



Des solutions transparentes

Réalisé par

G2C ingénierie

2 avenue Madeleine Bonnaud

13 770 VENELLES

Etabli par	Validé par
SN	JFCL

COMMUNE DE VENELLES
DEPARTEMENT DES BOUCHES DU RHONE

ETUDE HYDRAULIQUE VIS A VIS DU
RISQUE INONDATION

RAPPORT DE PRESENTATION

Juillet 2008

Conseil et assistance technique pour la gestion durable de l'environnement et du patrimoine

AIX EN PROVENCE - ARGENTAN - ARRAS - BORDEAUX - BRIVE - CASTELNAUDARY - CHARLEVILLE - MACON - NANCY - PARIS - ROUEN

Siège : Parc d' Activités Point Rencontre - 2 avenue Madeleine Bonnaud- 13770 VENELLES - France - Tél. : + 33 (0)4 42 54 00 68 - Fax : +33 (0) 42 4 54 06 78 e-mail : siege@g2c.fr
G2C ingénierie - SAS au capital de 781 798 € - RCS Aix en Provence B 453 686 966 - Code NAF 7112B - N° de TVA Intracommunautaire : FR 75 453 686 966

www.g2c.fr



SOMMAIRE

1. PREAMBULE	6
1.1. Objectifs	6
1.2. Méthodologie	6
2. ETUDE HYDROLOGIQUE.....	8
2.1. Caractérisation du bassin versant Venellois.....	8
2.1.1. Hydrographie et morphologie du bassin versant.....	8
2.1.2. Le réseau pluvial de la commune.....	9
2.1.3. Aspect géologique - Influence de la géologie sur la genèse des crues : L'effet du karst	10
2.1.4. L'occupation du sol.....	10
2.2. Pluviométrie	13
2.2.1. Climatologie de la zone étudiée	13
2.2.2. Données pluviométriques de références - étude régionalisée CEMAGREF (méthode SHYREG).....	13
2.3. Crues historiques	14
3. APPROCHE MODELISATRICE PLUIE-DEBIT SUR LES BASSINS VERSANTS DE LA TOULOUBRE, VALLONS DES FAURYS ET DU CLAOU.....	16
3.1. Détail de la modélisation mise en œuvre.....	16
3.2. Hypothèses prises en compte.....	17
3.2.1. Données topographiques	17
3.2.2. Témoignages humains	18
3.2.3. Coefficient de ruissellement	19
3.3. Détermination des hydrogrammes de crues pour les sous bassins versants	20
3.4. Modélisation hydraulique	20
3.5. Modélisation de la crue de référence	20
3.6. Validité du modèle constitué.....	21
3.7. Résultats de la modélisation	23
3.7.1. Organisation des écoulements pour la crue de référence	23
3.7.2. Caractérisation des hauteurs et des vitesses d'écoulement	24
3.7.3. Impact des travaux proposés dans le cadre de l'actualisation du schéma directeur eau pluviale sur l'aléa inondation.....	25
4. PRESENTATION DE L'ALEA EN ZONE URBAINE.....	27
4.1. définition de l'aléa	27
4.2. Comparaison de l'aléa en zone urbaine sur la partie modélisée avec celui établi en 1998 par la société Daragon.....	28
4.2.1. Méthodologie mise en œuvre pour l'élaboration de l'aléa dans le cadre de l'étude de 1998	28
4.2.2. Eléments différenciateurs.....	28
4.2.3. Commentaires sur les différences notables	30
5. ANNEXES	34
5.1. Détermination des coefficients de ruissellement associés à chaque sous bassin versant.....	34



5.2. Méthodologie de transfert Pluie-Débit utilisée pour la modélisation de la crue de référence au niveau du bassin versant de la Touloubre.....	36
5.3. Modélisation hydraulique des écoulements avec le logiciel XPSWMM.....	37
6. ANNEXES CARTOGRAPHIQUES	39



TABLE DES ILLUSTRATIONS

Figure 1 : taux d'imperméabilisation retenu selon le type d'occupation du sol	11
Figure 2 : calcul du taux d'imperméabilisation par type d'occupation du sol	12
Figure 3 : Hauteur -Durée – Fréquence à prendre en compte pour Venelles (analyses réalisées par le CEMAGREF)	13
Figure 4 : Ajustement de la loi de Montana	13
Figure 5 : Intensités de l'épisode du 22 septembre 1993 (données Météo France).....	15
Figure 6 : comparaison événement de 1993 avec les quantiles de pluies de référence sur la commune de Venelles.....	15
Figure 7 : délimitation et extrait du MNT.....	17
Figure 8 : Extrait de l'orthophotoplan de Venelles au 1/400.....	17
Figure 9 : Extrait du levé topographique de la Touloubre et axe principaux inspectés.....	18
Figure 10 : caractéristiques principales des sous bassins versants – versant Touloubre	19
Figure 11 : Pluie modélisée du 22 septembre 1993.....	20
Figure 12 : hydrogramme obtenue par SOGREAH pour la pluie du 22 septembre 1999.....	21
Figure 13 : Hydrogramme obtenue avec la modélisation XP SWMM dans le cadre de la présente étude et hydrogramme de la crue du 22 sept 1993 (digitalisé à partir du graphique SOGREAH ci-dessus - données extrapolées avant 20h).....	21
Figure 14 : comparaison des hydrogrammes.....	21
Figure 15 : travaux préconisés dans le cadre de la mise à jour du schéma directeur d'assainissement des eaux pluviales.....	25
Figure 16 : comparaison des données topographiques disponibles	29



ANNEXES CATOGRAPHIQUES

Planche 1 (format A3): Versant Durance et Touloubre	39
Planche 2 (format A3): Sous bassin versant	39
Planche 3 (format A3) : Trame du réseau pluvial	39
Planche 4 (format A3) : extrait du réseau modélisé pour la partie urbaine	39
Planche 5 (format A3) : Découpage des bassins versants en sous bassins versants.....	39
Planche 6 (format A3) : Organisation des écoulements pour la crue de référence	39
Planche 7 (format A3) : Organisation des écoulements pour la crue de référence	39
Planche 8 (format A0): cartographie des hauteurs d'eau pour la crue de référence sur les zones urbaines (U) de la commune	39
Planche 9 (format A0): cartographie des vitesses d'écoulement pour la crue de référence sur les zones urbaines (U) de la commune	39
Planche 10 (format A0) : détail des aménagements prévus dans le cadre de la mise à jour du schéma directeur eau pluviale	39



1. PREAMBULE

1.1. Objectifs

Située au nord-est d'Aix-en-Provence, la commune de Venelles s'est développée le long de l'axe routier Alpes-Méditerranée. Elle comptait 7537 habitants au dernier recensement de 1999 (source INSEE), répartis essentiellement à l'ouest de l'autoroute.

Les crues de 1993 et 1994 ont causé de nombreux dégâts matériels. L'urbanisation progressive de la commune et l'imperméabilisation des sols qui en découle augmentent encore les risques d'inondation.

La Commune a engagé la révision générale de son Plan d'Occupation des Sols. Dans ce cadre là, les services de l'État ont fait valoir à la Commune, qu'il est nécessaire de prendre en compte le risque inondation et donc de délimiter les zones inondables et celles présentant un aléa vis à vis du risque pluvial pour l'ensemble du territoire de la commune.

Ainsi la Commune a engagé une démarche dont la finalité est de retranscrire au travers du Plan Local d'urbanisme des objectifs de protection qui sont notamment de :

- de réduire la vulnérabilité des personnes et des biens, en limitant strictement l'urbanisation dans les zones qui peuvent être touchées, et en aidant aux travaux et autres mesures qui permettront que pour une même crue les dommages matériels ou moraux soient bien moindres après qu'avant,
- d'encourager à la protection des lieux actuellement urbanisés et des personnes qui les occupent, lorsqu'elle est possible techniquement et soutenable financièrement,
- de préserver les champs d'expansion des crues et leur environnement.

1.2. Méthodologie

Les étapes clés de la méthodologie mise en œuvre sont les suivantes:

■ 1 Réalisation de l'étude hydrologique

L'étude hydrologique, dont le but est la détermination d'une crue de référence pour caractériser ensuite l'aléa inondation, permet d'obtenir des éléments de débit par une approche statistique :

- des données de débits du cours d'eau (données régionales),
- des données pluviométriques (horaires, journalières,...).

Ces données peuvent être issues d'estimation de débits ou de ruissellement en fonction de bassins versants ou zones de voisinage. Elle permet de déterminer notamment si la plus forte crue connue peut être considérée comme la crue de référence à prendre en compte. La crue de référence est dans ce cas la plus forte connue, clairement répertoriée et survenue dans des conditions hydrauliques similaires à la situation actuelle, si elle est plus forte que la crue centennale. Sinon, c'est la crue centennale, reconstituée par analyse statistique qui doit être prise en compte.

■ 2 Réalisation d'une analyse hydrogéomorphologique sur l'ensemble du territoire de la commune

L'étude hydrogéomorphologique permet de déterminer les zones inondables géologiques basée sur la topographie naturelle du terrain (définition des lits mineur, moyen et majeur ainsi que des terrasses anciennes). Cette partie qualitative ne détermine ni la hauteur ni la vitesse des eaux.

Elle permet d'établir une première carte de l'enveloppe de l'aléa vis à vis du risque inondation et pluvial.



■ 3 Croisement de cette analyse avec les zones d'enjeux futurs ou existants au Plan Local d'Urbanisme

La superposition des zones de développement futur et des zones urbanisées actuelles avec la cartographie issue de l'analyse hydrogéomorphologique permet de déterminer les zones à enjeux. Sur ces zones, avons réalisé des compléments d'études hydrauliques afin d'approcher plus finement l'aléa inondation.

■ 4 Réalisation des compléments d'études hydrauliques pour les zones à enjeux

Deux types d'études hydraulique ont été réalisées pour déterminer les aléas, elles intègrent le fonctionnement hydraulique des zones à enjeux, pour la crue de référence, pour la détermination de l'aléa :

-Sur la partie urbaine du territoire, une modélisation de type pseudo 2D a été réalisée, avec des zones d'écoulements et de stockage dont les échanges sont régis par des lois de déversements et de frottements. Elle prend en compte des ajouts naturels ou anthropiques (digues, ponts, voire, remblais..). Elle détermine les débits , hauteurs, vitesses et durées des flux.

-Sur la partie non urbaine, l'approche mise en œuvre est simplifiée (estimation sommaire des débits de crues dans les zones à enjeux et évaluation des hauteurs par la formule de Manning-Strickler).

Elles permettent d'affiner la carte de l'aléa vis à vis du risque inondation et pluvial. Elles déterminent les zones exposées aux inondations en distinguant des niveaux d'aléa, en fonction notamment du niveau d'eau au-dessus du terrain naturel et de la vitesse.

