



# ACCORD CADRE MONO ATTRIBUTAIRE A BONS DE COMMANDE - SCHEMAS DIRECTEURS AEP, EU, EP

**Phase 3A : Etude du risque pluvial par analyse  
hydrogéomorphologique - commune du Castellet**



## LE PROJET

Client	<b>Communauté d'Agglomération Sud Sainte-Baume</b>
Projet	<b>Accord cadre mono attributaire à bons de commande - Schémas directeurs AEP, EU, EP</b>
Intitulé du rapport	<b>Phase 3A : Etude du risque pluvial par analyse hydrogéomorphologique - commune du Castellet</b>

## LES AUTEURS

	<p>Cereg Territoires – 260 avenue du Col de l'Ange – 13420 GEMENOS                  Tel : 04.42.32.32.65 - Fax : 04.42.32.32.66 - aubagne@cereg.com                  www.cereg.com</p>
---	--

Réf. Cereg - 2020-CT-000188

Id	Date	Établi par	Vérfié par	Description des modifications / Evolutions
V1	01/03/2021	Gauthier LERICHE	Antonin Montané	Version 1



## TABLE DES MATIERES

<b>A. CADRE GÉOGRAPHIQUE ET METHODOLOGIQUE.....</b>	<b>5</b>
A.I. SITUATION DE LA COMMUNE.....	6
A.II. CADRE GÉOLOGIQUE .....	7
A.III. CADRE GÉOMORPHOLOGIQUE .....	8
A.IV. LE RISQUE INONDATION SUR LA COMMUNE .....	10
A.IV.1. Les arrêtés « CatNat » inondation sur la commune.....	10
A.IV.2. Les données géographiques disponibles relatives à l'aléa inondation .....	10
A.V. LA METHODE HYDROGEOMORPHOLOGIQUE.....	12
A.V.1. Origine de la méthode .....	12
A.V.2. Principes de la méthode.....	12
A.V.3. Outils utilisés pour la cartographie hydrogéomorphologique .....	14
<b>B. ANALYSE DES ZONES INONDABLES.....</b>	<b>15</b>
B.I. DETERMINATION DE L'INONDABILITE .....	16
B.II. DIFFERENCIATION DES TYPES D'INONDATION .....	16
B.II.1. Les inondations par débordement.....	16
B.II.2. Les inondations par ruissellement .....	17
<i>B.II.2.1. Identification des zones de ruissellement.....</i>	<i>17</i>
<i>B.II.2.2. Analyse des secteurs problématiques en matière de ruissellement .....</i>	<i>18</i>
B.III. CONCLUSION SUR LES ZONES INONDABLES .....	22

## PREAMBULE

Dans le cadre de la réalisation du Schéma Directeur des Eaux Pluviales sur la commune du Castellet, Cereg réalise une cartographie hydrogéomorphologique des zones inondables à l'échelle du territoire communal. Ces données uniquement de l'aléa ruissellement.

# A. CADRE GÉOGRAPHIQUE ET METHODOLOGIQUE



## A.I. SITUATION DE LA COMMUNE

Située dans le département du Var, la commune du Castellet fait partie de la Communauté d'Agglomération Sud Sainte-Baume. Située à vingt kilomètres à l'ouest de Toulon, cette commune est traversée par un des cours d'eau majeurs du département, l'Aren, qui se jette dans la méditerranée au niveau de la baie de Bandol. Trois autres cours d'eau sont présents sur cette commune : le Grand Vallat, la Ragle et la Jaume.

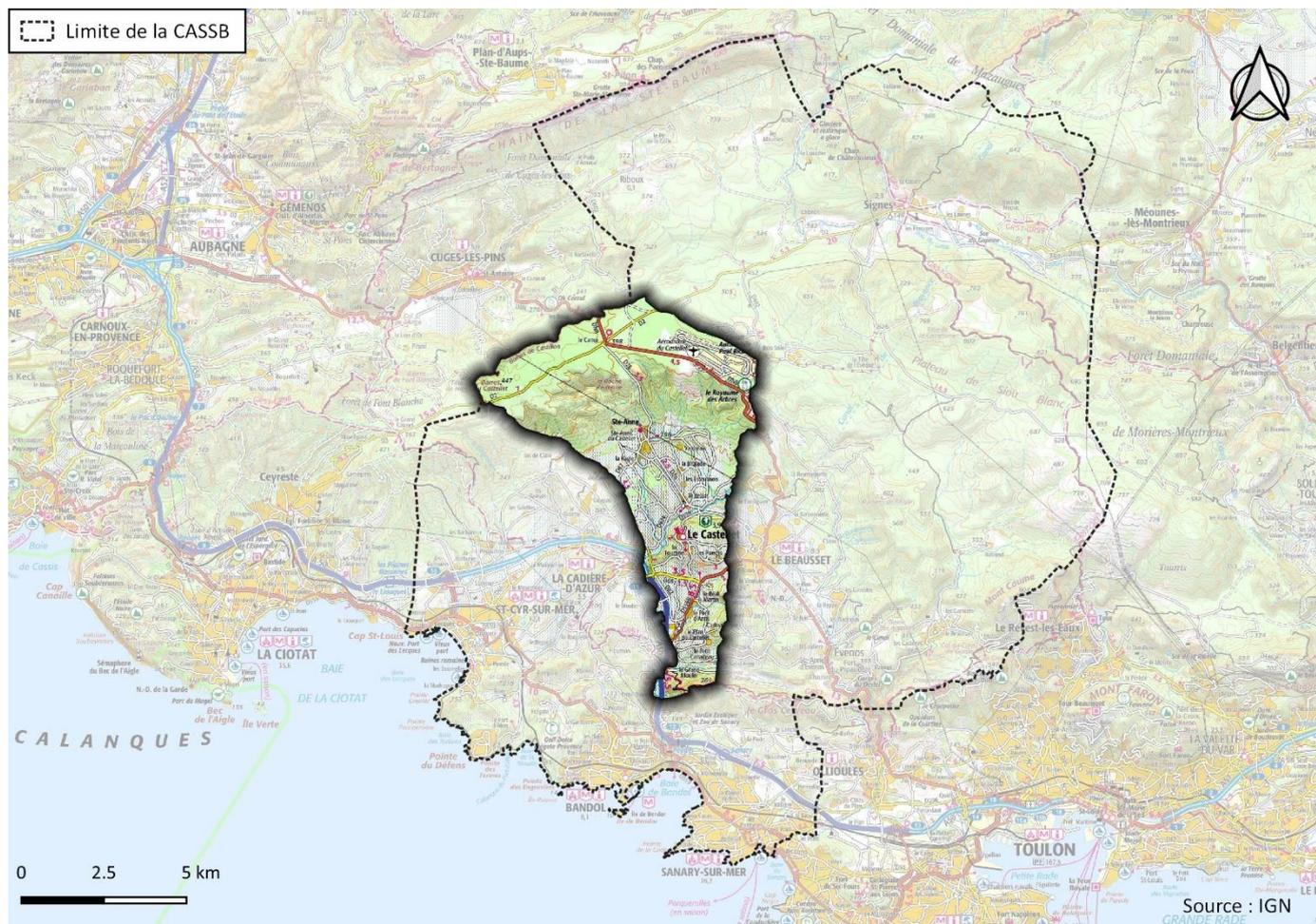


Figure 1 : Localisation de la commune du Castellet (source : IGN)

## A.II. CADRE GÉOLOGIQUE

La commune montre une géologie relativement hétérogène (Figure 2). Le nord de la commune présente des formations calcaires ainsi que des formations gréseuses. On observe ensuite des formations marneuses dans lesquelles s'intercalent des alluvions (Fz et Fy) et des colluvions (PLy) au niveau des cours d'eau. Le reste de la commune présente des formations variées intercalées et composées de calcaires, de grès, de marnes, d'alluvions, de colluvions ou encore d'éboulis.

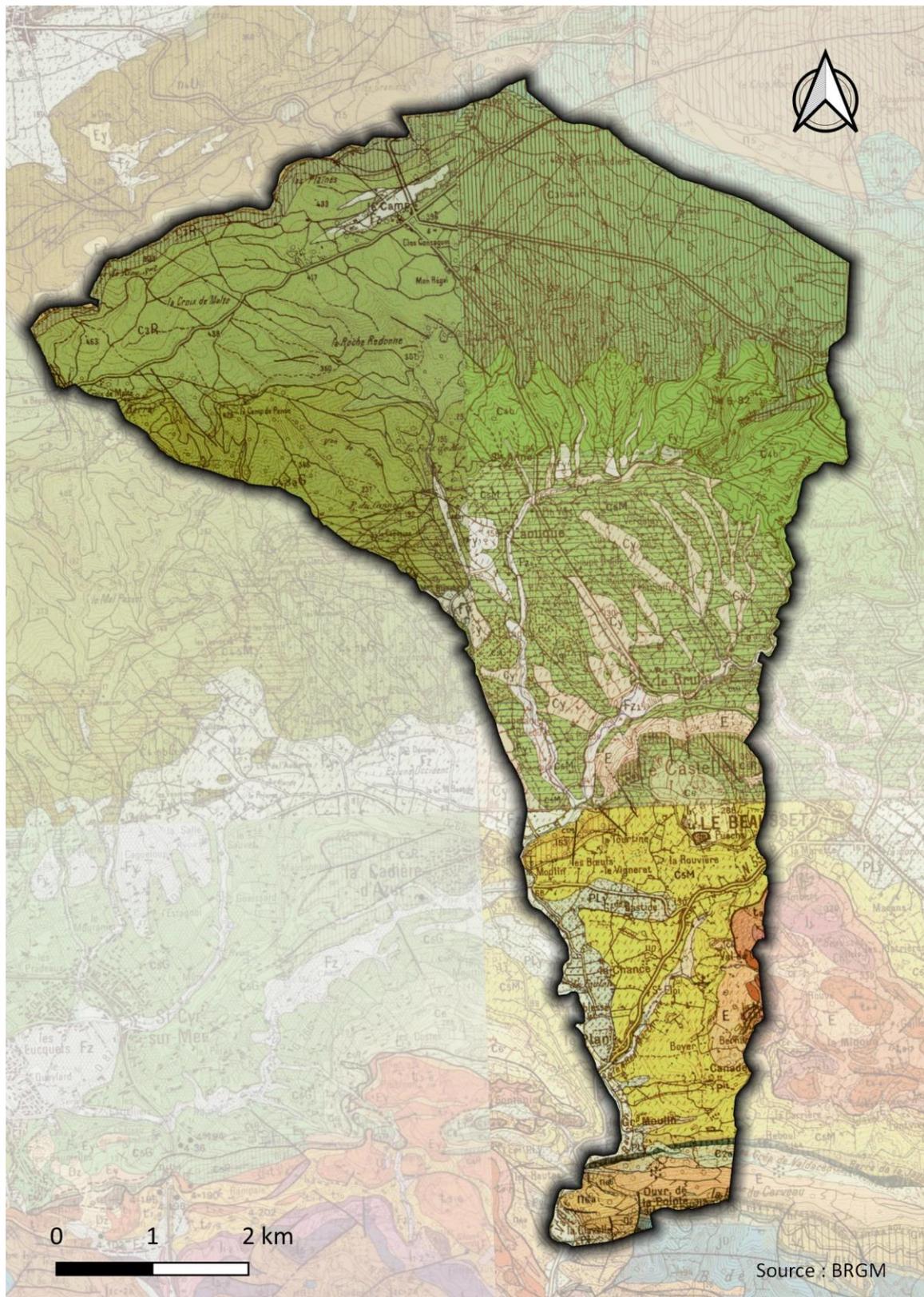


Figure 2 : Carte géologique de la commune du Castellet (source : BRGM)

### A.III. CADRE GÉOMORPHOLOGIQUE

Du fait de l'hétérogénéité de la géologie sur la commune, on constate également une morphologie hétérogène des cours d'eau. Dans la partie nord de la commune où l'on trouve des calcaires, les cours d'eau sont généralement bien encaissés avec un profil en « V » (Figure 3). Au niveau des alluvions récentes, les cours d'eau ont majoritairement un profil de vallées en « U » (Figure 4). Dans cette zone, les limites des zones inondables sont moins nettes, notamment du fait de l'imbrication des alluvions (zone inondable) et des colluvions (zone non inondable). En dehors des zones composées de calcaires, la morphologie des cours d'eau est hétérogène en raison de la présence d'un grand nombre formations variées intercalées.

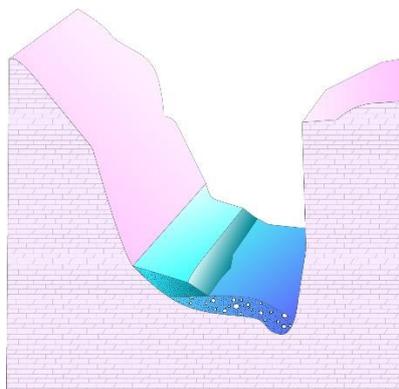


Figure 3 : Vallon en « V » (Modifié d'après Masson, 1996)

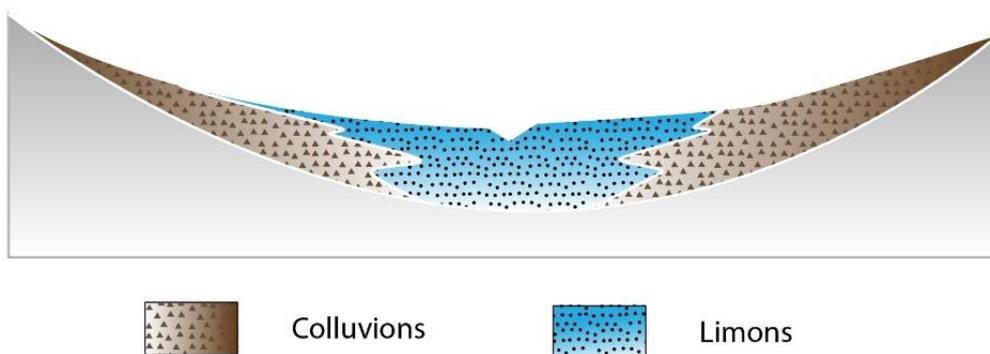


Figure 4 : Vallon en « U » (Modifié d'après Masson, 1996)

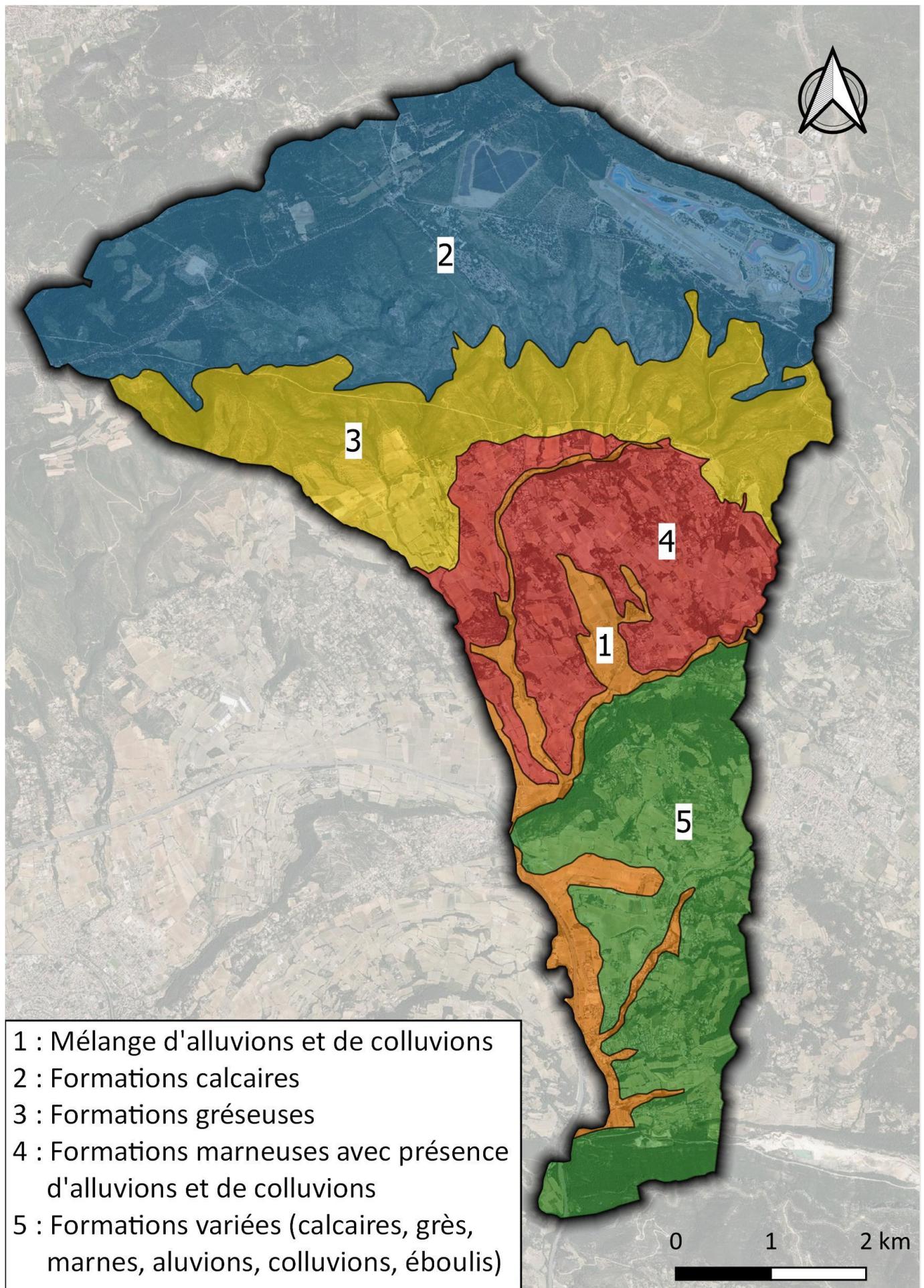


Figure 5 : Carte du contexte géomorphologique de la commune du Castellet (Réalisation : Cereg 2020 ; Source de données : BRGM)

## A.IV. LE RISQUE INONDATION SUR LA COMMUNE

### A.IV.1. Les arrêtés « CatNat » inondation sur la commune

La commune est concernée par 6 arrêtés de catastrophes naturelles (dits « CatNat ») pour l'aléa « inondation et coulée de boue ». Ces arrêtés sont listés dans le tableau ci-dessous.

