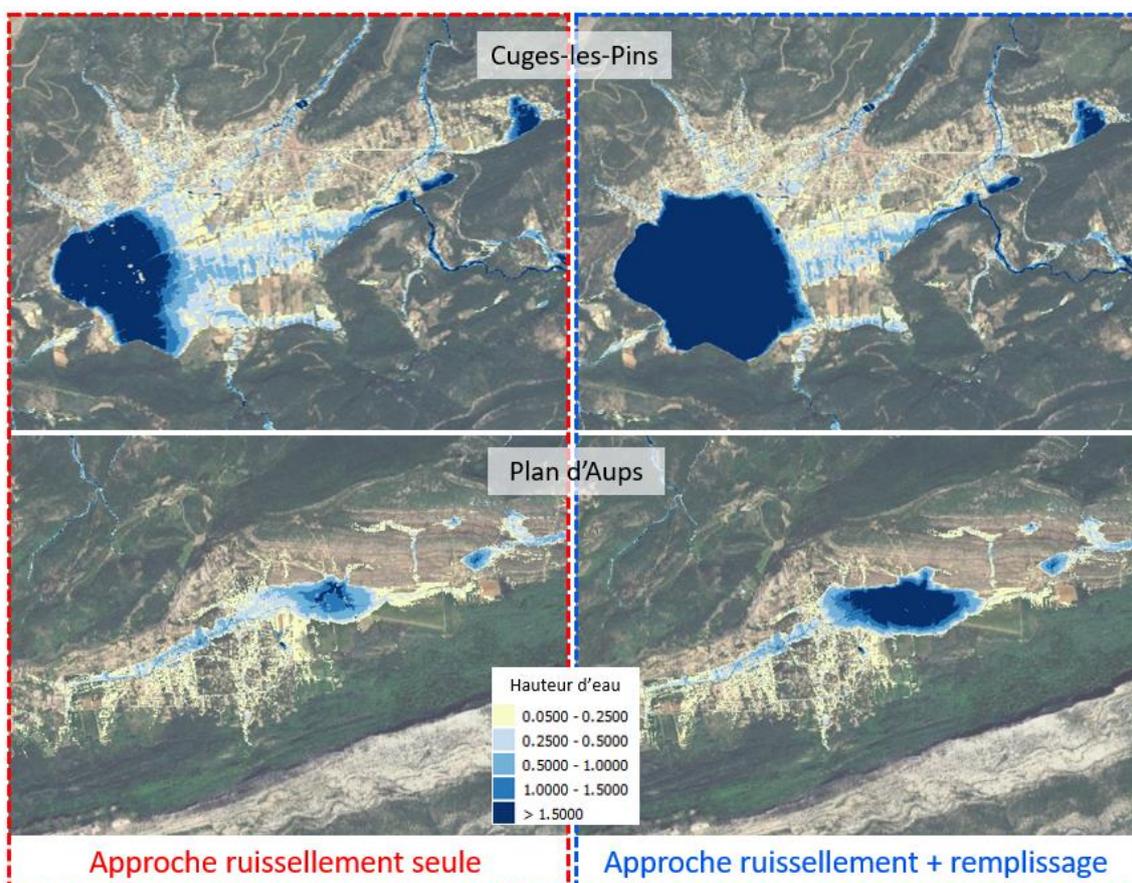


Illustration du caractère endoréique du polje de Plan d'Aups (gauche), schéma de principe de l'approche « remplissage » (droite)



Cartographie de l'aléa de référence avec et sans prise en compte de l'approche remplissage

L'aléa issu de cette approche a été intégré en post-traitement à l'aléa de référence pour compléter les résultats de l'aléa issu de l'approche « ruissellement ».

La méthodologie d'intégration est décrite dans le paragraphe « **Erreur ! Source du renvoi introuvable.** ».

Analyses de sensibilité

Plusieurs analyses de sensibilité ont été réalisées afin de caler certaines hypothèses structurantes de modélisation hydrologique et hydraulique.

Coefficients d'apport et conditions initiales d'humidité

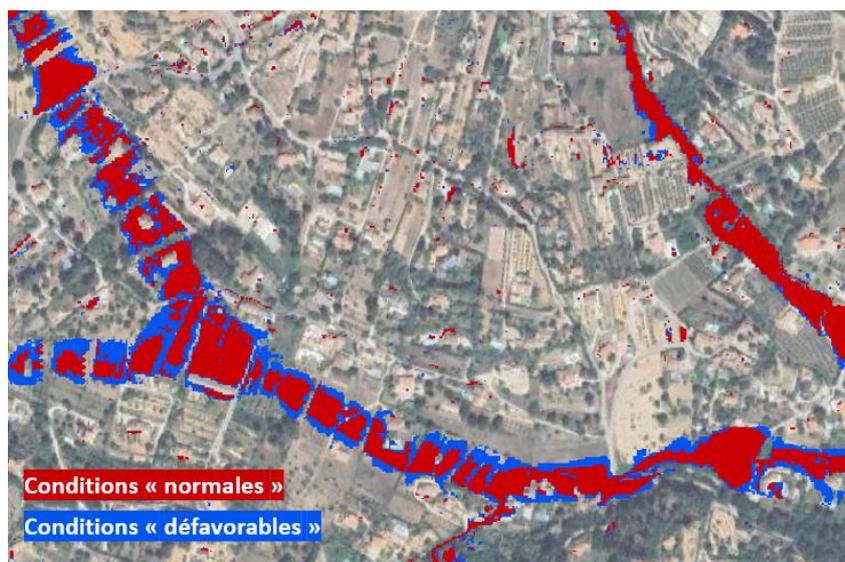
Deux scénarios de coefficients d'apport ont été envisagés, un scénario **normal** dit « **sec** » (**ou condition sèches**) et un scénario **défavorable** dit « **humide** » (**ou conditions humides**). Ces scénarii permettent de prendre en compte des conditions initiales variables de saturation des sols et du sous-sol en fonction de la saison et des précipitations antérieures à la pluie modélisée. Ils se traduisent par des coefficients d'apports différents. Ces coefficients d'apports ont été « calés » à partir de deux événements historiques aux conditions initiales de saturation des sols différentes :

- Octobre 2021 : condition sèches
- Décembre 2003 : conditions humides

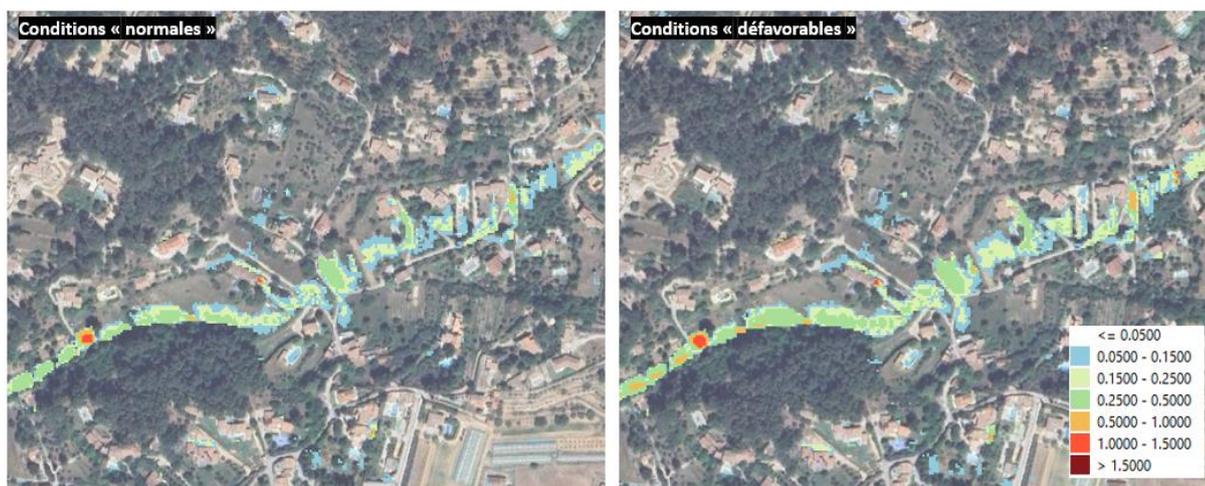
Une comparaison des emprises inondées et des hauteurs d'eau modélisées selon les deux scénarios a été effectuée pour la pluie de référence. Les écarts constatés sont les suivants :

- L'écart en termes de superficie inondée est de 16% pour le scénario humide ;
- L'écart en termes de hauteur d'eau moyenne est de 7 cm soit 20 % (*42 cm en moyenne en conditions humides contre 35 cm en conditions normales*) ;

Les résultats de cette comparaison sont illustrés dans les figures ci-après.



Comparaison de l'emprise inondée (> 5 cm) entre des conditions sèches "normales" et conditions humides "défavorables" à Roquevaire



Comparaison des hauteurs d'eau selon les deux scénarios d'apport envisagés pour la pluie décennale à Roquevaire

Le scénario humide apparaît plus pénalisant mais correspond toutefois à des situations historiques et des contextes locaux particuliers.

Sur la majorité du territoire, l'événement de référence retenu pour caractériser l'aléa inondation ruissellement / petits axes d'écoulement, retient **les paramètres hydrologiques correspondant à des conditions initiales sèches (normales)**.

