

Commune des Angles



ETUDE DE ZONAGE ET DE REDUCTION DU RISQUE INONDATION A L'ECHELLE COMMUNALE

**Phase 2 : Risque statistique - Etude hydrologique
et hydraulique**



Jun 2018

LE PROJET

Client	Commune des Angles
Projet	Etude de zonage et de réduction du risque inondation à l'échelle communale
Intitulé du rapport	Phase 2 : Risque statistique - Etude hydrologique et hydraulique

LES AUTEURS

	<p>Cereg Ingénierie - 589 rue Favre de Saint Castor – 34080 MONTPELLIER Tel : 04.67.41.69.80 - Fax : 04.67.41.69.81 - montpellier@cereg.com www.cereg.com</p>
--	---

Réf. Cereg - M15051

Id	Date	Etabli par	Vérifié par	Description des modifications / Evolutions
V1	Juin 2018	Audrey LATAPIE	Philippe DEBAR	Version initiale

Certification



TABLE DES MATIERES

A. ANALYSE HYDROLOGIQUE	7
A.I. CARACTERISTIQUES DES BASSINS VERSANTS D'APPORTS A LA ZONE D'ETUDE	8
A.I.1. Estimation des coefficients de ruissellement.....	9
A.I.2. Estimation des temps caractéristiques des bassins versants.....	12
A.I.2.1. <i>Temps de concentration</i>	12
A.I.2.2. <i>Temps de réponse</i>	13
A.II. PLUVIOMETRIE.....	13
A.II.1. Pluviométrie statistique	13
A.II.2. Analyse de l'événement des 8 et 9 septembre 2002	16
A.II.3. Elaboration des pluies de projet	16
A.II.4. Détermination des débits de pointe	17
A.II.4.1. <i>Méthode rationnelle</i>	17
A.II.4.2. <i>Modélisation hydrologique</i>	19
B. ETUDE HYDRAULIQUE	22
B.I. CONSTRUCTION DU MODELE HYDRAULIQUE	23
B.I.1. Méthodologie.....	23
B.I.2. Données topographiques.....	23
B.I.2.1. <i>Données existantes</i>	23
B.I.2.2. <i>Données acquises dans le cadre de l'étude</i>	24
B.I.3. Maillage de la zone d'étude	25
B.I.4. Calage du modèle hydraulique	27
B.II. EXPLOITATION DU MODELE HYDRAULIQUE	30
B.III. CARTOGRAPHIE DE L'ALEA INONDATION	34
B.III.1. Principes généraux.....	34
B.III.2. Définition de l'aléa par ruissellement pluvial.....	35
B.III.3. Prise en compte du risque d'inondation par ruissellement	36
B.IV. CROISEMENT ALEA / ENJEUX.....	36
C. ANNEXES	37

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Caractéristiques et occupation des sols des bassins versants périphériques.....	9
Tableau 2 : Capacité de rétention initiale (mm).....	9
Tableau 3 : Coefficients de ruissellement préconisés par la DDTM 30 (extrait du Guide technique de réalisation des dossiers Loi sur l'Eau).....	10

Tableau 4 : Cumuls pluviométriques journaliers de la station de Nîmes – Courbessac.....	11
Tableau 5 : Coefficients de ruissellement des sous bassins versants pour les occurrences 5, 10, 30 et 100 ans.	11
Tableau 6 : Méthodes utilisées pour le calcul du temps de concentration Tc (en heures).....	12
Tableau 7 : Détermination des vitesses d'écoulement selon les occurrences de crues pour le calcul du temps de concentration avec la formule de Bressand-Golossof.	12
Tableau 8 : Temps de concentration des bassins versants périphériques.	13
Tableau 9 : Coefficients de Montana de la station de Nîmes-Courbessac (1964-2012).	14
Tableau 10 : Quantiles de pluie Shyreg sur la commune des Angles.	15
Tableau 11 : Ajustement des coefficients de Montana de la station de Nîmes-Courbessac à la commune des Angles.	15
Tableau 12 : Cumuls de pluies dérivées du hyétogramme et détermination de l'occurrence.	16
Tableau 13 : Détermination des débits de pointe des bassins versants périphériques.	18
Tableau 14 : Comparaison des débits de pointe (Qp), coefficients de ruissellement (Cr), temps de concentration (Tc) de l'étude COGA (en bleu) et des valeurs déterminées dans la présente étude (en noir).....	18
Tableau 15 : Débits obtenus avec le modèle hydrologique et la méthode rationnelle pour les différentes occurrences et estimation de débit de pointe pour l'événement de 2002.	19
Tableau 16 : Prise en compte du karst dans les différents scénarios modélisés.	21
Tableau 17 : Crue de Septembre 2002 - Comparaison des hauteurs de submersion observées et calculées.	28
Tableau 18 : Nombre de bâtiments sur la commune et en zone inondable.	36

LISTE DES ILLUSTRATIONS

Illustration 1 : Définition des bassins versants périphériques et emprise du modèle hydraulique (contour en noir).....	8
Illustration 2 : Géologie des bassins versants périphériques des Angles.	10
Illustration 3 : Comparaison des hauteurs aux stations de Nîmes Courbessac et Orange et données calculées avec la méthode SHYREG sur la commune des Angles.	14
Illustration 4 : Cumul pluviométrique du 08/09/2002 00h00 au 10/09/2002 00h00 (TU).	16
Illustration 5 : Exemple de pluies de projet Desbordes pour une occurrence décennale.	17
Illustration 6 : Contour du modèle hydraulique en magenta et localisation des extensions basées sur les données RGE ALTI et BDT Rhône (en bleu).	25
Illustration 7 : Exemple des types de murs disponibles sur le levé Lidar (en vert) et non disponible (en rouge).	26
Illustration 8 : Conditions aux limites du modèle hydraulique.	27
Illustration 9 : Hauteurs de submersion calculées pour l'événement de 2002 et localisation des secteurs mentionnés dans le texte.	29
Illustration 10 : Hauteurs de submersion et vitesses d'écoulement pour la crue d'occurrence centennale sur le secteur des Lardières / Grand Terme.	30
Illustration 11 : Hauteurs de submersion pour la crue d'occurrence centennale et aperçu du bassin de l'entreprise Blancolor mentionné dans le texte.	31
Illustration 12 : Hauteurs de submersion et vitesses d'écoulement pour la crue d'occurrence centennale sur le secteur de l'EHPAD.....	31
Illustration 13 : Hauteurs de submersion et vitesses d'écoulement pour la crue d'occurrence centennale sur le secteur du Forum.	32

Illustration 14 : Hauteurs de submersion et vitesses d'écoulement pour la crue d'occurrence centennale sur le secteur du boulevard Diderot. 33

Illustration 15 : Comparaison de la zone inondée définie par approche hyfrogeomorphologique et calculée avec le modèle hydraulique. 34

Illustration n°16 : Grille d'évaluation de l'aléa ruissellement – croisement hauteurs et vitesses. 35

PREAMBULE

La commune des Angles est inscrite au cœur du territoire drainé par les bassins versants du Gard Rhodanien. Cette dénomination couvre tous les bassins versants ayant leur exutoire au Rhône et localisés dans le département du Gard, entre la Cèze et le Gardon.

La commune des Angles comme de nombreuses autres communes de la rive droite du Rhône a fait l'objet ces 30 dernières années d'un développement important, qui s'est traduit par un étalement urbain en direction des reliefs collinéens sous la forme d'un habitat pavillonnaire diffus. Son territoire, notamment sa zone urbanisée, est potentiellement impactée par les inondations provenant des vallons qui descendent des reliefs pour rejoindre la plaine du Rhône. Cette dernière quant à elle, est inondable par les crues du fleuve. Le projet de développement urbain de la commune implique donc une connaissance approfondie de cet aléa pour envisager la poursuite de l'urbanisation.

L'objectif de la présente étude est de proposer une analyse globale du risque inondation suivant une méthodologie définie par le Groupe d'Echange sur le Risque Inondation (GERI). Le GERI regroupe à l'échelle du département du Gard, les différents acteurs de la gestion du risque inondation (Conseil Général du Gard, DDTM, DREAL, Région).

Cette étude de cartographie des zones inondables sur la commune s'inscrit dans ce projet d'amélioration des connaissances en vue notamment d'une intégration de cette problématique dans le futur document d'urbanisme.

L'étude a été décomposée en trois phases :

- Phase 1 : Risque historique-hydrogéomorphologique
- Phase 2 : Risque statistique : étude hydrologique et hydraulique
- Phase 3 : Elaboration du zonage

Le présent rapport couvre l'intégralité de la phase 2.

A. ANALYSE HYDROLOGIQUE



A.I. CARACTERISTIQUES DES BASSINS VERSANTS D'APPORTS A LA ZONE D'ETUDE

La mise en œuvre de la modélisation hydraulique nécessite la définition des bassins versants d'apports aux différents points d'injection du modèle. Le découpage des bassins versants a été réalisé sur la base des fonds de cartes IGN et des reconnaissances de terrain. Les 7 bassins versants ainsi définis sont présentés sur l'illustration ci-dessous et leurs caractéristiques sont détaillées dans le tableau suivant.

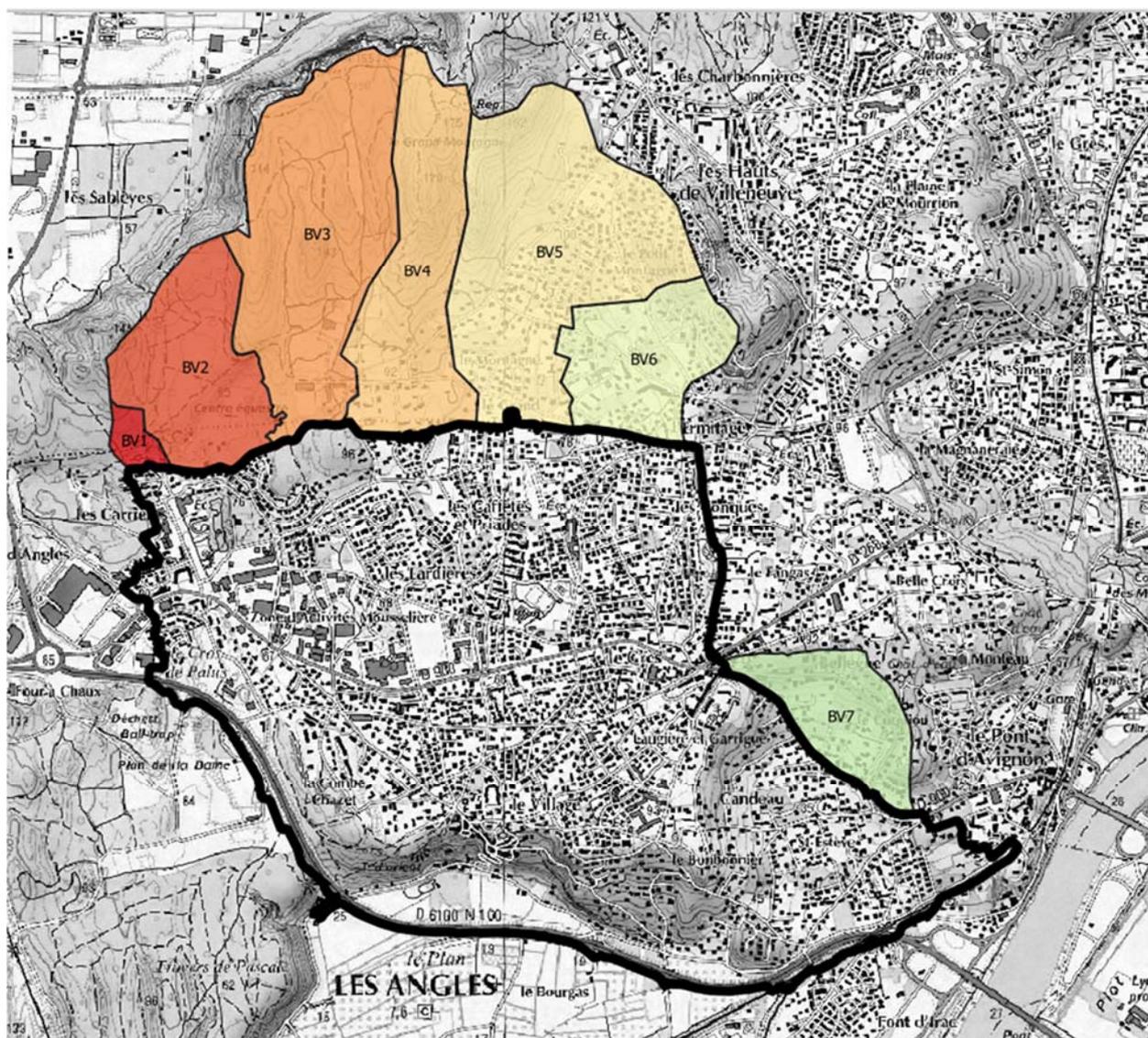


Illustration 1 : Définition des bassins versants périphériques et emprise du modèle hydraulique (contour en noir).

Afin de caractériser au mieux l'occupation des sols, une analyse à partir des photographies aériennes et de la base de données Corine Land Cover a été effectuée. Les surfaces de zones urbaines et de zones naturelles sont ainsi estimées (tableau 1).

Bassin versant	BV1	BV2	BV3	BV4	BV5	BV6	BV7
Superficie (ha)	3.15	32.3	58.2	39.1	64.3	26.5	18.7
Longueur hydraulique (m)	310	875	1350	1265	1180	710	590
Pente (%)	7.42	3.77	4.67	7.04	7.71	9.01	7.46
Zones urbaines (ha)	0	0.6	2.7	13.7	44.5	26.5	18.7
Zones naturelles (ha)	3.15	31.7	55.5	25.4	19.8	0	0
Surfaces imperméabilisées (ha)	0	0.2	0.1	4.1	13.3	9.3	5.6

Tableau 1 : Caractéristiques et occupation des sols des bassins versants périphériques.

Les bassins versants 1, 2 et 3 au Nord-Ouest de la commune sont des bassins naturels peu urbanisés tandis que les bassins périphériques localisés à l'Ouest présentent une urbanisation plus développée.

A.I.1. Estimation des coefficients de ruissellement

Le coefficient de ruissellement caractérise la fraction d'une lame d'eau précipitée qui ruisselle sur un bassin versant. Ce coefficient est influencé par la nature et la couverture du sol du bassin versant.

La zone d'étude est constituée de zones urbaines de types pavillonnaires et de garrigues. L'occupation des sols et en particulier, l'imperméabilisation des surfaces par l'urbanisation, est l'une des causes majeures des débits et des volumes rendus vers l'aval.