■ 5 Détermination de l'aléa inondation et transcription dans le règlement du PLU

Enfin la phase finale se déroule selon les étapes suivantes :

- la cartographie de l'aléa est établie à partir du croisement de la carte des enjeux issue des documents cartographique du PLU et de celle des aléas
- des principes de protection sont définis dans chaque type de zone pour chaque niveau d'aléau
- ces principes sont transcrites en prescriptions et inscrites dans le règlement du PLU de la commune

Ce document présente l'étude hydrologique et l'étude hydraulique en zones urbanisées réalisées par G2C environnement.

L'analyse hydrogéomorphologique réalisée par IPSEAU et la caractérisation de l'aléa inondation sur les zones non urbaines font l'objet d'un autre rapport de présentation.



2. ETUDE HYDROLOGIQUE

2.1. Caractérisation du bassin versant Venellois

2.1.1. Hydrographie et morphologie du bassin versant

La commune de Venelles s'inscrit en limite des bassins versants de la Touloubre et de la Durance.

L'axe principal d'écoulement des eaux n'est autre que la Touloubre, rivière prenant sa source sur le territoire de la commune et se jetant dans l'étang de Berre. Elle est l'exutoire naturel unique de quasiment tous les secteurs urbanisés de la commune, hormis la partie Nord qui s'écoule versant Durance via le torrent de Vauclaire (cf Planche 1 en annexe cartographique).

La Touloubre est un petit fleuve des Bouches du Rhône, dont le bassin versant s'insinue entre l'Arc au sud et la Durance, au nord. D'une superficie de 42 000 ha, ce bassin versant est constitué de bas plateaux et de collines surtout calcaires.

La Touloubre prend naissance dans le périmètre du lieu dit la « Baraque ». Son exutoire dans les limites de la commune de Venelles se situe au niveau de la station d'épuration.

On distingue des vallons fonctionnels affluents de la Touloubre. Un premier groupe d'affluents se localise tout d'abord dans le sous bassin versant qui alimente la Touloubre en amont des sous bassins versants urbanisés. Il s'agit en particulier des écoulements de deux unités hydrologiques qui alimentent la tête de la Touloubre, d'une part en rive gauche en provenance du château de Saint Hippolyte et d'autre part en rive droite dans le périmètre des Quatre Tours. Il est également possible de distinguer un second groupe d'affluents qui constituent de véritables organismes hydrologiques beaucoup plus marqués que ceux de la tête : vallons des « Faurys » et du « Claou » en rive droite et « Mon travail » en rive gauche (cf Planche 2 en annexe cartographique).

Sur la partie urbanisée de la Touloubre, l'urbanisation et la trame pluviale existante jouent un rôle important dans l'orientation des écoulements et modifie surtout les cheminements hydrauliques naturels.

L'est et l'extrême nord de la commune sont tournés d'un point de vue hydrologique vers la Durance. Le réseau hydrographique se compose essentiellement de talwegs marqués. L'ensemble converge vers deux ruisseaux, le Grand Vallat et le torrent de Vauclaire (cf Planche 2 en annexes cartographiques).

Le bassin versant du Grand Vallat prend sa source sur la commune limitrophe de Meyrargues et draine la zone rurale située à l'est de la commune de Venelles.

Le bassin versant du torrent de Vauclaire est essentiellement rural, il draine toutefois la partie Nord de la zone urbanisée de la commune de Venelles. La pente du bassin versant est très marquée et il est composé de multiples vallons qui se transforment en affluents par forte pluies.

DECOUPAGE EN SOUS BASSINS VERSANTS (UNITE HYDROLOGIQUE HOMOGENE)

Le réseau hydrographique est caractérisé sur la commune par :

- ses grands axes d'écoulement,
- ses biefs,
- la séquence des sections naturelles et des ouvrages sur les axes d'écoulement.

Les grands axes d'écoulement se dégagent d'eux-mêmes, alors que les biefs sont déterminés par des découpages successifs. A partir du profil en long des grands axes étudiés, un premier découpage est effectué à partir des biefs de pentes homogènes. Ensuite, un deuxième découpage est réalisé en fonction des ouvrages. Enfin, les biefs naturels sont découverts en fonction de l'homogénéité des profils en travers caractérisés lors des levés topographiques.

Après un travail de localisation et de caractérisation des réseaux structurants établi à partir des reconnaissances de terrain, le découpage du bassin versant est effectué en repérant les exutoires des réseaux dans les branches principales.



Chaque bassin ainsi obtenu est alors éventuellement découpé en sous bassins :

- en fonction du réseau structurant, c'est à dire en définissant un bassin versant pour chaque branche importante arrivant au même exutoire dans une branche principale,
- en fonction de l'occupation des sols, c'est à dire en essayant d'avoir un coefficient de ruissellement le plus homogène possible sur chaque bassin versant.

Les bassins versants sont caractérisés à partir du Modèle Numérique de Terrain (MNT), de l'orthophotoplan et des vérifications de terrain (la micro-topographie étant inaccessible par le MNT). On distingue alors des bassins de tête et des bassins de parcours :

- les bassins de tête à l'amont des branches principales et secondaires,
- les bassins de parcours qui viennent alimenter les branches principales.

Pour chaque sous bassin, sont déterminées les caractéristiques morphologiques suivantes:

- surface,
- longueur du plus long chemin hydraulique,
- pente,
- coefficient de ruissellement (qui dépend de l'occupation du sol, cf 2.1.4).

Les sous bassin versants principaux des versants Touloubre et Durance ont donc été divisés en unités hydrologiques homogènes.

2.1.2. Le réseau pluvial de la commune

Le réseau pluvial est composé d'une alternance de réseau superficiel et de réseau busé (cf Planche 3 en annexes cartographiques). Comme il l'a été précisé plus avant, la trame pluviale existante joue un rôle important dans l'orientation des écoulements et modifie surtout les cheminements hydrauliques naturels.

La commune compte également plusieurs bassins d'orage qui servent à la régulation des épisodes de crues notamment :

- Le bassin de rétention de la gare : 12 000 m³ répartis en deux compartiments (3000 m³ pour le bassin amont et 9000 m³ pour le bassin aval)
- Les bassin de rétention des Faurys nord : 1 800 m³
- Les bassin de rétention des Faurys sud : 1 500 m³
- Le bassin de rétention de l'A51 nord (bassin BP) : 3500 m³
- Le bassin de rétention de l'A51 sud : 5000 m³

Les volumes des bassins de rétention ont été déterminés avec précision grâce au modèle numérique de terrain et aux levés topographiques (cf chapitre 3.2.1).



2.1.3. Aspect géologique - Influence de la géologie sur la genèse des crues : L'effet du karst

La géologie de la zone étudiée présente de nombreux affleurements de roches calcaires, ces affleurements calcaires sont souvent à l'origine du développement d'un type de relief particulier : le modelé karstique ou « karst ». Le domaine géologique particulier que constitue le karst a une influence mal appréhendée d'un point de vue hydrologique sur la genèse des crues.

La particularité des roches calcaires qui constituent ce domaine est d'être perméables en grand et donc généralement peu favorables aux écoulements subaériens. Les réseaux de fractures qui accidentent ces massifs sont à l'origine de points d'absorption (pertes, avens, dolines, lapiez, ...) favorables au développement d'un réseau hydrographique souterrain qui s'agrandit par dissolution des roches. La densité de la fracturation et ses directions, le pendage des différentes couches stratigraphiques et les variations lithologiques déterminent la circulation hydrologique interne du karst.

Ces paramètres déterminent également le comportement hydrologique du réseau karstique en relation avec la pluviométrie enregistrée.

La difficulté du point de vue hydrologique résulte de la connaissance de ce comportement du karst. La première difficulté rencontrée concerne l'étendue des bassins versants, les bassins versants topographiques ne coïncident que rarement avec les bassins versants karstiques qui peuvent être plus étendus.

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 ressuyage de l'onde de crue provoquée par les volumes précipités et ruisselés. Dans le cas des crues fréquentes à rares, il 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. De nombreuses sources intermittentes fonctionnent alors à plein régime et les pertes peuvent se mettre à fonctionner en résurgences.

2.1.4. L'occupation du sol

L'occupation du sol est un paramètre essentiel dans l'importance du ruissellement et de l'infiltration.

La commune est coupée en deux par un l'axe Sud-Ouest Nord-Est que constitue l'autoroute A51. L'Ouest de l'axe s'est progressivement urbanisé pour laisser l'usage agricole à l'Est de la commune.

LA VEGETATION

La végétation joue un rôle important car le système racinaire des plantes favorise l'infiltration de l'eau dans le sol et diminue ainsi le ruissellement. Le couvert des feuilles favorise également une chute moins violente des gouttes au sol permettant aussi une meilleure infiltration.

La forêt est un des milieux qui permet une bonne infiltration, toutefois dans la région la forêt est menacée par les incendies ; un milieu qui est favorable à l'infiltration peut ainsi se trouver après un incendie favorable au ruissellement. Les milieux cultivés sont moins intéressants en terme d'infiltration et peuvent même parfois être défavorables comme c'est le cas du vignoble qui favorise le ruissellement.

L'URBANISATION

L'urbanisation entraîne l'imperméabilisation des sols et donc un ruissellement plus important et des temps de concentration moins élevés. Ce type d'occupation du sol favorise donc des débits de crue plus importants et une augmentation des fréquences de crue.

Les coefficients d'imperméabilisation dépendent essentiellement de l'occupation du sol. Celle-ci a été déterminée sur toute la zone d'étude à partir (*) :

- du cadastre,
- de photos aériennes,
- de reconnaissances du terrain.



(*) : Les données disponibles utilisées sont décrites au chapitre 3.2).

Plusieurs types d'occupation du sol ont été définis. A chacun de ces types est associé un coefficient d'imperméabilisation traduisant sa réponse hydrologique à la pluie. Ce coefficient peut varier légèrement d'une entité hydrologique à une autre en fonction du contexte urbain. Les surfaces imperméabilisées ont été déterminées sur l'orthophotoplan disponible et à partir du SIG Cart@jour. Le coefficient d'imperméabilisation est égal au pourcentage de surface imperméabilisée sur la surface totale.

Six types d'urbanisation sur la commune de Venelles dont l'imperméabilisation est rappelée dans le tableau ci-dessous:

Zones	Peu urbanisée	Lotissement	Centre	Venelles le haut	Industrielle	Autoroute
% imperméabilisé	0,20	0,44	0,53	0,63	0,72	1


Figure 1 : taux d'imperméabilisation retenu selon le type d'occupation du sol

La méthode utilisée pour la détermination des coefficients de ruissellement associés à chaque sous bassin versant est détaillée au chapitre 5.1.