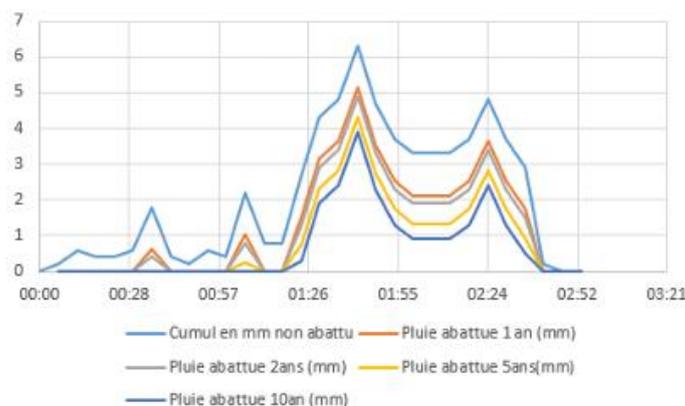
Test de l'effet d'abattement des réseaux

Comme mentionnée au paragraphe 00, la modélisation directe des réseaux EP/UN n'est pas envisagée puisque la pluie de référence considérée pour la modélisation est une pluie exceptionnelle nettement supérieure à la capacité des réseaux du territoire.

Pour autant, la part du volume géré par les réseaux peut s'avérer relativement significatif dans certaines configurations et pour des pluies d'occurrences faibles.

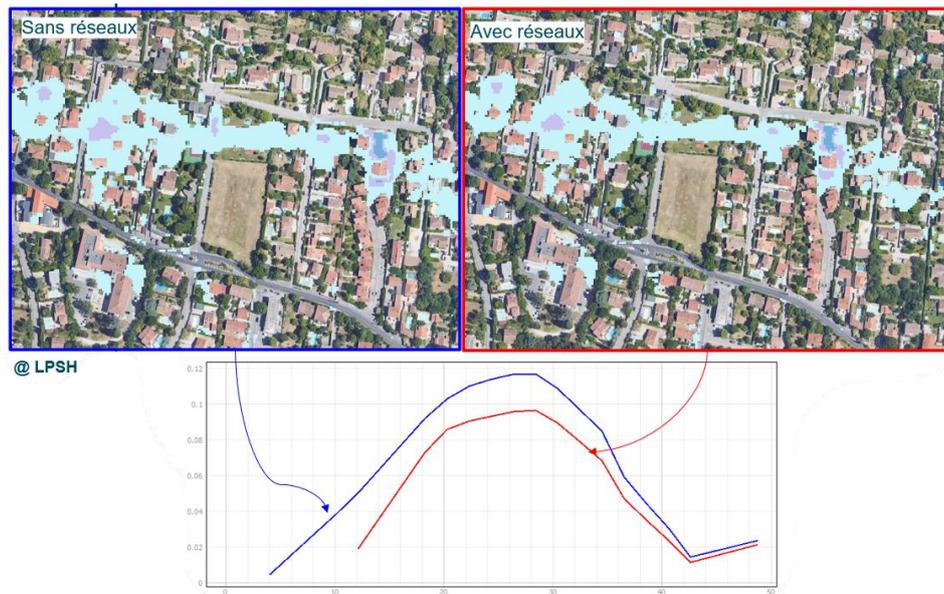
Afin de paramétrer l'hypothèse de référence (cf. 0) pour la prise en compte de l'effet des réseaux, un sous modèle a été extrait sur la commune de La Penne sur Huveaune et différentes options ont été testées :

- L'abattement de la pluie précipitée sur les surfaces de toitures et de voiries connectées au réseau suivant une intensité continue correspondant à une pluie d'occurrence (1 an, 2 ans, 5 ans, 10 ans)



Graphique de la pluie d'octobre 2021 suivant une hypothèse d'abattement constant

- Des pertes continuent sur les surfaces de toitures et de voiries connectées au réseau suivant une intensité fixe correspondant à la capacité de collecte des grilles et des avaloirs (test de différentes gammes)



Extrait du travail itératif de calage de l'infiltration : impact de la prise en compte de pertes continues au droit des surfaces de voiries et toitures liée au réseau sur les hauteurs d'eau pour la pluie octobre 2021 à La Penne sur Huveaune

C'est la seconde option, plus réaliste, qui a été retenue avec les paramètres présentés plus avant. Notons que la phase de calage/validation du modèle a permis de vérifier que l'application de cet abattement ne dégrade pas la représentativité du modèle par rapport aux données historiques.

Prise en compte des pertes/zones d'engouffrement

De nombreuses pertes karstiques ponctuelles (ou embuts) sont présents sur le territoire d'étude. Les principaux ont fait l'objet d'investigation bibliographique afin d'évaluer l'impact que ceux-ci pourraient jouer dans le fonctionnement hydraulique notamment au niveau des poljes (bassins versants endoreiques).

Les études montrent que ces entités karstiques disposent d'un débit capable de l'ordre de quelques dizaine de litre par seconde.

Ces débits sont sans commune mesure avec les débits modélisés dans le cadre de la présente étude (plusieurs dizaine voire centaine de m³ par seconde). Ces entités géologiques n'ont donc pas été directement intégrées au modèle. Leur impact sur les ruissellements sont intégrées dans le calage de l'hydrologie à l'échelle des massifs karstiques.

Prise en compte de l'effet du changement climatique

Les effets du changement climatique peuvent entraîner des conséquences directes ou indirectes sur l'hydrologie : en modifiant l'environnement physique du bassin versant (sécheresse, feu, migration des végétaux par exemple), ou en entraînant des modifications du régime des précipitations. Dans les deux cas, cela se traduit par un impact probable sur l'aléa ruissellement.

Les conséquences exactes du changement climatique sur le régime des précipitations est difficile à prévoir avec exactitude mais il est certain que cela se traduira (déjà actuellement) par une intensification des épisodes extrêmes (sécheresses et pluies intenses).

Dans le cadre de la présente étude, il a été décidé de mener un test de sensibilité pour prendre en compte les effets prospectifs du changement climatique sur les pluies extrêmes en modélisant une pluie centennale future avec des cumuls/intensités renforcés.

Cette pluie centennale future a été obtenue en appliquant un **coefficient correcteur de +20%** à la pluie centennale de référence.

Ce coefficient a été retenu sur la base de discussions avec le service GEMAPI s'appuyant sur des analyses sur des données historiques issues de la bibliographie³.

Il a également été validé sur la base de la méthode calculs théorique issus de la littérature⁴ :

- Théorie thermodynamique : l'intensité des précipitations augmente avec les températures, par un facteur général d'environ 7% / 1°C,
- On peut calculer l'intensité future pour une pluie 30 min 100 ans : $I(f)=I(a) \times 1.07^{\Delta T}$ où $I(h)$:
 - $\Delta T = +2,8$ °c (scénario RCP 4,5 pour Marseille source : climadiag)
 - Intensité actuelle des précipitations $I(a) = 155,4$ mm/h (100 ans 30 min)
 - $I(f) = 188$ mm/h (100 ans 30 min), soit +21%

A titre comparatif, une augmentation de 20 % de l'intensité de la pluie centennale calculée à partir des données historiques actuelles correspond à une intensité d'occurrence comprise entre 150 et 200 ans.

³ « The mean intensity increase is significant and estimated at + 22% (+ 7 to + 39% at the 90% confidence level) over the 1961–2015 period » - Observed increase in extreme daily rainfall in the French Mediterranean, 2018

⁴ Environnement and climate change CANADA : <https://donneesclimatiques.ca/ressource/introduction-aux-changements-climatiques-et-aux-precipitations-extremes/>



VALIDATION DES RESULTATS DU MODELE

L'objectif de cette étape a été de s'assurer que le modèle représente de manière réaliste les principaux écoulements générés dans des conditions d'événements pluviométriques extrêmes tels qu'étudiés.

Il n'est pas pertinent d'utiliser volontairement le terme de « calage », qui sous-entendrait que les paramètres du modèle ont été ajustés de manière à ce qu'il représente exhaustivement fidèlement la réalité, à partir de la comparaison de ses résultats avec les mesures de plusieurs événements pluvieux d'intensités variables sur les bassins versants étudiés. Or, le calage au sens strict des modèles pluviaux ruissellement est rarement possible, faute de mesures d'événements suffisamment importants. Il l'est d'autant moins dans les conditions exceptionnelles considérées ici.

Néanmoins, au travers des forts événements pluvieux récents, recensés lors de la phase de constitution de la base de données des désordres, un certain nombre d'observations précieuses (écoulements superficiels et désordres) existent permettant de contrôler la pertinence des résultats de la modélisation.

L'objectif est donc de croiser les approches à partir des données disponibles pour conforter les hypothèses retenues et valider les résultats du modèle.

La validation du modèle bi-dimensionnel construit s'est déroulée en plusieurs étapes successives :

- Une première **validation semi-quantitative** à l'échelle du bassin versant : à partir d'un modèle hydrologique « grosse maille » afin de vérifier la cohérence des hydrogrammes de débits mesurés à la station d'Aubagne et Roquevaire avec ceux obtenus à partir du modèle. Cette première étape permet de vérifier **la cohérence des apports hydrologiques et de la réponse hydraulique** et d'ajuster de façon itérative par type d'occupation des sols des coefficients d'apport (tels que décrits au chapitre précédent) ;
- Une **validation sur la base des données de la littérature** et de notre expertise en vérifiant la cohérence des coefficients d'apports ajustés et des résultats du modèle avec les gammes de coefficients et de débits spécifiques mesurés ou calculés sur des bassins versants similaires ;
- Une validation qualitative **du comportement hydraulique du modèle**, soit de sa capacité à bien reproduire les écoulements, les emprises historiquement inondées, les points de désordres identifiés, les enjeux touchés et les hauteurs d'eau constatées si disponibles ;
- Enfin, une validation des résultats par des **visites de terrain** au niveau des zones avec des hauteurs d'eau importantes reproduites par le modèle afin de vérifier in-situ le réalisme des phénomènes modélisés et le cas échéant d'ajuster le modèle hydraulique en cas d'erreur manifeste (ajout d'un ouvrage manquant par exemple).