L'estimation du coefficient de ruissellement se fait selon différentes formules en fonction des occurrences considérées. Ainsi, le calcul du coefficient de ruissellement pour une occurrence centennale se fait en appliquant la formulation dite des « Experts ».

$$Cr_{100\text{ ans}} = 0.8 * \left(1 - \frac{P_0}{Pj_{(100\text{ ans})}} \right)$$

avec $Pj_{(100\text{ ans})}$ la pluie journalière centennale et P_0 la capacité de rétention initiale des sols déterminée à partir du tableau suivant extrait du « Guide technique de réalisation des dossiers Loi sur l'Eau » de la rubrique 2.1.5.0 de la DDTM du Gard ($P_0 = 0$ mm dans le cas d'un sol imperméabilisé) :

Seuils de ruissellement P_0 (d'après Astier et al. 1993)					
Couverture végétale	Morphologie	Pente (%)	Nature du sol		
			Sableux	Limoneux	Argileux compact
Bois Garrigue	Presque plat	0 - 5	90	65	50
	Ondulé	5 - 10	75	55	35
	Montagneux	10 - 30	60	45	25
Pâturage	Presque plat	0 - 5	85	60	50
	Ondulé	5 - 10	80	50	30
	Montagneux	10 - 30	70	40	25
Cultures	Presque plat	0 - 5	65	35	25
	Ondulé	5 - 10	50	25	10
	Montagneux	10 - 30	35	10	0

Tableau 2 : Capacité de rétention initiale (mm).

Pour déterminer la nature du sol, une analyse des cartes géologiques du BRGM a été effectuée (illustration 2).

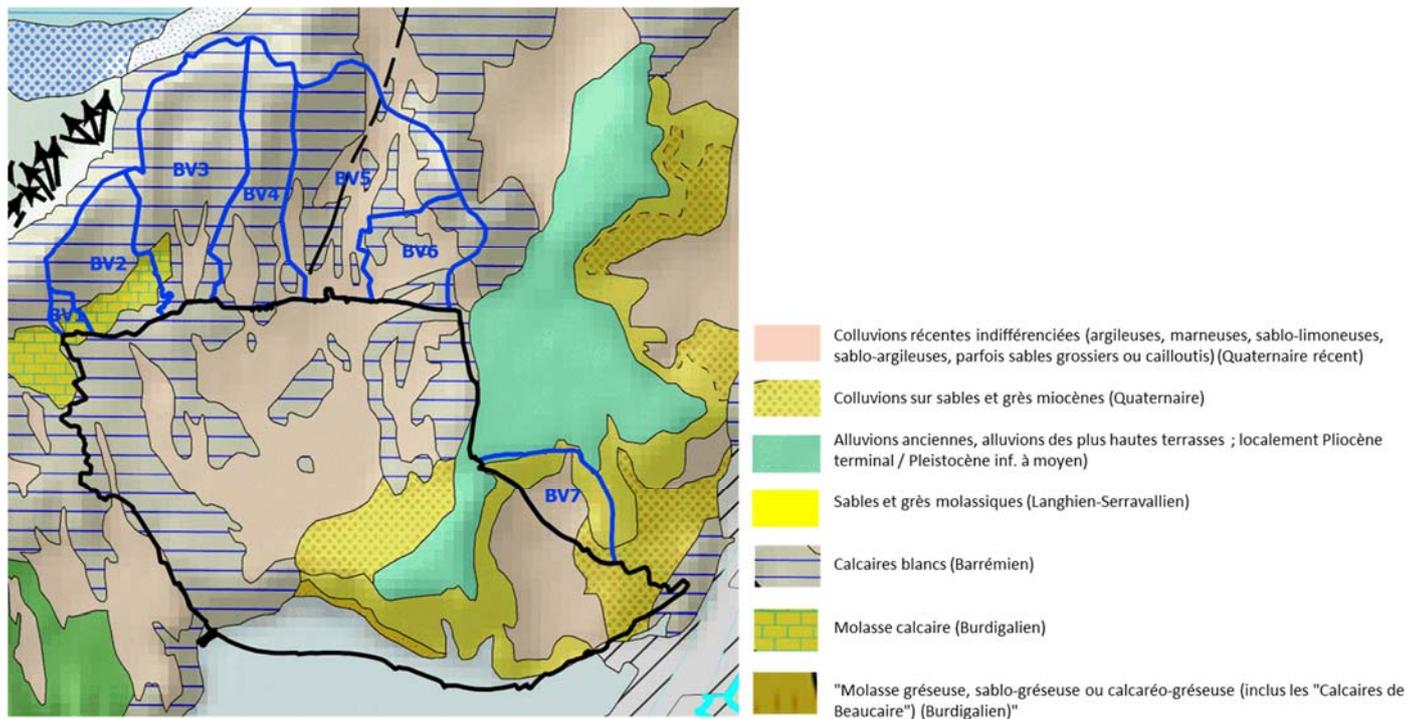


Illustration 2 : Géologie des bassins versants périphériques des Angles.

Les formations calcaires dominent et sont recouvertes par des dépôts de versants. Il en résulte que :

- Le bassin versant no. 1 est caractérisé par des molasses calcaires ;
- Les sols bassins versants no. 2, 3, 4 et 5 sont caractérisés principalement par des calcaires blancs ;
- Les sols du bassin no. 6 sont des calcaires blancs et des colluvions récentes ;
- Le bassin versant no. 7 est caractérisé par la présence de colluvions récentes et de sables et grès molassiques.

Le contexte géologique karstique est à souligner car il a une influence sur la perméabilité. La prise en compte du karst dans la modélisation hydrologique est détaillée dans le paragraphe A.II.4.2.

Pour l'occurrence trentennale, une formule des Experts « adaptée » est utilisée :

$$Cr_{30 \text{ ans}} = 0.6 * \left(1 - \frac{P_0}{Pj_{(30 \text{ ans})}} \right)$$

avec $Pj_{(30 \text{ ans})}$ la pluie journalière trentennale et P_0 la capacité de rétention initiale du sol définie précédemment.

Pour les occurrences de 2 et 10 ans, les coefficients de ruissellement sont calculés à partir d'une moyenne pondérée des valeurs unitaires des types d'occupation des sols préconisés par les services de la DDTM du Gard rappelés ci-après

OCCUPATION DU SOL	Cr
Zones urbaines	0.80
Zones industrielles et commerciales	0.70
Espaces verts artificiels	0.12
Vignobles	0.30
Vergers	0.15
Prairies - friches	0.11
Terres arables	0.15
Garrigues	0.11
Forêts	0.10

Tableau 3 : Coefficients de ruissellement préconisés par la DDTM 30 (extrait du Guide technique de réalisation des dossiers Loi sur l'Eau).

La pluie journalière de l'occurrence correspondante est également nécessaire au calcul du coefficient de ruissellement. Les données disponibles à la station météorologique de Nîmes-Courbessac, qui est la station de référence dans le département du Gard, sont fournies dans le tableau ci-après.

Occurrence T (ans)	Cumuls pluviométriques journaliers Pj (T) (mm)
5 ans	116.9
10 ans	148.4
20 ans	184.7
30 ans	208.8
50 ans	242.7
100 ans	296.0

Tableau 4 : Cumuls pluviométriques journaliers de la station de Nîmes – Courbessac.

Pour les surfaces imperméabilisées, le coefficient de ruissellement est fixé égal à 1.

Ainsi, pour chaque bassin versant d'apport au secteur d'étude, la détermination du coefficient de ruissellement résulte de la pondération des surfaces naturelles et imperméabilisées :

$$Cr = \frac{S_{\text{imperméable}} * 1 + S_{\text{naturelle}} * Cr_{\text{expert}}}{S_{\text{totale}}}$$

Les coefficients de ruissellement ainsi déterminés sont comparés aux coefficients établis dans le schéma communautaire d'assainissement des eaux usées et des eaux pluviales de la COGA (2008) pour les bassins versants similaires à ceux de la présente étude.

Bassin versant	5 ans		10 ans		30 ans	100 ans
	Notre estimation	COGA	Notre estimation	COGA		
BV1	0.25	-	0.37	-	0.44	0.58
BV2	0.22	0.20	0.41	0.42	0.46	0.57
BV3	0.22	0.21	0.41	0.42	0.46	0.57
BV4	0.33	-	0.44	-	0.53	0.63
BV5	0.41	-	0.50	-	0.57	0.67
BV6	0.38	0.34	0.59	0.55	0.65	0.73
BV7	0.48	-	0.56	-	0.62	0.71

Tableau 5 : Coefficients de ruissellement des sous bassins versants pour les occurrences 5, 10, 30 et 100 ans.

Les coefficients de ruissellement obtenus sont similaires aux coefficients établis dans le schéma communautaire (COGA, 2008) pour les occurrences 5 ans et 10 ans.

A.I.2. Estimation des temps caractéristiques des bassins versants

A.I.2.1. Temps de concentration

Le temps de concentration correspond à la durée que met la goutte d'eau tombée au point le plus éloigné du bassin versant pour parvenir à l'exutoire où l'on cherche à calculer le débit. La connaissance de ce temps de concentration est nécessaire à l'estimation des débits de pointe.

Les études hydrologiques et hydrauliques sur les communes proches de Villeneuve-les-Avignon et Tavel ont utilisé les méthodes de Kirpich, Passini et Ventura ainsi que la méthode de Bressand Golossof. Les différentes formules ainsi que leur domaine de validité sont détaillées dans le tableau ci-dessous.

L'ensemble de ces formules est de type empirique. Les formules de Passini, Ventura et Kirpich s'appliquent principalement aux grands bassins ruraux. Seule la formule de Bressand Golossof est adaptée aux bassins de taille plus réduite.

Méthode	Formule	Données d'entrée	Domaine de validité
Kirpich	$T_c = \frac{0.0195}{60} (L)^{0.77} (P)^{-0.385}$	L longueur du plus long cheminement hydraulique (m) P pente moyenne sur le plus long cheminement (m/m)	20 km ² < A < 100 km ² 3% > P > 10%
Passini	$T_c = 0,108 \frac{\sqrt[3]{AL}}{\sqrt{P}}$	A surface du bassin versant (km ²) L longueur du plus long cheminement hydraulique (km) P pente moyenne sur le plus long cheminement (m/m)	A > 40 km ²
Ventura	$T_c = 0,1272 \frac{\sqrt{A}}{\sqrt{P}}$	A surface du bassin versant (km ²) P pente moyenne sur le plus long cheminement (m/m)	A > 10 km ²
Bressand Golossof	$T_c = \frac{L}{(V * 3600)}$	L longueur du plus long cheminement hydraulique (km) V vitesse moyenne des écoulements (m/s)	A < 20 km ²

Tableau 6 : Méthodes utilisées pour le calcul du temps de concentration Tc (en heures).

Dans la formule de Bressand Golossof, la détermination des vitesses moyennes des écoulements doit être adaptée en fonction des occurrences de crue selon le guide technique pour l'élaboration des dossiers loi sur l'eau de la DDTM du Gard (cf. tableau ci-après).

T = 2 ans et T = 10 ans				T = 100 ans	
Pente (%)	Vitesse d'écoulement (m/s)			Pente du BV	Vitesse d'écoulement
	Pâturage dans la partie supérieure du bassin versant	Bois dans la partie supérieure du bassin versant	Impluvium naturel mal défini		
0-3	0.45	0.60	0.30	P < 1 %	V = 1m/s
4-7	0.90	0.60	0.90	1% < P < 10 %	V = 1 + (p-1) / 9
8-11	1.30	0.90	1.50	P > 10 %	V = 2 à 2.4 m/s
12-15	1.30	1.05	2.40		

Tableau 7 : Détermination des vitesses d'écoulement selon les occurrences de crues pour le calcul du temps de concentration avec la formule de Bressand-Golossof.

Compte tenu de l'approximation de l'ensemble des formules et à défaut de données de calage du temps de concentration, il est communément admis de prendre par hypothèse, la moyenne des résultats sauf si les écarts sont trop importants.

Pour la pluie centennale, seule la formule de Bressand Golossof est utilisée conformément aux prescriptions du département du Gard. Les résultats obtenus sont présentés dans le tableau ci-dessous.

Bassin versant	2 ans < T < 100 ans					T = 100 ans
	Tc Kirpich (min)	Tc Passini (min)	Tc Ventura (min)	Tc BG (min)	Moyenne (min)	Tc BG (min)
BV1	4.4	5.1	4.9	2	4.1	2
BV2	12.7	21.9	22.3	16	18.2	14.5
BV3	16.3	27.7	26.9	25	24.0	22.4
BV4	13.2	13.3	18.0	23	16.9	20.9
BV5	12.1	21.3	22.0	22	19.4	19.5
BV6	7.7	12.4	13.1	13.2	11.6	11.7
BV7	7.2	11.4	12.1	11	10.4	9.7

Tableau 8 : Temps de concentration des bassins versants périphériques.

On observe une dispersion assez grande des résultats avec un facteur atteignant 1.8 entre les valeurs obtenues avec la formule de Ventura et l'estimation de Kirpich sur le bassin versant no. 5. Les résultats obtenus avec les formules de Passini et Ventura sont proches, la formule de Passini étant une adaptation de la formule de Ventura.

Le temps de concentration calculé pour le bassin versant no. 1 est très court (inférieurs à 6 minutes). Ce temps de concentration ne correspond pas à la réalité hydrologique généralement observée sur le terrain et a donc été prise égale à 6 minutes. De plus, les données météorologiques disponibles (coefficients de Montana) ne sont pas analysées par Météo France pour des durées inférieures à 6 minutes.

A.I.2.2. Temps de réponse

Le temps de réponse (ou lag time) d'un bassin versant représente l'intervalle de temps qui sépare le centre de gravité de la pluie nette du centre de gravité de l'hydrogramme dû à l'écoulement de surface.

Selon les préconisations de Bresand Golossof, ce paramètre utilisé pour la mise en œuvre des modèles pluie-débit est estimé égal à la moitié des temps de concentration calculés précédemment.

A.II. PLUVIOMETRIE

A.II.1. Pluviométrie statistique

La pluviométrie utilisée pour construire les pluies de projet est celle de la station de Nîmes-Courbessac. Le choix de cette station au lieu de la station d'Orange pourtant plus proche est principalement motivé par le fait que la pluviométrie de la station de Nîmes-Courbessac est plus pénalisante comme illustré sur le graphique ci-après. La station de Nîmes Courbessac présente également une chronique d'observations plus longue et ses indicateurs statistiques sont plus fiables.

Une distance de 31 km sépare la commune Les Angles de la station météorologique de Nîmes-Courbessac. Compte tenu de l'éloignement géographique entre la commune et la station, la pluviométrie sur le secteur d'étude sera rendue par un ajustement des coefficients de Montana de la station météorologique de Nîmes-Courbessac par la méthode SHYREG. Il s'agit

d'une méthode développée par IRSTEA pour la régionalisation des quantiles de pluie. La description de la méthodologie est fournie dans les paragraphes suivants.

Ainsi, pour estimer les hauteurs et les intensités précipitées, les données disponibles sont :

- Les données statistiques de la station de Nîmes-Courbessac ;
- Les données calculées à l'aide de la méthode SHYREG sur la commune et commandées auprès de Météo-France.