Code national CATNAT	Début le	Fin le	Arrêté du
<b>83PREF19820009</b>	29/09/1982	30/09/1982	24/12/1982
<b>83PREF19940011</b>	22/09/1993	23/09/1993	08/03/1994
<b>83PREF19990010</b>	17/01/1999	18/01/1999	23/02/1999
<b>83PREF20020009</b>	26/08/2002	26/08/2002	29/10/2002
<b>83PREF20090014</b>	14/12/2008	15/12/2008	17/04/2009
<b>83PREF20190130</b>	22/10/2019	23/10/2019	30/10/2019

Figure 6 : Arrêtés « CatNat » inondation et coulée de boue sur la commune du Castellet

### A.IV.2. Les données géographiques disponibles relatives à l'aléa inondation

Sur la commune, deux données sont disponibles pour l'aléa inondation : le PPRi et l'AZI. Le PPRi, approuvé en 2017, repose sur des modélisations hydrauliques ainsi que sur une cartographie hydrogéomorphologique plus fine car allant au-delà de la crue centennale. Publié en Janvier 2012, l'AZI permet quant à lui une connaissance des phénomènes d'inondations susceptibles de se produire par débordement de cours d'eau et sert de base pour la réalisation du PPRi. L'AZI n'a pas été représenté sur la carte des données car il est largement recouvert par le PPRi de la commune.

Dans le cadre de cette étude, nous produisons une cartographie des zones inondables par approche hydrogéomorphologique, qui vient compléter le PPRi existant. Nous avons cherché en particulier à prendre en compte, de manière plus fine, le ruissellement issu des différents vallons de la commune.

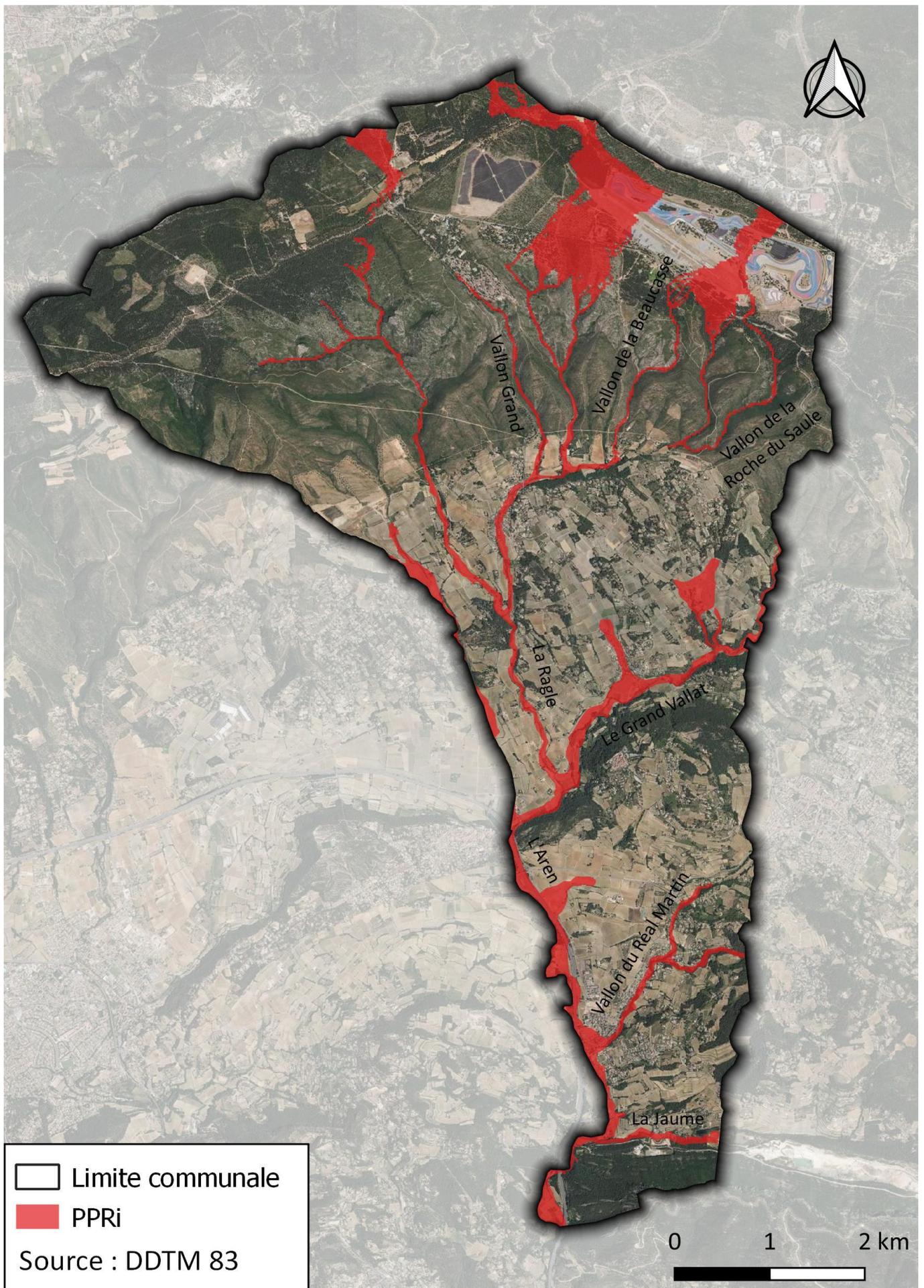


Figure 7 : Le PPRi sur la commune du Castellet

## A.V. LA METHODE HYDROGEOMORPHOLOGIQUE

Tel que précisé en préambule du présent rapport, c'est la méthode hydrogéomorphologique qui a été retenue pour l'identification des zones inondables.

### A.V.1. Origine de la méthode

Cette dernière a été mise au point dans les années 1980 par des experts du ministère de l'Équipement, des scientifiques et des bureaux d'études privés. Elle est reconnue et validée depuis 1996 par les différents ministères en charge de la prévention des inondations et codifiée à travers un guide méthodologique : « Cartographie des zones inondables, Approche hydrogéomorphologique, 1996, Éditions Villes et Territoires, METT-MATE ». Elle trouve alors sa place dans l'ingénierie appliquée aux cours d'eau. Mise en œuvre à grande échelle au niveau national dans le cadre de la nouvelle génération des Atlas de Zones Inondables (AZI), elle est aujourd'hui recommandée pour la réalisation des PPRI tant pour les débordements de cours d'eau que pour le ruissellement.

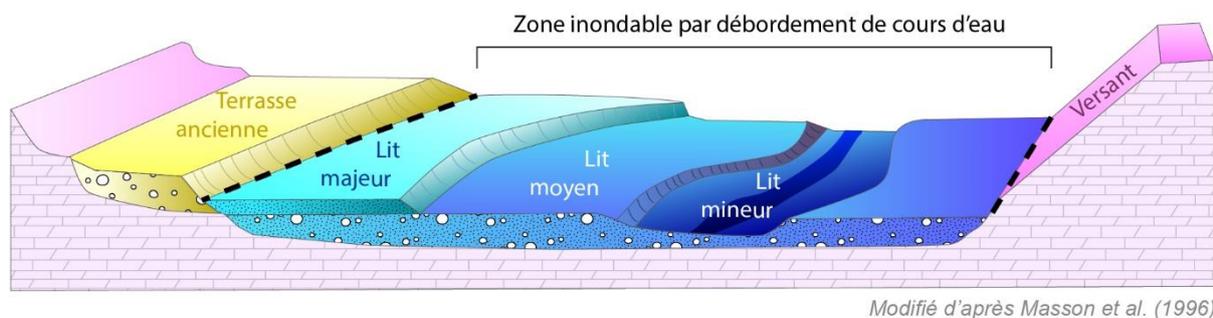
Plusieurs grandes crues en 1992 (Vaison-la-Romaine), 1993 (Pertuis- Vaucluse), 1994 (Coulon-Calavon), 1999 (Aude) et 2002 (Gard) ont rempli les plaines alluviales et validé ainsi l'utilisation de la méthode pour délimiter les zones inondables actuelles.

La cartographie qui en résulte présente la zone inondable maximale atteignable lors des événements pluvieux exceptionnels. Les aménagements anthropiques, les protections hydrauliques ont une incidence marginale sur la zone d'expansion des crues lors de ce type d'évènements. Ils sont ainsi considérés comme « transparents » dans cette approche des zones inondables.

### A.V.2. Principes de la méthode

Il s'agit d'une **approche géographique** qui étudie le fonctionnement naturel des cours d'eau en analysant la structure des vallées et en particulier les formes fluviales mises en place au fur et à mesure des crues successives. Elle produit des cartes représentant les emprises naturelles des zones inondables, accompagnées d'analyses hydrogéomorphologiques du fonctionnement des cours d'eau. Un spécialiste, le géomorphologue, observe les reliefs des fonds de vallée à partir de photographies aériennes, puis sur le terrain. De ces observations, il déduit le fonctionnement des cours d'eau et les limites de leurs zones inondables. Par rapport à d'autres méthodes de diagnostic des zones inondables, elle correspond à des phénomènes qui ont laissé leur empreinte sur le terrain. Elle facilite ainsi l'appropriation des résultats par ses utilisateurs.

C'est une approche qualifiée de « naturaliste », car elle **se fonde principalement sur l'observation et l'interprétation du terrain** naturel. Une plaine alluviale est composée de plusieurs unités hydrogéomorphologiques : ce sont les différents lits topographiques que la rivière a façonnés dans le fond de vallée au fil des siècles, au fur et à mesure des crues successives. Ces lits résultent d'une combinaison entre les phénomènes d'accumulation des sédiments et leur érosion. En effet, chaque crue dépose des matériaux dans certains secteurs, tandis qu'elle érode ailleurs. C'est le rapport entre ces deux phénomènes qui préside au façonnement progressif des différentes unités. L'accumulation dans le temps des sédiments construit les lits hydrogéomorphologiques tandis que l'érosion marque leurs limites (talus) et modèle leur surface. L'étude de ces unités hydrogéomorphologiques constitue la base de la méthode. Elles sont des témoins des crues passées et récentes dont elles traduisent le fonctionnement et l'extension, ce qui permet d'identifier les zones inondables correspondantes.



Modifié d'après Masson et al. (1996)

Figure 8: Identification des unités spatiales homogènes modelées par les différentes crues et séparées par des discontinuités topographiques (Masson et al., 1996)

Tout comme pour le débordement de cours d'eau, l'identification de zones inondables par ruissellement en utilisant une approche hydrogéomorphologique, s'appuie sur la topographie (recherche de talus, de dépressions) et de sédimentologie (impossible en zone urbaine). En zone rurale, la présence d'espèces hygrophiles (peupliers, saules...) peut également être un indicateur d'une zone de ruissellement, par opposition avec les zones non inondables plus arides.

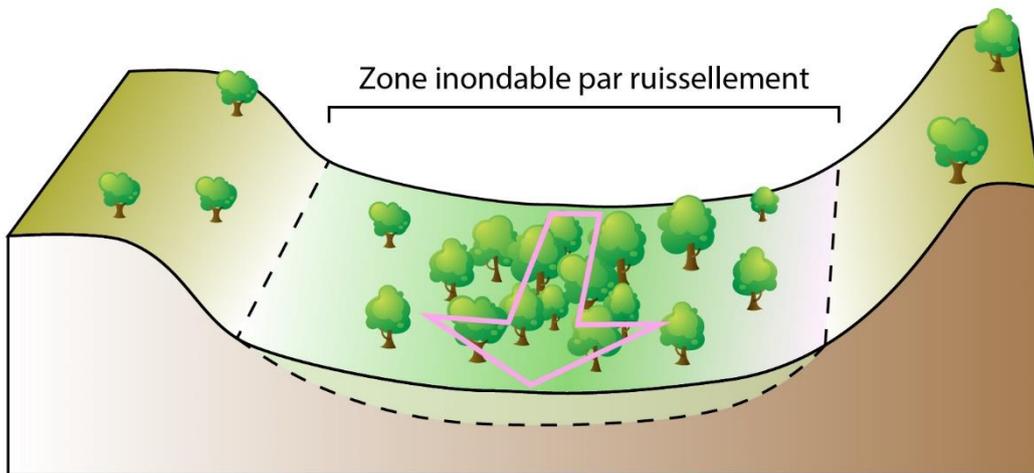


Figure 9 : Identification d'une zone de ruissellement concentré par approche hydrogéomorphologique

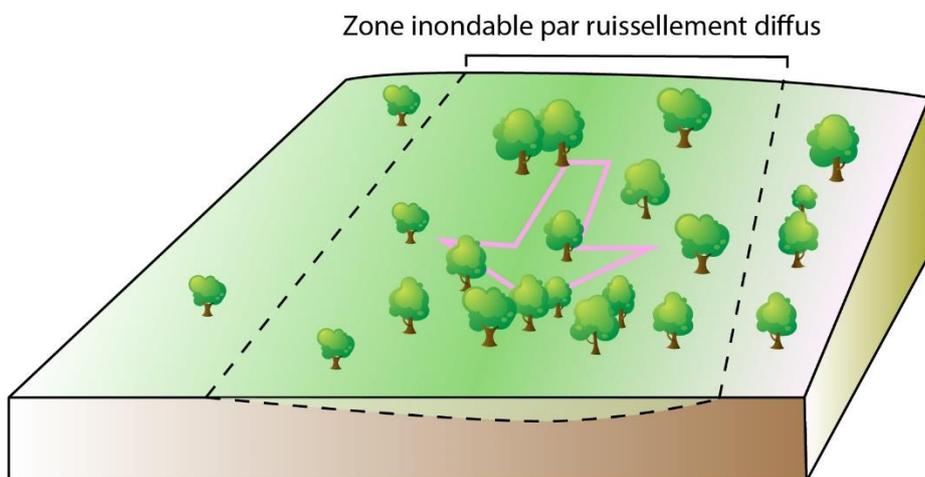


Figure 10 : Identification d'une zone de ruissellement diffus par approche hydrogéomorphologique

## A.V.3.Outils utilisés pour la cartographie hydrogéomorphologique

Pour aboutir à une cartographie hydrogéomorphologique pertinente, nous combinons trois approches des zones inondables, qui se complètent (Figure 11). La photo-interprétation permet de comprendre les morphologies de manière plus « naturelle », en ayant un regard direct sur les zones inondables. L'utilisation du MNT RGE ALTI de l'IGN permet de vérifier la photo-interprétation, notamment au regard de la microtopographie, mais aussi de calculs de superficies drainées. Enfin, les expertises de terrain permettent de valider ou de modifier les limites de zones inondables identifiées grâce à la photo-interprétation et au MNT.

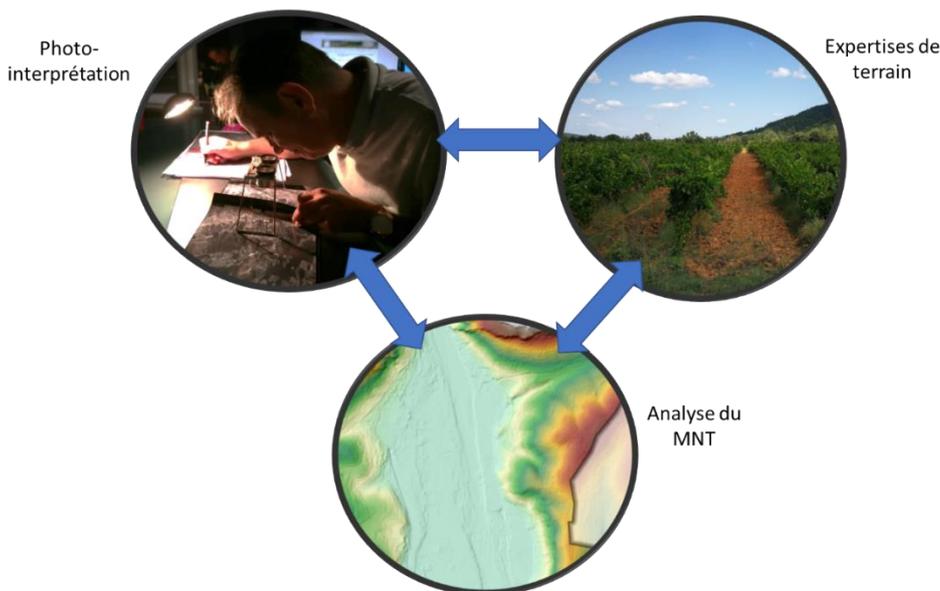


Figure 11 : Les outils de l'interprétation hydrogéomorphologique

Dans l'optique d'améliorer notre compréhension des zones inondables, mais aussi la précision de nos cartes, nous travaillons avec des tablettes tactiles qui nous permettent de consulter les cartes sous format SIG directement sur le terrain. Nous utilisons pour cela l'application Qfield (Figure 12), compatible avec le logiciel Qgis.

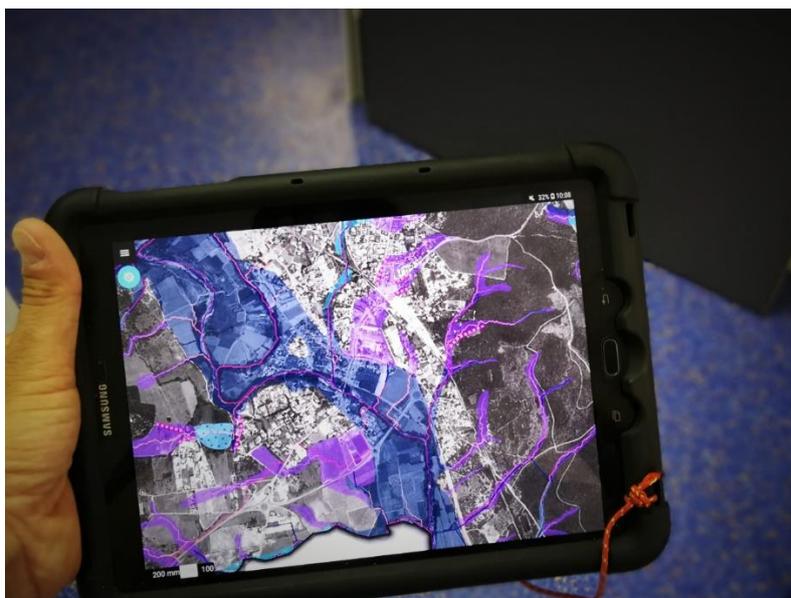


Figure 12 : Cartographie des zones inondables sur la tablette de terrain

# B. ANALYSE DES ZONES INONDABLES



## B.I. DETERMINATION DE L'INONDABILITE

Comme indiqué au chapitre précédent, la cartographie des unités hydrogéomorphologiques permet l'identification de la zone inondable des différents cours d'eau. Les cartes ont été établies suivant le guide méthodologique du Ministère pour la cartographie des zones inondables<sup>1</sup>. On trouvera dans ce guide un large développement sur les modalités techniques permettant l'identification des zones inondables par approche hydrogéomorphologique. Les principaux points à retenir sont qu'il existe divers critères observables sur le terrain permettant d'identifier les différentes unités géomorphologiques d'une plaine alluviale fonctionnelle et de les délimiter entre elles et par rapport à l'encaissant :

- La morphologie est le plus déterminant de ces critères. Son analyse permet d'interpréter la topographie et la microtopographie du milieu alluvial ; elle porte sur les caractéristiques de surface de chaque unité, et sur les contacts entre unités.
- Des critères secondaires (sédimentologie et occupation des sols) permettent de vérifier et de compléter l'analyse, en particulier en cas de doute, en multipliant les indices significatifs et concordants. Ainsi, la nature des formations superficielles constitutives de chaque unité résulte du fonctionnement hydraulique propre de celle-ci et constitue dans de nombreux cas un critère d'identification fiable. De même, l'occupation des sols, largement conditionnée par les caractéristiques pédologiques, hydrologiques et hydrogéologiques des unités, fournit des indices indirects pour l'identification de celles-ci.