Validation quantitative du modèle hydrologique

L'objectif de cette étape a été de valider le paramétrage des gammes de coefficients d'apport pour les différents types de surface du modèle.

Pour cela, ont été comparés les apports hydrologiques et la réponse hydraulique obtenus à l'aide d'un modèle simplifié 2D « grosses mailles » qui couvre la totalité du bassin versant de l'Huveaune (sans exutoire au niveau des cours d'eau) aux mesures effectuées sur l'Huveaune pour des événements historiques significatifs (il s'agit de la seule entité hydrologique du territoire d'étude pour laquelle on dispose de mesures ou d'estimations de débits pour des événements historiques).

Les paramètres hydrologiques (coefficients d'apports) des mailles 2D ont été ajustés ou validés de façon itérative jusqu'à obtenir un niveau de cohérence satisfaisante avec les hydrogrammes mesurés.

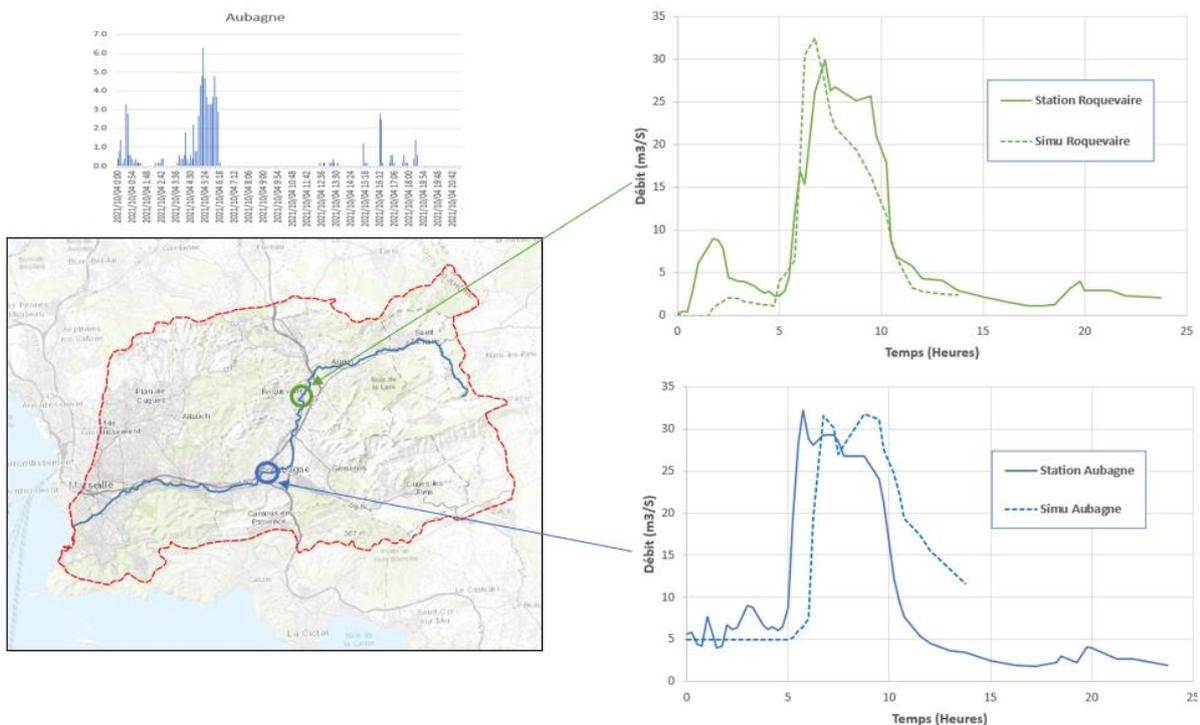
Les coefficients d'apports ainsi validés pour 1 occurrence et 1 condition d'humidité des sols données ont été ensuite extrapolés pour les autres périodes de retour.

Pluie du 04 octobre 2021

La pluie du 04 octobre 2021 présente une période de retour de l'ordre de 5 ans sur le bassin versant de l'Huveaune.

Elle a eu lieu dans un contexte antécédent sec, sans pluie significative les jours précédents.

Cette pluie a ainsi permis de définir et valider les coefficients d'apport des différents types de surface pour une pluie en condition normale « sèche » pour des occurrences inférieure à 10 ans.



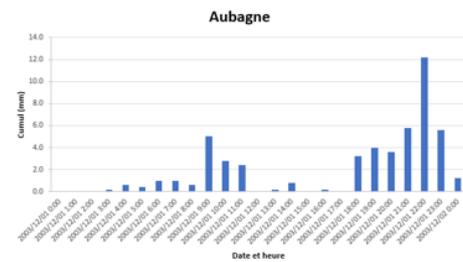
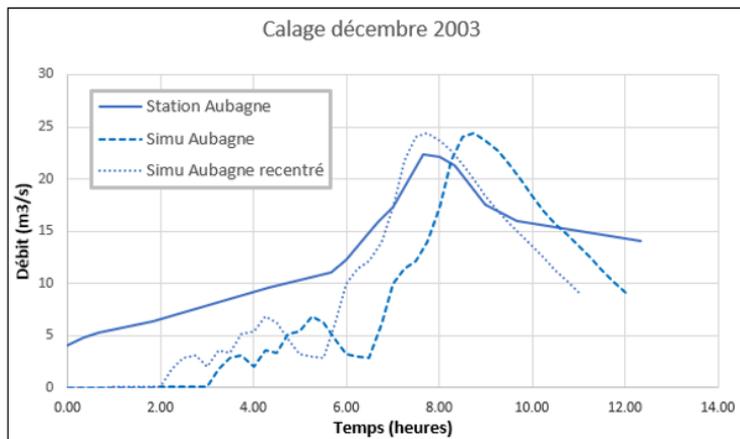
Réponses hydrauliques du modèle pour la pluie du 04 octobre 2021 à Roquevaire et Aubagne après ajustement des paramètres hydrologiques

Pluie du 01 décembre 2003

La pluie du 01 décembre 2003 présente un cumul statistique d'une pluie annuelle, elle a eu lieu dans un contexte humide à la suite de plusieurs événements pluvieux significatifs.

La réponse hydrologique (coefficients d'apport) pour cette pluie annuelle est influencée par les conditions initiales de saturation des sols, elle est semblable à celle obtenue pour une pluie d'occurrence 5 ans.

Cette logique a ainsi été extrapolée pour les autres périodes de retour.



Réponse hydraulique du modèle pour la pluie du 01 décembre 2003 à Aubagne après ajustement des paramètres hydrologiques

Limites de cette approche

En l'absence de mesures ou d'estimation des débits ruisselés le long des axes d'écoulement du périmètre d'étude pour un ou plusieurs événements de pluies historiques qui aurait permis une validation quantitative des apports d'un ou de plusieurs sous-bassins versant, les hydrogrammes utilisés ici pour « valider » les apports et la réponse hydrauliques du modèle sont ceux mesurés sur l'Huveaune, le fleuve côtier du bassin versant d'étude.

Or, la présente analyse porte sur l'aléa ruissellement (petits écoulements), les cours d'eau tels que l'Huveaune n'étant pas concernés.

Ces données sont néanmoins utiles en première approche pour **conforter des ordres de gradeurs**, sans pour autant « caler » précisément les paramètres de modélisation.

Vérification de la cohérence bibliographique des coefficients d'apport

L'objectif de cette seconde étape est de vérifier la cohérence des coefficients d'apports calés à partir de la méthode quantitative décrite au paragraphe précédent sur la base de la bibliographie et nos multiples retours d'expérience en termes de coefficients d'apports théoriques et empiriques.

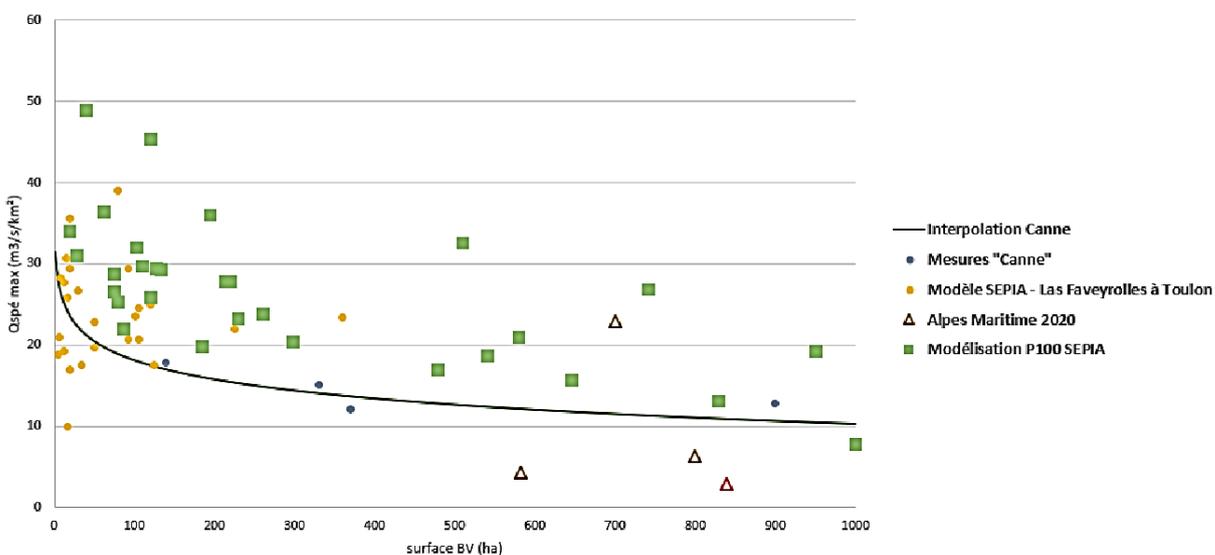
Cette seconde étape nous a conduit à ajuster les paramètres hydrologiques pour retomber dans des gammes de débit spécifiques cohérents.