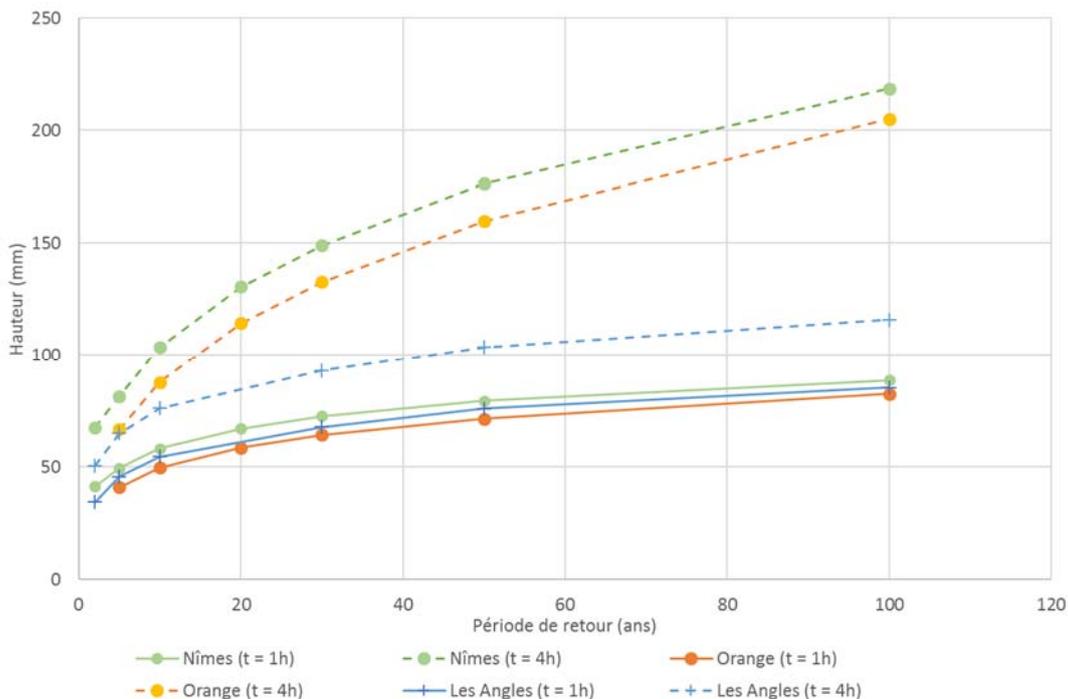


Illustration 3 : Comparaison des hauteurs aux stations de Nîmes Courbessac et Orange et données calculées avec la méthode SHYREG sur la commune des Angles.

■ Coefficients de Montana

L'intensité de pluie nécessaire à l'estimation des débits de pointe est déterminée à partir de la formule de Montana :

$$I = a \times t^{-b}$$

avec I l'intensité de la pluie de durée t et a et b les coefficients de Montana.

Le poste de Nîmes-Courbessac dispose de données statistiques calculées sur une longue période de 48 ans (1964-2012). Les coefficients de Montana pour des durées de pluies comprises entre 6 minutes et 6 heures sont présentés dans le tableau suivant.

Nîmes Courbessac (1964 – 2012)	6' < d < 2h		2h < d < 6h	
	a	b	a	b
2 ans	41.39	0.47	45.53	0.72
5 ans	49.57	0.46	53.39	0.70
10 ans	58.20	0.43	62.66	0.64
20 ans	67.12	0.39	71.73	0.57
30 ans	72.55	0.36	76.96	0.52
50 ans	79.41	0.34	83.60	0.46
100 ans	88.63	0.30	91.58	0.37

Tableau 9 : Coefficients de Montana de la station de Nîmes-Courbessac (1964-2012).

Pluviométrie statistique SHYREG

IRSTEA a développé un modèle permettant une approche spatialisée de la pluviométrie basée sur les chroniques de pluie horaire disponibles sur 217 stations du réseau météorologique en France.

Il permet d'obtenir des hauteurs de précipitation horaires sur des durées comprises entre 1h et 72h pour différentes périodes de retour (de 2 à 1000 ans) à l'échelle de mailles de 1 km². Sur chacune de ces mailles, un générateur aléatoire de chroniques de pluie est mis en place sur la base de diverses variables géographiques (altitude, relief) et des données aux postes pluviométriques les plus proches.

Le tableau suivant présente les valeurs des quantiles de pluie SHYREG sur la commune des Angles.

Durées de cumul	Période de retour					
	2 ans	5 ans	10 ans	20 ans	50 ans	100 ans
1 heure	34.4 mm	45.7 mm	54.5 mm	63.6 mm	75.9 mm	85.3 mm
4 heures	50.6 mm	64.9 mm	76.1 mm	87.6 mm	103.5 mm	115.9 mm

Tableau 10 : Quantiles de pluie Shyreg sur la commune des Angles.

Ajustement des coefficients de Montana

La méthode SHYREG fournit des quantiles de pluie pour différentes occurrences à partir d'une durée minimale de pluie de 1h. Or, bien souvent et c'est le cas pour la présente étude, les temps de concentration des bassins versants dont on cherche à déterminer les débits de pointe, présentent des temps de concentration inférieurs à l'heure.

Il a donc été recherché une méthode qui tout en bénéficiant de la richesse de l'information SHYREG, permette de déterminer des intensités de pluie sur des durées inférieures à l'heure. Cela est possible dans la mesure où les intensités et hauteurs de pluie de période de retour donnée sont liées par les courbes Intensité-Durée-Fréquence (IDF). Ainsi pour deux durées t_1 et t_2 , les hauteurs de période de retour T répondent à :

$$i_1/i_2 = (t_1/t_2)^{(1-b)}$$

Avec i_1 , i_2 les hauteurs précipitées pour les durées t_1 et t_2 et $b(T)$ le coefficient de Montana.

On peut donc simplement dégager des coefficients de proportionnalité sensiblement constants pour un secteur géographique donné. La méthode consiste donc à :

- Calculer ces coefficients de proportionnalité i_{15}/i_{60} , i_{30}/i_{60} puis i_{45}/i_{60} pour une occurrence donnée à partir de la station pluviographique de référence ;
- Estimer les quantiles en 15, 30 et 45 minutes en appliquant ces coefficients à la hauteur tombée en 1 h fournie par SHYREG ;
- Recalculer par ajustement statistique le coefficient « a » sur les durées 15 à 60 minutes à partir des 4 hauteurs (ou intensité) ainsi interpolée.

Le résultat de l'ajustement des coefficients de Montana est indiqué dans le tableau ci-dessous.

Ajustement des coefficients de Montana	6'<d<2h		2h<d<6h	
	a	b	a	b
2 ans	34.400	0.465	34.085	0.715
5 ans	45.700	0.463	42.522	0.695
10 ans	54.500	0.426	46.072	0.638
30 ans	67.700	0.364	47.955	0.523
50 ans	75.900	0.335	49.026	0.461
100 ans	85.300	0.297	48.528	0.372

Tableau 11 : Ajustement des coefficients de Montana de la station de Nîmes-Courbessac à la commune des Angles.

A.II.2. Analyse de l'événement des 8 et 9 septembre 2002

Le hyétogramme cumulé spatialisé décrivant la pluie tombée sur la zone d'étude pour cet événement a été obtenu auprès de Météo France. L'événement a duré 2 jours (du 08/09/2002 au 10/09/2002) et il est tombé 350 mm d'eau durant cet épisode. L'intensité maximale de la pluie est de 93 mm/h.

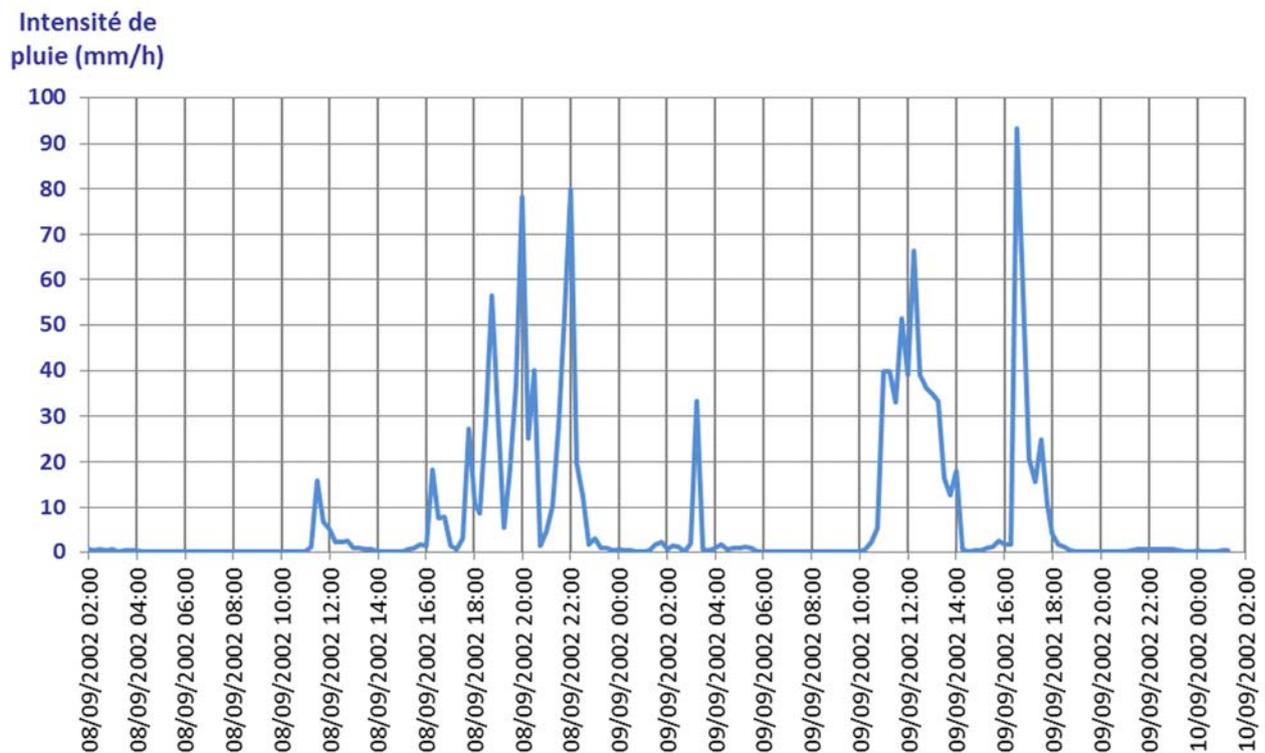


Illustration 4 : Cumul pluviométrique du 08/09/2002 00h00 au 10/09/2002 00h00 (TU).

En comparant les lames d'eau précipitées pendant l'événement pour plusieurs durées de pluie aux quantiles SHYREG, il est possible de connaître la période de retour de l'événement observé (Tableau 12).

Durée (h)	0.25	0.50	1	2	4	6
Les Angles	23 mm	38 mm	59 mm	86 mm	129 mm	155 mm
Occurrence	05 – 10 ans	05 – 10 ans	05 – 10 ans	10 - 20 ans	>100 ans	>100 ans

Tableau 12 : Cumuls de pluies dérivées du hyétogramme et détermination de l'occurrence.

L'analyse montre que l'événement de Septembre 2002 est un événement de période de retour estimée entre 05 ans et 10 ans pour des pluies de durée inférieure à 1 h. Pour des durées de 4 à 6 h, la période de retour est centennale.

A.II.3. Elaboration des pluies de projet

Les pluies de projet sont des pluies synthétiques construites à partir de statistiques établies sur des pluies réelles. Plusieurs méthodes de construction existent : il a été choisi la méthode de Desbordes en concertation avec le comité de pilotage de l'étude.

Les principales caractéristiques de ces pluies sont les suivantes :

- Une durée totale de pluie DP ($DP = 4$ h) ;
- Une durée de pluie intense DM ;

- Une hauteur d'eau précipitée durant la période totale HT ;
- Une hauteur d'eau précipitée durant la période intense HM .

La durée totale de la pluie de projet est généralement prise égale à 4h. Sur cette durée, selon la bibliographie, il tombe plus de 80% de la hauteur totale des épisodes pluvieux significatifs dans 73% des cas. A une hauteur intense précipitée (HM), on associe une hauteur totale (HT). Celle-ci est déduite de valeurs observées sur des pluies réelles correspondantes.

La durée de la période intense ne peut être arrêtée a priori : il convient donc de tester plusieurs durées intenses afin de retenir l'événement le plus pénalisant en termes de débit de pointe sur le secteur d'étude. En effet, les durées intenses courtes associées à de fortes intensités auront tendance à maximiser les débits de pointe des petits bassins versants alors que les durées intenses longues vont générer des volumes importants et maximiser les débits générés par les grands bassins versants et saturer les dispositifs de rétention.

Les paramètres des pluies de Desbordes sont calés de façon à donner le débit d'occurrence T au niveau des points d'entrées du modèle hydraulique. Les durées intenses 15 min, 30 min, 1 h et 2 h ont été simulées.

La modélisation hydrologique réalisée par la suite (paragraphe A.II.4.2) permettra de définir la durée intense pertinente pour la présente étude.

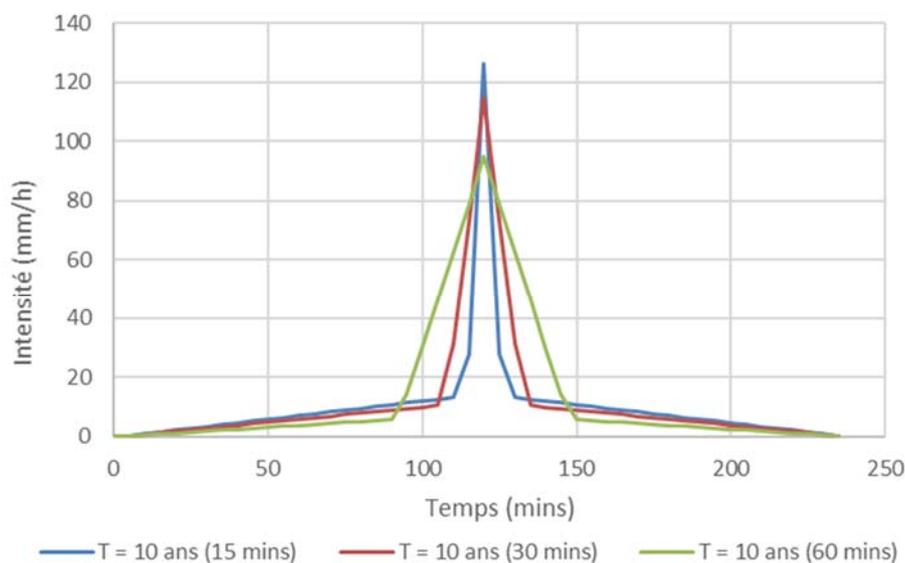


Illustration 5 : Exemple de pluies de projet Desbordes pour une occurrence décennale.