Cette détermination s'est traduite par la réalisation d'une cartographie des zones inondables au 1/5 000<sup>ème</sup>.

## B.II. DIFFERENCIATION DES TYPES D'INONDATION

### B.II.1. Les inondations par débordement

Les inondations par débordement concernent les plaines alluviales avec un lit mineur constitué. Généralement, lors des événements pluviaux intenses, le cours d'eau sort de son lit mineur pour occuper son lit majeur. Le niveau de l'eau augmente et la rivière déborde alors de sa situation habituelle. Le cours d'eau peut alors envahir toute ou partie de sa plaine alluviale suivant l'importance de la crue. Ces inondations par débordement témoignent généralement d'une dynamique significative des crues avec dans le cas des grandes crues et des crues exceptionnelles des hauteurs et des vitesses élevées.

Il est considéré comme débordement de cours d'eau toute zone inondable dont la superficie drainée est supérieure à 1 km<sup>2</sup>. Dans le cas de la commune du Beausset, seuls les cours d'eau suivants sont concernés par du débordement de cours d'eau :

- L'Aren
- Le Grand Vallat
- La Ragle
- La Jaume

Le cours d'eau du Grand Vallat résulte de la confluence du Gourganon et de la Daby sur la commune du Beausset. Il traverse la commune du Castellet d'est en ouest et prend le nom « Aren » lors de sa confluence avec son principal affluent, la Ragle, sur la commune du Castellet. Ce fleuve côtier se jette en méditerranée au niveau de la baie de Bandol.

Les nombreux ruisseaux intermittents des vallons des collines du Castellet se rejoignent et forment la Ragle qui draine l'essentiel de la partie nord du territoire. Ce cours d'eau traverse ensuite la plaine avant de confluer avec le Grand-Vallat plus au sud pour former l'Aren.

La Jaume est un ruisseau qui prend sa source sur la commune du Beausset et qui afflue vers l'Aren au niveau de la commune de La Cadière-d'Azur.

**Tous ces cours d'eau ont déjà été pris en compte dans le PPRI. La présente étude ne comprend donc aucune nouvelle zone inondable par débordement de cours d'eau.**

<sup>1</sup> Approche hydrogéomorphologique. 1996. Éditions Villes et Territoires. METT-MATE

## B.II.2. Les inondations par ruissellement

### B.II.2.1. Identification des zones de ruissellement

Une inondation par ruissellement est provoquée par les seules précipitations tombant sur les zones urbaines, et (ou) sur les bassins périphériques naturels ou ruraux de faible taille. Ces ruissellements empruntent un réseau hydrographique naturel (ou artificiel) à débit non permanent ou à débit permanent très faible et sont ensuite évacués quand cela est possible, pour les petites crues uniquement, par le système d'assainissement de la ville, ou par la voirie.

Ce type d'inondation affecte indifféremment des zones naturelles et rurales où la structuration géomorphologique est encore bien marquée malgré la petite taille des bassins versants concernés. Il concerne également des zones plus fortement artificialisées comme les zones urbanisées où la morphologie d'origine est discontinue, masquée, ou a parfois disparu.

Elles peuvent en première analyse passer inaperçues, mais sont en général parfaitement identifiables au moyen de la photo-interprétation, de l'observation de terrain. En effet, dans la majorité des cas, les structures morphologiques sont encore suffisamment présentes pour être révélées par l'approche hydrogéomorphologique. Dans les secteurs ruraux, les aménagements agricoles ont eu tendance plutôt à s'adapter aux structures géomorphologiques. Dans les secteurs à forte urbanisation, les transformations du terrain sont importantes, mais on constate que les grandes structures topographiques sont préservées.

Nous rappelons qu'est considéré comme ruissellement tout écoulement concentré dont la superficie drainée est inférieure à 1 km<sup>2</sup>. Sur la commune du Beausset, les vallons identifiés comme inondations par ruissellement qui méritent un commentaire compte tenu des enjeux en présence sont :

- Les Vallons de Fournier
- Le Vallon de Capucine
- Le Vallon de l'Estournois
- Le Vallon de Saint-Éloi

## B.II.2.2. Analyse des secteurs problématiques en matière de ruissellement

### B.II.2.2.1. Les vallons de Fournier

Cet ensemble de vallons se situe dans la partie nord de la commune entre le chemin de la chapelle et la RD26. La partie amont de ces vallons se situe dans des zones de garrigues sans enjeux avec une largeur moyenne de 20 m. Plus en aval, un vallon périphérique rejoint le principal dans une zone moins encaissée avec une largeur d'environ 30 m. Des habitations de ce lotissement se trouvent dans l'axe de ruissellement, certaines étant même équipées de batardeaux afin de se prémunir contre le ruissellement.



Figure 13 : À gauche, l'axe de ruissellement du vallon du Fournier / à droite, photo de batardeau dans le lotissement

En aval du lotissement, l'axe de ruissellement traverse la RD87 avant de rejoindre le fossé situé en contrebas de cette dernière. Les écoulements ne touchent aucun enjeu sur cette partie et convergent ensuite avec le PPRi de la Ragle.

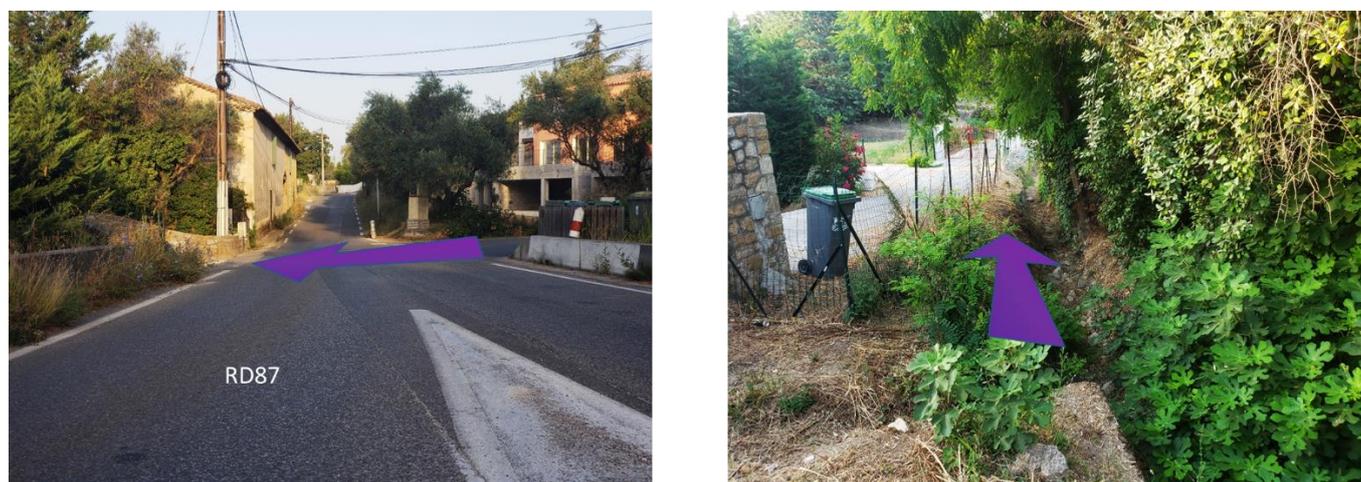


Figure 14 : À gauche, l'axe de ruissellement traversant la RD87 / à droite, vue vers l'aval de l'axe de ruissellement en aval de la RD87

### B.II.2.2.2. Le vallon de Capucine

Ce vallon est situé à l'ouest de la commune, à proximité de la limite communale avec la Cadière-d'Azur. Avec une partie naturelle à l'amont, la zone de ruissellement est concentrée avec une largeur limitée à une dizaine de mètres.

Plus en aval, cette zone de ruissellement s'élargit au-dessus de parcelles agricoles. Plusieurs remblais sont présents du fait d'une activité de traitement de matériaux. Le remaniement de la topographie de ce secteur ne permet pas la délimitation nette des talus.



Figure 15 : Zone de ruissellement du vallon de Capucine

Il est à noter que des débordements se produisant sur le vallon du Cannet à l'est (Figure 16) peuvent rejoindre la zone du ruissellement du vallon de Capucine.



Figure 16 : Vue vers l'amont du vallon du Cannet à l'est du vallon de Capucine

### B.II.2.2.3. Le vallon de l'Estournois

Le vallon de l'Estournois est situé au nord du hameau du Brûlat, dans l'axe de la RD26. La zone de ruissellement est assez large (jusqu'à 150 m) du fait de la configuration en « U », et donc très évasée, du vallon.

Traversant des parcelles agricoles, nous n'avons pas observé la présence d'enjeux dans cette zone. Les écoulements rejoignent plus en aval la zone PPRi commençant à l'entrée du hameau, et continuant sur le Grand Vallat dans lesquelles se trouvent des bâtiments.

Il est à noter que des écoulements supplémentaires arrivent sur cette zone de ruissellement depuis un vallon identifié au nord du cimetière.



Figure 17 : Vue sur l'axe de ruissellement de l'Estournois

#### B.II.2.2.4. Le vallon de Saint-Éloi

Ce vallon se situe au sud-ouest de la commune, à proximité de l'A50.

Sur sa partie amont, il est au milieu de parcelles agricoles (vignes) avec une zone de ruissellement concentré d'une largeur de 65 m. Plusieurs canaux sont présents à proximité, concentrant les écoulements jusqu'à un cadre au niveau du chemin des Fangues.

En aval de ce chemin des Fangues, les limites de la zone de ruissellement deviennent moins marquées, notamment du fait d'aménagements (stade d'athlétisme et collège le Vigneret). Plusieurs maisons et un bâtiment du collège sont situés dans cette zone de ruissellement diffus.



Figure 18 : À gauche, l'axe de ruissellement au milieu des vignes / à droite, vue sur le cadre en amont du chemin des Fangues

## B.III.CONCLUSION SUR LES ZONES INONDABLES

À l'issue de cette étude, voici les points principaux à retenir :

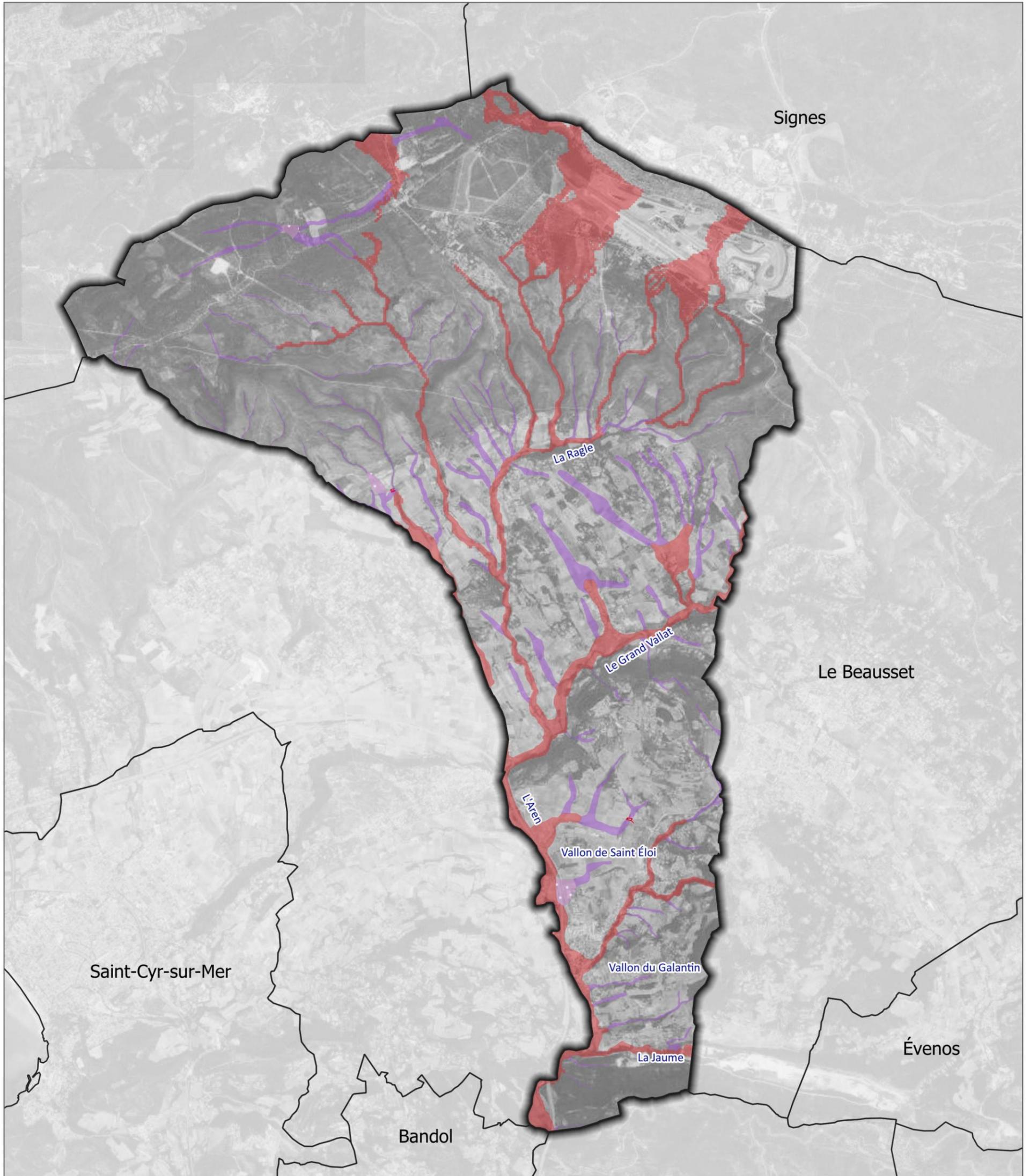
- Compléments effectués au PPRI avec les apports périphériques provenant des vallons identifiés ;
- Des enjeux identifiés en zone de ruissellement principalement sur la partie nord de la commune près des lieux-dits de Saint-Anne-du-Castellet et les Faramberts.



# Communauté d'Agglomération Sud Sainte-Baume

## Phase 3A : SDEP Le Castellet

### Carte HGM du ruissellement



#### Légende

-  Limite communale
-  PPRi (zonage indifférencié)
-  Zones inondables
-  Ruissellement concentré
-  Ruissellement diffus
-  Remblai surfacique en zone inondable



0 500 1,000 m



Carte élaborée par Cereg le 01/03/2021.  
Source : BD ADMIN EXPRESS, BD ORTHO - IGN / DDTM 83

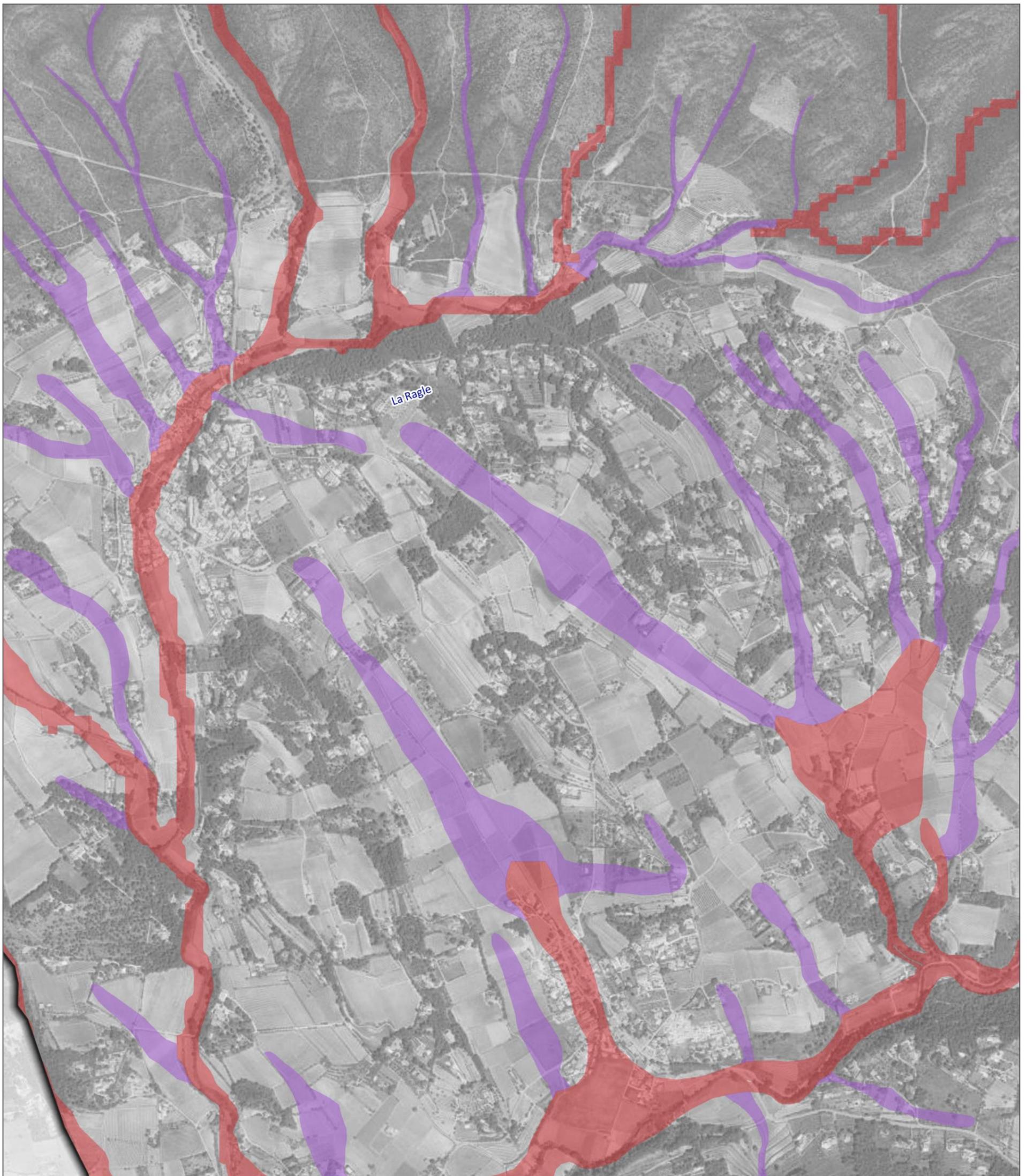
Figure 19 : Cartographie des zones inondables