Les résultats obtenus pour les sous bassins versant urbains de la Touloubre sont présentés au chapitre 3.3.



Figure 2 : calcul du taux d'imperméabilisation par type d'occupation du sol

 Surface imperméabilisée

$$C = \frac{\text{(surface imperméabilisée)}}{\text{(surface totale)}}$$



2.2. Pluviométrie

2.2.1. Climatologie de la zone étudiée

La commune de Venelles est soumise à un climat méditerranéen marqué par des étés secs et des précipitations de saison fraîche. La xéricité du climat cache des précipitations qui peuvent être extrêmes : il peut pleuvoir en quelques heures l'équivalent de plusieurs mois, notamment lors des orages. De ce fait, les crues du domaine méditerranéen sont généralement d'une redoutable violence car rapides et de débit important.

2.2.2. Données pluviométriques de références - étude régionalisée CEMAGREF (méthode SHYREG)

Cette étude a été réalisée en 2005, suite aux événements de 1993 et 1994, qui compte tenu de leur intensité et du faible échantillon de données disponibles sur la station pluviométrique d'Aix en Provence, introduisaient un biais dans la détermination des périodes de retour associées aux événements.

A partir de la méthode de régionalisation (SHYREG) du générateur de hyétogrammes (SHYPRE) développé par le groupement d'Aix-en-Provence du Cemagref, il est possible d'obtenir des chroniques de pluie horaire pour toute maille de 1 km² des régions Languedoc et PACA. Sur cette base, les quantiles de pluies de référence de différentes fréquences à considérer sur la commune de Venelles sont les suivants (méthode SHYREG – CEMAGREF) :

	100 ans	50 ans	20 ans	10 ans	5 ans	2 ans
P1HEURE	81.1	72.8	61.6	52.7	44.6	34.6
P2HEURES	88.9	80.1	68.3	59.2	50.7	39.9
P3HEURES	98.5	88.3	75.4	65.4	56.4	44.8
P4HEURES	108.3	95.7	81.4	71.1	61.1	48.6
P6HEURES	129.6	109.7	91.6	79.6	68.5	54.4
P12HEURES	162.2	139.3	110.7	94.8	81.4	65.0
P24HEURES	189.9	162.4	128.2	108.8	93.7	75.4
P48HEURES	212.5	181.3	144.3	123.4	106.7	86.3
P72HEURES	221.2	189.4	153.4	133.0	115.3	93.0

Figure 3 : Hauteur -Durée – Fréquence à prendre en compte pour Venelles (analyses réalisées par le CEMAGREF)

Les coefficients de Montana (a,b) sont calculés par un ajustement statistique entre les durées et les quantités de pluie ayant une durée de retour donnée. Cet ajustement est réalisé à partir des pas de temps (durées) disponibles entre 1 heure et 6 heures et entre 6h et 72h.

		100 ans	50 ans	20 ans	10 ans	5 ans	2 ans
Durée 1h à 6h	a	47.146	41.399	33.475	26.512	20.916	14.910
	b	-0.868	-0.862	-0.851	-0.832	-0.815	-0.794
Durée 6h à 72h	a	58.367	51.162	37.054	29.031	23.974	18.287
	b	-0.838	-0.841	-0.829	-0.818	-0.813	-0.805

Figure 4 : Ajustement de la loi de Montana

Avec $h(t)=a*t(1-b)$ et t en min et h en mm.



2.3. Crues historiques

CHRONIQUE DES CRUES DE LA TOULOUBRE

J.L. Ballais et al. (« L'inondation de la Touloubre de septembre 1993 dans son contexte historique ») ont recensé les crues connues de la Touloubre. L'extrait suivant présente les informations collectées sur les évènements antérieurs à 1960 :

« Nous ne savons rien des crues et des inondations de la Touloubre avant 1842 où une grosse inondation provoque des dégâts importants. En revanche, on ignore si les fortes pluies de novembre 1854, de septembre 1855, d'octobre 1856 et de septembre 1873 ont provoqué des inondations. En effet, en général les informations sont imprécises et peu scientifiques. On sait seulement que la Touloubre débordait régulièrement dans la plaine de Salon-de-Provence jusqu'à Lançon et occupait toute la largeur de cette plaine. (...) A partir de 1886, les informations semblent plus précises : les immeubles de Grans montrent des indications de niveaux d'inondations en 1886, 1907, 1951 et 1953. D'après les services d'EDF, ces niveaux correspondaient respectivement aux débits suivants : 108 m³/s, 86 m³/s, 55 m³/s et 29 m³/s. La crue exceptionnelle de 1886 serait liée à des précipitations particulièrement abondantes (...). »

On dispose depuis 1965 de données sur les crues de la Touloubre à deux stations limnimétriques : La Barben et Saint-Chamas. Mais en raison de la configuration de la station de Saint Chamas seule la station de la Barben qui contrôle un bassin versant de 234 km² est considérée comme la station de référence, mais la « Banque Hydro » ne dispose de données numériques pour cette station qu'à partir de 1975.

A l'occasion de l'étude « Etablissement d'une cartographie réglementaires des zones inondables de la Touloubre », SOGREAH a synthétisé les données connues sur la période 1965-1976 :

Année	Disponibilité des débits journaliers	Disponibilité des valeurs maximales	Débit maximal répertorié
1966	Oui	Non	-
1967	Partiel	Non	-
1968	Non	Non	-
1969	Oui	Partiel	11,6 m ³ /s, le 20/09
1970	Oui	Partiel	14 m ³ /s, le 22/10
1971	Oui	Partiel	1,96 m ³ /s en avril et en mai
1972	Partiel	Partiel	57m ³ /s, le 19/02
1973	Non	Non	-
1974	Oui	Oui	17,5 m ³ /s, le 04/02
1975	Oui	Oui	5,80 m ³ /s, le 10/03
1976	Oui	Oui	43,4 m ³ /s, le 10/11

L'année 1973 n'est malheureusement pas disponible dans les annuaires or, selon l'étude hydrologique du Schéma de gestion et d'aménagement de la Touloubre et de son aménagement », réalisée par Daragon Conseils, il s'est produit deux crues intéressantes en 1973, le 14 juillet et le 6 octobre 1973. Cette dernière dont le débit a été estimé à La Barben à 60 m³/s, serait la plus forte crue enregistrée depuis la création de la station, dépassant la crue du 19 février 1972 dont le débit de pointe avait été mesuré à 57 m³/s.

Le tableau suivant présente les résultats issue de la Banque Hydro en ce qui concerne les débit de crue de période de retour 2 à 50 ans calculés sur les 41 dernières années.



crues (loi de Gumbel - septembre à août) - données calculées sur 41 ans

fréquence	QJ (m3/s)	QIX (m3/s)
biennale	4.800 [3.900;6.100]	10.00 [7.700;13.00]
quinquennale	9.200 [7.800;12.00]	20.00 [17.00;26.00]
décennale	12.00 [10.00;15.00]	27.00 [23.00;34.00]
vicennale	15.00 [12.00;19.00]	33.00 [28.00;43.00]
cinquantennale	18.00 [15.00;24.00]	41.00 [35.00;54.00]
centennale	non calculé	non calculé

Les valeurs entre crochets représentent les bornes de l'intervalle de confiance dans lequel la valeur exacte du paramètre estimé a 95% de chance de se trouver.

Il est à noter que le débit de crue le plus important observé sur cette période est celui du 23 septembre 1993 qui a atteint un peu plus de 90 m3/s.

LA CRUE DU 22 ET 23 SEPTEMBRE 1993 SUR LA COMMUNE DE VENELLES

La cartographie des isohyètes des précipitations responsables de la crue des 22-23 septembre 1993 illustre combien l'épisode pluvieux de septembre 1993 a particulièrement touché la commune de Venelles.

Un cumul de pluie (mesurée de 8 h à 8 h) de 222 mm a été enregistrée à la station de Aix-Galice le 22 septembre 1993, le total de l'épisode pluvieux des 22, 23 et 24 septembre 1993 s'élevant à 259 mm à ce poste.

Un cumul de pluie (de 8 h à 8 h) de 189 mm a été enregistrée à Aix-les-Milles le 22 septembre 1993, le cumul de l'épisode pluvieux (les 22, 23 et 24 septembre) s'élevant à cette station à 236 mm.

On note également qu'il est tombé 170 mm en 3 heures au poste de Aix-les-Milles et 170 mm en 2 h 6 mn au poste de Aix-Galice, ce qui est considérable.

Durée	48h	24h	6h	3h	1h	1/2h	6 min
Station							
Aix Galice	255	222	218.2	206.8	129.9	70.7	12.8
Aix les Milles	232.7	189	178.2	169.4	100.8	53	12.4
Peyrolles	185.6	135.6	125.4	113.2	71.6	41.6	13.2
Lambesc	170.4	135.6	125.4	113.2	71.6	41.6	12.2

Figure 5 : Intensités de l'épisode du 22 septembre 1993 (données Météo France)

DETERMINATION DE LA CRUE DE REFERENCE

Le tableau ci dessous situe l'évènement de 1993 par rapport aux quantiles de pluies de référence (méthode SHYREG) à prendre en compte sur la commune de Venelles:

Durée	Evènement de 1993 (hauteur cumulée mm) – Station Aix les Milles	Evènement de 1993 (hauteur cumulée mm) – Station Aix Galice	Pluie de période de retour 100 ans (Méthode SHYREG)
1 h	100.8	129.9	81.1
3 h	169.4	206.8	98.5
6 h	178.2	218.2	129.6
24 h	189	222	189.9
48 h	232	255	212.5

Figure 6 : comparaison évènement de 1993 avec les quantiles de pluies de référence sur la commune de Venelles

Compte tenu de ses caractéristiques (pluviométrie enregistrée lors de l'évènement, impact, hydrogramme de crue,...), la crue de 1993 constitue la crue de référence à prendre en compte pour la détermination de l'aléa sur la commune de Venelles.



3. APPROCHE MODELISATRICE PLUIE-DEBIT SUR LES BASSINS VERSANTS DE LA TOULOUBRE, VALLONS DES FAURYS ET DU CLAOU

Les études hydrauliques sont réalisées au moyen de modélisation hydraulique, pour déterminer les aléas. Elles intègrent le fonctionnement hydraulique des zones à enjeux, pour la crue de référence, pour la détermination de l'aléa.

La modélisation hydraulique intègre les données statistiques sur la pluviométrie et, par rapport à l'étude hydrogéomorphologique, considère des ajouts naturels ou anthropiques (digues, ponts, voire, remblais..). Elle détermine les débits, hauteurs, vitesses des écoulements.