A.II.4. Détermination des débits de pointe

A.II.4.1. Méthode rationnelle

Les débits de pointe générés par chaque sous bassin versant ont été calculés à partir de la méthode rationnelle :

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

Q : Débit de pointe en m^3/s ;

C : Coefficient de ruissellement ;

I : Intensité des pluies en mm/h sur le temps de concentration déterminée à partir des coefficients de Montana issus de l'ajustement par SHYREG ;

A : Superficie du bassin versant (ha).

Pour chaque bassin versant périphérique, le calcul du débit de pointe à l'exutoire issue de la méthode rationnelle est indiqué dans le tableau suivant :

Bassin versant	Qp 5 ans	Qp 10 ans	Qp 30 ans	Qp 100 ans
BV1	0.3	0.45	0.7	0.85
BV2	1.65	3.5	4.7	6.6
BV3	2.4	5.2	7.2	10.5
BV4	2.55	3.9	5.7	7.95
BV5	5.3	7.4	10.4	14.2
BV6	3.2	5.6	6.9	7.4
BV7	2.5	3.25	4.15	5.4

Tableau 13 : Détermination des débits de pointe des bassins versants périphériques.

Une comparaison avec les débits de pointe déterminés dans le schéma communautaire d'assainissement des eaux usées et des eaux pluviales de la COGA (2008) a été réalisée pour les bassins équivalents à ceux de la présente étude. Les résultats de cette comparaison sont détaillés dans le tableau ci-après.

Bassin versant	S (ha)		Cr 5 ans		Cr 10 ans		Tc 5 ans (mins)		Tc 10 ans (mins)		Qp 5 ans (m ³ /s)		Qp 10 ans (m ³ /s)	
	COGA	CEREG	COGA	CEREG	COGA	CEREG	COGA	CEREG	COGA	CEREG	COGA	CEREG	COGA	CEREG
BV2 (VIL 1)	35.5	32.3	0.20	0.22	0.42	0.41	105	14	80	14	0.607	1.6	1.804	3.5
BV3 (VIL 2)	41.9	58.2	0.21	0.22	0.42	0.41	112	21	82	21	0.729	2.43	2.108	5.23

Tableau 14 : Comparaison des débits de pointe (Qp), coefficients de ruissellement (Cr), temps de concentration (Tc) de l'étude COGA (en bleu) et des valeurs déterminées dans la présente étude (en noir).

Les débits obtenus dans l'étude communautaire de la COGA sont très nettement inférieurs à ceux calculés dans la présente étude. Les surfaces des bassins versants comparés diffèrent mais ce seul élément ne permet pas d'expliquer les écarts obtenus entre les deux estimations du débit de pointe.

Les coefficients de ruissellement étant similaires dans les deux études, les temps de concentration ont été comparés. Les valeurs du temps de concentration ne sont pas mentionnées dans l'étude de la COGA. A partir des données disponibles dans le rapport de la COGA et de la formule de la méthode rationnelle, nous avons déterminé les temps de concentration permettant d'obtenir les valeurs de ces débits. Les données pluviométriques de la station d'Orange ont été utilisées pour ce calcul afin d'avoir les mêmes hypothèses que l'étude de la COGA.

Les temps de concentration obtenus sont d'environ 110 minutes pour l'occurrence 5 ans et de 80 minutes pour l'occurrence 10 ans. Ces valeurs sont très nettement supérieures aux valeurs déterminées dans la présente étude.

Ces temps de concentration nous semblent forts pour le secteur étudié. Suite à la concertation avec le comité de pilotage, les valeurs de débit présentées dans le tableau 13 et calculées avec les temps de concentration détaillés dans le paragraphe A.I.2.1 sont conservées dans la suite de l'étude.

A.II.4.2. Modélisation hydrologique

La définition d'hydrogrammes d'apport est nécessaire à la modélisation hydraulique afin de définir un volume de crue. La construction des hydrogrammes est réalisée à partir du logiciel HEC-HMS (Hydrologic Engineering Center, Hydrological Modeling System).

Il s'agit d'un code assurant :

- Le calcul de la **fonction de production** pour estimer la fraction de la pluie brute qui ruisselle au cours du temps (prend en compte l'effet de saturation des sols au cours du temps) ;
- La détermination de la **fonction de transfert** qui transforme la pluie nette en hydrogramme de crue à l'exutoire du bassin versant (au droit des points d'injections du modèle hydraulique).

Dans le cadre de l'étude, la méthode du Soil Conservation Service (SCS) a été utilisée. Elle est adaptée aux bassins versants à dominance rurale.

L'utilisation de ce modèle de calcul fait intervenir deux paramètres :

- Le **Curve Number** (noté CN) utilisé dans la fonction de production qui tient compte de l'occupation des sols et des conditions initiales de saturation des sols. Des abaques associés à la méthode de calcul permettent de déterminer les gammes de valeurs correspondantes pour chaque sous bassin versant. Plus le Curve Number est élevé, plus le ruissellement est important.
- Le **Lag-Time** correspondant au temps de réponse du bassin versant. Il est en général considéré égal à la moitié du temps de concentration.

Le modèle hydrologique a été calé pour chaque bassin versant sur la base des débits de pointe calculés précédemment à partir de la méthode rationnelle.

L'analyse de la réponse des bassins versants en fonction des différentes durées de pluie intenses testées dans le modèle hydrologique indique que les débits de pointe des bassins versants sont atteints pour des durées intenses de 30 minutes.

Le modèle hydrologique permet de générer les hydrogrammes de réponse des bassins versants aux pluies de projet pour les occurrences 5, 10, 30 et 100 ans. Une fois le calage du modèle réalisé, le débit de pointe de l'événement de septembre 2002 a pu être estimé. Les débits de pointe issus du modèle hydrologique sont fournis dans le tableau ci-dessous.

Bassin versant	Qp 5 ans (m ³ /s)		Qp 10 ans (m ³ /s)		Qp 30 ans (m ³ /s)		Qp 100 ans (m ³ /s)		Qp 2002 (m ³ /s)
	Modèle hydrologique	Méthode rationnelle	Modèle hydrologique	Méthode rationnelle	Modèle hydrologique	Méthode rationnelle	Modèle hydrologique	Méthode rationnelle	Modèle hydrologique
BV1	0.3	0.3	0.44	0.45	0.65	0.7	0.84	0.85	0.6
BV2	1.6	1.65	3.48	3.5	4.6	4.7	6.5	6.6	5.3
BV3	2.45	2.4	5.22	5.2	7.1	7.2	10.4	10.5	9.5
BV4	2.65	2.55	3.8	3.9	5.9	5.7	8.1	7.95	6.6
BV5	5.1	5.3	7.7	7.4	10.7	10.4	14.5	14.2	11
BV6	3.1	3.2	5.4	5.6	6.8	6.9	7.45	7.4	5.2
BV7	2.4	2.5	3.1	3.25	4.2	4.15	5.4	5.4	3.6

Tableau 15 : Débits obtenus avec le modèle hydrologique et la méthode rationnelle pour les différentes occurrences et estimation de débit de pointe pour l'événement de 2002.

L'écart entre les estimations est inférieur à 2.5% pour l'estimation du débit centennal et inférieur à 6 % pour les petites occurrences (de 5 à 30 ans). Le calage du modèle hydrologique est donc satisfaisant.

Les débits calculés pour l'événement de septembre 2002 sont compris entre les débits d'occurrence trentennale et centennale. Les hydrogrammes obtenus avec le modèle hydrologique seront injectés aux points d'entrée du modèle hydraulique.

Prise en compte du karst

La prise en compte du karst dans l'étude hydrologique est complexe car elle nécessite une connaissance du fonctionnement de l'hydrosystème karstique. La première difficulté concerne l'étendue des bassins versants : les bassins versants topographiques ne coïncident que rarement avec les bassins versants karstiques qui peuvent être plus vastes. La deuxième difficulté résulte de l'appréhension du rôle tampon du karst qui peut ralentir la formation des crues du fait de l'absorption d'une partie des volumes précipités et ne les restituer que plusieurs heures voire plusieurs jours après la pluie soit après le passage de l'onde de crue provoquée par les volumes précipités et ruisselés. Dans le cas des crues fréquentes à rares, le karst joue souvent un rôle bénéfique en faveur de la réduction des débits de crue. Cependant, il peut constituer un facteur aggravant dans le cas d'épisodes pluvieux longs ou lors d'épisodes pluvieux successifs lorsque le réseau karstique est mis en charge en même temps qu'un épisode pluvieux sévit.

La caractérisation des crues d'un système karstique correspond à l'étude des relations entre les précipitations sur l'impluvium, les pertes et la vidange du réservoir karstique. La réponse du karst à une impulsion est variable :

- En fonction des conditions de charge au sein de l'aquifère ;
- En fonction de l'entrée selon l'intensité, l'importance et la durée des précipitations privilégiant tel ou tel écoulement ;
- En fonction du degré de karstification (potentiel hydraulique et structure).

De nombreuses approches permettent d'estimer les interactions hydrodynamiques surface/souterrain en milieu karstique. Cependant les modélisations karst/écoulement de surface nécessitent des données sur les bassins versants karstiques pour différents épisodes pluvieux afin de valider les coefficients de ruissellement, le temps de propagation, les débits et les coefficients de restitution.

Sur la commune des Angles, en l'absence de données précises sur le fonctionnement du massif karstique, la prise en compte du karst sera faite de façon simplifiée. Les éléments suivants ont été considérés :

- Ajustement du temps de concentration T_c : les formules utilisées ne font pas intervenir de paramètre lié à la structure du sous-sol. Ce temps de concentration peut être allongé pour représenter le passage de l'eau dans le massif karstique. Cependant ce paramètre étant difficilement estimable, cette hypothèse n'a pas été retenue ;
- Prise en compte d'un débit additionnel forfaitaire : ce paramètre est difficilement estimable au vu des données disponibles ;
- Ajustement du coefficient de ruissellement Cr :
 - L'estimation du Cr 30 ans et du Cr 100 ans utilise la « méthode des experts ». Le caractère karstique du sous-sol y est partiellement pris en compte par l'utilisation d'un paramètre de rétention initiale présentant des valeurs plus importantes (sols fortement perméables).
 - L'estimation du Cr 5 ans et du Cr 10 ans se base sur le calcul de la moyenne pondérée des coefficients de ruissellement suivant les données d'occupation du sol (sans prise en compte de la géologie). Ce paramètre peut donc être ajusté pour rendre compte l'infiltration dans l'aquifère. Des valeurs de 15 à 20 % sont généralement rapportées en milieu karstique (CETE, 2007).
- Evénement de Septembre 2002 : Lors de cet événement, les inondations se sont principalement produites le 09 septembre (lors du deuxième épisode pluvieux). Le réseau souterrain s'est retrouvé saturé et les résurgences se sont potentiellement mises en charge et se sont juxtaposées au ruissellement de surface. L'hypothèse d'un karst saturé est donc prise pour cet événement.

Le tableau suivant présente une synthèse de la prise en compte du karst pour les différents événements étudiés.

Événement	Approches proposées
Crue de calage de 2002	Karst saturé ($Cr = 1$)
Q5 et Q10	Adaptation du coefficient ($Cr = 0.2 \%$)
Q30 et Q100	Karst saturé ($Cr = 1$)

Tableau 16 : Prise en compte du karst dans les différents scénarios modélisés.

Les estimations des débits de crue trentennale et centennale ainsi que ceux de la crue de 2002 seront donc légèrement sécuritaires considérant un massif saturé par un événement antérieur.

B. ETUDE HYDRAULIQUE



B.I. CONSTRUCTION DU MODELE HYDRAULIQUE

B.I.1. Méthodologie

Afin de préciser l'aléa de risque inondation par ruissellement pluvial sur la zone urbaine de la commune, une modélisation hydraulique bidimensionnelle est réalisée. La modélisation permet d'affiner les enveloppes des zones inondables définies par l'approche hydro-géomorphologique et de déterminer les hauteurs de submersion et les vitesses pour différentes occurrences de crue. Le code de calcul SW2D développé par le laboratoire Hydrosociences de l'université de Montpellier 2 est utilisé.

La modélisation 2D s'effectue en plusieurs étapes :

- La construction du modèle qui s'articule en deux temps :
 - La construction du maillage à partir de l'emprise topographique couverte par les levés du géomètre ;
 - La création des fichiers d'entrée : des conditions aux limites sont définies et injectées dans le modèle. Il peut s'agir de débits ou de cotes ou de hauteurs de submersion.
- Le calage du modèle ;
- L'étude du fonctionnement hydraulique de la zone d'étude ;
- La cartographie des résultats fournit aux différents points du maillage les hauteurs de submersion ainsi que les vitesses d'écoulement.

Le modèle mathématique utilisé s'appuie sur un maillage de l'espace élaboré à partir des différents points topographiques et complété localement pour les besoins de l'étude d'après les observations de terrain. Le maillage est construit de manière à prendre en compte les éléments structurants principaux du secteur :

- Les fossés ;
- Les ouvrages hydrauliques ;
- Les voiries ;
- Les murs principaux et pérennes (murs de soutènement par exemple).

Les calculs sont réalisés en régime transitoire.

B.I.2. Données topographiques

B.I.2.1. Données existantes

Données fournies par le Grand Avignon

Les données topographiques sur les bassins de rétention et les ouvrages du réseau pluvial ont été transmis par le Grand Avignon. Les données sur le réseau pluvial acquises lors du diagnostic capacitaire du réseau (COGA, 2008) nous ont également été fournies.

RGE Alti et BDT Rhône

Au cours de l'étude, le maître d'ouvrage a demandé une extension du modèle hydraulique sur le secteur Font d'Irac – Queue de l'île. Cette demande fait suite à un projet de création d'une piste de BMX et aux réactions des riverains du secteur qui affirment que la zone est inondable. Aucune campagne topographique complémentaire n'a été réalisée sur le secteur et la géométrie du modèle se base uniquement sur les données RGE ALTI et la BDT Rhône fournies par le Syndicat Mixte pour l'Aménagement des Bassins Versants du Gard Rhodanien (SMABVGR) et la DDTM 30.

La DDTM a également souhaité inclure l'ensemble des parcelles construites localisées dans la proximité immédiate de l'emprise du modèle dans la cartographie du ruissellement pluvial. L'extension du modèle hydraulique sur ces secteurs est également basée sur les données RGE ALTI.

Le RGE Alti au pas de 1 m présente une précision variable selon les zones. La précision est comprise entre 20 et 30 cm sur le secteur étudié (et de 20 à 50 cm sur les secteurs boisés).

La BDT Rhône nous a été fourni sur les secteurs de Font d'Irac et de Queue de l'Île pour étendre le modèle hydraulique. Ces données présentent une précision planimétrique et altimétrique inférieure à 20 cm.