## Communauté d'Agglomération Sud Sainte-Baume

### Phase 3A : SDEP Le Castellet

### Carte HGM du ruissellement - zoom sur le centre urbain de la commune



#### Légende

-  Limite communale
-  PPri (zonage indifférencié)
- Zones inondables**
-  Ruissellement concentré
-  Ruissellement diffus

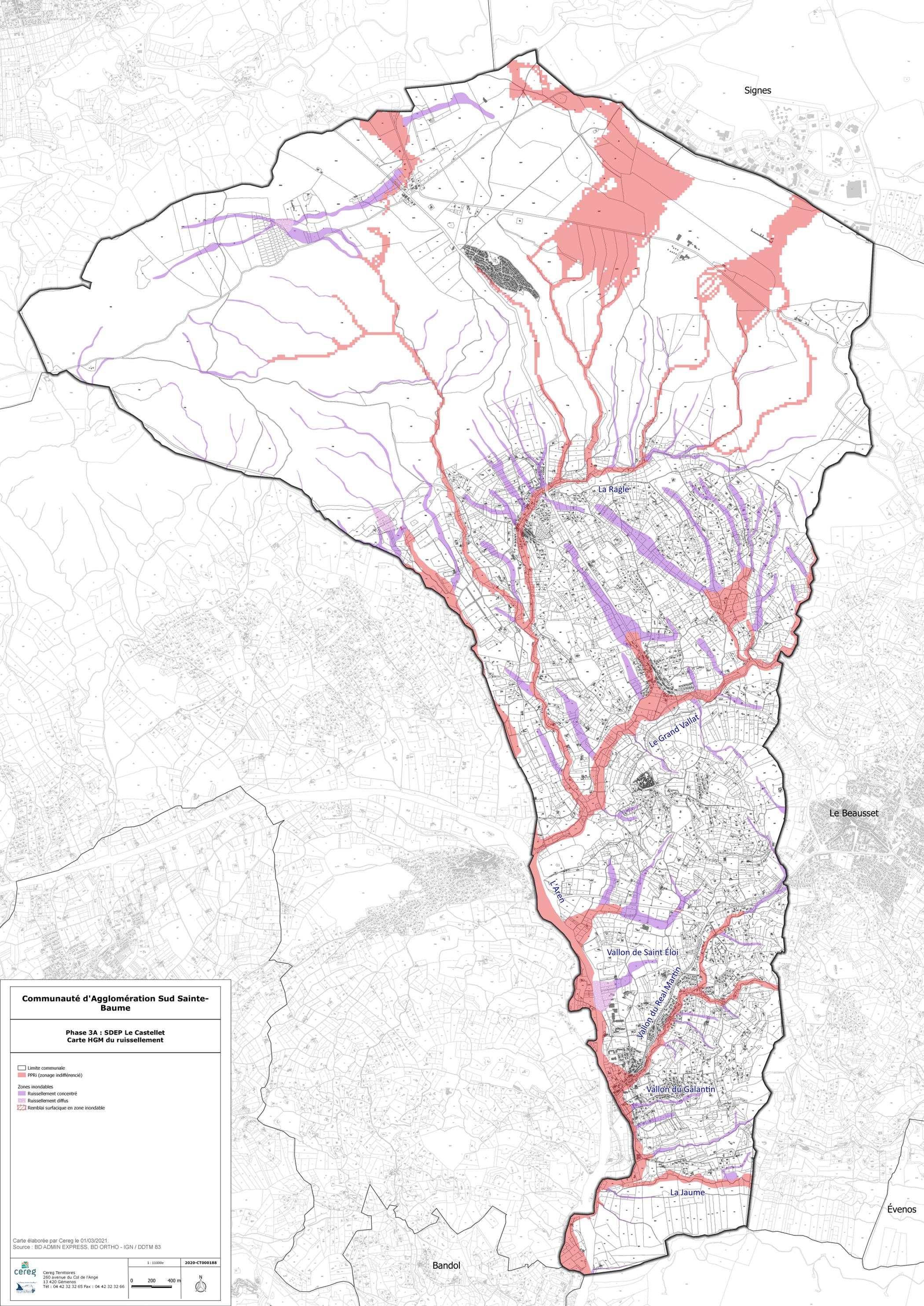


0 250 500 m



Carte élaborée par Cereg le 01/03/2021.  
Source : BD ADMIN EXPRESS, BD ORTHO - IGN/ DDTM 83

Figure 20 : Cartographie des zones inondables (zoom centre-ville)



**Communauté d'Agglomération Sud Sainte-Baume**

**Phase 3A : SDEP Le Castellet**  
**Carte HGM du ruissellement**

Limite communale  
 PPRI (zonage indifférencié)  
**Zones inondables**  
 Ruissellement concentré  
 Ruissellement diffus  
 Remblai surfacique en zone inondable

Carte élaborée par Cereg le 01/03/2021.  
 Source : BD ADMIN EXPRESS, BD ORTHO - IGN / DDTM 83

 Cereg Territoires  
 260 avenue du Col de l'Ange  
 13 420 Gémenos  
 Tél : 04 42 32 32 65 Fax : 04 42 32 32 66

1 : 11000e      2020-CT000188  
 0      200      400 m  


CASSB

# ETUDE HYDRAULIQUE 2D DU GRAND-VALLAT AU CHEMIN DES FAREMBERTS

Étude hydraulique



Avril 2021

## LE PROJET

Client	<b>CASSB</b>
Projet	<b>Etude hydraulique 2D du Grand-Vallat au chemin des Faremberts</b>
Intitulé du rapport	<b>Étude hydraulique</b>

## LES AUTEURS

	<p>Cereg Territoires • Parc de Gémenos – 260 Av du Col de l’Ange - 13420 GEMENOS  Tél : 04.42.32.32.65 • Fax : 04.42.32.32.66 • <a href="mailto:aubagne@cereg.com">aubagne@cereg.com</a>  <a href="http://www.cereg.com">www.cereg.com</a></p>
--	--

Réf. Cereg - 2020-CT-000084

Id	Date	Établi par	Vérfié par	Description des modifications / Évolutions
V1	07/04/2021	Cédric LAMIRAUX	Audrey NOAILLY	Version initiale



# TABLE DES MATIÈRES

<b>A. CONTEXTE DE L'ÉTUDE .....</b>	<b>5</b>
A.I. LOCALISATION.....	6
A.II. ZONE MODÉLISÉE ET MÉTHODOLOGIE.....	7
A.III. INONDABILITÉ.....	8
<b>B. ETUDE HYDROLOGIQUE.....</b>	<b>9</b>
B.I. MÉTHODOLOGIE.....	10
B.II. DÉLIMITATION ET CARACTÉRISTIQUES DES BASSINS VERSANTS.....	10
B.II.1. Délimitation des bassins versants.....	10
B.II.2. Caractéristiques des bassins versants.....	11
<i>B.II.2.1. Calcul des coefficients de ruissellement .....</i>	<i>11</i>
<i>B.II.2.2. Calcul des Curve Number.....</i>	<i>11</i>
<i>B.II.2.3. Résultats.....</i>	<i>12</i>
B.III. CALCUL DES DÉBITS .....	12
B.III.1. Calcul des débits de pointe avec la méthode rationnelle .....	12
B.III.2. Calcul des hydrogrammes aux frontières du modèle .....	13
B.III.3. Comparaison avec le PPRi .....	14
<b>C. ETUDE HYDRAULIQUE .....</b>	<b>15</b>
C.I. CONSTRUCTION DU MODÈLE HYDRAULIQUE.....	16
C.I.1. Le choix du type de modélisation .....	16
C.I.2. Le code de calcul utilisé .....	16
C.I.3. Maillage de la zone d'étude.....	17
C.I.4. Conditions aux limites.....	18
C.I.5. Paramétrage du modèle .....	18
C.II. RÉSULTATS DE MODÉLISATION.....	19
C.II.1. Hauteurs d'eau maximales.....	19
C.II.2. Vitesses d'écoulement .....	20
<i>C.II.2.1. Vitesses maximales.....</i>	<i>20</i>
<i>C.II.2.2. Évolution des vitesses dans la zone d'étude .....</i>	<i>21</i>
C.II.3. Carte d'aléa .....	22
C.II.4. Emprise de l'inondation .....	23
C.III. CONCLUSION .....	24
<b>D. ANNEXES.....</b>	<b>25</b>

## LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Caractéristiques hydrologiques calculées.....	12
Tableau 2 : Table des coefficients de Montana.....	12
Tableau 3 : Débits de pointe pour les différents bassins versants .....	13

## LISTE DES ILLUSTRATIONS

Illustration 1 : Localisation de la zone d'étude.....	6
Illustration 2 : Zone modélisée .....	7
Illustration 3 : Carte de synthèse des études précédentes .....	8
Illustration 4 : Délimitation des bassins versants .....	10
Illustration 5 : HyétoGramme de la pluie centennale et hydrogrammes calculés pour les bassins versants 1 à 4 (T=100 ans) ....	13
Illustration 6 : Schéma représentant les écoulements 1D (à gauche) et 2D (à droite) .....	16
Illustration 7 : Maillage de la zone d'étude et pas d'espace utilisés .....	17
Illustration 8 : Conditions aux limites du modèle hydraulique.....	18
Illustration 9 : Carte des hauteurs d'eau maximales en réponse à une pluie centennale .....	19
Illustration 10 : Carte des vitesses maximales en réponse à une pluie centennale .....	20
Illustration 11 : Évolution des vitesses au cours de l'évènement modélisé .....	21
Illustration 12 : Grille des aléas inondation du PPRI du Grand-Vallat .....	22
Illustration 13 : Carte d'aléa .....	22
Illustration 14 : Comparaison de l'emprise d'inondation avec les études précédentes .....	23
Illustration 15 : Extrait de la carte de zonage du PPRI du Castellet.....	24

# A. CONTEXTE DE L'ÉTUDE



## A.I. LOCALISATION

La zone de modélisation se situe sur la commune varoise (83) du Castellet au nord-est du village historique. Elle concerne la partie amont du fleuve du Grand-Vallat. En effet, celui-ci prend naissance en aval de la confluence du Gourganon et de la Daby. L'étude hydraulique porte sur une zone non urbanisée où le cours d'eau longe le chemin des Faremberts avant de traverser la RD26. Le site est positionné en contrebas de la colline où est situé le village historique du Castellet. Cette configuration fait que la rive gauche du cours d'eau présente des fortes pentes (de l'ordre de 40 %) avant la traversée de la route départementale. La cartographie suivante permet de préciser le contexte géographique de la zone étudiée.

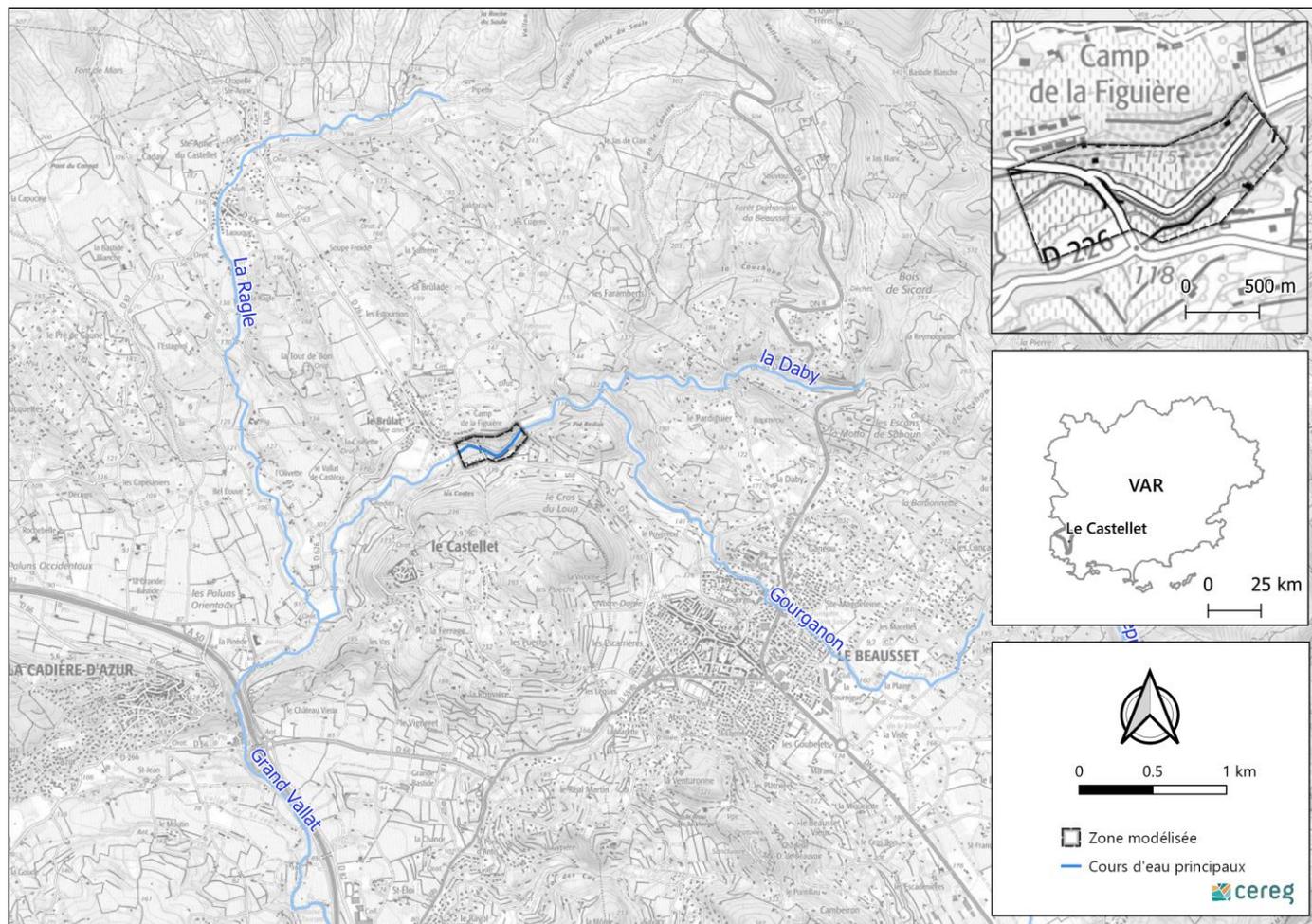


Illustration 1 : Localisation de la zone d'étude

## A.II. ZONE MODÉLISÉE ET MÉTHODOLOGIE

La zone modélisée représente une superficie de **7,3 hectares** sur un linéaire de cours d'eau d'environ **530 mètres linéaires**.

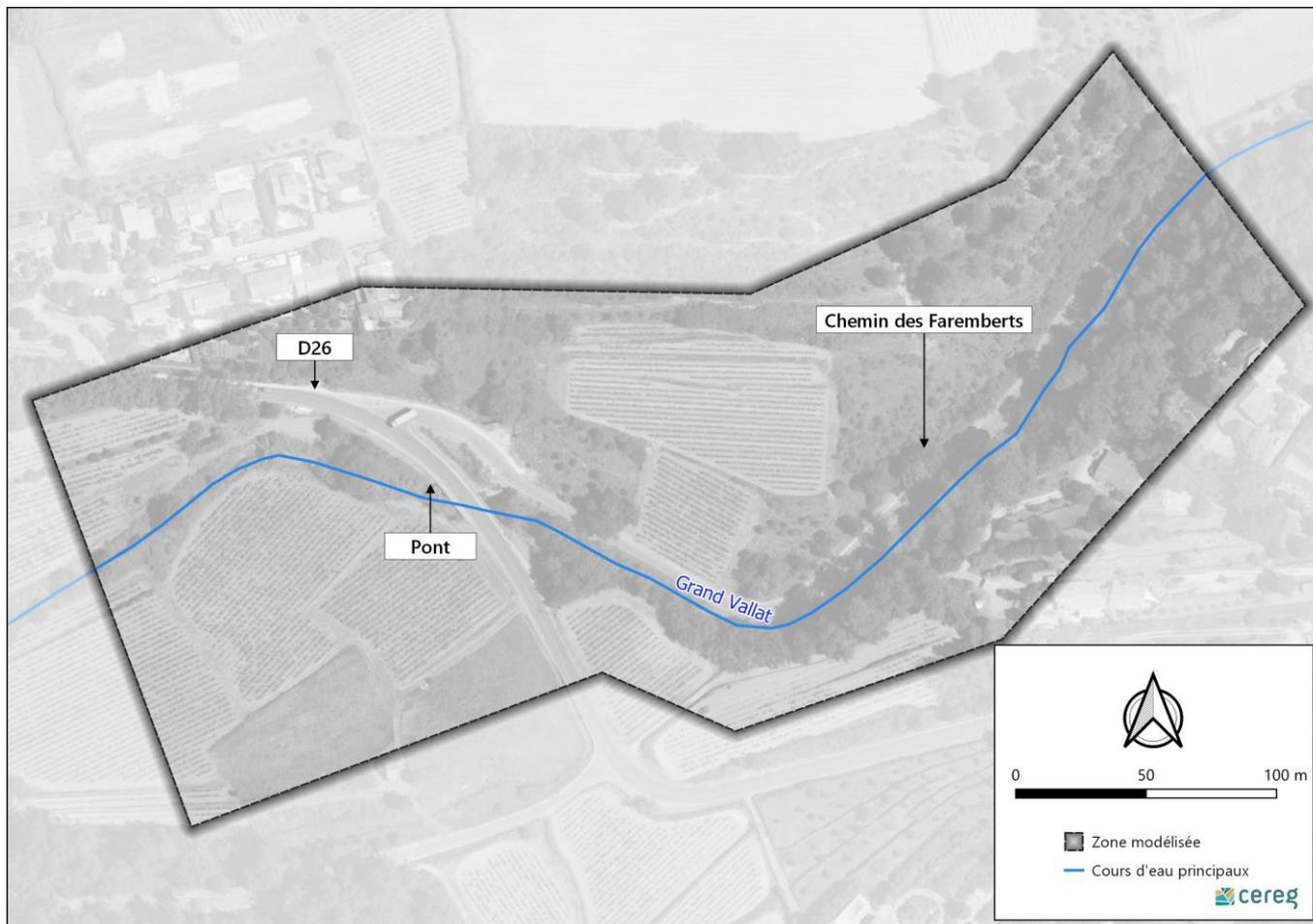


Illustration 2 : Zone modélisée

La modélisation hydraulique de la zone d'étude se décompose en deux parties :