3.1. Détail de la modélisation mise en œuvre

La méthodologie employée (modélisation hydrologique et hydraulique) est celle décrite dans le document « actualisation du schéma directeur eau pluviale », elle est rappelée succinctement ci après.

La modélisation hydrologique et hydraulique en régime transitoire est parfaitement adaptée aux bassins versants pour lesquels la modélisation correcte du fonctionnement hydraulique est indispensable au diagnostic et à la réalisation des cartographies hauteur - vitesse. La modélisation hydrologique et hydraulique en régime transitoire mise en oeuvre sur le bassin versant se décompose en 2 phases :

- la transformation pluie-débit : la méthode du réservoir linéaire a été utilisée afin de modéliser au mieux le temps de réponses des bassins versants.
- la propagation de l'onde de crue le long des axes d'écoulement: elle est effectuée par le logiciel XP-SWMM et est basée sur une modélisation hydraulique qui résout le système complet des équations de Barré de St Venant permettant la description explicite des pertes de charge aux ouvrages et le calcul des hauteurs d'eau et des débits, en tout point du domaine modélisé.

Les résultats obtenus à l'aide du logiciel XP-SWMM permettent de comparer les débits engendrés par la crue du 22 septembre 1993 aux débits capables du réseau. La constitution de zones de rétention permet d'apprécier les hauteurs d'eau atteintes dans les zones de débordement (la transfert entre zone d'écoulement et zone de débordement est régi par des lois d'orifices et de frottements).



3.2. Hypothèses prises en compte

Les hypothèses prises en compte dans le cadre du modèle constitué sont multiples. Elles constituent les données de base pour la modélisation des axes d'écoulement pluvial de la commune.

3.2.1. Données topographiques

Les données topographiques utilisées pour la constitution du modèle et notamment la caractérisation des sous bassins versants se basent sur :

■ Le modèle Numérique de Terrain

Le modèle numérique de terrain disponible pour l'étude recouvre la commune de Venelles avec une résolution de 10X10m. Il permet de

- reconstituer l'altimétrie de la zone d'étude,
- délimiter les bassins versant sur la base des flèches de pentes directement générés à partir du MNT,
- reconstituer les volumes de rétention naturels et artificiels (bassin d'orage).

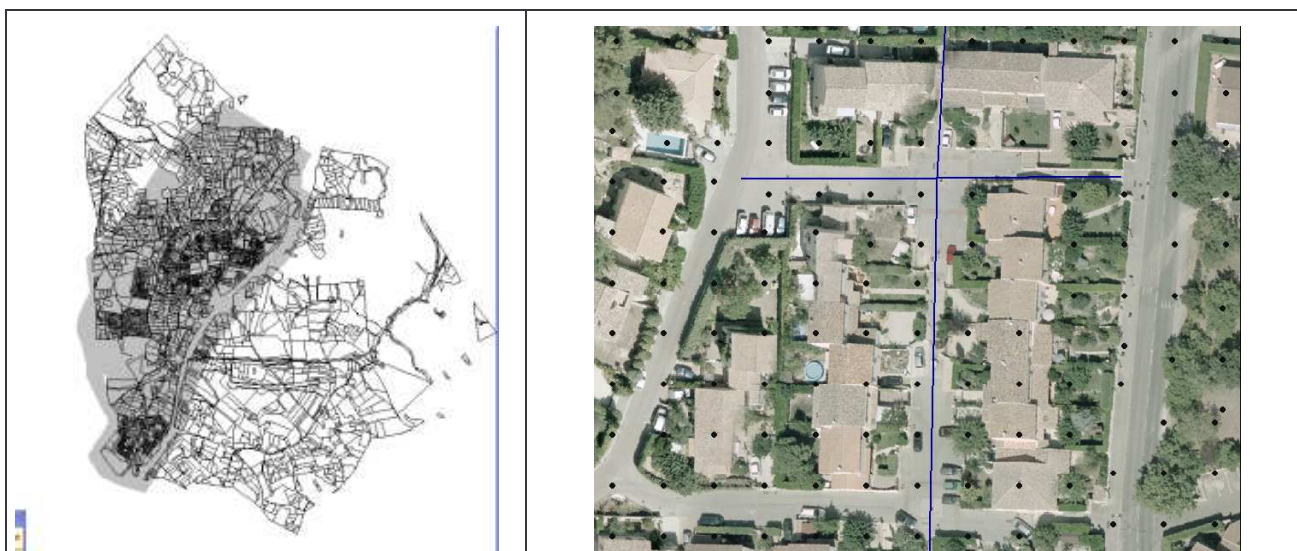


Figure 7 : délimitation et extrait du MNT

■ L'orthophotoplan

Un orthophotoplan de grande précision est disponible pour l'étude. Il a été réalisé par la société GEO 2000. Il permet de caractériser l'occupation des sols et constitue un fond de plan plus clair que le cadastre pour la réalisation du diagnostic et les propositions d'aménagements

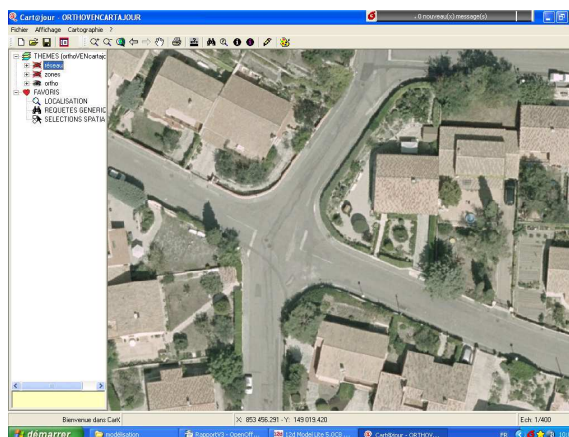


Figure 8 : Extrait de l'orthophotoplan de Venelles au 1/400



■ Des levés topographiques

Des levés topographiques précis des côtes terrain naturel (TN) et fil d'eau (Fe) ont été réalisés par la société SC Ingénierie et le géomètre Jean Fritz sur les axes principaux du réseau d'eaux pluviales de Venelles. Notamment :

- **Caractérisation du lit de la Touloubre par 51 gabarits** : 51 gabarits ont été levés sur la partie urbaine de la Touloubre pour avoir une idée plus juste de la géométrie de chaque tronçon.

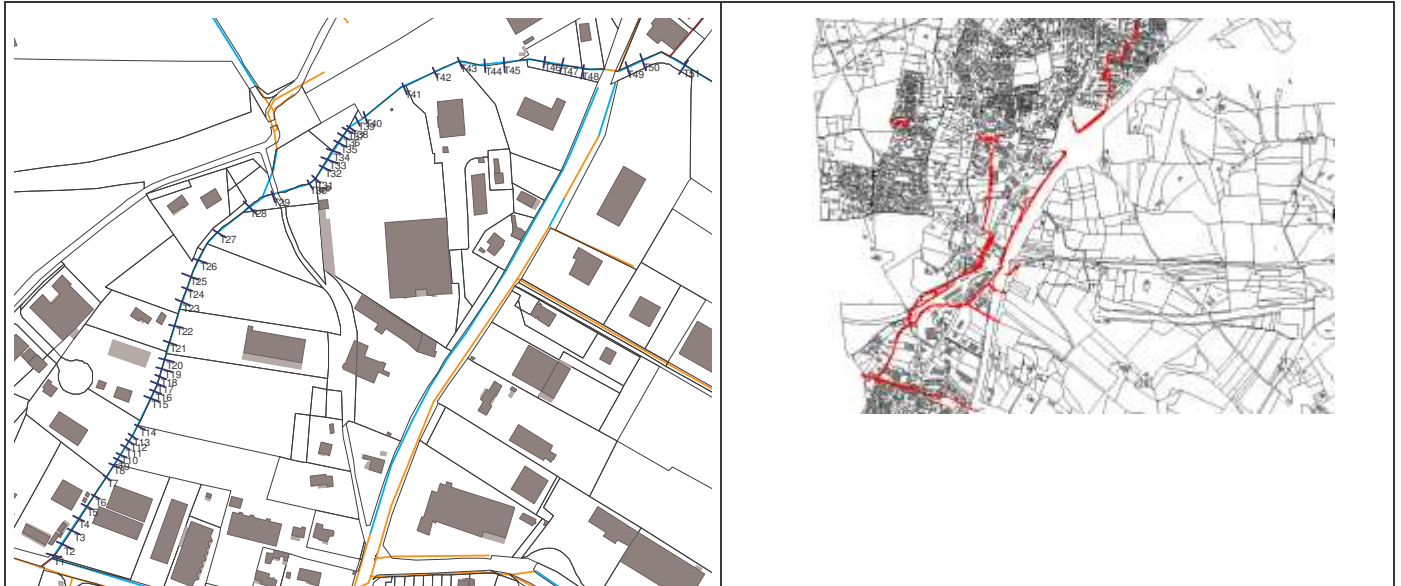


Figure 9 : Extrait du levé topographique de la Touloubre et axe principaux inspectés

3.2.2. Témoignages humains

- Entretien avec les agents des Services Techniques de la commune de Venelles, présents sur le terrain lors de la crue de 1993. Ce témoignage a permis de caractériser les hauteurs d'eau et autres manifestations de la crue dans les différents quartiers de la ville.
- Des témoignages d'habitants du bassin versant des Faurys et des visites sur le terrain ont permis de récolter des informations sur la situation de cette zone en période de crue.
- Des habitants des Logissons et du bassin versant rural en amont des Faurys ont mis à notre disposition des photos des crues.



3.2.3. Coefficient de ruissellement

Le coefficient de ruissellement découle en partie de l'analyse présentée au chapitre 2.1.4 pour la détermination du coefficient d'imperméabilisation de chaque sous bassin versant et de l'étude SOGREAH (Etude « Etablissement d'une cartographie réglementaire des zones inondables de la Touloubre – juin 1999) pour l'élaboration d'une cartographie des zones inondables de la Touloubre. Le détail de la méthode utilisée pour la détermination du coefficient de ruissellement associé à chaque sous bassin versant est détaillé en annexe 5.1.