Les extensions du modèle hydraulique sont basées sur des données dont la précision altimétrique et la densité de points sont moindres que les données topographiques acquises dans la présente étude. Cette différence est à prendre en considération dans l'exploitation des résultats.

B.I.2.2. Données acquises dans le cadre de l'étude

Le cabinet de géomètres experts OPSIA a été missionné pour réaliser différents levés sur le secteur :

- Un levé topographique 1/2000 sur 400 hectares à partir d'une acquisition Lidar ;
- Deux levés spécifiques du réseau pluvial au droit du franchissement de l'Allée Louis Montagne et entre la RN100 et la voie ferrée SNCF ;
- Trois levés d'ouvrages d'art (franchissement de l'allée Louis Montagne par la RN100, franchissement du boulevard du Midi par la RN100 et passage de la rue du Chêne Vert sous la voie ferrée).

La densité de l'acquisition Lidar est de 10 points/m² et la précision altimétrique de +/- 5 cm.

Croisement et vérification des dimensions des ouvrages et des réseaux

Des différences sur les dimensions de l'ouvrage hydraulique localisé Allée Louis Montagne ont été identifiées entre les données acquises dans la présente étude (OPSIA) et les données du diagnostic capacitair la COGA (2008). Les données d'OPSIA et les campagnes topographiques du Grand Avignon étant identiques, les données OPSIA ont été conservées pour cet ouvrage.

Les données extraites du diagnostic capacitair du réseau d'eau pluviales ont donc été comparées ponctuellement (rue de la Grange Rouge et rue de Massepezoul) aux données fournies par le Grand Avignon. Ces données étant identiques, le réseau pluvial inclus dans le modèle est basé sur les données du diagnostic capacitair (sauf pour l'ouvrage localisé Allée Louis Montagne mentionné précédemment).

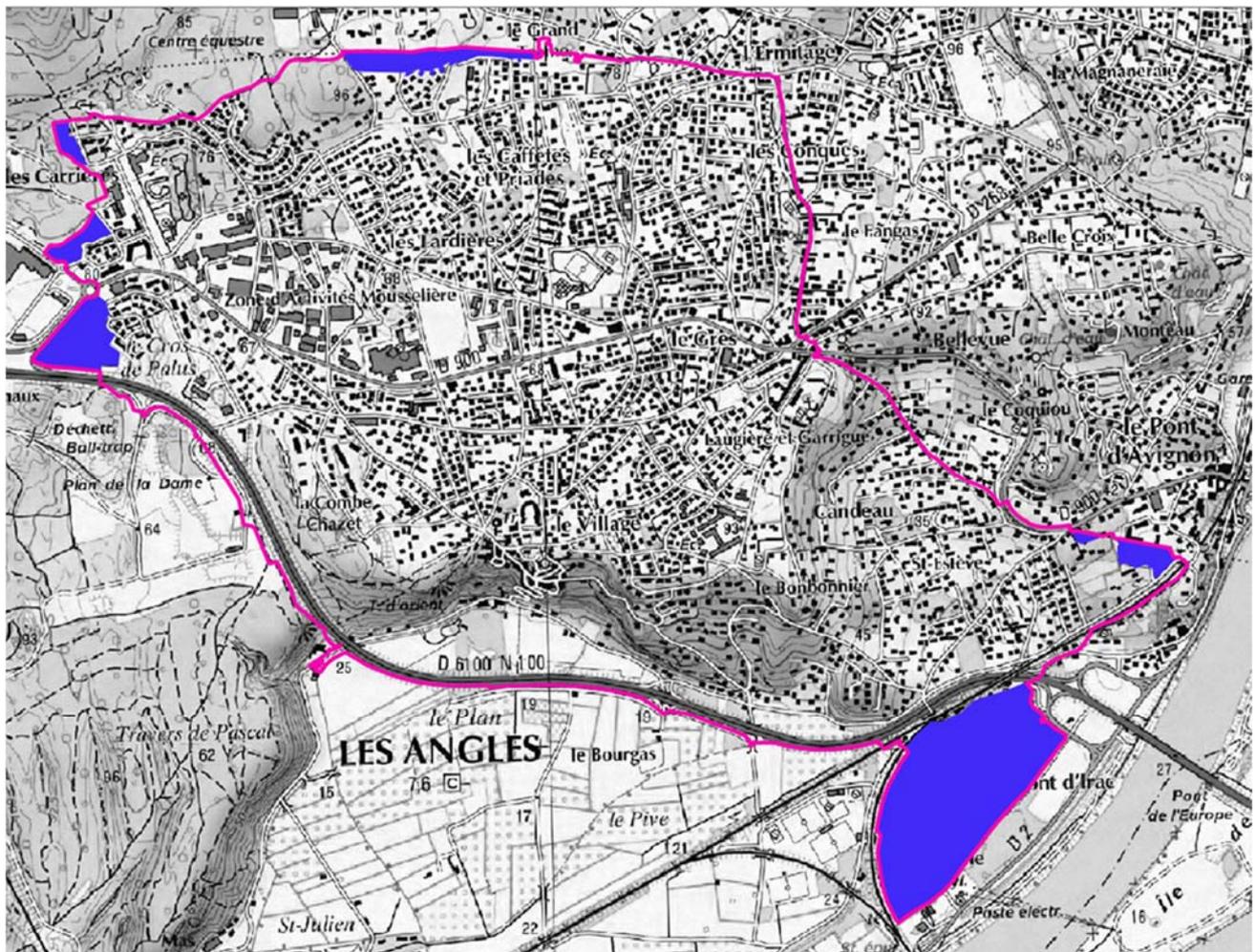


Illustration 6 : Contour du modèle hydraulique en magenta et localisation des extensions basées sur les données RGE ALTI et BDT Rhône (en bleu).

B.I.3. Maillage de la zone d'étude

Le maillage de la zone d'étude s'appuie sur les données topographiques indiquées précédemment. Le modèle hydraulique est défini par 94 560 mailles et couvre une superficie de 385 ha.

Prise en compte des ouvrages influençant l'écoulement

La commune est traversée par de nombreux ouvrages linéaires ayant un impact sur les écoulements des eaux pluviales (cf. paragraphe B.V.3 du rapport de Phase 1).

- La RN 100 est prise en compte dans le modèle hydraulique et constitue sa limite Sud.
- La voie ferrée est prise en compte dans la géométrie du modèle sur le Boulevard du Midi ainsi qu'à proximité de la rue de la Justice. Ces secteurs sont proches de la limite du modèle mais ils mettent en évidence les zones de stockage.
- La digue CNR ainsi que les voies LGV sont en dehors de l'emprise du modèle hydraulique.

Les deux ouvrages (réseau pluvial au droit du franchissement de l'Allée Louis Montagne et entre la RN100 et la voie ferrée SNCF) et les 3 ouvrages d'art (franchissement de l'allée Louis Montagne par la RN100, franchissement du boulevard du Midi par la RN100 et passage de la rue du Chêne Vert sous la voie ferrée) ont également été inclus.

Prise en compte des murs

Les techniques de restitution à grande échelle de la topographie (technique Lidar) ne permettent pas d'obtenir un rendu précis de tous les éléments structurants et en particulier des murs : seuls les murs de soutènement et les murs principaux sont rendus et ont été intégrés dans la géométrie du modèle hydraulique.



Illustration 7 : Exemple des types de murs disponibles sur le levé Lidar (en vert) et non disponible (en rouge).

Prise en compte du réseau pluvial

Les données des réseaux d’eaux pluviales fournies par le Grand Avignon ont été prises en compte dans le modèle hydraulique. La branche principale se situe au niveau de la RD 900 suivant un axe Est-Ouest et permet la collecte des eaux pluviales des versants Nord et Sud. Le réseau est souterrain jusqu’à l’avenue Boileau avant de se rejeter dans le fossé aérien taillé dans la roche et longeant la RN100 avant de rejoindre le canal longeant la plaine des Plans et son exutoire dans le Rhône au droit du château des Issarts.

A l’Est de la commune, le quartier de Saint Estève (entre la rue Olivier de Serres et la Montée de Lorette) est drainé par un réseau dont l’exutoire correspond à la RN 100.

Prise en compte des travaux prévus ou en cours

Suite à la concertation avec le comité de pilotage de l’étude, les travaux suivants ont été intégrés dans le modèle hydraulique :

- L’approfondissement du bassin de rétention du Grand Terme ;
- La reprise du réseau pluvial au niveau du carrefour de Carrières.

Conditions aux limites

En limite amont du secteur, le modèle sera alimenté par les hydrogrammes des bassins versants périphériques correspondant aux 5 scénarios hydrologiques définis précédemment (événement de septembre 2002 et occurrences de 5 ans, 10 ans, 30 ans et 100 ans). Les différents points d’injection sont détaillés sur l’illustration ci-dessous.



Illustration 8 : Conditions aux limites du modèle hydraulique.

B.I.4. Calage du modèle hydraulique

➤ *Planche n° 1 : Localisation des PHE de l'événement de 2002.*

Le calage est l'opération qui consiste à retrouver par le calcul des valeurs de submersion observées sur le terrain lors d'un événement. Des écarts de +/- 10 cm sont considérés comme acceptables pour valider le calage d'un modèle hydraulique.

Le calage a été réalisé en supposant un coefficient de rugosité K uniforme sur toute la zone d'étude. En effet, en modélisation hydraulique 2D, ce type de secteur urbanisé présente une rugosité comprise entre $20 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$ et $40 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$. Des valeurs de coefficients de 20, 30 et 40 ont ainsi été testées afin de retrouver observations faites lors de l'événement de septembre 2002.

Lors de cet épisode, 75 riverains ont fait une déclaration auprès de la mairie. Sur ces 75 déclarations, seules 18 fournissent une indication sur les hauteurs de submersion. Les autres sinistres sont des infiltrations d'eau par les toitures, des affaissements de terrain,... et ne sont pas utilisables pour le modèle.

Les hauteurs de submersion calculées et observées sont comparées dans le tableau ci-dessous.

Identifiant de la PHE	Hauteur d'eau observée (m)	Hauteur d'eau calculée (m)	Ecart (cm)
1	0.20	0.28	+ 8 cm
2	0.15	0.08	- 7 cm
3	0.10 (habitation) 0.40 (jardin)	- 0.50	+ 10 cm
4	0.30 (habitation) 0.50 (jardin)	- 0.48	- 2 cm
5	0.20	0.16	- 4 cm
6	0.30	0.30 (côté jardin)	0
7	0.30	0.28	- 2 cm
8	0.35 (garage) 0.60 (jardin)	- 0.57	-3 cm
9	0.30	0.14	-16 cm
10	0.30	0.32	+ 2 cm
11	0.50 (cave)	0.13	- 37 cm
12	0.05	0.42	+ 37 cm
13	0.15	0.18	+ 3 cm
14	0.80	0.75	- 5cm
15	0.50	0.14	- 36 cm
16	0.05	0.12	+ 7 cm
17	0.40	0.33	- 7 cm
18	0.40	0.42	+ 2 cm
19	-	0.20	-
20	-	0.38	-
21	-	0.06	-
22	-	0	-
23	-	0.42	-

Tableau 17 : Crue de Septembre 2002 - Comparaison des hauteurs de submersion observées et calculées.

Sur les 23 données de PHE listées dans le tableau ci-dessus :

- 5 observations ne possèdent pas de hauteurs observées (identifiants 19 à 23) mais indiquent une zone inondée ;

- Une hauteur (identifiant no. 11) correspond à une hauteur dans une cave et n'est donc pas directement exploitable. Cette observation permet néanmoins d'identifier un secteur inondé ;
- La PHE no. 15 est fortement influencée par la présence de mur. Ce point a été conservé car il permet de valider l'emprise de la zone inondée mais il n'est pas attendu de retrouver par le calcul la hauteur observée. Il nous a également été précisé par la commune que cette observation correspondait à une habitation implantée 60 cm en dessous de la cote de la voirie ce qui peut expliquer la mauvaise représentation du modèle en ce point.

En comparant les hauteurs calculées aux 16 PHE réellement exploitables on constate que :

- 9 hauteurs de submersion calculées présentent un écart de moins de 5 cm avec les observations (en vert dans le tableau) ;
- 5 hauteurs de submersion calculées présentent un écart de moins de 10 cm avec les observations (en orange dans le tableau) ;
- 2 hauteurs de submersion calculées présentent des écarts supérieurs à 15 cm (en rouge dans le tableau).

Lors de cet événement, les rues ayant connues les plus importantes hauteurs de submersion (60 cm) sont situées à proximité du boulevard des Carrières, de la rue Mousselière et au Sud-Ouest du Forum (impasse des Cades) ce qui est correctement reproduit par le modèle.

Pour les habitations, 4 secteurs ont été particulièrement touchés :

- Le boulevard Diderot (entre la rue des Aires et l'impasse de la Combe) où des hauteurs de submersion de 80 cm ont été rapportées ;
- La rue Racine entre la rue Menassier et la rue Mirabeau (50 cm) ;
- Le boulevard du Midi : entre la rue Saint Estève et la montée de Lorette ;
- Le boulevard du Grand Terme : entre la rue du 08 Mai et l'impasse des Alpes. Sur ces secteurs les habitations inondées sont très ponctuelles et correspondent généralement à une localisation en contrebas des rues.