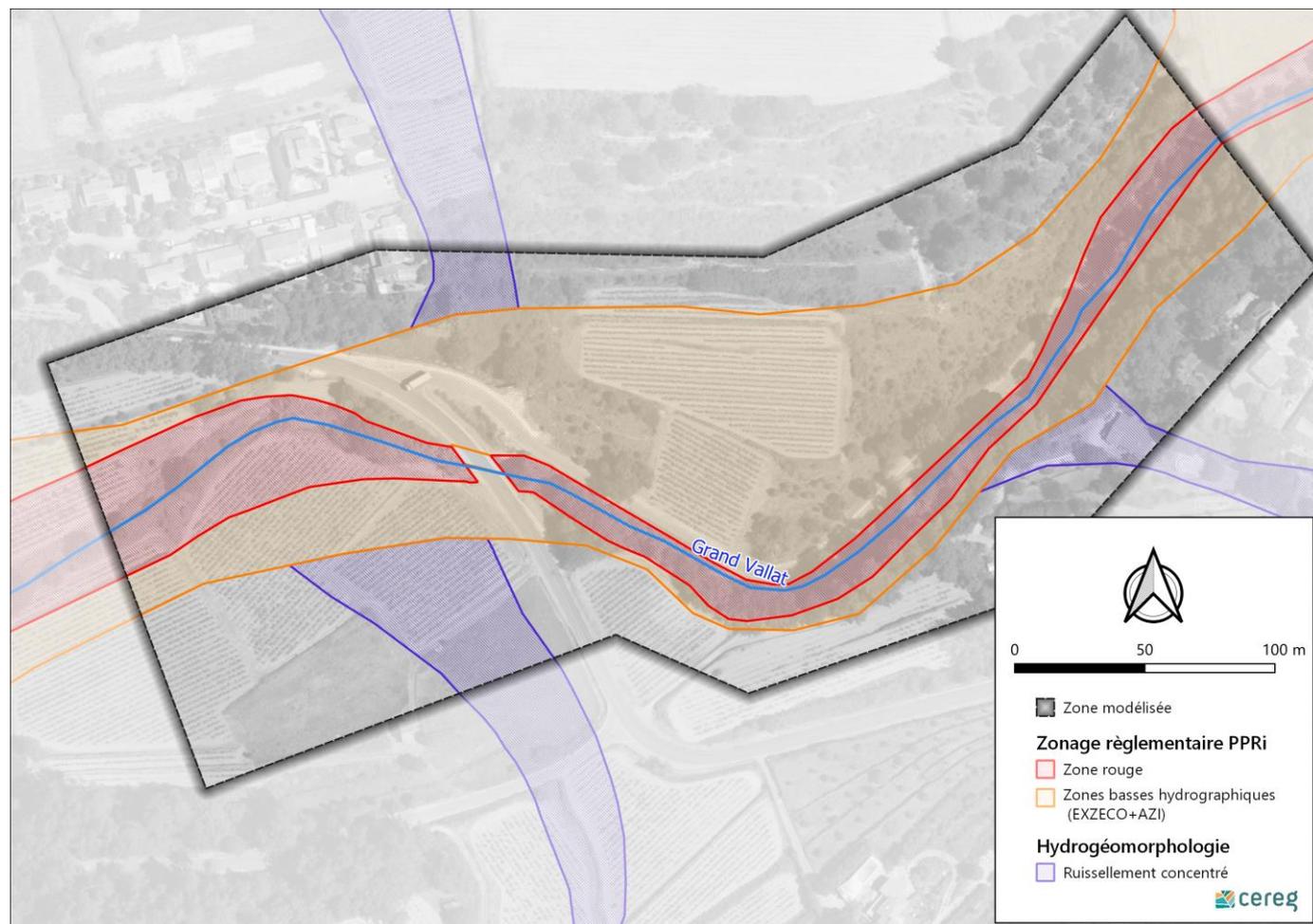
- **Une étude hydrologique** : elle permet de définir les débits d'eau entrants sur la zone modélisée selon la période de retour choisie ;
- **Une modélisation hydraulique** : elle permet, à l'aide d'un logiciel de calcul hydraulique résolvant les équations de Barré-de-Saint-Venant 2D, de déterminer les hauteurs d'eau ainsi que les vitesses à différents endroits du modèle pour un pas de temps défini.

**La modélisation est réalisée pour un épisode de période de retour centennale qui constitue l'évènement de référence.**

## A.III. INONDABILITÉ

Le site a déjà fait l'objet d'une étude hydrogéomorphologique menée par Cereg. Le site est aussi couvert par un PPRi.

La cartographie suivante présente l'emprise des différents zonages identifiés lors de ces deux études.



*Illustration 3 : Carte de synthèse des études précédentes*

Du point de vue de l'approche hydrogéomorphologique, le site est entouré de plusieurs zones de ruissellement concentré à l'origine d'apports latéraux lors d'épisodes pluvieux. Ces apports secondaires sont intégrés dans le modèle hydraulique.

Le zonage du PPRi permet d'identifier une zone rouge couvrant essentiellement l'emprise du lit mineur ainsi qu'une emprise orange issue du croisement entre l'Atlas des Zones Inondables et de la méthode EXZECO, qui représente le lit majeur du cours d'eau.

# B. ETUDE HYDROLOGIQUE



## B.I. MÉTHODOLOGIE

L'étude hydrologique se décompose en trois parties :

- La délimitation des bassins versants à l'origine d'apports en eau sur la zone modélisée ainsi que la détermination de leurs paramètres hydrologiques (surface, coefficient de ruissellement, curve number, pente, etc.) ;
- Le calcul des débits de pointe avec la méthode rationnelle utilisant les coefficients de Montana de la station météorologique de Toulon ;
- Le calcul des hydrogrammes à l'exutoire des différents bassins versants identifiés avec le logiciel de modélisation PCSWMM.

## B.II. DÉLIMITATION ET CARACTÉRISTIQUES DES BASSINS VERSANTS

### B.II.1. Délimitation des bassins versants

La délimitation des bassins versants a été réalisée sur la base des cartographies et données topographiques existantes :

- Cartes IGN ;
- RGE Alti de l'IGN de résolution 1 mètre.

4 bassins versants ont été identifiés comme étant générateurs de ruissellements en direction de la zone modélisée. La cartographie suivante précise leurs limites.

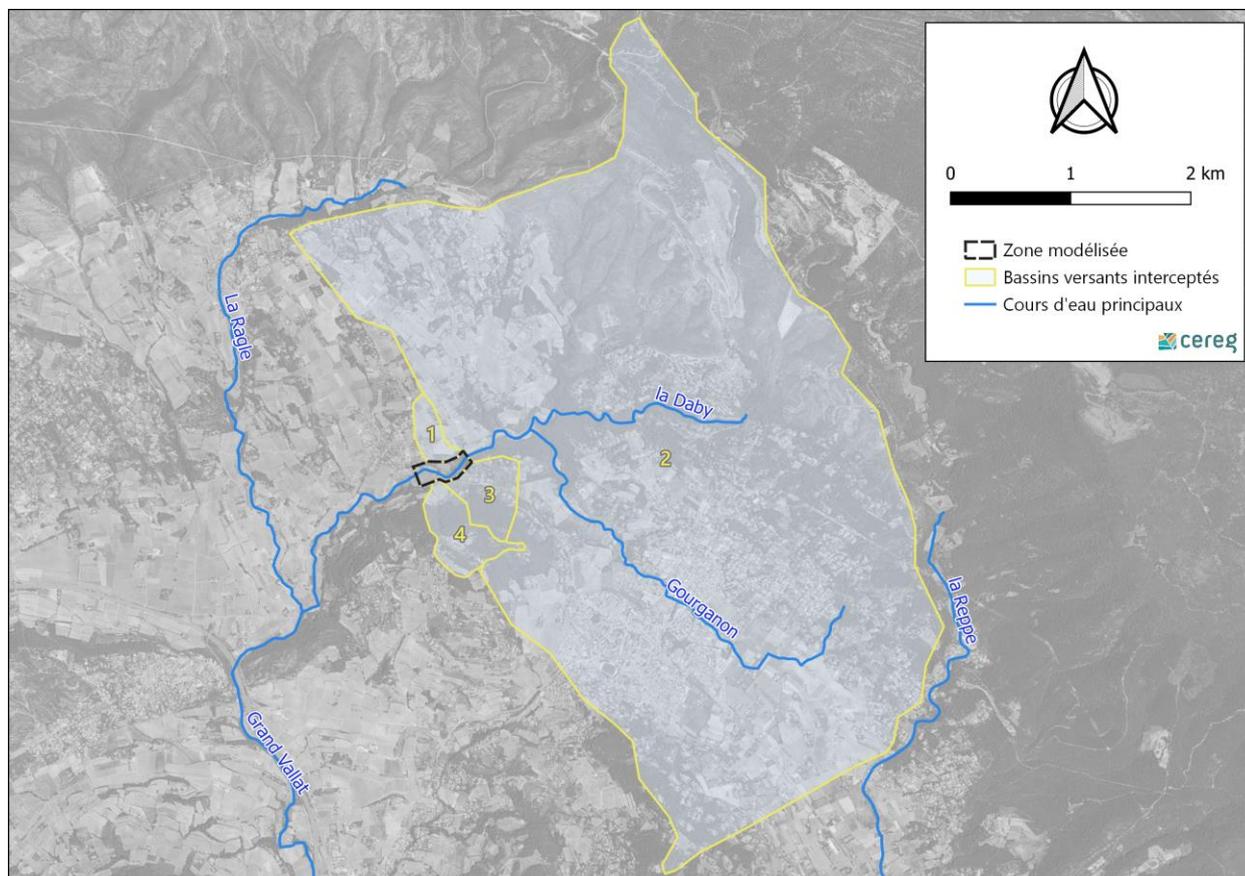


Illustration 4 : Délimitation des bassins versants

## B.II.2. Caractéristiques des bassins versants

Afin d'évaluer le débit ruisselant vers la zone modélisée, il est nécessaire de déterminer, pour chaque bassin versant :

- Sa superficie ;
- Sa pente ;
- La longueur du plus long chemin hydraulique ;
- Son coefficient de ruissellement associé à la période de retour 100 ans ;
- Son Curve Number pour le calcul des hydrogrammes avec la méthode du SCS Curve Number associé à l'utilisation de l'hydrogramme unitaire adimensionnel.

### B.II.2.1. Calcul des coefficients de ruissellement

Le calcul des coefficients de ruissellements moyens utilise les coefficients prescrits par la doctrine du Var pour la rubrique 2.1.5.0 de la loi sur l'Eau ainsi que les valeurs rencontrées couramment dans la littérature sont utilisés. Ce coefficient global considère l'impact de la période de retour de l'évènement pluvieux. Ceci se traduit par une augmentation de sa valeur liée à une saturation des sols et de la capacité d'interception plus rapide.

L'occupation du sol nécessaire à la détermination des coefficients de ruissellement a été déterminée en utilisant les données du CRIGE PACA.

**Pour chaque bassin versant, un coefficient de ruissellement global est calculé. Il est issu d'une moyenne pondérée par la surface de chaque type de sol rencontré.**

### B.II.2.2. Calcul des Curve Number

Les Curve Numbers (CN) utilisés dans la méthode du SCS sont des coefficients calculés selon **l'humidité initiale du sol, la géologie** ainsi que **l'occupation du sol**. L'étude de la géologie du bassin versant montre des terrains très karstiques au nord dont la perméabilité est difficilement qualifiable puisque très dépendante de l'état hydrique des sols au moment de l'évènement pluvieux. Sur le restant des bassins versants, les sols dominants sont plutôt calcaires et gréseux avec de grands épandages alluvionnaires datant du quaternaire au niveau des plaines alluviales. Ces dépôts, souvent de granulométries et de perméabilités très variables se présentent sous la forme de limons, de sables et de galets. Une classe de niveau C plutôt sécuritaire vis-à-vis du comportement des karsts a été choisie pour la détermination des curve number.

L'état hydrique du sol au début de la modélisation est considéré comme déjà humide (classe II du SCS). Cette situation correspond à l'état le plus couramment rencontré au cours de l'année. Les CN sont calculés à l'aide d'abaques.

Ces coefficients ont été déterminés en utilisant deux documents :

- L'abaque du SCS intégré au logiciel de modélisation PCSWMM ;
- L'abaque pour les zones agricoles et urbaines (USDA-SCS, 1972).

Contrairement aux coefficients de ruissellement, les curve numbers ne varient pas en fonction de la période de retour.

Ils sont calculés avec une moyenne pondérée par la surface comme pour les coefficients de ruissellement.

## B.II.2.3. Résultats

Les caractéristiques morphométriques calculées en état actuel sont précisées dans le tableau ci-après :

BV	Surface (ha)	Longueur hydraulique (m)	Pente (%)	Cr (100)	CN (II)
(1)	12	560	4.2	48	73
(2)	1803	6430	3.8	47	69
(3)	27	770	21.0	41	65
(4)	30	1150	15.9	32	60

Tableau 1 : Caractéristiques hydrologiques calculées

## B.III.CALCUL DES DÉBITS

### B.III.1. Calcul des débits de pointe avec la méthode rationnelle

#### Methodologie

Pour rappel, la formule de la méthode rationnelle est la suivante :

$$Q = \frac{Cr \times I \times A}{360}$$

Avec :

- Q : Débit de pointe en m<sup>3</sup>/s
- Cr : Coefficient de ruissellement,
- I : Intensité des pluies en mm/h sur le temps de concentration,
- A : Superficie du bassin versant (ha),

#### Choix des données pluviométriques

L'intensité de pluie nécessaire à la détermination des débits de pointe est calculée à partir des coefficients de Montana « a » et « b » du poste pluviographique le plus adapté au secteur étudié sur une durée égale au temps de concentration du bassin versant :

$$I = a * t^{-b}$$

La station Météo France de Toulon est la plus proche de la zone d'étude disposant de données pluviométriques sur une période de plus de 30 années (1982 à 2016).

Les coefficients de Montana utilisés sont les suivants :

Toulon	6'<d<2h		2h<d<6h		6h<d<24h	
	a	b	a	b	a	b
1982 - 2018						
100 ans	65,2	0,410	71,7	0,583	125,0	0,897

Tableau 2 : Table des coefficients de Montana

### Calcul des débits de pointe

Les débits de pointe pour les différents bassins versants, calculés en état initial, sont présentés dans le Tableau 3 :

Bassin versant	Débit de pointe centennal (m <sup>3</sup> /s)
(1)	2.0
(2)	94.3
(3)	4.5
(4)	3.5

Tableau 3 : Débits de pointe pour les différents bassins versants

## B.III.2. Calcul des hydrogrammes aux frontières du modèle

Le calcul des hydrogrammes de crue, qui seront injectés dans le modèle hydraulique, est réalisé à l'aide du logiciel PCSWMM. Les hydrogrammes sont calés de manière à retrouver le même débit de pointe que calculé initialement avec la méthode rationnelle.

La méthode utilisée est celle du SCS Curve Number pour la fonction de production du modèle (calcul de la part ruisselée). Elle est couplée à la méthode de l'hydrogramme unitaire adimensionnel pour la fonction de transfert (calcul du débit résultant) avec un calage à l'aide du facteur de pointe.

Pour le calcul, une pluie de projet de type Keifer est utilisée sur une durée de 4h. Cette pluie correspond à l'intégration des coefficients de Montana. L'évènement modélisé est une pluie de période de retour 100 ans.

Le hétéogramme de la pluie centennale et les hydrogrammes calculés par modélisation hydrologique sont les suivants :

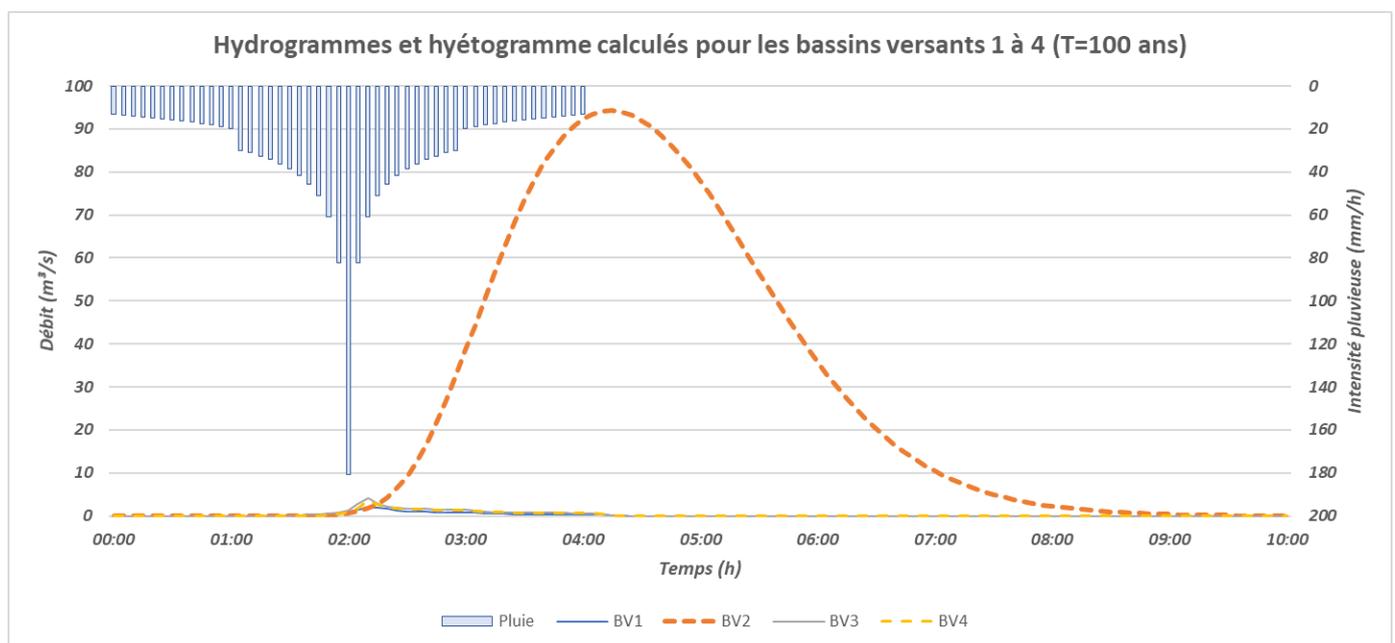


Illustration 5 : Hétéogramme de la pluie centennale et hydrogrammes calculés pour les bassins versants 1 à 4 (T=100 ans)

Ces résultats montrent l'importance des apports en provenance de la Daby et du Gorganon formant le Grand-Vallat quelques centaines de mètres avant la zone de modélisation (BV 2). Les bassins versants, 1,3 et 4 apportent quant à eux beaucoup moins d'eau mais sont représentés dans la modélisation afin de simuler les apports latéraux issus du ruissellement.