Le graphique ci-dessous permet de comparer les débits spécifiques issu du modèle Huveaune ceux mesurés sur des secteurs méditerranéens (Alpes Maritime, Canne), ou issu d'une autre modélisation (Las Faveyrolles à Toulon).

Il montre la cohérence globale des résultats, en particulier pour les « petits » bassins versants (inférieurs à 5 km²), particulièrement visés par la présente étude ruissellement.

Rappelons néanmoins qu'il s'agit bien ici de trouver un équilibre entre :

- Une estimation prudente des apports, c'est-à-dire qui ne conduise pas à les sous-estimer et à négliger certains axes d'écoulement ;
- Une estimation néanmoins réaliste de ces apports, c'est-à-dire qui ne conduise pas à les surestimer, à exagérer le risque inondation qui pèse sur le territoire et pour finir à discréditer la cartographie produite. C'est l'écueil le plus fréquent.



comparaison des débits spécifiques mesurés et calculés par le modèle hydraulique

Validation du comportement hydraulique du modèle

Une fois le modèle hydraulique construit, il a été nécessaire de procéder à sa validation afin de vérifier la pertinence des écoulements simulés.

Cette validation passe par la confrontation de la réponse du modèle aux informations historiques recensées dans la base de données des désordres constatés construites dans le cadre de l'étude.

Il convient toutefois de préciser les limites de l'exercice de comparaison entre ces désordres historiques et les résultats de la modélisation des écoulements exceptionnels calculés :

- Les causes des désordres signalés sont multiples et peuvent être liées à un phénomène non représenté par le modèle (colmatage des réseaux enterrés par exemple) ;
- La description des désordres est parfois vague avec un niveau de détail très faible ce qui rend difficile la compréhension pour pouvoir comparer aux résultats de modèle ;
- La précision de la localisation des désordres indiqués est également variable et peut être approximative ;
- Comme explicité précédemment, le modèle mis en place n'est pas représentatif des débordements se formant le long des principaux cours d'eau du territoire. Il n'est donc pas pertinent d'effectuer une comparaison entre les désordres historiques signalés suite au débordement de ces principaux cours d'eau et les résultats de modélisation.

Les exemples de confrontation des résultats de modélisation aux informations historiques présentés ci-après montrent la bonne représentativité du modèle au regard des différentes informations historiques recensées.

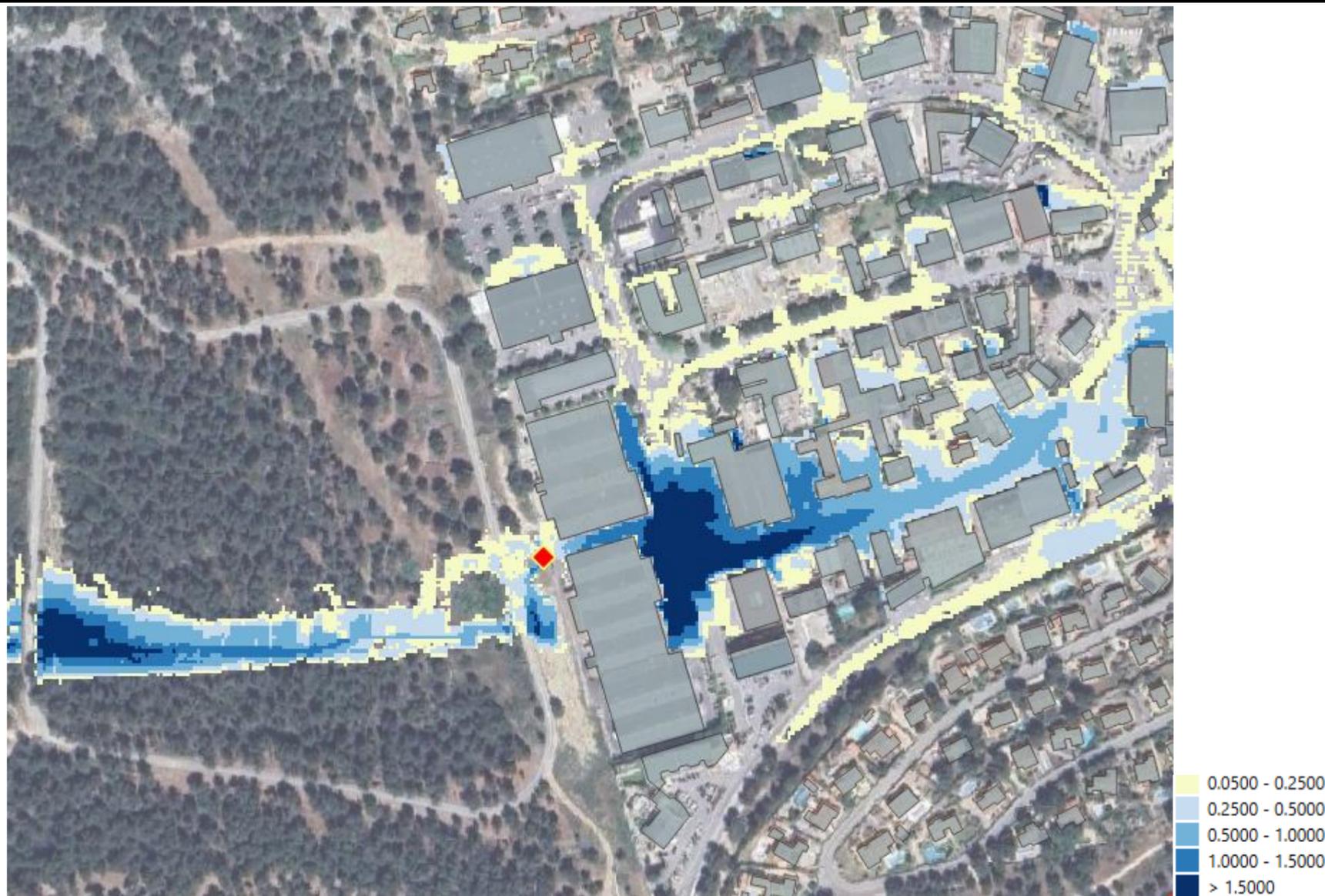


Observations :

Commune de Peypin
 Lors des fortes pluies et en octobre 2021
 Multiples débordements du ruisseau du Grand Pré en amont de la zone urbanisée
 1 habitation inondée et 1 jardin inondé

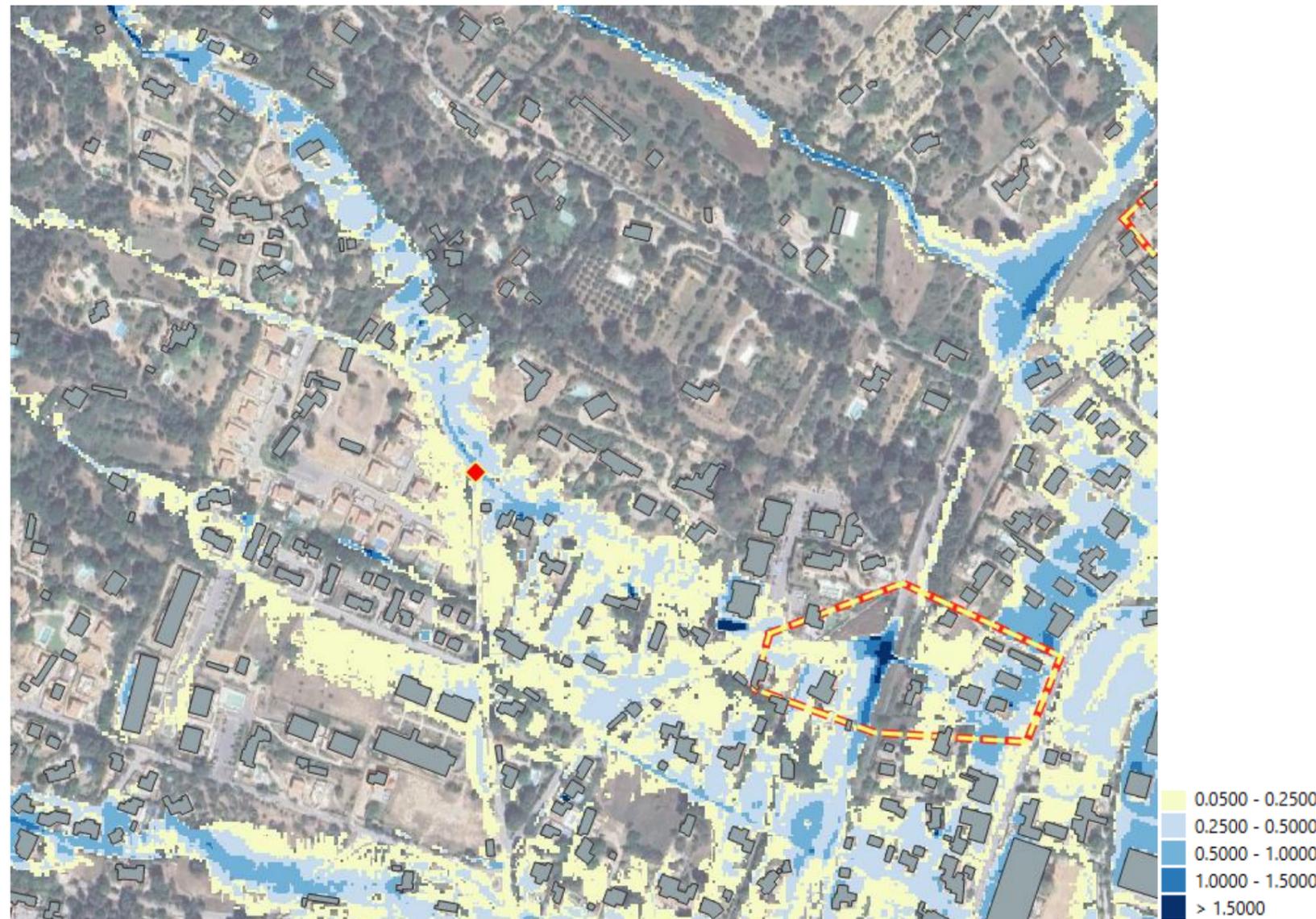
Résultats de la modélisation :