BV	Sous BV	Surface (m ²)	Longueur (m)	Pente (m/m)	CR10	CR30	CR100	CR 1993
FAURYS	1	125000	469	0.036	0.14	0.20	0.26	0.46
	6	141400	665	0.032	0.32	0.36	0.43	0.56
	31	305200	1110	0.062	0.14	0.20	0.26	0.46
	32	98800	395	0.030	0.42	0.46	0.53	0.62
	33	21200	116	0.061	0.46	0.50	0.57	0.64
	34	18600	96	0.021	0.46	0.50	0.57	0.64
	35	62700	271	0.037	0.46	0.50	0.57	0.64
	36	67000	186	0.081	0.36	0.41	0.47	0.58
VALLON DU CLAOU – GARE	2	53300	456	0.046	0.64	0.66	0.70	0.76
	3	14000	247	0.028	0.97	0.97	0.97	0.97
	4moitié1	29950	95	0.053	0.43	0.46	0.54	0.64
	4moitié2	29950	95	0.053	0.43	0.46	0.54	0.64
	7	90900	447	0.069	0.34	0.38	0.45	0.57
	8	29000	302	0.030	0.57	0.59	0.68	0.70
	12	22400	365	0.068	0.29	0.33	0.40	0.54
	13	46500	337	0.080	0.38	0.42	0.49	0.60
	14	26000	470	0.092	0.46	0.50	0.57	0.64
	15	72900	564	0.085	0.46	0.50	0.57	0.64
	16	33800	417	0.050	0.59	0.62	0.67	0.73
	22	75200	322	0.096	0.41	0.45	0.52	0.61
	23	98400	305	0.033	0.44	0.48	0.55	0.63
	37	49000	481	0.004	0.55	0.58	0.66	0.69
	CENTRE VILLE	5	37800	844	0.021	0.51	0.53	0.61
9		52700	577	0.024	0.67	0.68	0.77	0.76
9bis		29500	370	0.022	0.67	0.68	0.77	0.64
10		69100	1140	0.027	0.29	0.33	0.40	0.54
11		92700	611	0.020	0.55	0.59	0.63	0.71
17		39400	312	0.064	0.67	0.68	0.77	0.76
18		144400	738	0.060	0.53	0.56	0.64	0.68
19		8700	69	0.029	0.53	0.56	0.64	0.68
20		57700	237	0.008	0.53	0.56	0.64	0.68
21		18600	221	0.072	0.53	0.56	0.64	0.68
24		43700	311	0.093	0.46	0.50	0.57	0.64
26	100200	275	0.062	0.48	0.52	0.60	0.65	
TOULOUBRE	28	898100	1060	0.048	0.14	0.20	0.26	0.46
	Autoroute 28	16300	610	0.007	0.97	0.97	0.97	0.64
	29	671900	1380	0.031	0.14	0.20	0.26	0.46
	Autoroute 29	15000	493	0.006	0.97	0.97	0.97	0.64
	38	27800	252	0.008	0.67	0.68	0.77	0.76
	39	74200	467	0.006	0.52	0.55	0.63	0.68
	40	70800	422	0.021	0.57	0.59	0.68	0.70
	41	98800	256	0.016	0.56	0.58	0.66	0.69
	42	99700	344	0.026	0.46	0.49	0.57	0.64
	45	46400	185	0.049	0.46	0.50	0.57	0.64

Figure 10 : caractéristiques principales des sous bassins versants – versant Touloubre

Le découpage en sous bassin versant est présenté en annexe cartographique, planche 5.



3.3. Détermination des hydrogrammes de crues pour les sous bassins versants

La pluie de projet retenue est la pluviométrie enregistrée lors de l'épisode pluvieux pour la crue du 22 septembre 1993.

La modélisation hydrologique utilisée pour calculer les réponses des bassins versants (transformation des hyétogrammes en hydrogrammes) est la suivante:

- Formule du réservoir linéaire pour les bassins versants semi urbains et urbains (coeff d'imperméabilisation >20%) et modèle du double réservoir linéaire pour les bassins versants ruraux (sous bassin versant n°31).

Le Lag time ou K précisé dans le tableau suivant est le temps de réponse du bassin versant, il correspond au décalage entre le pic du hyétogramme et le pic de l'hydrogramme. Il a été déterminé à partir de la formule proposée par DEBORDES qui permet d'obtenir des résultats cohérents avec CAQUOT si la pluie de projet utilisée est une plus synthétique double triangle.

3.4. Modélisation hydraulique

Le modèle hydraulique mis en oeuvre sur cette partie du territoire de la commune repose sur le logiciel de modélisation XP SWMM. Une présentation succincte des équations résolues par le logiciel est présenté en annexe 5.3. Le modèle est basé sur la résolution des équations complètes de Barré de St Venant. Ces équations régissent la propagation des ondes dynamiques dans les écoulements à surface libre.

Un extrait du réseau modélisé est présenté sur la Planche 4 en annexes cartographiques.

3.5. Modélisation de la crue de référence

La crue modélisée est la crue de référence du 22 septembre 1993.

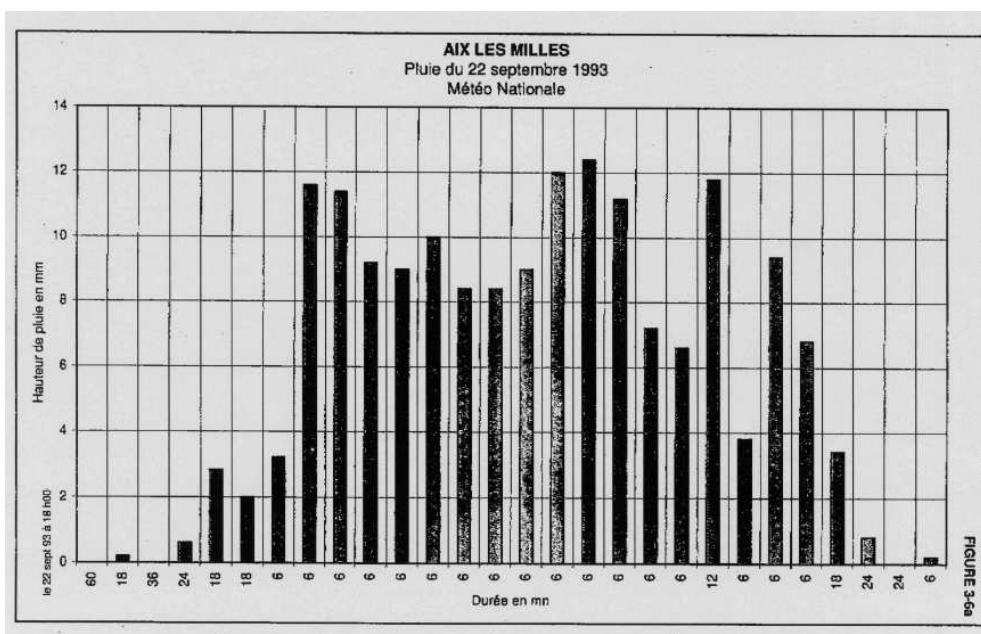


Figure 11 : Pluie modélisée du 22 septembre 1993



3.6. Validité du modèle constitué

Les résultats obtenus avec le modèle constitué ont été comparés avec l'hydrogramme de crue généré par le modèle SOGREAH à l'exutoire de Venelles (Etude « Etablissement d'une cartographie réglementaire des zones inondables de la Touloubre – juin 1999).

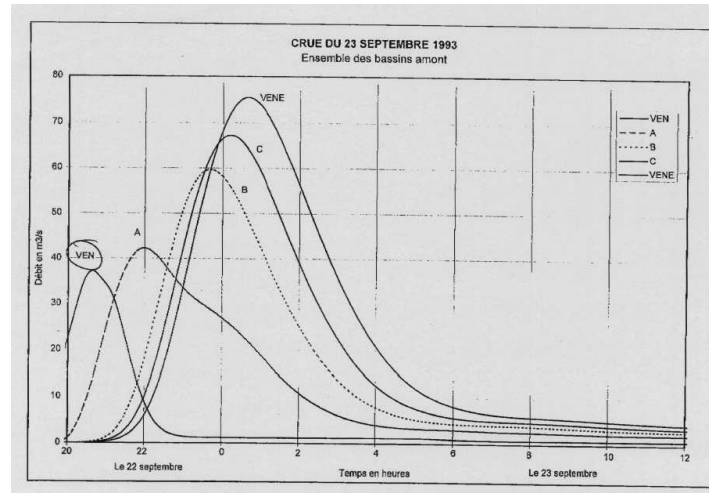


Figure 12 : hydrogramme obtenue par SOGREAH pour la pluie du 22 septembre 1999

Dans le cadre de l'étude SOGREAH, le débit de pointe à l'exutoire du bassin hydrologique VEN qui correspond au site de la station dépuratoire est de 37.5m³/s.

Comparaison des hydrogrammes réels et modélisés en sortie de Venelles
 Crue du 22 septembre 1993

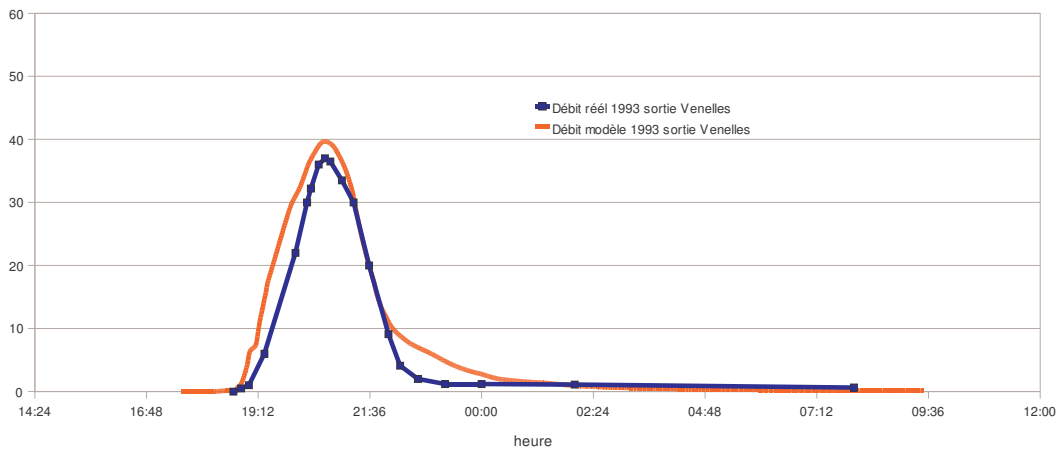


Figure 13 : Hydrogramme obtenue avec la modélisation XP SWMM dans le cadre de la présente étude et hydrogramme de la crue du 22 sept 1993 (digitalisé à partir du graphique SOGREAH ci-dessus - données extrapolées avant 20h)

Pluie du 22 septembre 1993	Débit de pointe (m ³ /s)
Etude SOGREAH	37.5
Etude G2C	39
Ecart	4%

Figure 14 : comparaison des hydrogrammes

Compte tenu de la proximité des deux hydrogrammes de crue, le modèle constitué est validé.