### B.III.3. Comparaison avec le PPRi

Dans le PPRi en vigueur sur la commune du Castellet un débit de pointe est indiqué pour « Le Grand-Vallat en limite de commune du Beausset ». Le bassin versant considéré dans le PPRi est donc légèrement plus petit mais reste comparable à celui délimité pour la présente étude.

- Le débit présenté par le **PPRi est de 82 m<sup>3</sup>/s** ;
- Le débit calculé dans **cette étude est de 94 m<sup>3</sup>/s**.

Le débit du PPRi et celui utilisé dans l'étude différent mais sont dans le même ordre de grandeur. Cet écart provient principalement de l'évolution des coefficients de Montana (étude hydraulique utilisée pour le PPRi réalisée en mai 2006), du choix des coefficients de ruissellement ainsi que de la différence de surface des deux bassins versants. L'hydrologie retenue pour le modèle est donc comparable à celle du PPRi.

# C. ETUDE HYDRAULIQUE



## C.I. CONSTRUCTION DU MODÈLE HYDRAULIQUE

### C.I.1. Le choix du type de modélisation

Les écoulements sont usuellement considérés à composantes 1D ou 2D (cf. Illustration suivante).

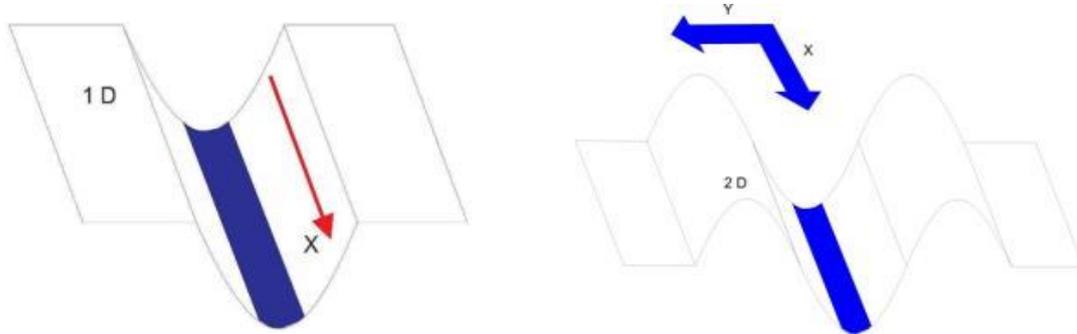


Illustration 6 : Schéma représentant les écoulements 1D (à gauche) et 2D (à droite)

L'utilisation d'un modèle hydraulique 1D (une Dimension) est justifiée lorsque les écoulements s'effectuent selon un axe préférentiel (axe parallèle au lit mineur). Lorsqu'ils se font selon des axes non parallèles entre eux, on parle d'écoulements 2D (2 Dimensions).

La zone d'étude est intégrée sur une zone où les écoulements peuvent suivre de multiples axes « divergents » (non parallèles au lit mineur). **L'utilisation d'un modèle hydraulique 2D est par conséquent nécessaire.**

### C.I.2. Le code de calcul utilisé

Le code de calcul utilisé par Cereg est SW2D. Il est développé par le laboratoire HYDROSCIENCES de Montpellier. Ce code a été retenu, car il gère les fronts secs (secteurs non en eau en début de calcul) et il résout à chaque pas de temps l'ensemble des équations 2D du système de Barré-de-Saint-Venant. Une présentation du logiciel utilisé est présentée en annexe.

SW2D repose sur la discrétisation de la zone d'étude en petites mailles basées sur les données topographiques fournies.

## C.I.3. Maillage de la zone d'étude

Le modèle mathématique utilisé s'appuie sur un maillage élaboré à partir des différents relevés topographiques et complété par un modèle numérique de terrain de résolution 1m (RGE Alti 1m). Il permet de prendre en compte les principaux éléments structurants du secteur (les fossés, les voiries, les talus, les remblais, etc.) nécessaires à la bonne description du fonctionnement hydrodynamique de la zone d'étude.

Pour les besoins de l'étude, un bureau de géomètre expert a réalisé les relevés suivants :

- Un **relevé topographique complet du pont** ;
- **8 profils en travers**, 6 en amont du pont et 2 en aval.

La taille des mailles varie selon la topographie du terrain rencontré ainsi que du niveau de finesse des résultats recherché aux différents points du modèle. Ainsi, à proximité et dans le lit mineur, un pas d'espace de 2 mètres est utilisé. Au passage du pont le pas d'espace est réduit jusqu'à 1 mètre. Sur les frontières du modèle, un pas d'espace de 8 mètres au maximum est utilisé.

Le maillage complété de la topographie, annoté avec les pas d'espaces utilisés est présenté dans la carte suivante.

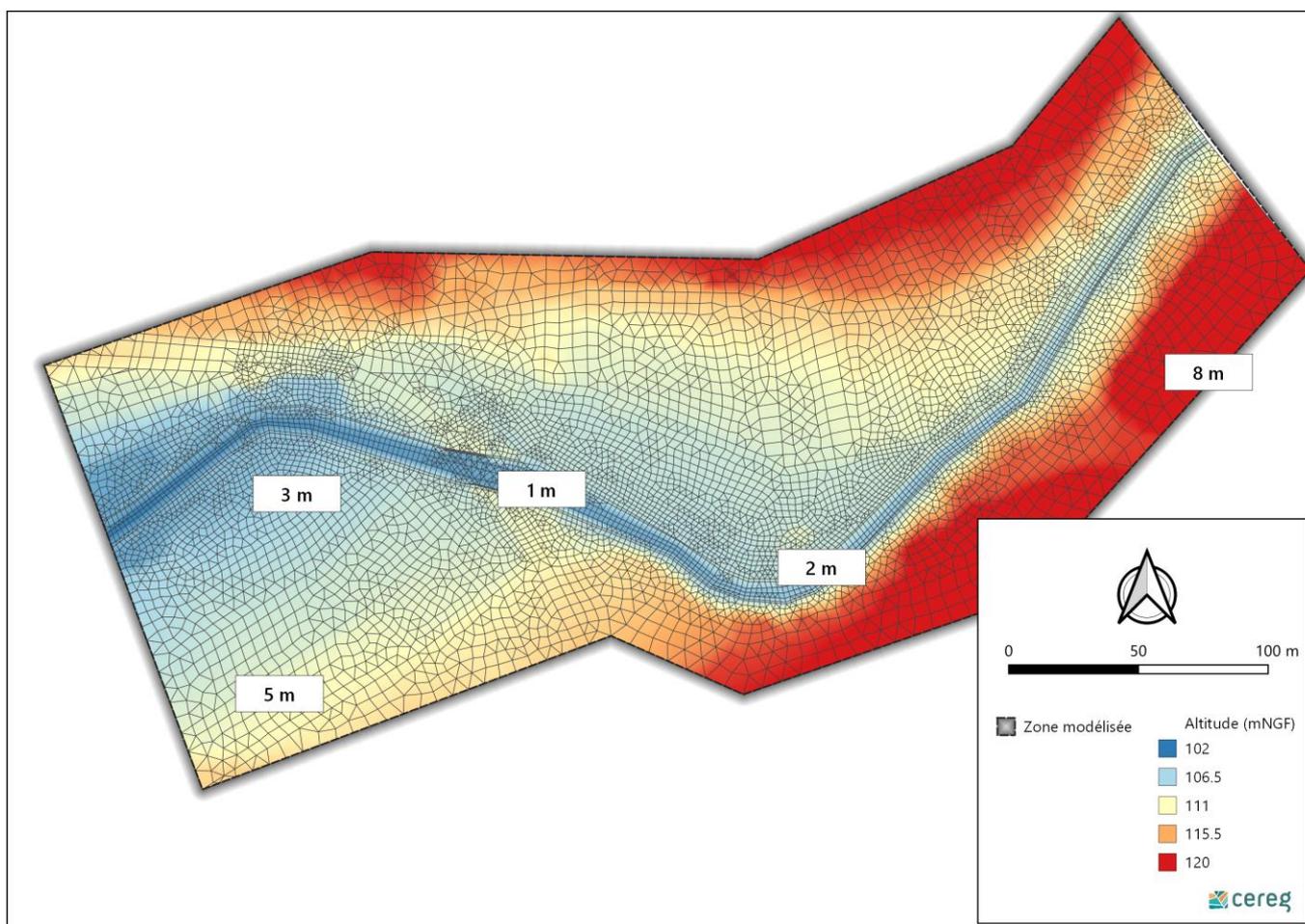


Illustration 7 : Maillage de la zone d'étude et pas d'espace utilisés

## C.I.4. Conditions aux limites

Les conditions aux limites permettent de décrire ce qu'il se passe aux frontières du modèle. Dans le cas d'espèce on distingue :

- Les frontières amont : conditions de type hydrogramme de crue. Ces hydrogrammes d'apport sont issus de la modélisation hydrologique présentée dans la partie B.
- La frontière aval : condition de type cote de la ligne d'eau. Une condition d'écoulement libre est fixée au niveau de cette frontière sur l'intégralité du lit majeur du Grand-Vallat.

Les limites restantes sont considérées comme imperméables.

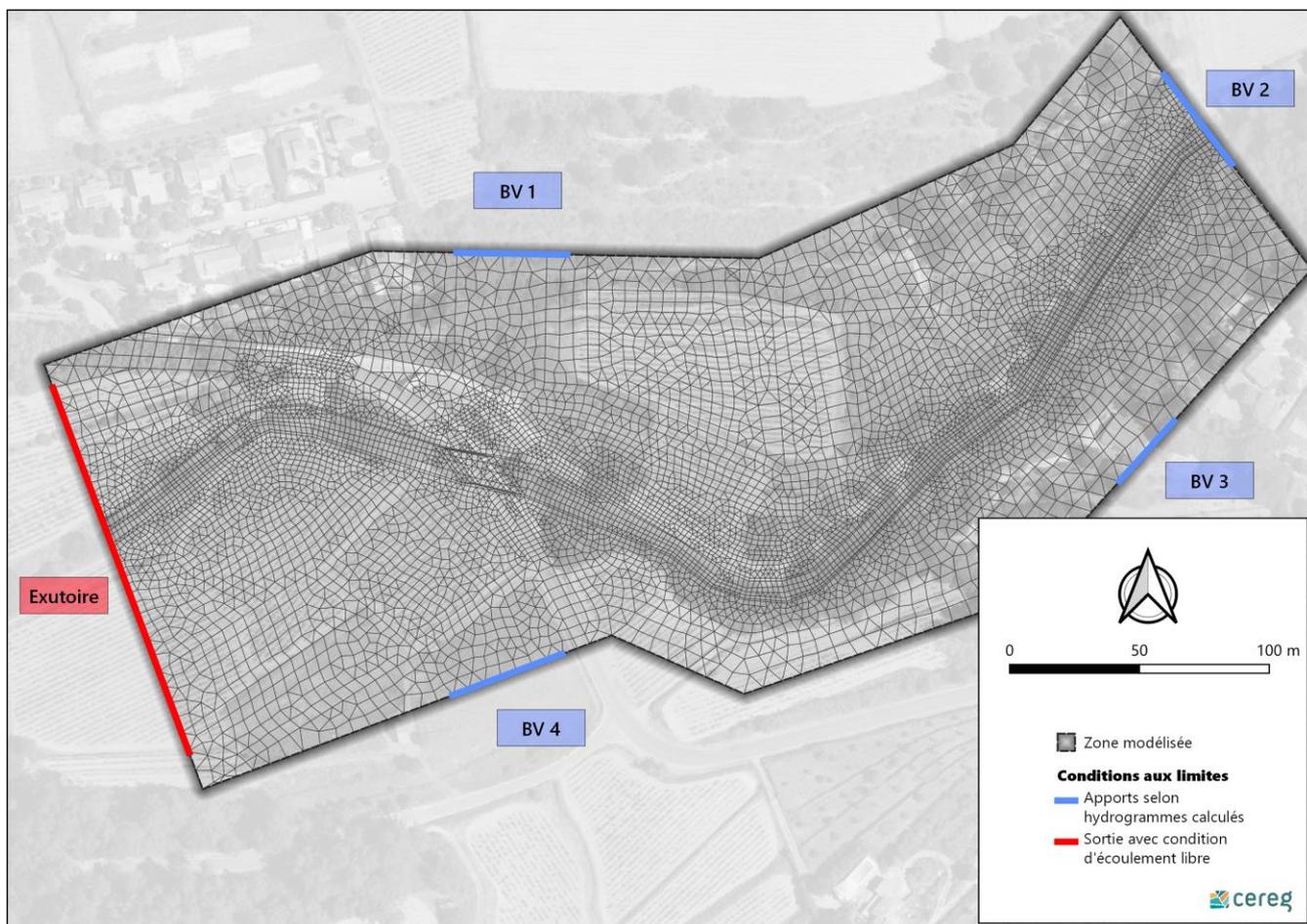


Illustration 8 : Conditions aux limites du modèle hydraulique

## C.I.5. Paramétrage du modèle

Le principal paramètre de calage du modèle est le coefficient de Strickler qui représente la rugosité du terrain.

En l'absence de relevé de hauteur d'eau permettant d'ajuster ce paramètre, une valeur de 20 a été retenue sur l'ensemble de la zone modélisée. Cette valeur est issue de la littérature et est classiquement employée pour une occupation du sol similaire à la zone d'étude.

Une modélisation avec un coefficient de Strickler de 25 a été réalisée. Ce calcul conduit à une emprise de crue très proche de celle calculée pour un coefficient de 20. Seules les hauteurs d'eau ainsi que les vitesses sont modifiées. Au regard des vitesses d'écoulement maximales, les résultats pour un coefficient de 20 sont retenus et présentés dans la suite du rapport. En effet, les vitesses d'écoulement obtenues avec un coefficient de 25 n'étaient pas cohérentes avec les observations de terrain.

## C.II. RÉSULTATS DE MODÉLISATION

### C.II.1. Hauteurs d'eau maximales

Les hauteurs d'eau maximales calculées à l'aide de SW2D, pour une pluie centennale, sont présentées sur la carte suivante.

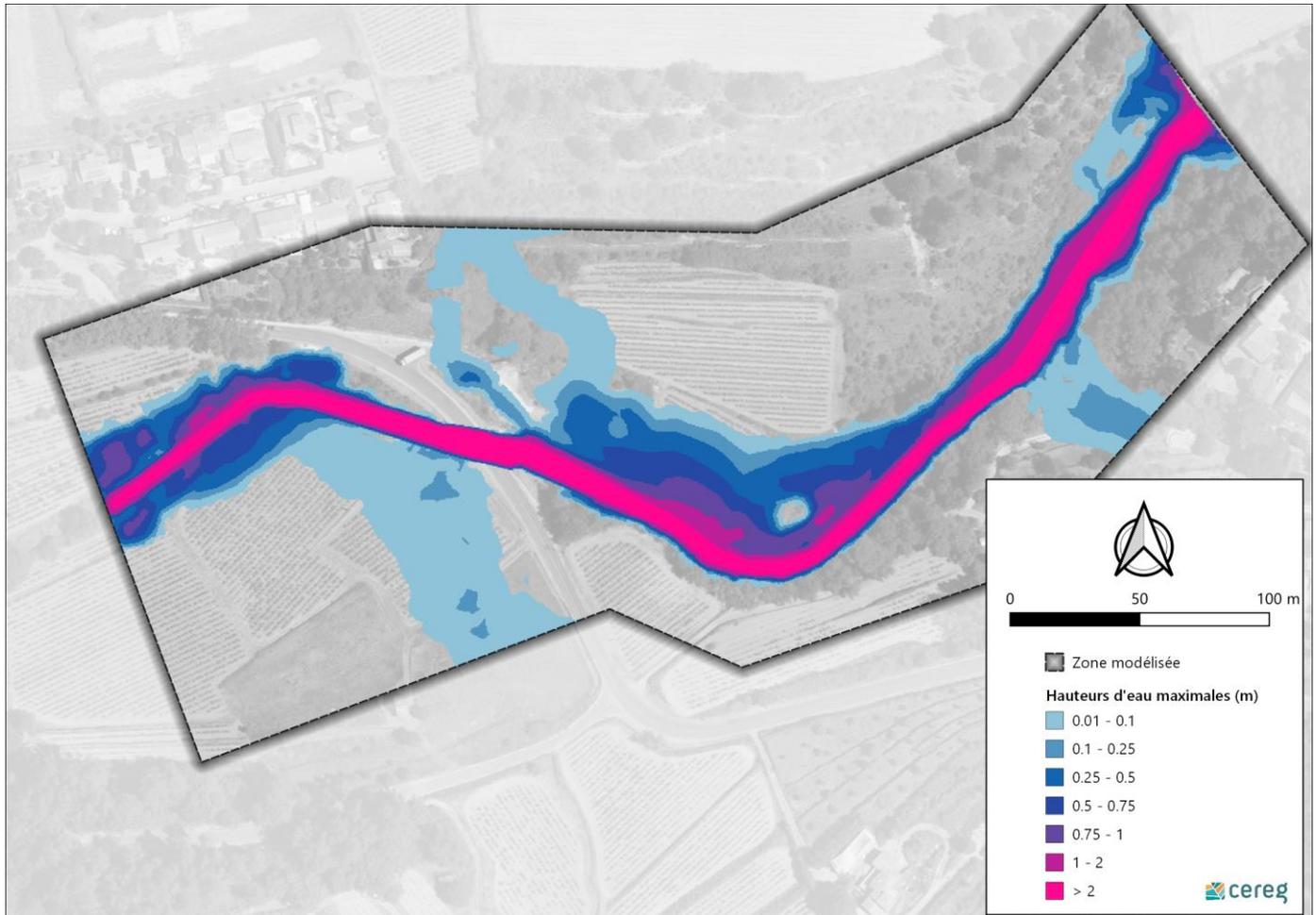


Illustration 9 : Carte des hauteurs d'eau maximales en réponse à une pluie centennale

Le calcul des hauteurs d'eau en réponse à une pluie de période de retour 100 ans met en évidence le débordement important du lit mineur du Grand-Vallat en rive droite sur le chemin des Faremberts. En amont du passage sous le pont le cours d'eau est fortement contraint en rive gauche où la berge est bien plus haute que le terrain naturel en rive droite où est située le chemin des Faremberts. Après le passage du pont, les contraintes topographiques des deux rives sont similaires permettant ainsi un débordement de chaque côté du cours d'eau.