Bonne représentativité du phénomène sur les secteurs impactés
 Zone de rétention sur le ruisseau qui déborde en amont du secteur urbanisé, impactant la route, les parcelles (jardins) et les bâtiments les plus proches



Observations :
 Avenue Augustin Fresnel à Carnoux en Provence
 Inondations fréquentes de la ZI du Mussuguet
 Entreprises impactées
 Une étude a déjà été menée en 2013 pour résoudre ce dysfonctionnement récurrent mais les travaux n'ont pas été mis en œuvre

Résultats de la modélisation :
 Très bonne représentativité du phénomène
 Axe d'écoulement en provenance de Carpiagne qui transite par la zone industrielle aménagée en travers de l'axe naturel.
 Inondation généralisée des entreprises situées au droit de l'axe d'écoulement.



Observations :
 Chemin Boyer - Chemin Carreirade à Aubagne
 Importants ruissellements sur voirie à chaque pluie
 Inondations plus à l'aval au droit du passage sous la route départementale

Résultats de la modélisation :
 Bonne représentativité du phénomène
 Les ruissellements se concentrent le long de la voirie puis se dispersent dans les parcelles.
 Au niveau de la départementale on constate une forte accumulation avec des hauteurs conséquentes

Vérification et visites de terrain

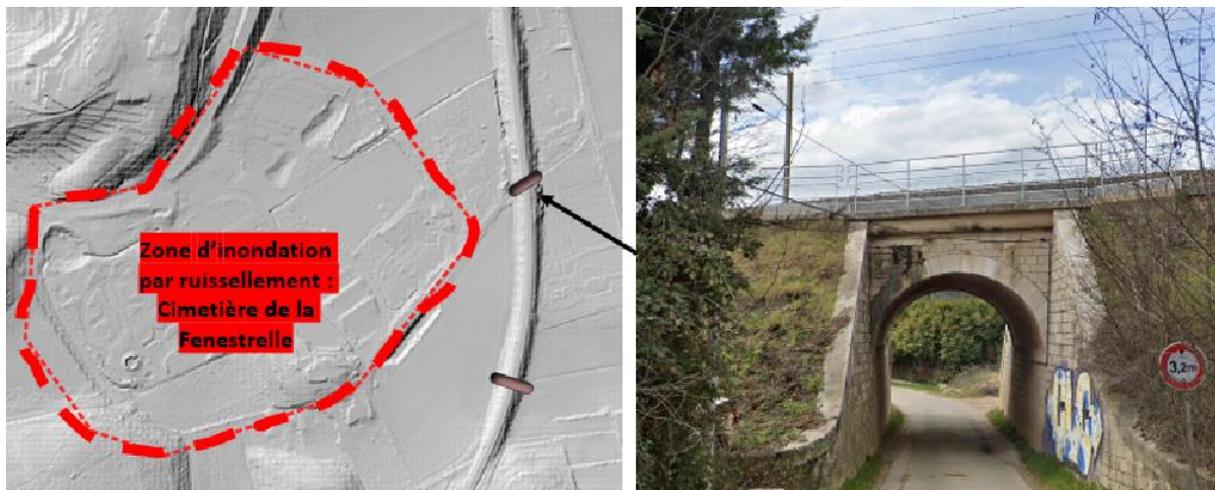
De nombreuses vérifications et visites de terrain ont été effectuées sur la base d'une première modélisation du territoire, afin d'identifier :

- Sur les **zones de forte accumulation d'eau (> 1m)** si cela est cohérent avec la topographie, si les dimensions de l'ouvrage sont bonnes ou/et si un ouvrage est manquant ;



Ouvrage de passage sous ancien remblai SNCF à la Bouilladisse

- La **cohérence avec les désordres historiques** et si des éléments de topographie supplémentaire sont à prendre en compte (murets, ouvrages ...) ;

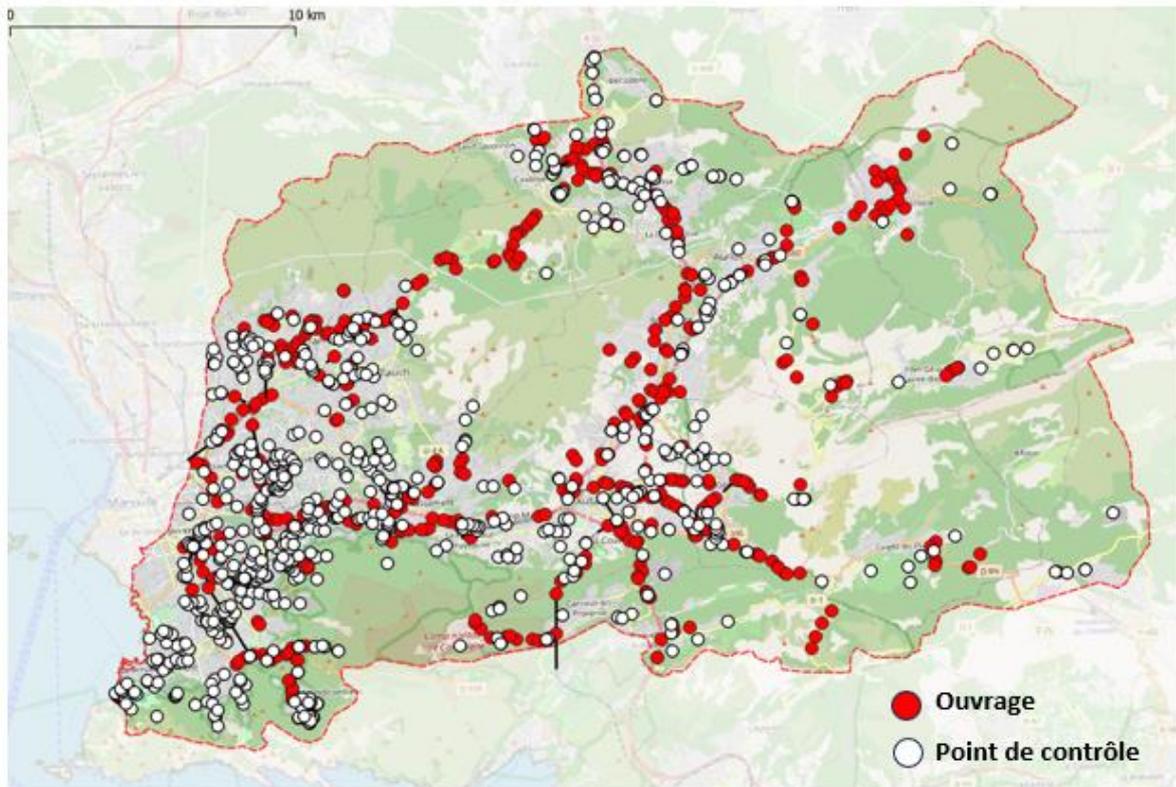


Ouvrage de passage sous voie ferrée à l'amont d'un désordre

Ces repérages ont été réalisés dans un premier temps par repérage sur les orthophotographies, Streetview et Google Earth, complétés dans un second temps visites de terrain qui se sont déroulées en février, mai, et octobre 2023.

En outre, cette méthodologie a permis de **contrôler plus de 1200 secteurs dont 600 ouvrages ou dimensions d'ouvrages de passages.**

En complément, 12 ouvrages inaccessibles ont été contrôlés par un géomètre expert.



Localisation des zones vérifiées lors des visites de terrain (SEPIA Conseils, 2022)

Les premiers résultats de modélisation ont été partagés avec les services Métropolitain et les Communes qui ont validé les résultats ou signalés des incohérences avec des événements vécus. Ces signalements ont fait l'objet d'investigations complémentaires qui ont conduit à ajuster localement le modèle pour prendre en compte des ouvrages ou des éléments topographiques complémentaires.

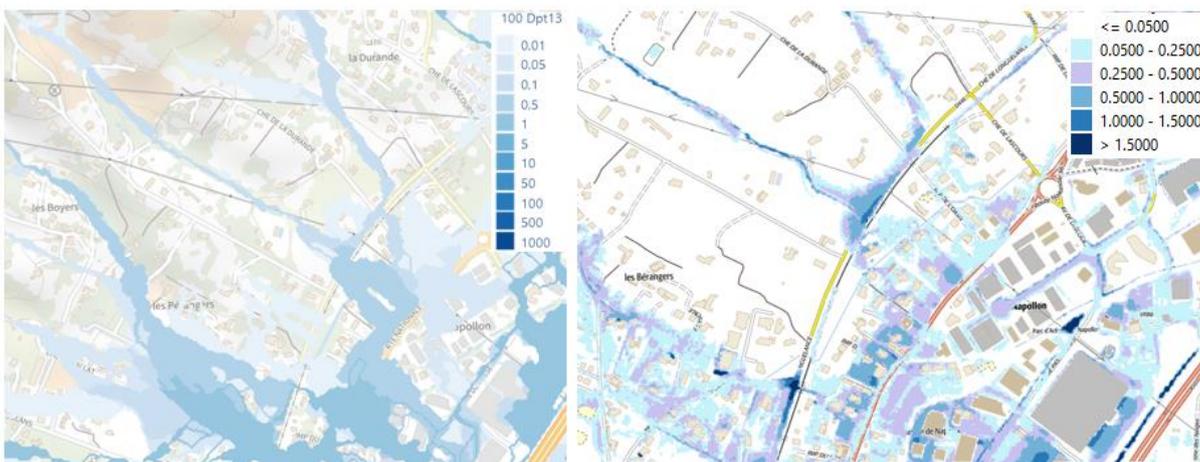
Comparaison à l'aléa issu des études antérieures

L'objectif de ce paragraphe est de comparer les résultats de la modélisation de l'aléa de référence (100 ans) aux résultats d'approches alternatives sur le territoire.