Il est important de rappeler à ce stade que malgré tout le soin que l'on peut apporter à la construction d'un modèle, celui-ci conserve des incertitudes que le calage avec des évènements observés ne parvient pas totalement à éliminer :

- Incertitudes de la topographie ;
- Incertitude de la géométrie du lit (curages réguliers, modifications fréquentes des remblais faisant obstacle à l'écoulement) ;
- Incertitudes sur l'hydrologie ;
- Incertitudes sur les repères de crues, certains sont parfois contradictoires ;
- Incertitudes sur l'occupation du sol de part sa variabilité dans le temps ;
- Incertitudes sur la modélisation des écoulements en nappes ;
- Incertitudes sur les écoulements composés (interaction des écoulements dans le lit mineur et dans le lit majeur) ;
- Incertitudes sur la représentation des petites profondeurs dans les casiers.

De façon générale, la précision de la modélisation est de l'ordre de 20 à 30 cm en cote.



3.7. Résultats de la modélisation

3.7.1. Organisation des écoulements pour la crue de référence

L'autoroute A51 sépare en deux le bassin versant de la Touloubre sur le territoire Venellois :

- Un bassin versant rural à l'Est, qui constitue le bassin de tête de la Touloubre
- Un bassin versant urbain à l'Ouest, composé des zones construites de Venelles

■ Est de l'A51

Cet axe autoroutier forme un obstacle majeur limitant les écoulements en provenance du bassin amont de la Touloubre situé en zone rurale.

Les capacités des trois ouvrages de franchissement conduisent à un laminage des hydrogrammes en provenance de ces bassins versants.

A l'exutoire du bassin versant Mon Travail, compte tenu de la topographie locale, une partie du flot surverse sur l'autoroute A51 pour suivre cet axe et se déverser ensuite dans la zone industrielle de Venelles.

Selon un processus similaire, les ouvrages de franchissement de la voie SNCF Marseille-Gap lamine les écoulements en provenance du bassin versant des Quatre Tours

■ Ouest de l'A51

Ce secteur peut-être décomposé en deux sous-secteurs :

- **le Nord de la voie ferrée**, pentu et essentiellement formé des sous-bassins urbanisés Faurys, Claou et Centre-Ville, constitue la zone de production principale des écoulements pluviaux :
 - Les Faurys : tous les ouvrages de rétention sont transparents devant la montée des eaux rurales en amont et le ruissellement urbain du quartier. Le talweg qui draine ce secteur voit passer un flot qui atteint plus de 9 m³/s en sortie, traverse un champ (La Violaine) et rejoint le bassin de rétention de la gare en deux axes de ruissellement distincts. Sur la partie amont pentue des Faurys, la vitesse de l'eau peut atteindre 4 à 5 m/s.
 - Le vallon du Claou : La partie pentue et urbanisée de cet axe voit se former des écoulements drainés par la rue du Claou pour atteindre 4 à 5 m³/s à son aval. La vitesse de l'eau atteint à cet endroit 3 m/s pour une lame d'eau d'épaisseur 10 cm. Le flot principal quitte alors la voirie, traverse et inonde (moins de 50 cm d'eau) la zone industrielle avant de rejoindre l'avenue des Ribas, puis la RN 96 au niveau du Rond-point de la gare en traversant le champ de la parcelle 84 à plus de 8 m³/s.
 - Le centre-ville : les écoulements du centre-ville sont régulés par le bassin Escota situé au sud de la station service BP. Mais celui-ci est rapidement transparent devant la lame d'eau urbaine qui emprunte le fossé autoroutier servant d'exutoire au bassin de rétention pour atteindre plus de 10 m³/s en amont de la buse de franchissement de la voie ferrée. Devant la faible capacité de cet ouvrage, la majeure partie de l'écoulement est alors détournée vers le passage à niveau. La RN 96 draine également une partie des eaux ruisselées du centre-ville à hauteur de 4 m³/s. L'ensemble des flots en provenance du centre ville et du vallon du Claou confluent ainsi à hauteur du passage à niveau, ce qui inonde les zones de dépression en amont et en aval de celui-ci.



- **Le Sud de la voie ferrée**, relativement plat et essentiellement formé de la zone industrielle et de quelques lotissements, est drainée par la Touloubre vers laquelle confluent l'ensemble des écoulements de la commune.
 - Les flots en provenance du Nord de la voie ferrée et de l'Est de l'autoroute se rejoignent sur la zone industrielle de Venelles, qui s'inonde assez légèrement (<50 cm) compte tenu de sa topographie et de son étendue, sauf en quelques zones de dépression (jusqu'à 1 m d'eau). Ce secteur est essentiellement drainée par la Touloubre (14 m³/s en pointe) et par la RN 96 (8 à 10 m³/s), sur laquelle la vitesse de l'eau peut atteindre 3 m/s pour une hauteur de 20 à 30 cm à l'amont du croisement avec la rue de la Touloubre. Une partie des eaux de ce secteur sont drainées par le biais de la voie ferrée.
 - La D63 constitue, au niveau de son passage sous la ligne SNCF, l'exutoire principal des écoulements en provenance des Faurys et du bassin de rétention de la gare. Ce flot de 14 m³/s environ vient gonfler les eaux de la Touloubre qui inonde totalement le jardin Maurice Plantier
 - La majeure partie des eaux de la rivière (presque 20 m³/s) quitte alors son lit actuel pour retrouver son lit historique et inonder la quasi-totalité du territoire compris entre la D63, alors que le lit canalisé de la Touloubre draine quant-à-lui environ 10 m³/s. Les deux axes d'écoulement se rejoignent à l'exutoire en sortie de commune.
 - C'est précisément à cet exutoire que viennent également confluer les écoulements en provenance de la rue de la Touloubre alimenté par : les écoulements en provenance du bassin versant Mon Travail écrêtés par l'ouvrage de franchissement de l'autoroute et les écoulements en provenance de la zone industrielle via la RN 96. Le débit atteint 15 m³/s en pointe à l'aval de la rue de la Touloubre avec plus de 1 m d'eau dans la partie la moins pentue.

En sortie de Venelles, le débit de pointe de la Touloubre, exutoire quasi-exclusif des écoulements de la commune, atteint près de 40 m³/s.

La localisation et la quantification des écoulements sont précisées sur les planches 6 et 7 en annexes cartographiques.

3.7.2. Caractérisation des hauteurs et des vitesses d'écoulement

Le modèle constitué a permis de définir une cartographie des iso hauteurs et des iso vitesses en tout point du réseau modélisé.

Les cartographies suivantes ont été établies :

- Planche 8 : Cartographie des hauteurs de submersion,
- Planche 9 : Cartographie des vitesses de l'écoulement,



3.7.3. Impact des travaux proposés dans le cadre de l'actualisation du schéma directeur eau pluviale sur l'aléa inondation

LES AMENAGEMENTS

Le diagnostic hydraulique réalisé dans le cadre du schéma directeur d'assainissement des eaux pluviales a mis en évidence la nécessité de réaliser des aménagements pour assurer la maîtrise des eaux pluviales pour une occurrence 10 à 30 ans. Seul le bassin de rétention proposé en amont du quartier des Faurys a été dimensionné pour laminer la crue centennale.

Les dysfonctionnements mis en évidence dans le cadre des simulations de ces événements (saturation, débordements de collecteur, ruissellement sur voirie,...) concernent principalement les insuffisances de la trame pluviale urbaine, en particulier sur les sous bassins versants vallons des « Faurys », du « Claou » et « Touloubre aval ». Ces insuffisances ont pour conséquences la création de zones de débordement et un ruissellement relativement important sur voirie.

Les aménagements préconisés, décrits dans le tableau ci-dessous, sont localisés sur la Planche 10 en annexes cartographiques.

Bassin Versant	Sous bassin versant	Volume de rétention	Renforcement de la trame pluviale
Touloubre	Faurys	Création d'un bassin de rétention des eaux pluviales de 6 000m ³ Extension du bassin de rétention de 1 000m ³	DN600mm sur 120ml DN1200 sur 280ml
	Claou	Création d'un volume de rétention de 8 000m ³ sur deux sites	Pose de canalisation Ø600 sur 180 ml Pose de canalisation Ø800 sur 240 ml Pose de canalisation Ø1000 sur 280 ml Pose de canalisation d'un cadre 1500 x 700 sur 15 ml
	Centre ville	Création d'une retenue temporaire de 20 000 m ³ à l'Est de l'A51. Ce bassin est également destiné à accueillir les eaux de ruissellement du secteur Nord-Est du carrefour A 61 – chemin de fer. (sous-bassin Touloubre amont)	Pose de canalisation Ø800 sur 310 ml Pose de canalisation Ø1000 sur 80 ml Création d'un fonçage sous l'autoroute pour diriger les eaux du centre-ville vers le nouveau bassin situé à l'Est de l'autoroute.

Bassin Versant	Sous bassin versant	Volume de rétention	Renforcement de la trame pluviale
Touloubre	Mon Travail	Création d'une retenue temporaire d'un volume allant jusqu'à 10000 m ³ par la construction d'un merlon le long de la voie communale	Pose d'un cadre 2500 x1500 sur 130 ml Pose de canalisation Ø1200 sur 270 ml Pose de canalisation Ø600 sur 80 ml Pose de canalisation Ø800 sur 100 ml
	Touloubre amont	Création d'une retenue temporaire d'un volume allant jusqu'à 20000 m ³ par la construction d'un merlon le long de la ligne SNCF. Ce bassin est également destiné à accueillir les eaux de ruissellement du secteur centre-ville (cf. sous-bassin versant centre-ville)	

Figure 15 : travaux préconisés dans le cadre de la mise à jour du schéma directeur d'assainissement des eaux pluviales



ANALYSE DE L'IMPACT DES NOUVEAUX BASSINS DE RETENTION SUR L'ALEA INONDATION : EXEMPLE DES SECTEURS FAURYS ET CLAOU

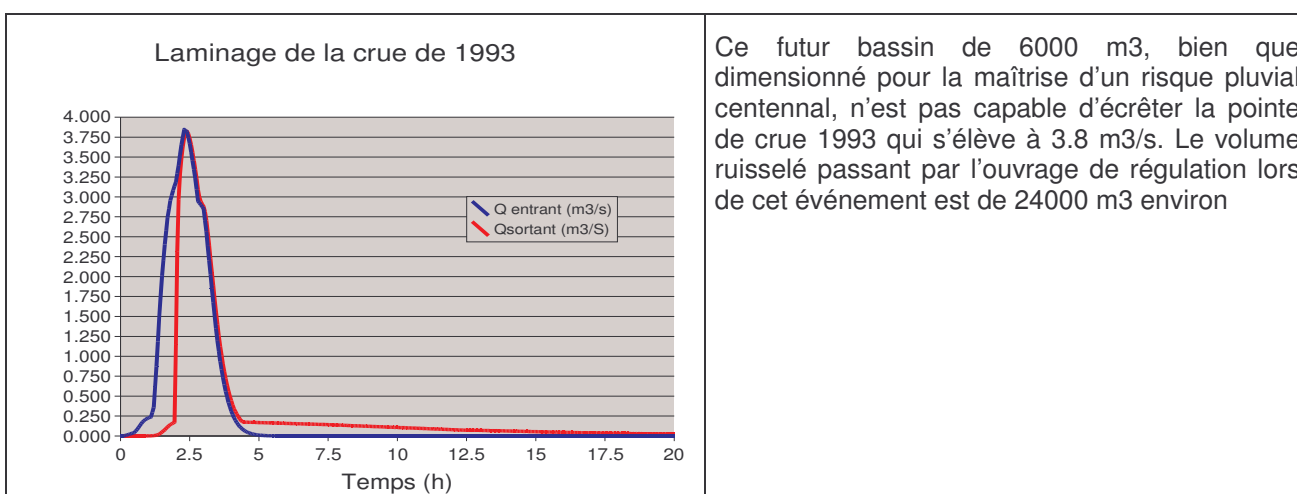
La crue de 1993 présente un volume global ruisselé et un débit de pointe tels que :

- les nouveaux ouvrages de rétention, dimensionnés pour laminer une crue de période de retour de 30 ans, sont rapidement transparents - le volume ruisselé en 3h est de 400 000 m3 environ pour une volume de rétention supplémentaire de 45000 m3 environ,
- alors que les débits ruisselés sont supérieurs de 4 à 15 fois à la capacité de la trame pluviale urbaine.