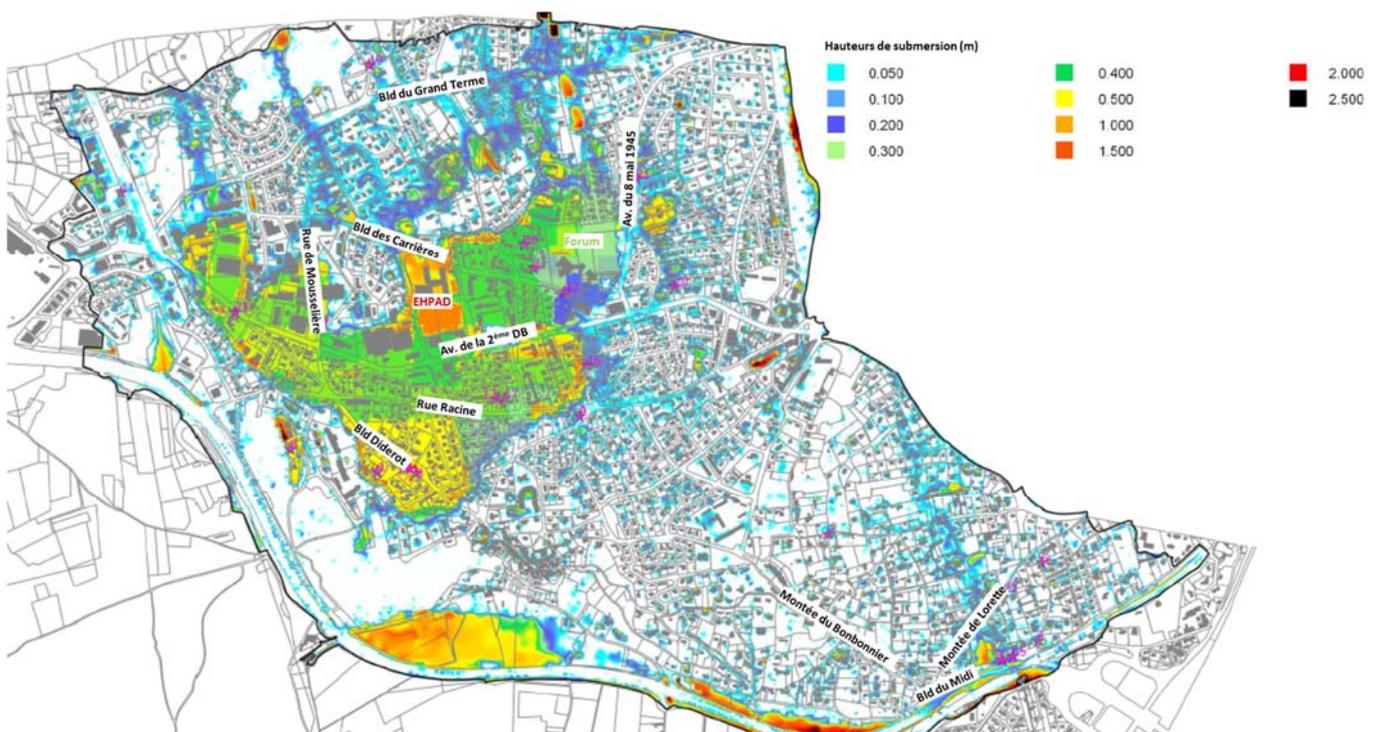


Illustration 9 : Hauteurs de submersion calculées pour l'événement de 2002 et localisation des secteurs mentionnés dans le texte.

Le modèle est cohérent avec les observations collectées lors de l'événement de 2002 avec un coefficient de rugosité de $30 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$.

B.II. EXPLOITATION DU MODELE HYDRAULIQUE

- Planche n° 2a à 5a : Hauteurs de submersion pour la pluie d'occurrence quinquennale, décennale, trentennale et centennale
- Planche n° 2b à 5b : Vitesses d'écoulement pour la pluie d'occurrence quinquennale, décennale, trentennale et centennale

Les cartographies des hauteurs de submersion et des vitesses d'écoulement pour les occurrences quinquennale, décennale, trentennale et centennale sont fournies dans l'atlas cartographique joint au présent rapport. Les résultats sont détaillés dans les paragraphes suivants pour les différents secteurs de la commune.

▲ Secteur Les Lardières / Grand Terme

Les ruissellements suivent les axes de voiries pour la crue d'occurrence centennale. Les hauteurs de submersion sont inférieures à 10 cm sur la majorité de la zone (sauf accumulation ponctuelle des eaux sur les points bas topographiques) mais les vitesses d'écoulement sont fortes sur les voiries (supérieures à 0.5 m/s).



Illustration 10 : Hauteurs de submersion et vitesses d'écoulement pour la crue d'occurrence centennale sur le secteur des Lardières / Grand Terme.

▲ Secteur Mousselière

Les écoulements diffus empruntent les voiries et s'étalent plus largement vers le Sud en contrebas de l'avenue de la 2^{ème} DB. Les hauteurs de submersion sont de 25 cm en moyenne pour l'occurrence décennale, 30 cm pour l'occurrence trentennale et atteignent ponctuellement 50 cm pour l'occurrence centennale. Les vitesses d'écoulement sont fortes sur les voiries en raison

de la topographie du secteur (jusqu'à 0.5 m/s pour la crue d'occurrence centennale). On notera à proximité de l'entreprise Blancolor, la présence d'un bassin de récupération des eaux polluées en cas d'incendie qui crée une dépression topographique et donc des hauteurs de submersion ponctuellement élevées (supérieure à 1 m pour l'occurrence centennale).

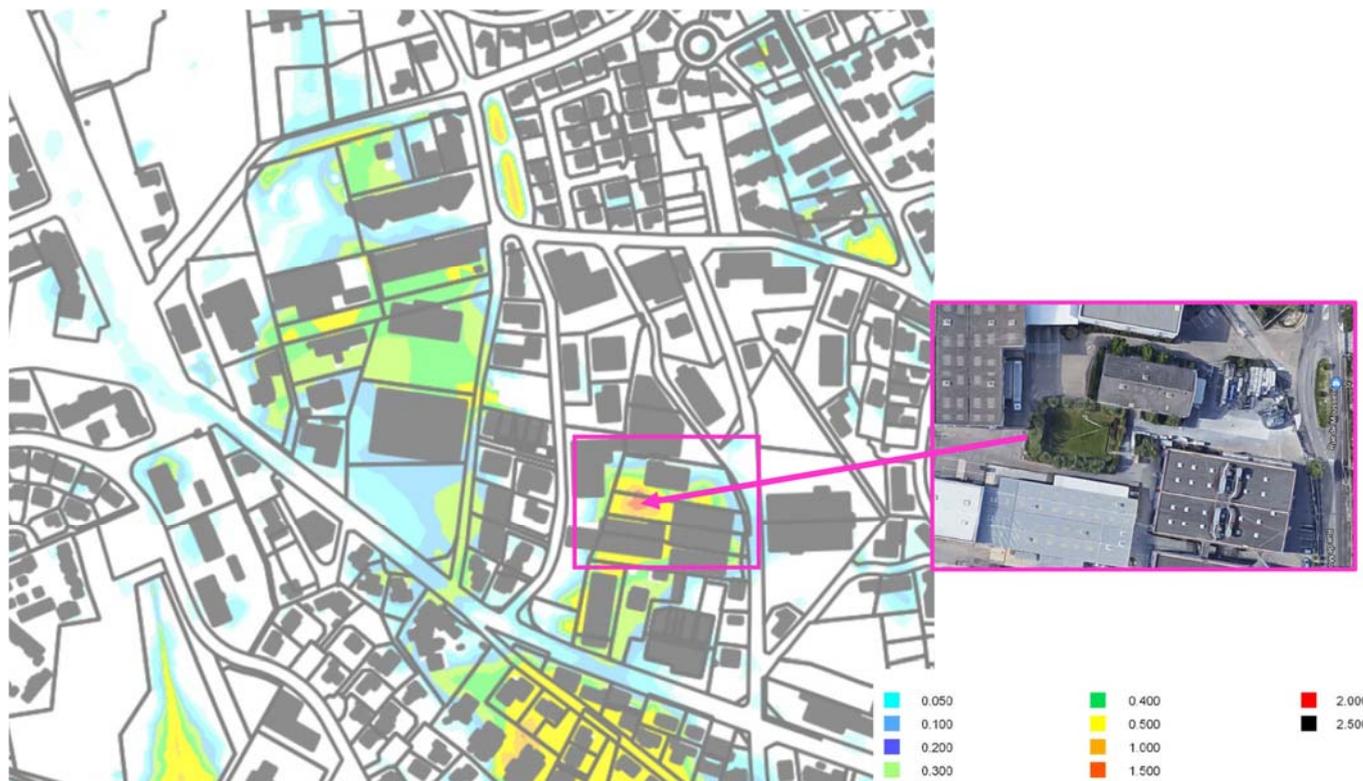


Illustration 11 : Hauteurs de submersion pour la crue d'occurrence centennale et aperçu du bassin de l'entreprise Blancolor mentionné dans le texte.

Secteur de l'EHPAD

Les eaux s'accumulent sur la parcelle au Sud de l'EHPAD sans possibilité d'évacuation. La présence de nombreux points bas entraînent des hauteurs de submersion significative (ponctuellement supérieures à 1 m pour la crue d'occurrence centennale). En revanche, la topographie présente des pentes douces et donc des vitesses d'écoulement modestes, inférieures à 0.1 m/s pour l'occurrence centennale.

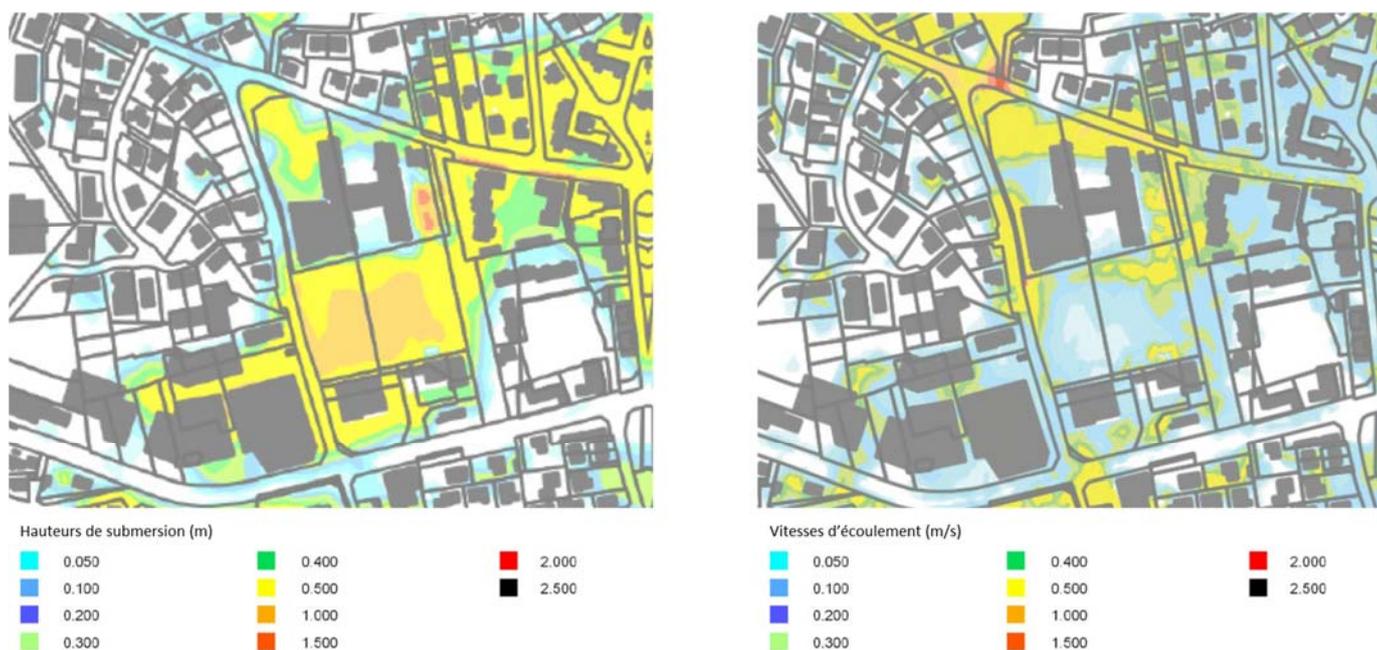


Illustration 12 : Hauteurs de submersion et vitesses d'écoulement pour la crue d'occurrence centennale sur le secteur de l'EHPAD.

Secteur du Forum

Les ruissellements impactent les lotissements pavillonnaires à l'Ouest du Forum. Pour la crue d'occurrence centennale :

- Les hauteurs de submersion atteignent 60 cm dans l'impasse des Caffètes et jusqu'à 85 cm impasse des Cades ;
- La zone d'espace vert et d'équipement sportif à l'Est du Forum est impactée par des hauteurs de submersion de 80 cm en moyenne ;
- Les vitesses d'écoulement sont faibles (inférieures à 0.15 m/s) sur la majorité du secteur avec ponctuellement des vitesses supérieures à 0.5 m/s.

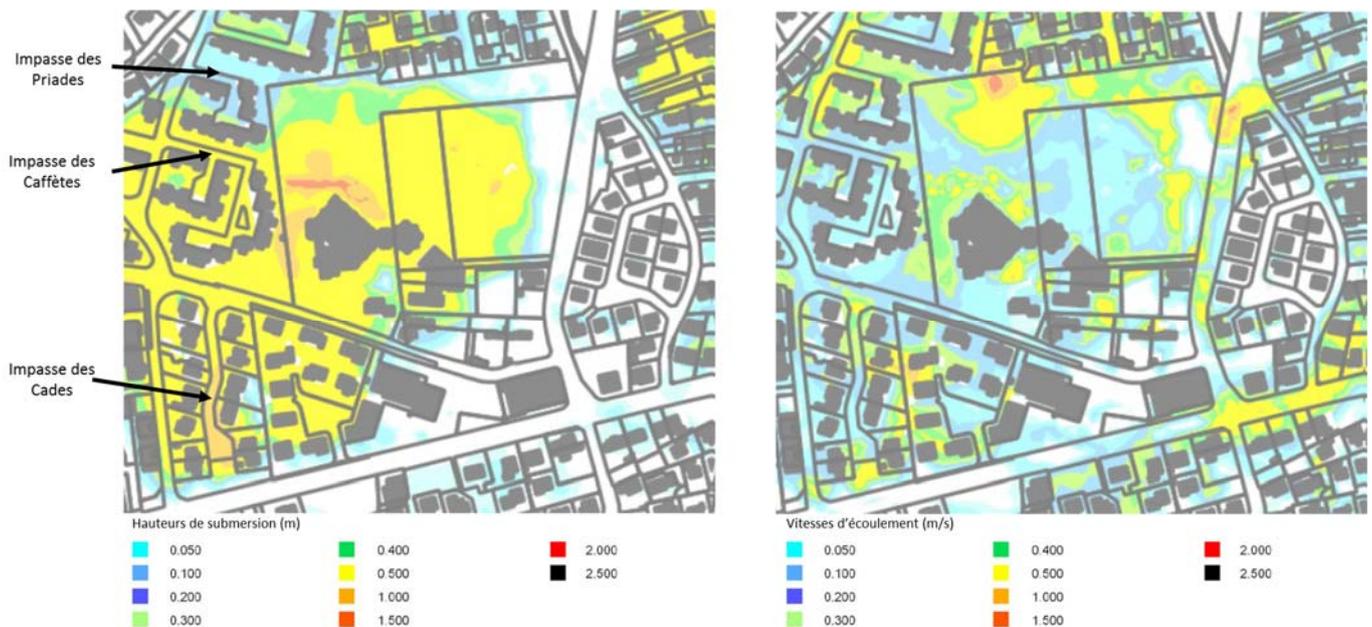


Illustration 13 : Hauteurs de submersion et vitesses d'écoulement pour la crue d'occurrence centennale sur le secteur du Forum.

Secteur boulevard Diderot / rue Racine

Ce secteur au Sud de l'avenue de la 2^{ème} DB présente une topographie relativement plane. Les eaux s'accumulent sur ce secteur où les hauteurs de submersion atteignent ponctuellement 30 cm dès l'occurrence décennale et jusqu'à 1 m pour l'occurrence centennale.

Les vitesses d'écoulement sont inférieures à 0.1 m/s quelles que soient les occurrences de crue considérées dans cette zone de stockage des eaux de ruissellement.