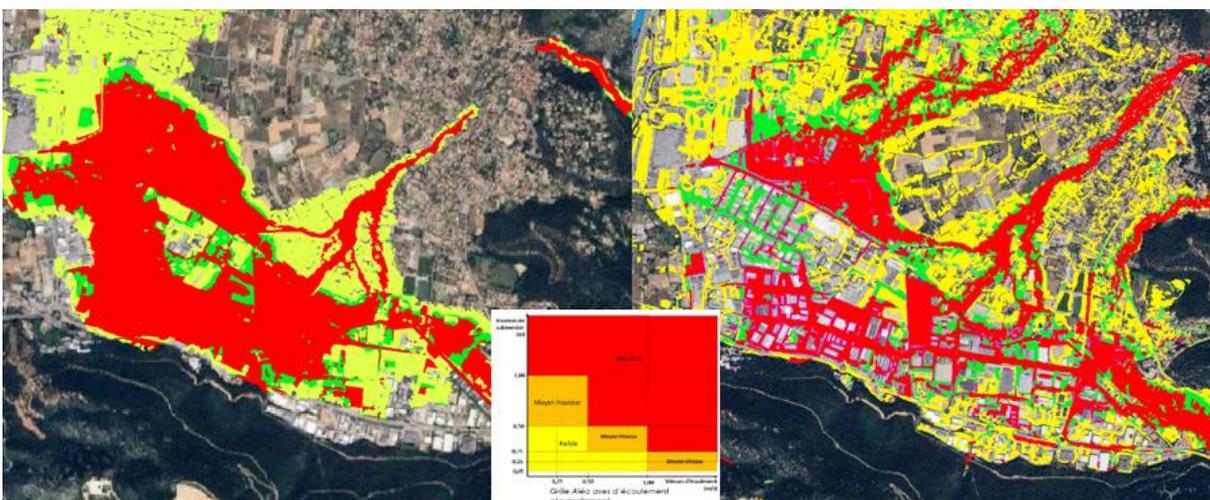
Cette comparaison se veut :

qualitative car les approches sont très différentes (full 2D, semi distribuée, approche morphologique), n'ont pas les mêmes hypothèses hydrologiques (pluie de référence, modèle pluie débit...), sont à des échelles différentes (approche régionale, cours d'eau, bassin versant), n'ont pas les mêmes hypothèses hydrauliques (prise en compte du bâti, intégration des ouvrages de passage, prise en compte du réseau...) et ne sont pas de la même époque.

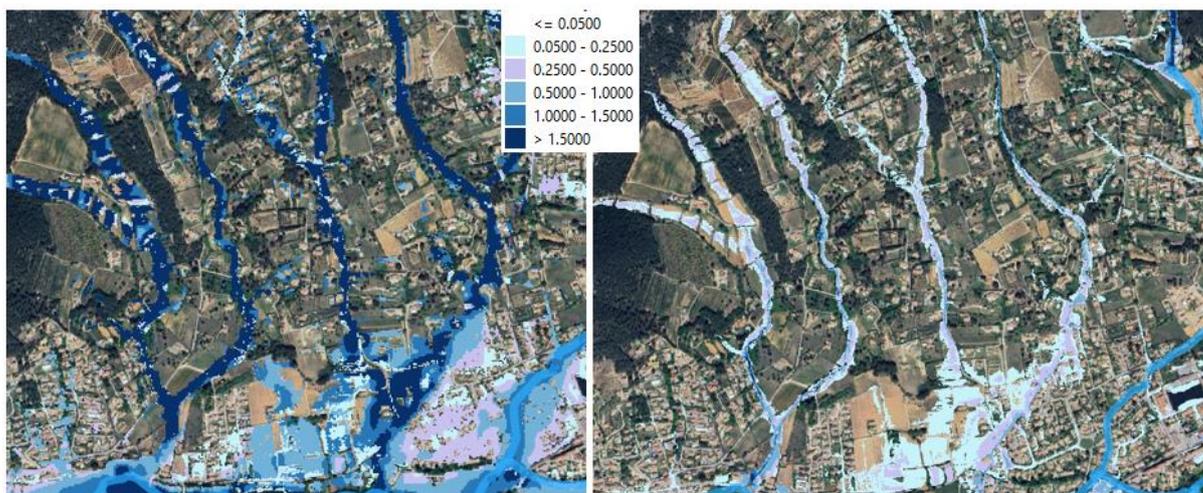
Centrée sur les études hydrauliques réalisées au droit des peits affluents de l'Huveaune et des Aygalades. Le process de modélisation retenu ne permet pas de réaliser les calculs mis en œuvre dans le cadre des études de Porté à Connaissances sur les BV de l'Huveaune, du Jarret (étude EGIS 2016) ou encore du BV Aygaldes (étude Setec).



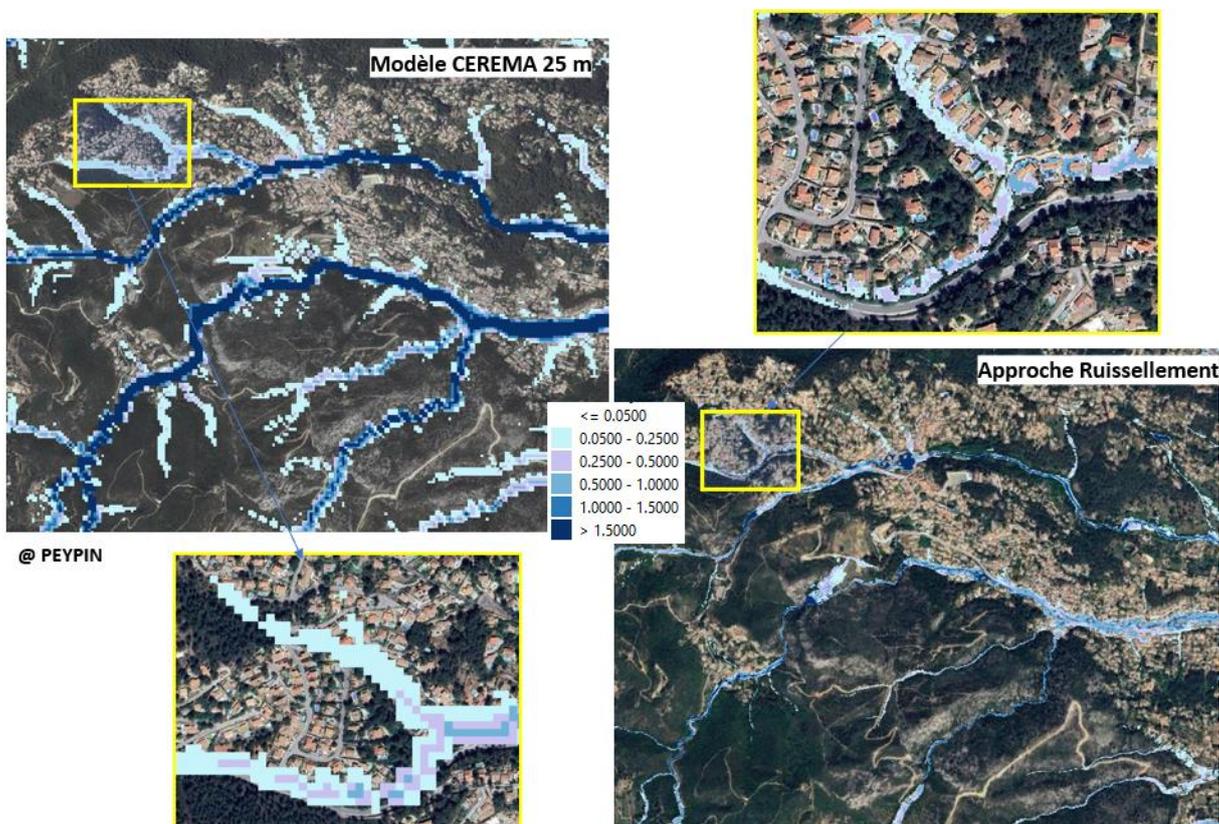
Comparaison avec les résultats de l'approche Exzeco – à gauche - (CEREMA, 2015) à Roquevaire



Comparaison avec les résultats du PAC Huveaune – à gauche- (EGIS, 2014) à Gémenos



Comparaison avec les résultats du modèle ARTELIA – à gauche – (2021) à Saint-Zaccharie



Comparaison avec les résultats du modèle grossier CEREMA – à gauche - (2022) à Peypin

Malgré la disparité des approche méthodologiques, plusieurs constats qualitatifs peuvent être fait et rassurent sur la robustesse du modèle mis en œuvre :

- Les différentes approches font ressortir des phénomènes hydrauliques similaires et cohérents : ruissellement concentré, inondation de cuvette, débordement d'axe d'écoulement,
- Le modèle Ruissellement Huveaune apporte un niveau de précision et de détail significativement plus élevé par rapport aux autres approches,
- La prise en compte du bâti dans la modélisation permet d'apporter un éclairage important pour la compréhension et l'interprétation des phénomènes et une meilleure lisibilité des résultats.