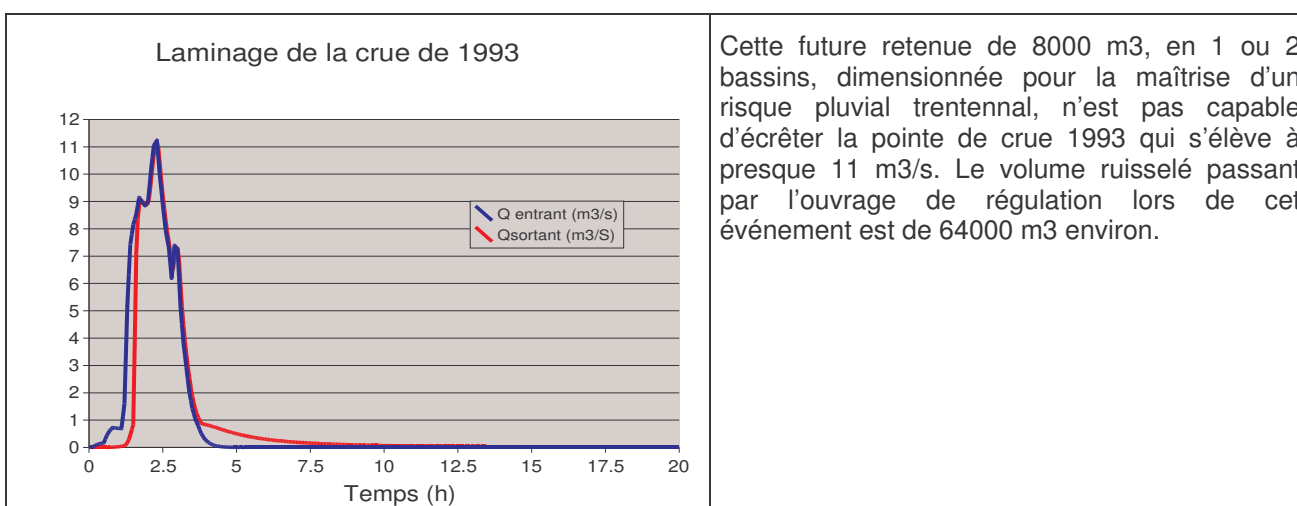
Nous avons, pour illustrer cette analyse, établi les courbes de laminage de deux nouveaux bassins de rétentions :

- Les Faurys
- Les deux zones de rétention du vallon du Claou

■ **Bassin amont des Faurys**



■ **Retenues du bassin versant du Claou**





Les autres bassins de rétention, également conçus pour la maîtrise d'une pluie trentennale, sont de la même manière incapables de laminer la crue exceptionnelle de 1993, qui présente une intensité et un volume 2 à 3 fois supérieurs à la crue T=30 ans

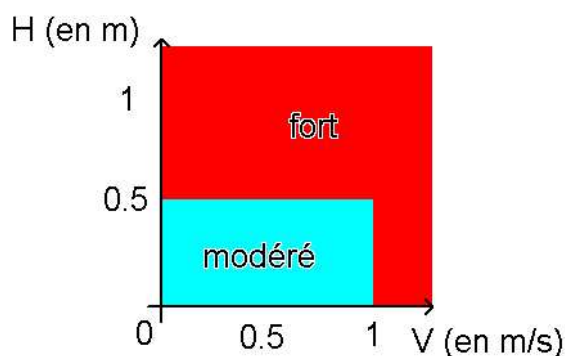
Les aménagements préconisés (cf planche 10 en annexe cartographique - renforcement de collecteur, réalisation de bassin de rétention,...) ne sont pas de nature à éliminer le risque inondation. En particulier, ils sont transparents pour un événement similaire à celui de 1993.

4. PRESENTATION DE L'ALEA EN ZONE URBAINE

4.1. définition de l'aléa

La finalité de l'étude est d'établir une cartographie des zones inondables pour la partie urbaine. La cartographie permet à la fois une représentation synthétique et détaillée de l'information et constitue le document de base pour l'analyse de l'aléa et pour l'établissement ultérieur des documents de planification urbaine.

Les cartographies d'iso-hauteurs et d'iso-vitesses issues de l'étude hydraulique ont permis de cartographier l'aléa inondation en zone *urbaine** en distinguant les zones d'aléa faible et d'aléa modéré selon la grille d'analyse ci-après :



Conformément à cette grille :

Les zones pour lesquelles la hauteur d'eau est comprise entre 0 et 0,5 m et la vitesse d'écoulement comprise entre 0 et 1 m/s ont été qualifiées en aléa modéré. Les zones pour lesquelles la hauteur d'eau est supérieure à 0,5 m et/ou la vitesse d'écoulement est supérieure à 1 m/s ont été qualifiées en aléa fort. Cette grille d'analyse est adaptée à la caractérisation des centres urbains denses principalement soumis aux phénomènes de ruissellement où la faible rugosité des surfaces imperméabilisées entraîne des écoulements rapides. D'un point de vue de la mobilité des personnes, ce seuil correspondrait à la limite de déplacement debout d'un adulte sportif (voir diagramme de déplacement des personnes dans l'eau).

Pour les zones non inondables par la crue de type 1993 mais reconnues comme inondables par la cartographie hydrogéomorphologique une zone d'aléa résiduel a été établie.

La cartographie de l'aléa est présentée dans l'étude synthèse IPSEAU « détermination de l'ALEA INONDATION sur la commune de Venelles (13) ». Elle présente également en dehors des zones urbaines de la commune.

Le travail de cartographie a été réalisé au moyen d'un SIG (Système Informatique Géographique).

*: connectée au réseau pluvial urbain (réseau busée et ou fossé aménagé). En ce sens, la zone géographique « urbaine » définie ici débordé parfois au-delà du découpage de la zone U du zonage du Plan Local d'Urbanisme.



4.2. Comparaison de l'aléa en zone urbaine sur la partie modélisée avec celui établi en 1998 par la société Daragon

4.2.1. Méthodologie mise en œuvre pour l'élaboration de l'aléa dans le cadre de l'étude de 1998

Le modèle hydraulique mis en oeuvre repose sur le logiciel de modélisation XP SWMM. Une présentation succincte des équations résolues par le logiciel est présentée en annexe 5.3. Le modèle est basé sur la résolution des équations complètes de Barré de St Venant. Ces équations régissent la propagation des ondes dynamiques dans les écoulements à surface libre.

Il s'agit d'une modélisation de type pseudo 2D dans laquelle nous avons distingué :

- des zones d'écoulement au niveau de la voirie, des talwegs, des fossés et du lit de la Touloubre
- et des zones de rétention échangeant avec des zones d'écoulement selon des lois de déversements et de frottements

Nous avons croisé les données de ligne d'eau et la topographie issue du modèle numérique de terrain (qui nous a permis d'établir les courbes de niveau et des profils en travers) pour obtenir la cartographie des hauteurs d'eau.

Nous avons considéré des valeurs de rugosité différentes pour les sections hétérogènes ou les écoulements d'une certaine largeur dans le but d'obtenir la carte des vitesses.

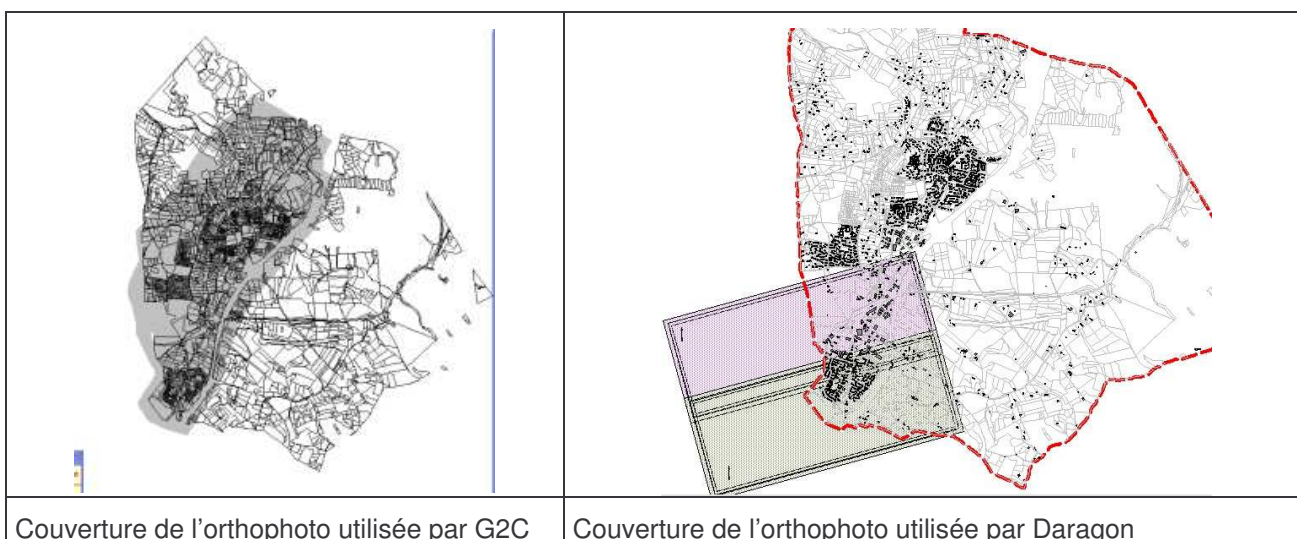
4.2.2. Eléments différentiateurs

Nous pouvons observer certaines différences entre la carte établie par Daragon en 1998 et celle que nous avons établie dans le cadre de la présente étude. Ces divergences peuvent trouver leur origine dans les sources de données topographiques utilisées ou dans les changements de la topographie.