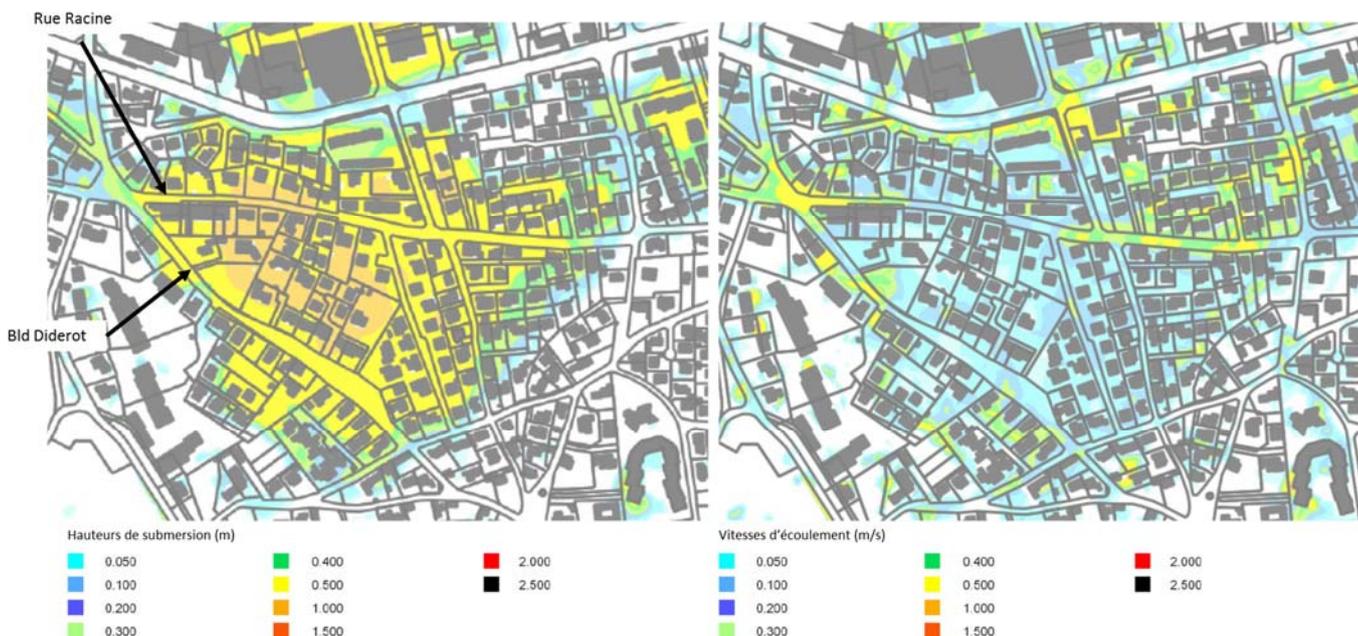


Illustration 14 : Hauteurs de submersion et vitesses d'écoulement pour la crue d'occurrence centennale sur le secteur du boulevard Diderot.

Secteur Font d'Irac / Queue de l'Île

Le secteur Font d'Irac / Queue de l'Île est ceinturé par la voie ferrée et la N100 au Nord et la D2 au Sud. Le quartier est caractérisé par un habitat pavillonnaire dense avec la présence d'une zone boisée et d'un poste électrique à proximité du Rhône.

Les hauteurs de submersion atteignent ponctuellement 35 cm au Sud de la voie ferrée et les vitesses d'écoulement sont faibles (inférieures à 0.2 m/s) pour la crue d'occurrence centennale.

Pour rappel, les données topographiques utilisées sur ce secteur sont moins précises que sur le reste de la commune et les résultats du modèle hydraulique sont donc moins précis sur cette zone.

Comparaison de la zone inondable définie pour la crue d'occurrence centennale avec les cartographies hydrogéomorphologiques de l'AZI et de la phase 1 de la présente étude.

A titre indicatif, l'enveloppe des zones inondées par la pluie d'occurrence centennale est comparée aux limites de la cartographie AZI du Gard Rhodanien (2009) ainsi qu'avec la cartographie hydrogéomorphologique réalisée dans la phase 1 de la présente étude.

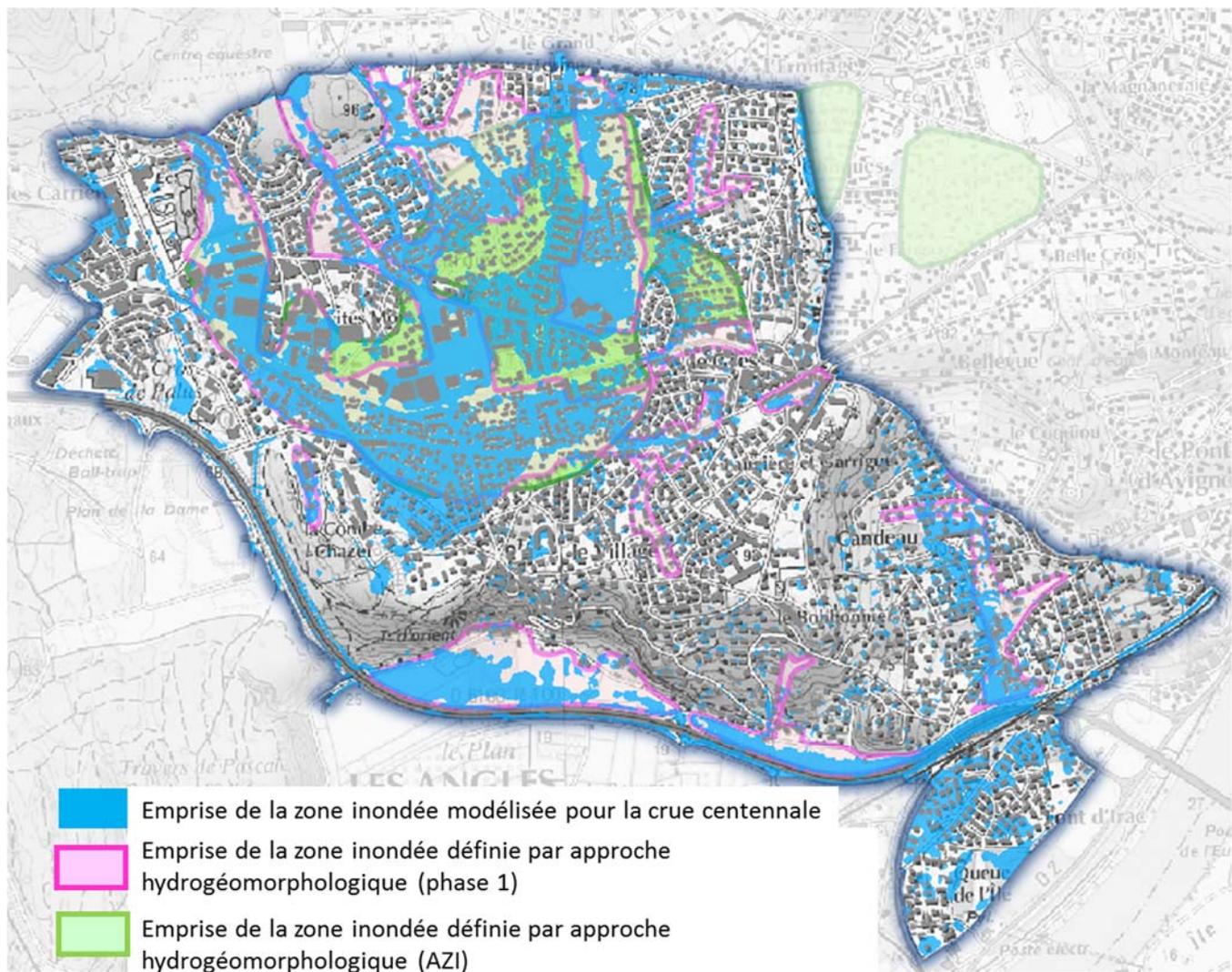


Illustration 15 : Comparaison de la zone inondée définie par approche hydrogéomorphologique et calculée avec le modèle hydraulique.

L'emprise de la zone inondée par la crue d'occurrence centennale calculée avec le modèle hydraulique est inférieure à l'emprise hydrogéomorphologique définie dans la phase 1 de la présente étude. Il est rappelé que la cartographie hydrogéomorphologique permet d'obtenir des informations qualitatives. Dans le cas d'espèce, la cartographie a été faite sur la base de l'analyse stéréoscopique des photographies aériennes (mission IGN de 1996 au 1/30 000^{ème}) et des observations de terrain réalisées en juillet et septembre 2015. Aucune données topographiques n'étaient disponibles lors de la définition de l'emprise de la zone inondable dans la phase 1 de l'étude.

B.III.CARTOGRAPHIE DE L'ALEA INONDATION

B.III.1. Principes généraux

L'objectif de la cartographie de l'aléa est de définir une sectorisation des zones inondées de la commune en fonction de divers critères pour y associer un règlement sur l'occupation des sols. Ce règlement a pour objet de ne pas augmenter l'aléa inondation (par remblaiement, par obstruction d'axes d'écoulement) et de limiter, voire d'interdire l'implantation de nouveaux enjeux dans cette zone inondable (construction d'habitations par exemple).

Pour cartographier l'aléa, il faut définir l'événement de référence (qui donne l'emprise des zones inondables) et une grille d'analyse des zones inondables associées à cet événement (critère de hauteur et/ou vitesse) permettant de qualifier l'aléa de faible, modéré ou fort.

L'aléa de référence retenu sur la commune des Angles pour le risque par ruissellement pluvial est la pluie centennale. La grille d'évaluation de l'aléa ruissellement défini dans le Gard est fournie sur l'illustration ci-dessous. Elle permet de distinguer 3 classes d'aléa indiquées comme suit :

V en m/s \ H en m	V < 0.2	0.2 < V < 0.5	0.5 < V < 1	V > 1
H < 0.2	Faible		Modéré	
0.2 < H < 0.5	Modéré			
0.5 < H < 1				Fort
H > 1				Fort

Illustration n°16 : Grille d'évaluation de l'aléa ruissellement – croisement hauteurs et vitesses.

B.III.2. Définition de l'aléa par ruissellement pluvial

➤ *Planche n° 6 : Aléa inondation sur la commune des Angles.*

L'aléa de référence sur la commune Les Angles est la crue centennale.

La modélisation hydraulique donne les hauteurs d'eau et les vitesses d'écoulement sur l'ensemble de la zone modélisée. Cet aléa ne prend pas en compte le risque inondation par débordement du Rhône traité dans le cadre du PPRI du Rhône.

Un projet de réglementation de l'utilisation de l'espace inondé associé au risque inondation par ruissellement pluvial sera produit dans la phase 3 de la présente étude.

La cartographie de l'aléa s'inscrit dans le projet d'amélioration des connaissances en vue notamment d'une intégration optimale de cette problématique dans le futur document d'urbanisme. Néanmoins, certains projets prévus par la commune sont situés dans des zones d'aléa modéré ou fort. Les projets et les contraintes liés à la définition de l'aléa par ruissellement pluvial sont décrits dans les paragraphes ci-dessous.

Densification de la commune

La commune a une obligation légale relative à la loi SRU (Solidarité et Renouvellement Urbain) par rapport à la production de logements sociaux et une obligation de compatibilité avec les documents supra communaux (Plan Local de l'Habitat, PLH, et Schéma de Cohérence Territoriale, SCOT).

La prise en compte du risque inondation dans le PLU contraint les projets de densification sur la commune en particulier le long de l'avenue de la 2^{ème} DB. La commune souhaite éviter la densification sur certain secteur si les zones prévues initialement s'avéraient inconstructibles du fait de l'aléa inondation.

Projet de la commune sur le secteur de La Mousselière / EHPAD

Sur le secteur de la Mousselière, il est prévu à long terme de transférer la zone d'activité existante sur le secteur dénommé « Champs de Tir » au Sud-Ouest de la commune. Cet aménagement semble a priori envisageable.

Il est rappelé que le bassin de récupération des eaux polluées en cas d'incendie qui a été construit par l'entreprise Blancolor crée une dépression topographique et place la zone en aléa fort. Dans le cas du départ de l'entreprise, le remblaiement est possible (il s'agit d'une façon de faire pour exonder) à la condition que les travaux à prévoir n'aggravent pas les aléas (hauteurs d'eau et vitesses) en amont et en aval du projet (avec la nécessité de produire une étude hydraulique qui le démontre).

Au Sud de l'EHPAD, la commune est propriétaire du terrain localisé en zone d'aléa fort où il était envisagé de construire un bassin de rétention enterré surmonté d'un bâtiment. Au vu des hauteurs de submersion (proches d'1 m) sur ce secteur, cette option ne semble pas envisageable. Toutefois, si l'activité du garage Peugeot, situé au Sud de l'EHPAD, devait cesser, il pourrait être autorisée une extension de la construction en hauteur afin de permettre la réalisation de logements tout en conservant une ou des activités en RDC.

B.III.3. Prise en compte du risque d'inondation par ruissellement

Les prescriptions réglementaires et le zonage pluvial font l'objet de la phase 3 de la présente étude. Il est néanmoins rappelé les points suivants qui sont extraits de la « note de cadrage méthodologique sur la prise en compte du risque inondation dans les documents d'urbanisme » publiée par les services de l'état en Mai 2018.

« A la différence du risque inondation par débordement, pour le risque inondation par ruissellement des travaux et des aménagements pérennes peuvent permettre de mettre hors d'eau, durablement, des terrains exposés.

Ainsi, il est envisageable d'étendre une zone d'urbanisation sur des secteurs soumis à un aléa ruissellement sous les conditions qui suivent :

- Démontrer, par une étude hydraulique, la possibilité de mettre hors d'eau les terrains projetés pour une pluie de référence centennale ou historique si celle-ci est supérieure ;
- Réaliser des aménagements nécessaires dans le respect du Code Civil et du code de l'environnement (dépôt d'un dossier Loi sur l'Eau) ».

B.IV. CROISEMENT ALEA / ENJEUX

Un premier croisement a été réalisé en phase 1 de la présente étude en superposant la carte des enjeux avec les zones inondables définies par approche hydro géomorphologique.

Un deuxième croisement est réalisé en superposant les enjeux avec les zones inondables définies par modélisation hydraulique pour la pluie d'occurrence centennale.

Il est rappelé que l'analyse des enjeux est menée sur la base de données des bâtiments cadastrés. Plusieurs bâtiments peuvent ainsi constituer une seule entité.

Les résultats de ces deux croisements aléas/enjeux sont détaillés dans le tableau ci-dessous.

Type d'enjeux	Sur la commune	Zone inondable hydrogéomorphologique	Zone inondable modélisée (Q100)
Habitation	4351	928 (21 %)	242 (5%)
Commerce / Industrie	95	35 (37 %)	12 (13%)
ERP	14	3 (21 %)	3 (21 %)

Tableau 18 : Nombre de bâtiments sur la commune et en zone inondable.