POSSIBILITES ET LIMITES

La modélisation bi-dimensionnelle des écoulements exceptionnels mise en place permet :

- **D'évaluer en tout point du territoire modélisé** l'impact de la survenue d'une pluie exceptionnelle (qui dépasse très largement la capacité des réseaux) ;
- De **délimiter les principales zones à risques pour les personnes et les biens** : axes d'écoulement et principales zones d'accumulation (cuvettes topographiques sensibles) avec une estimation de l'ordre de grandeur des hauteurs de submersion et des vitesses d'écoulement potentielles ;
- De **comprendre la dynamique d'inondation** à l'échelle d'un groupe de parcelles, d'un axe de ruissellement, d'un groupe de maisons/quartier : prise en compte de la topographie urbaine générale, de l'effet d'obstacle des bâtiments et des axes de drainage préférentiel sur voirie ;
- De **fournir des informations utiles à la gestion de crise** (ex : identification des axes de circulation coupés) **et pour l'aménagement du territoire.**

En revanche, les résultats du modèle ne permettent pas :

- De représenter les débordements le long des grands cours d'eau du territoire ;
- De simuler le fonctionnement des réseaux d'évacuation des eaux pluviales ;
- De représenter avec exactitude les inondations (emprises, hauteurs d'eau, ...) à l'échelle de chaque bâtiment / parcelle considérés individuellement (ne sont pas pris en compte par exemple : les parkings souterrains, les possibilités d'infiltration dans les bâtiments, les vides sanitaires, les ouvrages d'irrigation, les cours d'immeubles, les murs et murets...). C'est la raison pour laquelle les résultats sont présentés sous forme de classes de hauteurs et de vitesses et non de valeurs brutes.



SCENARIJ MODELISES

SCENARII MODELISES

En tout, 29 scénarii de pluie de projet ont été modélisés :

- **1 Scénario de référence :**
 - **Pluie de projet d'occurrence 100 ans, cumuls ajustés en fonction des 2 zones de pluies CT1/CT2 (durée totale 3H)**
 - **Paramètres hydrologiques conditions normales « sèches » retenus majoritairement,**
 - **Approche « remplissage » au niveau des bassin versant endoréiques de Cuges-les-Pins et Plan d'Aups Sainte Beaume⁵**
- 14 Scénarii conditions normales « sèches » :
 - Application des pluies de projet d'occurrence 100 ans, 50 ans, 20 ans, 10 ans, 5 ans, 2 ans, 100 ans + 20% (changement climatique) avec cumuls ajustés en fonction des 2 zones de pluies CT1/CT2
 - Paramètres hydrologique conditions normales « sèches » partout
- 14 Scénarii conditions défavorables « défavorables » :
 - Application des pluies de projet d'occurrence 100 ans, 50 ans, 20 ans, 10 ans, 5 ans, 2 ans, 100 ans + 20% (changement climatique) avec cumuls ajustés en fonction des 2 zones de pluies CT1/CT2
 - Paramètres hydrologique conditions défavorables « humides » partout

NB : Sans compter les pluies historiques ayant participées à la validation du modèle.

⁵ *Le remplissage des embuts a été modélisé en retenant une pluie plus longue que celle ayant servi pour caractériser l'aléa ruissellement/petits axes d'écoulement afin de s'assurer que les niveaux de replissage atteints témoignent de pluies représentatives (Durée 2 jours).*



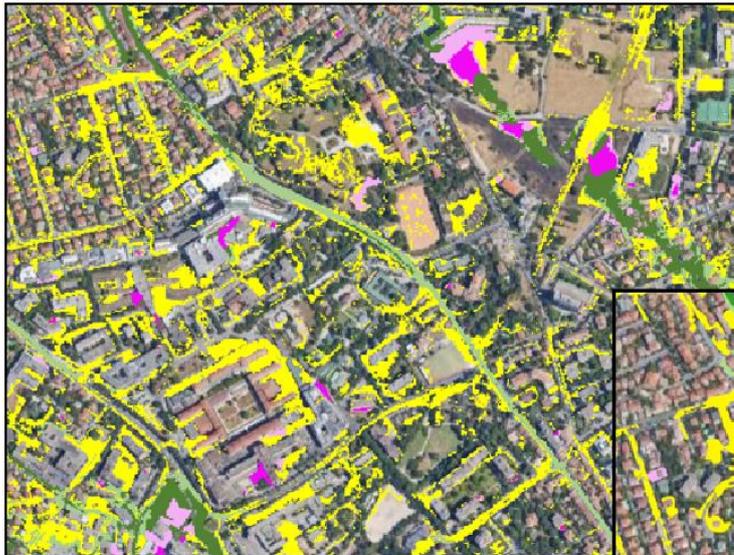
POST-TRAITEMENT DES RESULTATS POUR L'ALEA DE REFERENCE

Les résultats bruts du modèle ont fait l'objet de plusieurs étapes de filtrage et simplification afin de cartographier l'aléa de référence. La méthodologie de post traitement a fait l'objet d'un travail itératif de validation par la Métropole.

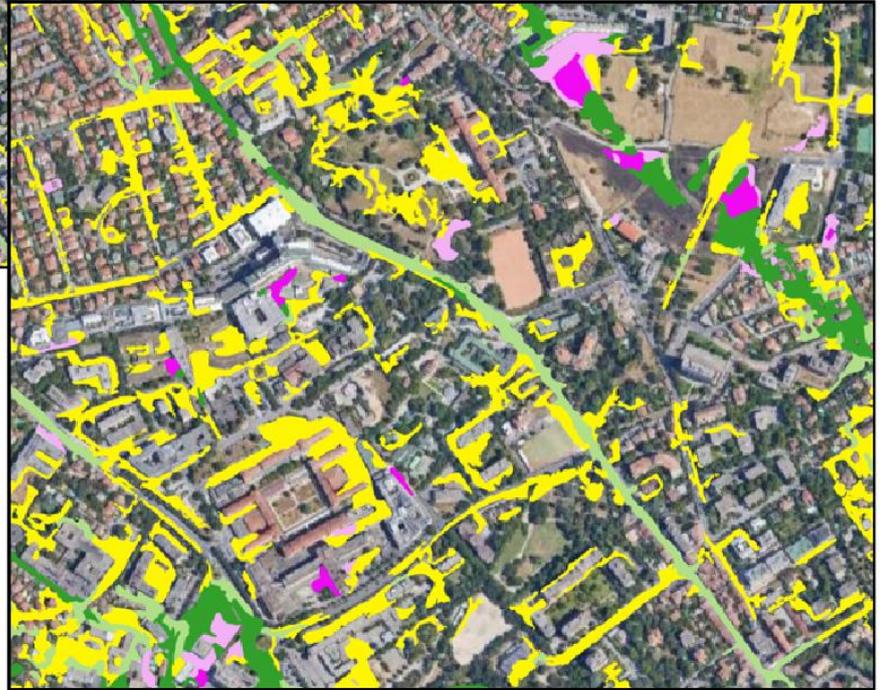
Les traitements ci-dessous ont été appliqués sur l'aléa de référence (cf. 0) issu du croisement des hauteurs maximales de submersion et des vitesses maximales d'écoulement modélisées (cf. 0).

- Afin de gagner en précision, les résultats de modélisation ont été reprojétés sur le MNT de référence selon un maillage de 2 m (résultats à Haute Résolution – mentionnée « HR » plus bas) ;
- Afin d'améliorer la visibilité des résultats, et de voir se dessiner les chemins préférentiels de ruissellement, un seuil minimal de hauteur d'eau de 5 cm a été appliqué pour leur affichage. Ce choix est justifié par le fait que cette hauteur se situe dans la marge d'incertitude du modèle et qu'une telle hauteur aura globalement un impact très limité au regard de la topographie sur le territoire et de la période de retour de l'épisode étudié ;
- Les polygones d'aléa isolés d'une superficie inférieure à 250 m² ont été supprimés afin de concentrer l'analyse sur les principales zones à risques ;
- Les petites zones d'aléas ou trous de moins de 100 m² ont été fondus dans l'aléa environnant ayant avant la plus longue frontière commune ;
- Les contours des enveloppes inondables ont fait l'objet d'un lissage pour un meilleur rendu visuel.
- Les bâtiments ont été considérés comme des obstacles étanches dans la modélisation : il n'y a donc pas de résultats sous les bâtiments.
- Afin d'assurer une continuité hydraulique dans les zones de fortes pentes, l'aléa brut (non-HR), filtré à 5 cm, a été ajouté « en fond » en aplat de couleur comme une matrice d'écoulement.
- Au droit des 2 poljés, les approches « ruissellement » et « remplissage » ont été croisées pour retenir l'aléa le plus pénalisant. Pour cela, les hauteurs de submersion maximales des deux approches ont été croisées et la hauteur maximale a été conservée. Cette hauteur a ensuite été croisée avec la vitesse maximale de l'aléa ruissellement pour cartographier l'aléa Hauteur x vitesse.

Les résultats de modélisation (hauteurs HR, vitesses) de l'aléa de référence ont fait l'objet d'un traitement simplifié : ils ont été découpés par rapport à l'emprise de l'aléa de référence pour filtrer les zones d'aléa isolé.



@ MARSEILLE 13009



Post traitement

Exemple de résultats bruts du modèle (en haut) et de résultats filtrés et lissés (en bas)



**CONSTRUCTION DES
CARTOGRAPHIES DE L'ALEA
RUISSELLEMENT**

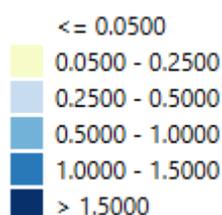
Grilles retenues pour les résultats de modélisation

La modélisation de l'événement pluvieux retenu pour caractériser le ruissellement (Pluie centennale) permet d'accéder aux hauteurs de submersion maximales ainsi qu'aux vitesses maximales d'écoulement.