Les hauteurs d'eau calculées au droit du pont montrent que l'ouvrage est en capacité de faire transiter cette crue centennale. En effet, le calcul de la cote de crue résultante au droit de l'ouvrage est de **107,6 mNGF** tandis que le tablier du pont est lui situé à **108,4 mNGF** en son point le plus bas.

En amont du pont, le débordement en rive droite conduit à une inondation des parcelles voisines, avec localement sur la route des hauteurs d'eau supérieures à 1 mètre. Les zones agricoles et naturelles sont elles aussi, pour certaines, inondées par une lame d'eau supérieure à 50 centimètres.

Après le passage du pont où les écoulements sont concentrés, les parcelles agricoles sont inondées par des hauteurs d'eau pouvant atteindre 1 mètre.

Sur les bords de la zone d'étude, les apports issus du ruissellement fort identifié par l'étude hydrogéomorphologique précédente ont été modélisés. Ils permettent de compléter les apports hydriques en provenance du Grand-Vallat ainsi que d'estimer les hauteurs d'eau dans ces zones. Dans ces zones où les pentes sont importantes, les calculs mettent en évidence des lames d'eau atteignant au maximum 10 centimètres.

## C.II.2. Vitesses d'écoulement

### C.II.2.1. Vitesses maximales

À l'instar de la carte des hauteurs d'eau, la carte suivante présente les vitesses d'écoulement maximales pour la pluie centennale.

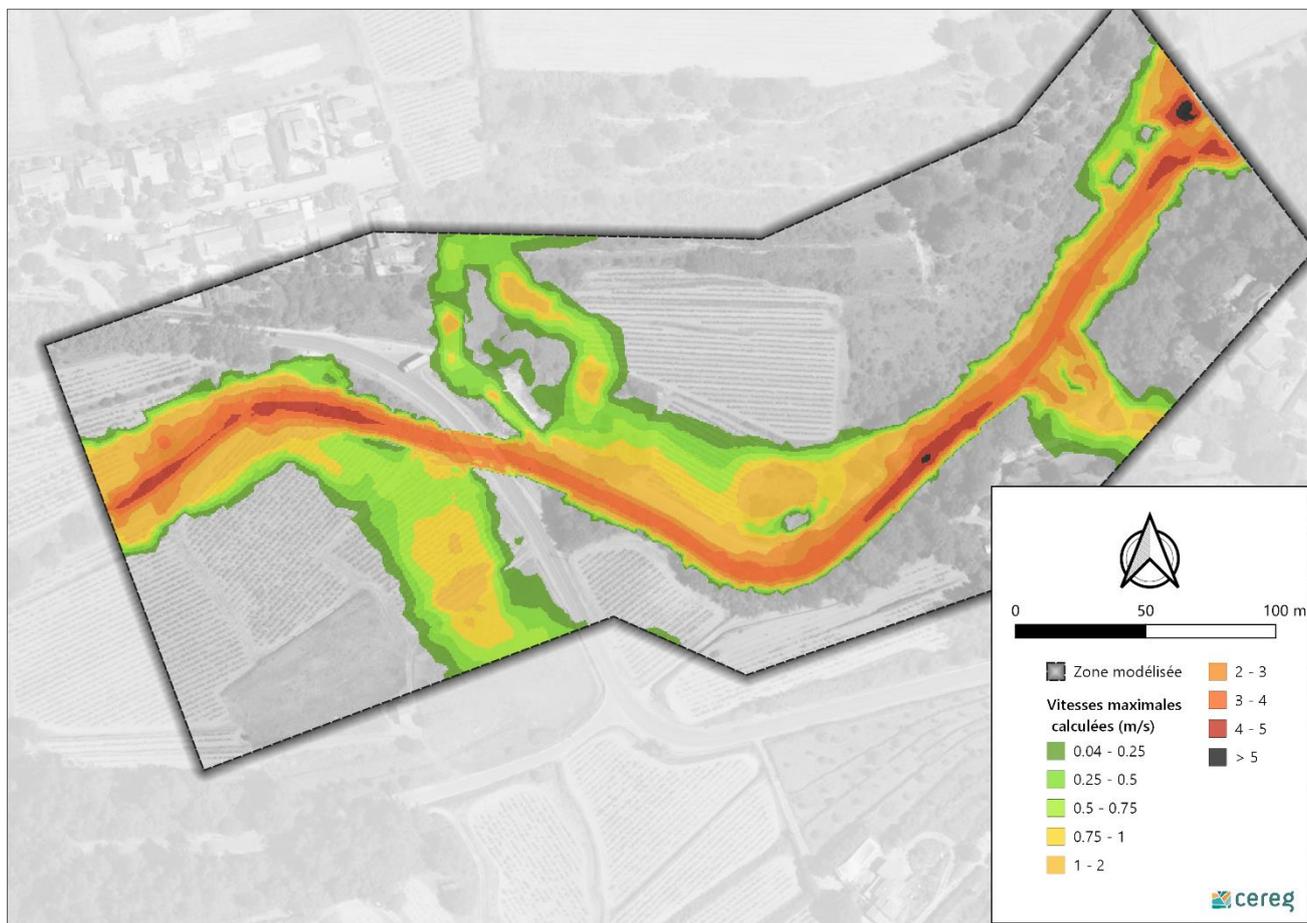


Illustration 10 : Carte des vitesses maximales en réponse à une pluie centennale

Les résultats de modélisation montrent que les vitesses d'écoulement sont importantes dans le lit mineur du cours d'eau avec par endroits des valeurs proches de 5 m/s. Ces valeurs diminuent jusqu'à 3 m/s au passage du pont où les hauteurs d'eau augmentent conjointement.

Dans la zone de débordement en rive droite avant le passage de l'ouvrage de franchissement, les vitesses atteignent des valeurs proches de 3 m/s sur le chemin des Faremberts. Dans les parcelles voisines ces vitesses sont aussi importantes ( $> 1$  m/s) et diminuent progressivement en s'approchant de la limite du champ d'inondation.

En sortie de la zone modélisée, après passage sous le pont, les vitesses sont fortes avec localement des valeurs proches de 4 m/s dans le lit mineur et comprises entre 1 et 3 m/s dans le lit majeur où sont positionnées les parcelles de vignes.

Sur les zones de ruissellement fort identifiées par l'étude HGM, du fait de la pente élevée des versants, les vitesses d'écoulement atteignent de 1 à 2 m/s au maximum.

## C.II.2.2. Évolution des vitesses dans la zone d'étude

Les cartes suivantes illustrent la dynamique d'inondation de la zone d'étude en présentant à différents pas de temps, les valeurs des vitesses d'écoulement calculées par SW2D.

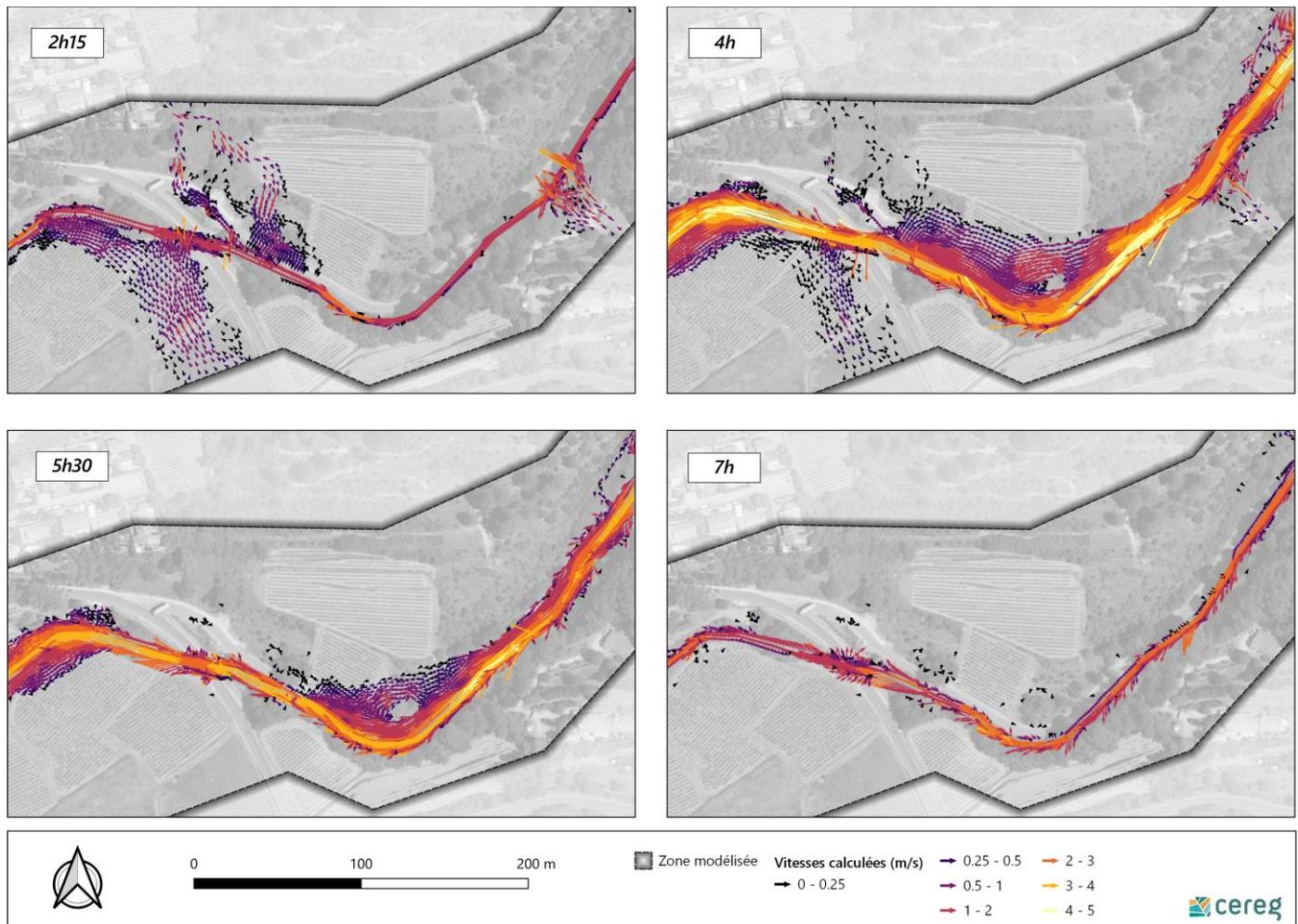


Illustration 11 : Évolution des vitesses au cours de l'évènement modélisé

Ces résultats montrent que sur les premières heures de modélisations les apports des bassins versant sont faibles ce qui engendre des faibles hauteurs d'eau et vitesses d'écoulement. À 2h15 et jusqu'à 4h après le début de la modélisation, les apports des bassins versants s'intensifient ce qui engendre une augmentation progressive des hauteurs d'eau et des vitesses.

La période entre 4h et 5h30 correspond au pic de la crue dans le modèle. Les apports du bassin versant principal (Grand-Vallat) ne sont pas concomitants avec les apports des bassin versants annexes étant donné la différence de leur temps de concentration.

Une fois ce dernier passé, les eaux restantes se dirigent progressivement vers l'exutoire et les vitesses diminuent progressivement jusqu'à ce que le cours d'eau retrouve son débit initial avant la crue.

### C.II.3. Carte d'aléa

Afin de déterminer les niveaux d'aléa induits par la crue centennale sur la zone de modélisation, la grille des niveaux d'aléa du PPRi du Grand-Vallat est utilisée (cf. Illustration 12)

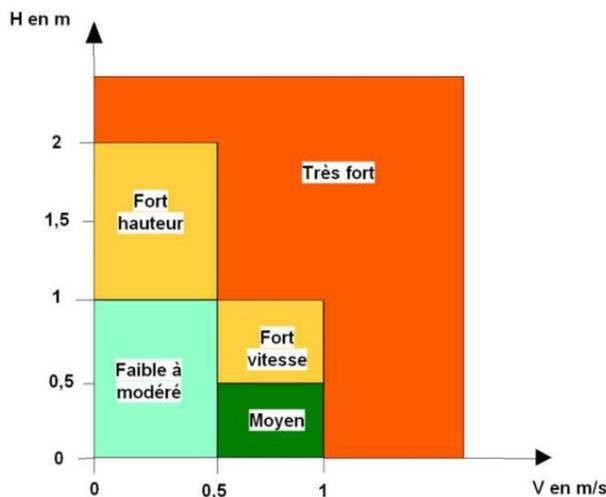


Illustration 12 : Grille des aléas inondation du PPRi du Grand-Vallat

La cartographie suivante présente ces aléas sur la zone modélisée.

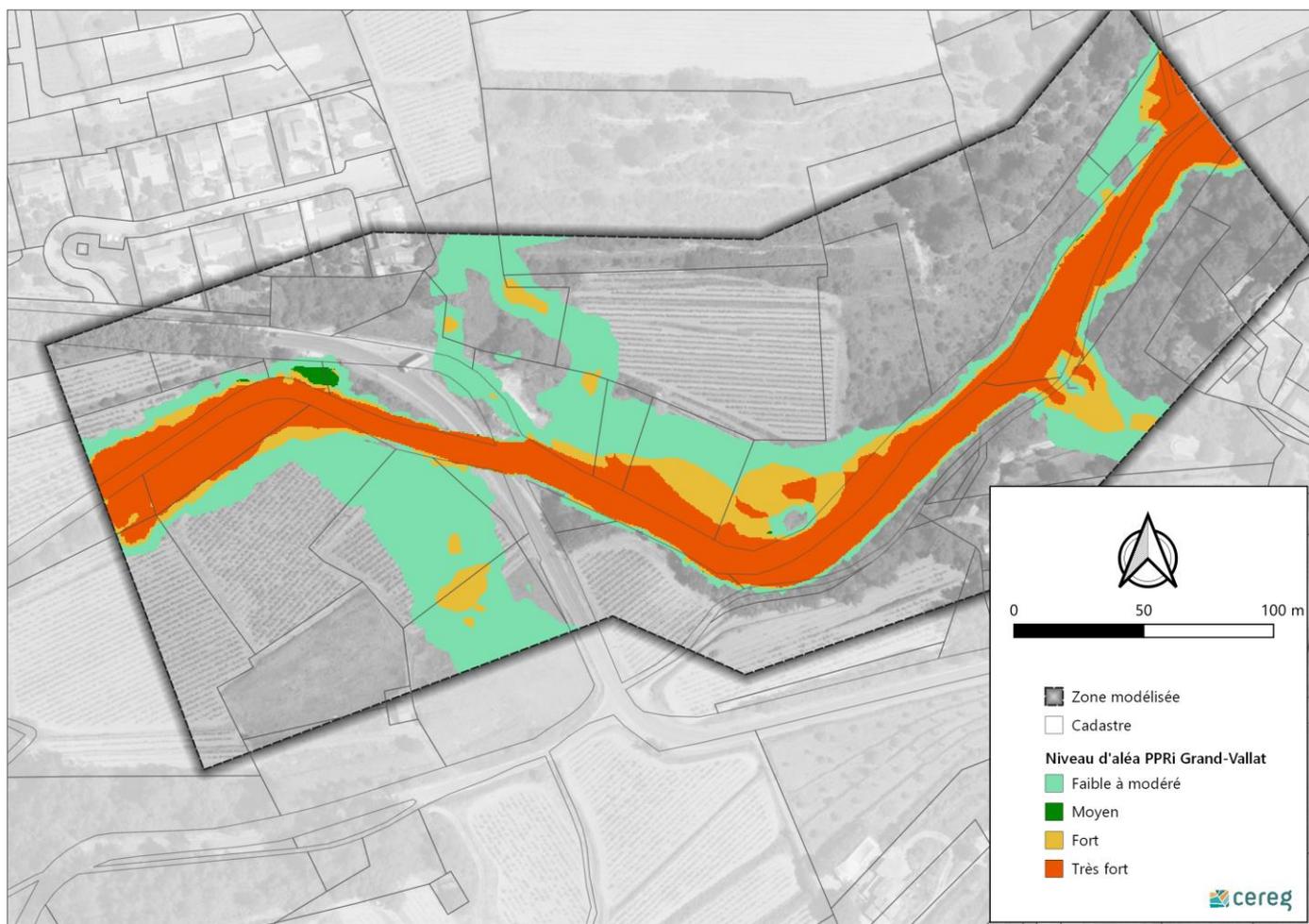


Illustration 13 : Carte d'aléa

Les résultats mettent en évidence la présence d'un aléa très fort sur la quasi-totalité du chemin des Faremberts. Les parcelles voisines au cours d'eau, dans la zone d'expansion de crue avant passage sous la route présentent des niveaux d'aléa variables. En s'éloignant du lit mineur, le niveau diminue progressivement et devient modéré à faible. Après passage du pont le niveau d'aléa très fort couvre une grande partie de l'emprise du champ d'inondation modélisé. Dans les zones de ruissellement les niveaux d'aléa sont majoritairement faibles étant donné les faibles hauteurs d'eau (inférieures à 50 cm) et vitesses (inférieures à 1m/s) sur ces zones.

## C.II.4. Emprise de l'inondation

L'emprise de l'inondation calculée est comparée aux précédentes études (PPRi du Grand-Vallat et étude hydrogéomorphologique) (cf. Illustration 14).