Dans la zone inondée par la pluie d'occurrence centennale, il est implanté :

- 242 habitations (hors garages) ;
- 12 bâtiments commerciaux ;
- 3 ERP (l'EHPAD Paul Gache, le forum et la bibliothèque). Il est précisé que le forum est identifié comme une zone refuge pour les sinistrés dans le PCS de la commune.

C. ANNEXES



LISTE DES ANNEXES

Annexe n°1 : Description du code de calcul SW2D	39
---	----

Annexe n°1 : Description du code de calcul SW2D

Description

SW2D (Shallow Water 2D) est un logiciel de modélisation hydraulique permettant de **simuler les écoulements de surface en 2 dimensions**. Il possède également **un module de prise en compte du réseau d'assainissement pluvial**. Le logiciel 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.

GENERALITES SUR SW2D

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

- Précipitation et infiltration distribuées dans l'espace et le temps ;
- Ecoulements à surface libre, incluant la représentation des zones urbaines par une porosité ;
- Echanges avec et stockage dans le bâti (caves, cours et jardins, etc.) ;
- Ecoulements du réseau d'assainissement pluvial ;
- Lois d'ouvrages : déversoirs, orifices, vannes, ouvrage de franchissement (pont).

RESOLUTION NUMERIQUE

1- Equations 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 2D avec porosité,
- Diffusion de la quantité de mouvement,
- Frottement sur le fond,

- Pertes de charges singulières,
- Précipitations sur la topographie,
- Infiltration,
- Échanges 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 :

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

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

ϕ 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)

ϵ 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 :

- précipitation (P);
- infiltration pour les sols perméables (I) ;
- échange avec les bâtis : les capacités éventuelles de rétention dans les bâtis sont modélisées 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.

2- 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'espèce) ;
- 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 :

Les équations résolues par SW2D sont les équations de Navier-Stokes sous forme conservative.

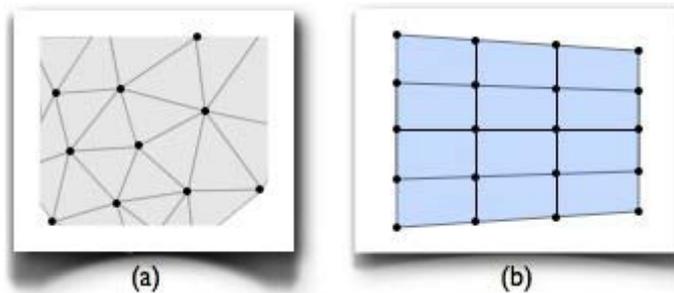
Cette forme d'équations (par opposition aux équations non-conservatives) associée à la méthode des « volumes finis » préserve la propriété de conservation du débit lors de la résolution des équations discrétisées. La conservation du débit n'est pas systématique avec les autres méthodes. Par exemple, 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.

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.

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)

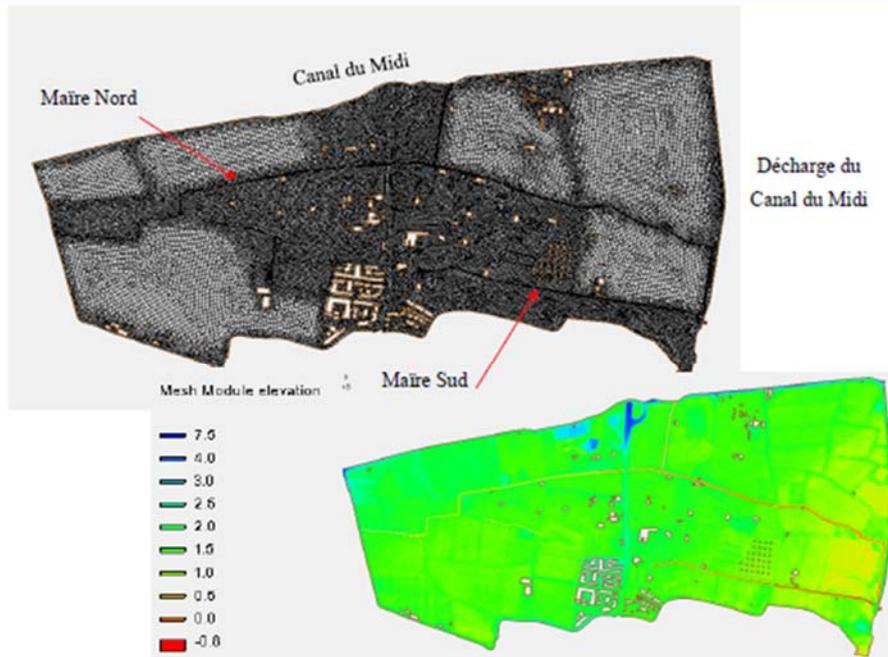
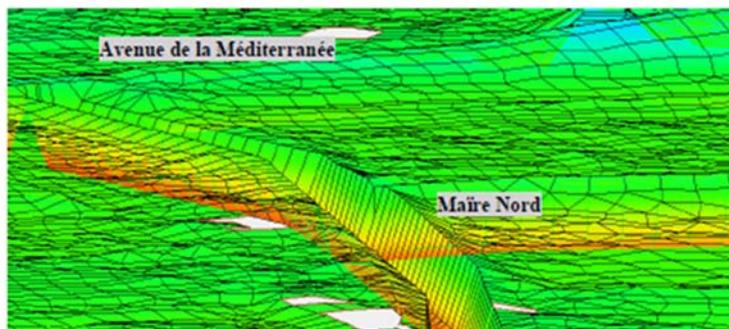


Illustration n°8 : Maillage de la zone d'étude et variation altimétrique



Exemple de maillage

Prise en compte des ouvrages de type pont

SW2D permet de prendre en compte les ouvrages de type pont en introduisant un terme supplémentaire de perte de charge dans les équations de quantité de mouvement. Ce terme est pris en compte par une méthode de type pas fractionnaires (l'équation d'évolution en temps est résolue en tenant compte uniquement du terme de perte de charge) :

$$\partial_t \mathbf{q} = -gh \Delta \mathbf{H}$$

$$\Delta \mathbf{H} = C \frac{|\mathbf{u}|}{2g} \mathbf{u} = C \frac{|\mathbf{q}|}{2gh^2} \mathbf{q}$$

Où C est un coefficient adimensionnel de perte de charge, g est l'accélération de la pesanteur, h la profondeur d'eau, q le débit unitaire et ΔH est le vecteur perte de charge.

Le coefficient de perte de charge est donné par :

$$C = \begin{cases} 0 & \text{si } z < z_1 \\ C_1 & \text{si } z_1 \leq z < z_2 \\ C_1 + C_2 & \text{si } z \geq z_2 \end{cases}$$

Où C_1 est le coefficient de perte de charge induit par la mise en charge du tablier du pont, C_2 est le coefficient de perte de charge induit par le frottement sur la chaussée, z_1 et z_2 étant respectivement la cote sous poutre du tablier et de la chaussée. Les coefficients C_1 et C_2 peuvent être spatialisés et peuvent par exemple intégrer un coefficient de perte de charge singulière en sortie d'ouvrage pour tenir compte des pertes de charge supplémentaires liées à l'augmentation de la section de passage par exemple.

De même, la prise en compte de ces ouvrages intègre également la présence éventuelle de piles dans le lit mineur du cours d'eau.

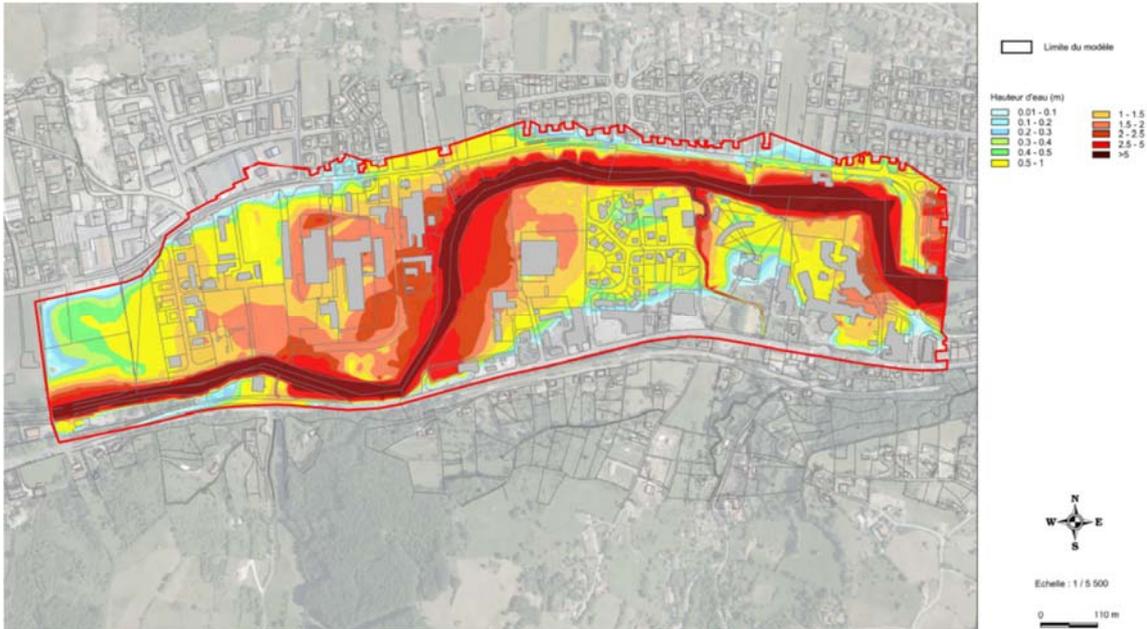


Éléments d'intégration des ouvrages de franchissement dans les modèles hydrauliques 2D

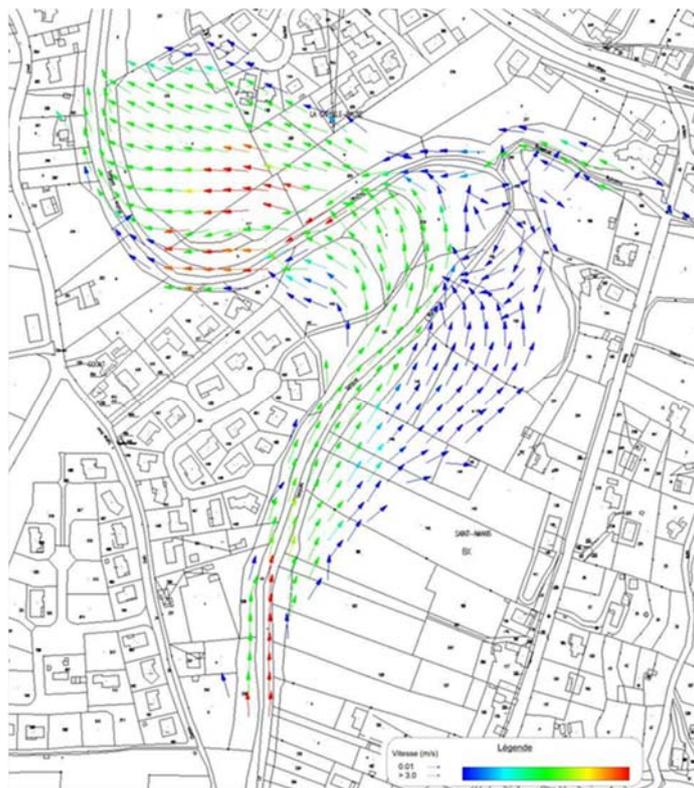
RENDU CARTOGRAPHIQUE

SW2D fournit les résultats au centre de chaque maille sous forme de table avec les coordonnées X, Y, variable. Les variables extraites peuvent être : les hauteurs d'eau, les cotes de lignes d'eau, les débits unitaires selon x ou y, ou la norme du débit unitaire, la vitesse normée ou les composantes x et y de la vitesse, le nombre de Froude ou le nombre de Courant. Les valeurs être extraites à leur maxima ou à différents pas de temps.

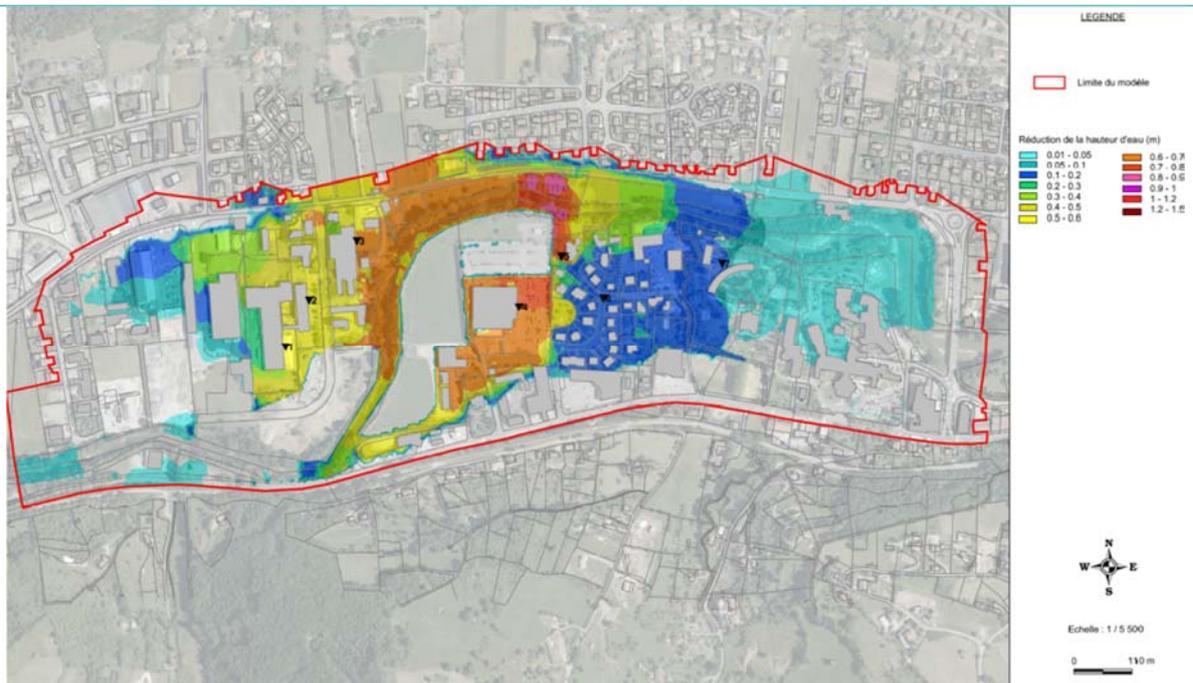
Les résultats sont exploités avec le logiciel QGIS, système d'Information Géographique distribué sous licence publique



Exemple de rendu cartographique des hauteurs de submersion.



Exemple de rendu cartographique des vitesses d'écoulement.



Exemple de rendu cartographique de l'impact d'un aménagement