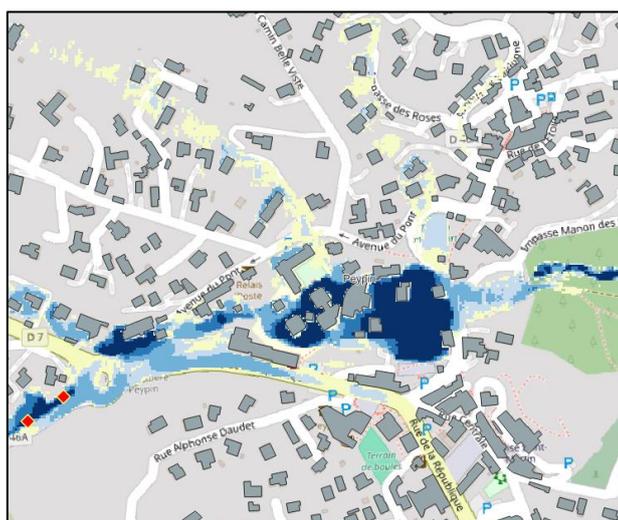
Compte tenu du type de modèle (full 2D), des hypothèses de modélisation et des marges d'incertitudes, et pour permettre une meilleure lisibilité de l'aléa, les résultats de modélisation ont systématiquement été filtrés à 5 cm.

Classes de hauteurs

Les hauteurs maximales de submersion ont été classées en 5 catégories, présentées sur la figure ci-après, et cartographiées selon ce classement.

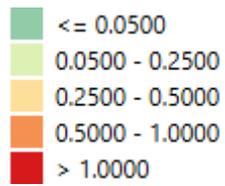


Ces classes permettent de faire ressortir les secteurs avec une hauteur d'eau importante, qui correspondent plutôt à des zones d'accumulation, et les secteurs avec une hauteur d'eau plus faible, correspondant plus à des zones de transit. La figure ci-après montre un exemple de zone d'accumulation des eaux historique.

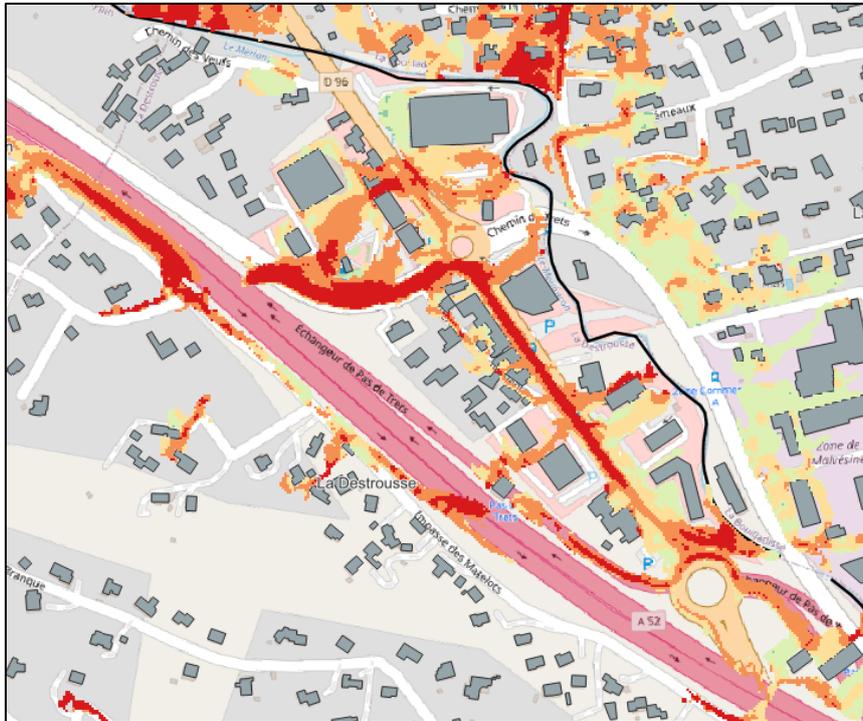


Classes de vitesses

Les vitesses d'écoulement ont quant à elle été cartographiées selon un classement en quatre catégories.



Ces classes de vitesses permettent de distinguer les zones de ruissellement, où l'eau transite rapidement, des zones d'accumulation, où elle a plutôt tendance à stagner.



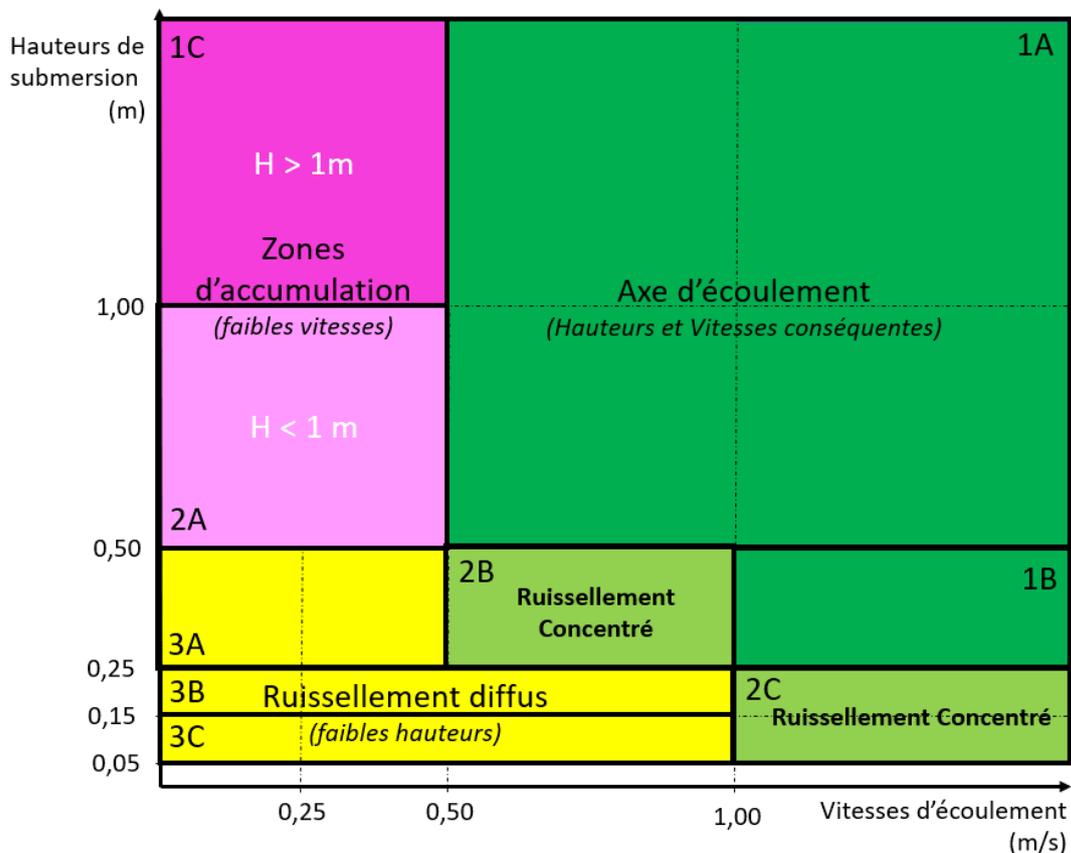
Croisement hauteurs/vitesses

La grille de croisement Hauteurs maximales de submersion / Vitesses d'écoulement a été définies de façon itérative avec le service GEMAPI de la Métropole en concertation avec la Direction Départementale des Bouches du Rhône (DDTM13).

La grille retenue permet de décrire l'aléa ruissellement / petits axes d'écoulement de façon phénoménologique :

- Les zones d'accumulation avec de fortes hauteurs et des vitesses limitées,
- Les axes d'écoulements principaux avec des hauteurs et des vitesses d'écoulement conséquentes,
- Les ruissellements concentrés, avec des vitesses importantes ou des vitesses et des hauteurs conséquentes,
- Les zones d'écoulements diffus, correspondant à des
- La matrice d'écoulement issue de l'aléa non-HR a été ajoutée en fond pour mieux appréhender les phénomènes, notamment en zone de fortes pentes, mais elle ne correspond pas à un aléa de référence et n'apparaît pas sur la grille de croisement.

Ce classement de l'aléa permet de faire ressortir les zones de danger pour les personnes en fonction des phénomènes hydrauliques potentiels (emportement de véhicules, noyades ...).



Grille phénoménologique de croisement Hauteurs/Vitesses pour l'aléa de référence

Pour rappel, l'analyse s'intéressant à l'aléa ruissellement/ petits axes d'écoulement en complémentarité de l'aléa débordement défini au cours des études de Porté à Connaissances traduites souvent sous forme de PPRI sur les territoires du Pays d'Aubagne et de l'Etoile (CT4) mais également Marseille Provence (ex CT1).

Le process retenu a été :

- Le lissage des couches d'aléa (Rasters => Vecteurs, polygones)
- L'harmonisation des informations issues d'études différentes (Huveaune/Aygalades, Etude SEPIA/Artelia/CEREMA)
- Le filtrage (manuel) des lentilles (« flaques ») d'aléa faible (secteurs où les hauteurs et vitesses calculées apparaissent faibles en moyenne une fois par siècle)
- Un travail sur les zones de confluence, jonctions avec résultats études PAC pour faire apparaître l'aléa maximum calculé pour les différents cas de figure.



ANNEXE 1 : PRESENTATION DU PROGICIEL TUFLOW