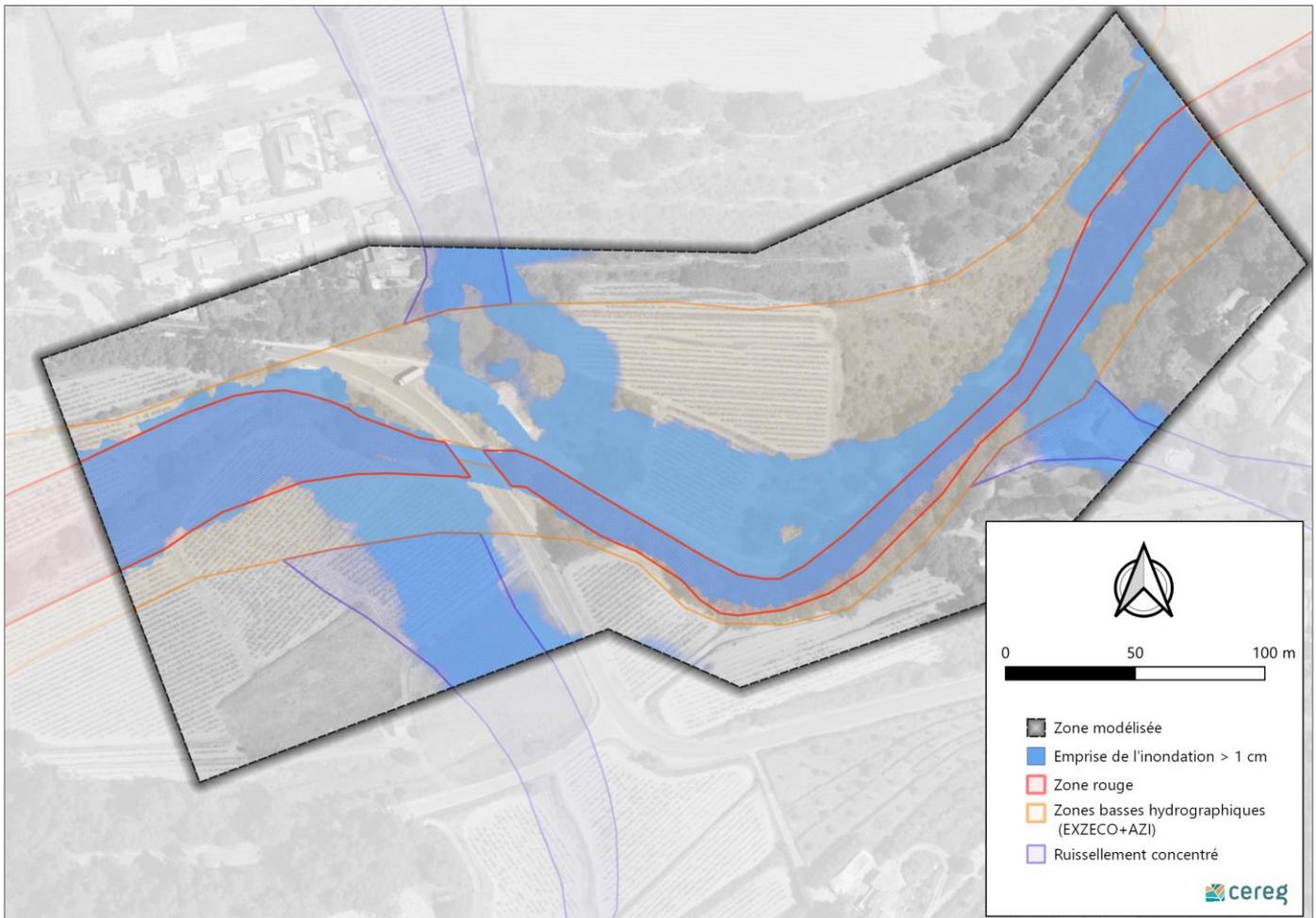


Illustration 14 : Comparaison de l'emprise d'inondation avec les études précédentes

La modélisation permet d'apporter un complément au PPRi en identifiant la zone d'expansion de crue située en rive droite avant le franchissement du pont de la D26.

Malgré données hydrologiques similaires à celles du PPRi (cf. partie B.III.3), les résultats sont différents. Ces différences sont principalement dues aux données topographiques utilisées et à la nature du modèle. En effet l'étude du PPRi est réalisée à partir d'un modèle 1D qui ne comprend qu'un seul profil en travers du Grand Vallat sur la zone de débordement (Cf. figure page suivante). Le modèle réalisé dans le cadre de notre étude utilise des données topographiques plus précises et récente (Cf. C.I.3). De plus, un modèle 2D permet de représenter plus précisément les débordements en lit majeur.

Les emprises définies par EXZECO et l'AZI fournissent une emprise maximale d'inondation sans indiquer une période de retour de l'évènement. Les résultats obtenus par modélisation sont contenus dans cette emprise maximale et sont donc en cohérence avec ces approches qualitatives.

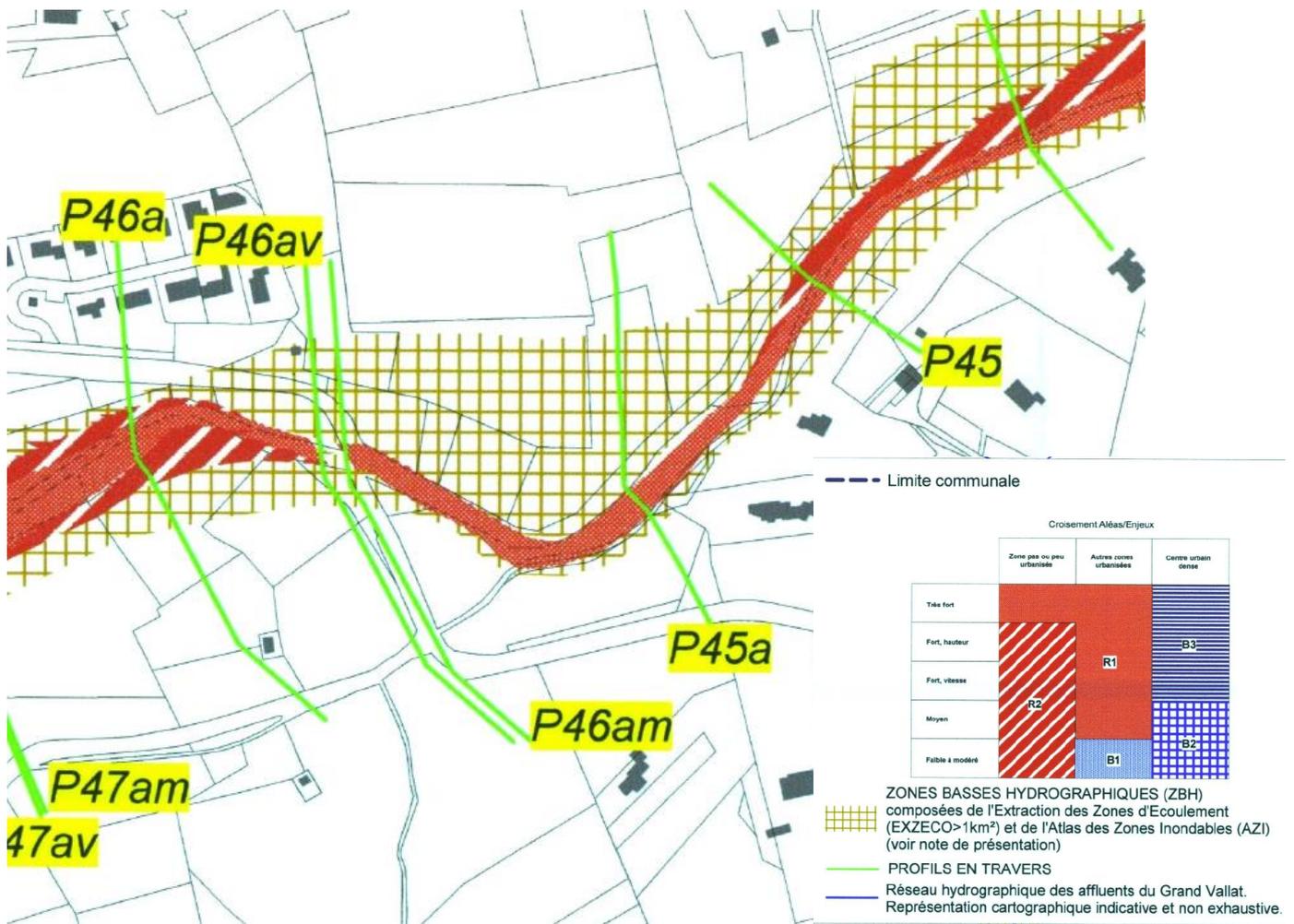


Illustration 15 : Extrait de la carte de zonage du PPRi du Castellet

## C.III. CONCLUSION

La modélisation de la zone d'étude sur le Grand-Vallat a permis d'identifier pour une période de retour 100 ans :

- L'emprise du champ d'inondation qui s'étend en rive droite avant le franchissement du pont sous la RD26 ;
- L'emprise du champ d'inondation en sortie de l'ouvrage de franchissement qui inonde les parcelles agricoles mitoyennes au cours d'eau ;
- Une carte des hauteurs d'eau avec des enjeux menacés comme le chemin des Faremberts, complètement inondé par plus de 1 mètre d'eau localement ;
- Une carte des vitesses avec des valeurs fortes (jusqu'à 5 m/s) dans le lit mineur mais aussi dans le lit moyen ;
- Une carte des aléas utilisant la table d'aléa du PPRi permettant d'identifier un niveau de risque très fort sur le chemin des Faremberts mais aussi des niveaux d'aléa forts sur certaines parcelles voisines ;
- Une définition de l'aléa d'inondation par ruissellement en complément de l'étude hydrogéomorphologique réalisée en amont.

La zone d'inondation est globalement importante avec des hauteurs d'eau supérieures à 1 mètre en de nombreux points mais aussi avec des vitesses relativement importantes du fait de la pente générale du terrain supérieure à 1%. Les apports latéraux sont quant à eux à l'origine de cônes de ruissellement plutôt rapides (jusqu'à 2 m/s) et peuvent être à l'origine d'apports de matériaux solides arrachés aux versants bordant le cours d'eau.

# D. ANNEXES



## LISTE DES ANNEXES

Annexe n°1 : Présentation du code de calcul SW2D .....	27
--	----

# Annexe n°1 : Présentation du code de calcul SW2D

## PRÉSENTATION DU CODE DE CALCUL SW2D

SW2D (Shallow Water 2D) est un logiciel de modélisation hydraulique permettant de simuler les écoulements de surface en 2 dimensions (X, Y). Il est développé par V. GUINOT du laboratoire Hydrosiences de l'université de Montpellier II et professeur à POLYTECH' Montpellier. Couplé à un logiciel SIG, SW2D permet des rendus de qualité pouvant porter un secteur en particulier ou l'ensemble d'une ville.

### Généralités sur SW2D

SW2D est un modèle multi-processus pour la simulation des écoulements à surface libre à différentes échelles spatiales. Les processus modélisés sont les suivants :

- précipitation et infiltration (2 modèles) distribuées dans l'espace et le temps,
- écoulements à surface libre,
- réseau pluvial enterré et aérien,
- structures (déversoirs, orifices) pouvant relier les deux côtés d'une limite imperméable,
- échanges avec et stockage dans le bâti (caves, cours et jardins, etc.)

Ainsi ce logiciel traite le problème des écoulements d'un cours d'eau dans sa totalité.

### Méthode utilisée par SW2D

#### • Équations résolues

Les équations reposent sur les lois fondamentales et fournissent les variations spatio-temporelles des variables d'état en fonction des conditions initiales et conditions aux limites, par l'intermédiaire de paramètres.

Les modèles mécanistes tels que SW2D sont basés sur les équations de Barré de Saint-Venant, système simplifié des équations de Navier-Stokes utilisé lorsque la composante verticale de la vitesse est faible par rapport aux deux composantes horizontales.

Le logiciel SW2D résout les équations de l'hydrodynamique à surface libre en deux dimensions d'espace : selon X et Y. Ces équations sont modifiées par rapport aux équations de Saint-Venant classiques, afin de prendre en compte un certain nombre de phénomènes que les équations de Saint-Venant ne permettent pas de représenter.

Les processus modélisés par le logiciel sont les suivants :

- propagation des ondes longues (Saint-Venant) en deux 2D avec porosité ;
- diffusion de la quantité de mouvement ;
- frottement sur le fond ;
- pertes de charge singulières ;
- précipitations sur la topographie ;
- infiltration ;
- échange avec le bâti.

Les équations résolues par le modèle SW2D sont de la forme :

$$\frac{\partial U}{\partial t} + \frac{\partial F}{\partial x} + \frac{\partial G}{\partial y} = S \quad (1)$$

Avec :

$$U = \begin{bmatrix} \phi h \\ \phi u h \\ \phi v h \end{bmatrix}, \quad F = \begin{bmatrix} \phi u h \\ \left( h a + g \frac{I^2}{2} \right) \phi \\ \phi v h \end{bmatrix}, \quad G = \begin{bmatrix} \phi u h \\ \phi v h \\ \left( h v^2 + g \frac{I^2}{2} \right) \phi \end{bmatrix} \quad (2)$$

Où  $g$  est l'accélération de la pesanteur,  
 $h$  est la profondeur d'eau,  
 $u$  et  $v$  sont les vitesses selon  $x$  et  $y$  respectivement  
 $\phi$  est la porosité

Le terme source est défini par :

$$S = \begin{bmatrix} P - I - E \\ (S_{0,x} - S_{f,x}) \phi g h + \phi u \epsilon (P - I - E) \\ (S_{0,y} - S_{f,y}) \phi g h + \phi v \epsilon (P - I - E) \end{bmatrix} \quad (3)$$

Où  $E$  est le terme d'échange avec le bâti  
 $I$  le taux d'infiltration  
 $P$  l'intensité de pluie  
 $S_{0,x}$  et  $S_{f,x}$  sont les pentes du fond et de la ligne d'énergie dans la direction  $x$  (notation similaire pour la direction  $y$ )  
 $\epsilon$  est donné par

$$\epsilon = \begin{cases} 0 & \text{si } P - I - E \geq 0 \\ 1 & \text{si } P - I - E < 0 \end{cases}$$

Les termes de pente du fond et de frottement sont donnés par :

$$S_{0,x} = \phi \frac{\partial z_b}{\partial x} + \frac{h}{2} \frac{\partial \phi}{\partial x} \quad (4)$$

$$S_{f,x} = \frac{\|u\|}{Kh^{4/3}} u + \begin{bmatrix} M_{11} & M_{12} \\ M_{21} & M_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u \\ v \end{bmatrix}$$

Où  $K$  est le coefficient de Strickler

Les termes  $M_{ij}$  du tenseur de pertes de charge représentent les pertes de charge singulières causées par le tissu urbain.

**Remarque :**

Les équations résolues par SW2D sont les équations classiques de Saint-Venant 2D auxquelles sont ajoutés des termes sources caractéristiques des écoulements en milieu urbain :

- précipitations ( $P$ ) ;
- infiltration pour les sols perméables ( $I$ ) ;
- échange avec les bâtis : les capacités éventuelles de rétention dans les bâtis sont modélisés par ce terme ;
- pertes de charge singulières dues aux éléments du milieu urbain.

Seuls les termes de frottement visqueux et turbulent sont négligés, ces termes étant négligeables par rapport aux autres termes dans le cas d'écoulement à surface libre en milieu urbain.

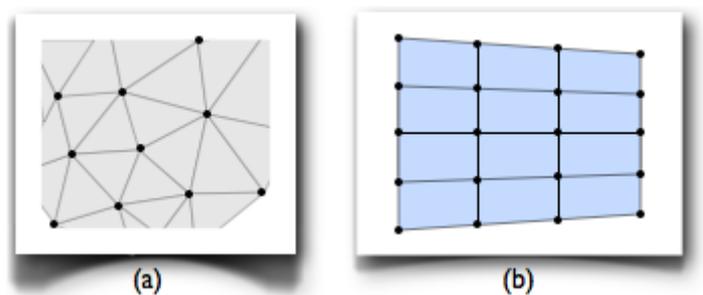
### ■ Méthode de résolution

Ces équations sont ensuite résolues selon la méthode dite des « volumes finis », qui se décompose en plusieurs étapes :

- l'espace est discrétisé en des petits volumes disjoints (en surfaces dans le cas d'espace) ;
- les équations précédentes sont intégrées sur ces volumes (les équations obtenues sont les équations d'Euler) ;
- ces équations sont discrétisées puis résolues sur chaque petit volume à l'aide d'un solveur de Riemann qui fournit des solutions aux équations d'Euler.

### Remarques :

1. Les équations résolues par SW2D sont les équations de Navier-Stokes sous forme conservative. Cette forme d'équations (par opposition aux équations non-conservatives) associée à la méthode des « volumes finis » préserve la propriété de conservation du débit lors de la résolution des équations discrétisées. La conservation du débit n'est pas systématique avec les autres méthodes. Par exemple, la méthode des éléments finis (utilisée par Telemac2D) ne prend pas nécessairement en compte cette loi de conservation, et les codes de calculs utilisant cette méthode doivent intégrer une vérification de cette propriété dans leurs algorithmes de résolution.
2. Ces équations intègrent un modèle de porosité et un modèle de perte de charge singulière (voir équation (5)) offrant une méthode alternative lors de la simulation d'écoulements en milieu urbain :
  - Dans la méthode de modélisation 2D classique, la géométrie des singularités est définie avec une certaine précision et les bâtiments sont considérés comme des frontières imperméables. Cette méthode nécessite d'avoir un grand nombre d'éléments en milieu urbain, et implique des temps de calcul conséquents, voire rédhibitoires dans certains cas.
  - Le modèle à porosité permet une modélisation 2D dite « macroscopique » dans laquelle le milieu urbain et ses éléments caractéristiques (voiries, bâtiments) sont représentés par l'intermédiaire de leurs propriétés moyennes : porosité et perte de charge due aux singularités. Avec cette méthode, le milieu urbain peut être représenté par des mailles de grande taille, offrant un temps de calcul moindre. À noter que dans cette méthode, les lois de conservation sont également respectées.
3. Le maillage utilisé par SW2D est de type « non-structuré » : les éléments du maillage sont des triangles ou des quadrilatères. Ce type de maillage présente l'avantage de s'adapter à n'importe quel type de géométrie et est donc adapté à la représentation d'un milieu urbain.



Maillages non structuré (a) et structuré (b)

## **Rendu et interactivité**

- **Rendu SW2D**

SW2D fournit des tableaux présentant au centre de chaque maille les données X, Y, Z.

X, Y étant les coordonnées du centre de chaque maille.

Z peut être la hauteur d'eau, la cote de la ligne d'eau, les débits unitaires selon x et y, la norme de la vitesse, la vitesse selon x et y, le nombre de Froude et le nombre de Courant.

- **Couplage SIG**

Les tableaux de données issus de SW2D peuvent être lus par n'importe quel logiciel SIG, notamment Mapinfo et Qgis.

Cette interactivité permet la visualisation rapide :

- des zones inondables,
- des enjeux impactés,
- de l'impact des aménagements
- ...