DONNEES TOPOGRAPHIQUES

■ Couverture spatiale

La société Daragon avait utilisé des données topographiques issues d'une restitution photogrammétrique couvrant une zone au sud de la voie SNCF alors que l'orthophoto que nous avons utilisée couvre la quasi totalité des zones urbaines Venelloises.





■ Densité d'information

Les données topographiques utilisées dans le cadre des deux études sont différentes. Le modèle numérique de terrain utilisé dans la cadre de la présente étude (point vert ci dessous) est beaucoup plus dense (traitement automatique de l'orthophoto) que celui utilisé en 1999 (triangle rouge sur la figure ci dessous).



Figure 16 : comparaison des données topographiques disponibles

Par ailleurs pour cette étude, le lit mineur de la Touloubre a fait l'objet d'un levé topographique précis entre le passage sous la RN96 et le site de la station d'épuration, avec l'établissement de 51 gabarits pour avoir une idée plus juste de la géométrie de chaque tronçon.

PRISE EN COMPTE DES AMENAGEMENT REALISES DEPUIS 1999

Depuis 1999, année de la réalisation de la cartographie de l'aléa inondation par la société Daragon, un certain nombre d'aménagements urbains ont été réalisés, modifiant localement la topographie du terrain naturel par des opérations de terrassement, particulièrement en zone industrielle.

Ces aménagements peuvent avoir un impact sur l'enveloppe inondante dans la mesure où ils peuvent mettre hors d'eau certaines zones construites.



4.2.3. Commentaires sur les différences notables

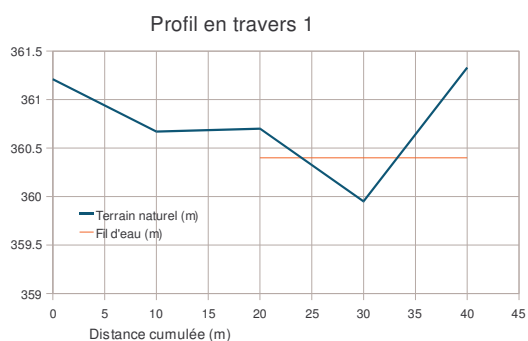
Pour expliquer notre cartographie et justifier certaines différences avec la carte de l'aléa inondation établi par Daragon en 1998, nous avons représenté des profils en travers (dont le sens de lecture va de la rive gauche à la rive droite) directement issus de l'orthophotoplan ainsi que la cote de l'eau, à cet endroit, issue de notre modélisation.

Sur les extraits photographique, le blanc représente l'enveloppe de l'aléa établi par Daragon (l'aléa fort est en gris foncé). Les autres couleurs correspondent à l'aléa que nous avons établi (cf. cartographie de l'aléa inondation).

Les points de comparaison mis en évidence correspondent en général à une réduction de l'enveloppe de l'aléa par rapport à celui de Daragon.

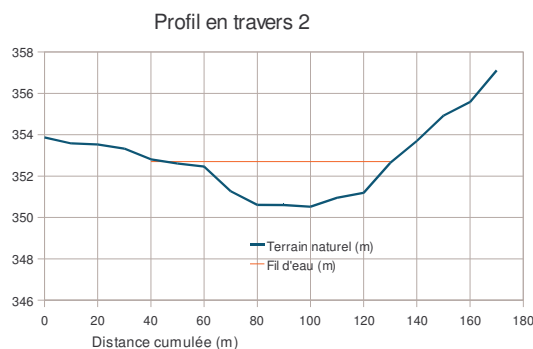
LES FAURYS

Faurys amont



Compte tenu la hauteur d'eau, la largeur la zone inondée au niveau de ce profil n'est que d'une dizaine de mètres, ce qui correspond à notre enveloppe.

Faurys Bassin de Rétention Nord

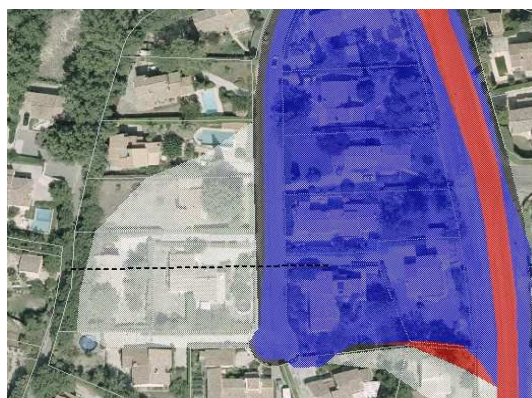
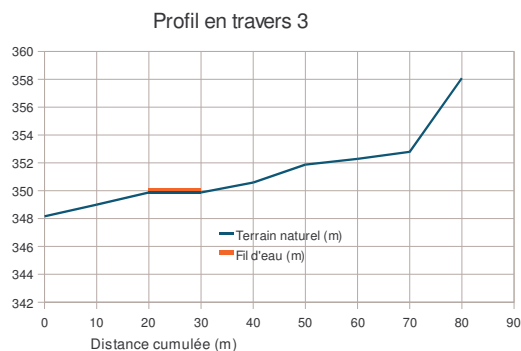


Compte tenu la hauteur d'eau, la largeur la zone inondée au niveau de ce profil (qui suit la plus grande longueur du bassin) est de 80 mètres environ, ce qui correspond à notre enveloppe.



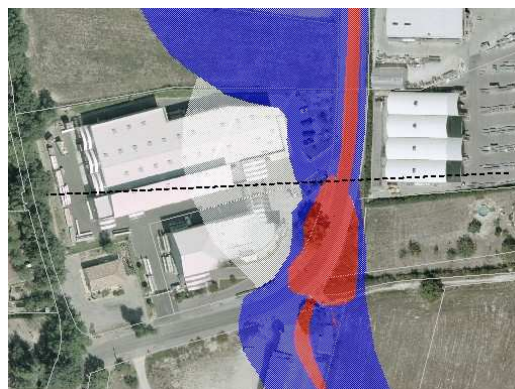
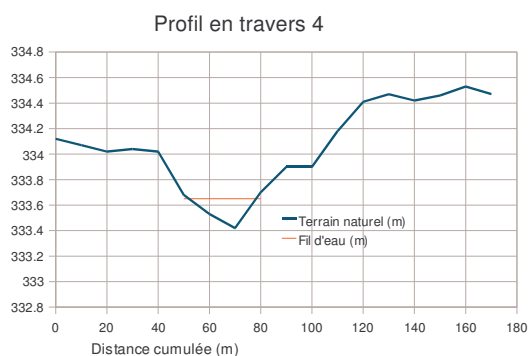
LE CLAOU

Le Claou – Impasse des résistants



Le coteau situé en rive droite est pentu et situé au dessus de l'écoulement sur la voirie : il ne peut être inondé.

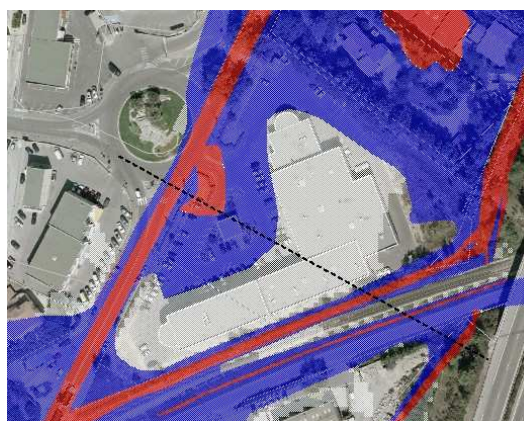
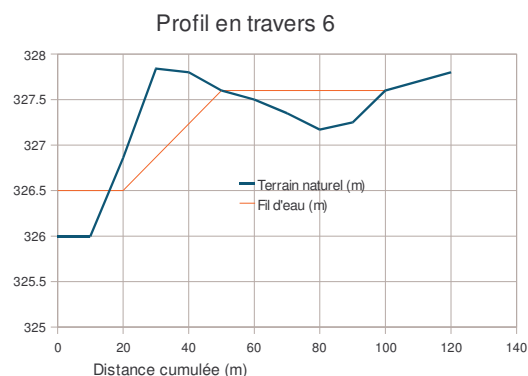
Le Claou – Avenue des Ribas



Des modifications topographiques ont réduit le profil de l'enveloppe inondante suite à une nouvelle construction (à gauche sur la photo) avec plate-forme en surélévation.

ZONE D'ACTIVITES

Zone d'activités - Rond-point de la gare (CASA)



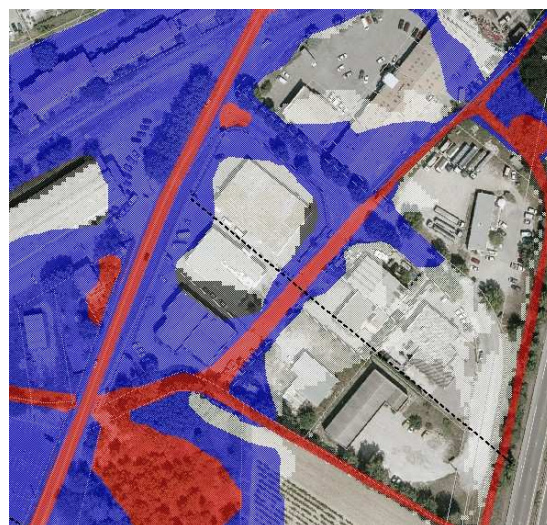
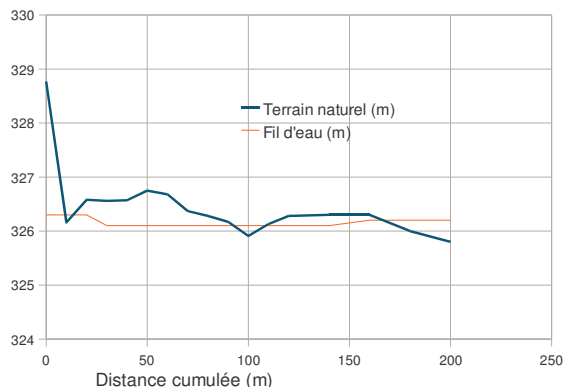
Des modifications topographiques ont réduit le profil de l'enveloppe inondante : la plateforme des nouveaux bâtiments commerciaux est en surélévation du terrain naturel.



ZONE INDUSTRIELLE

Zone industrielle - petite bastide

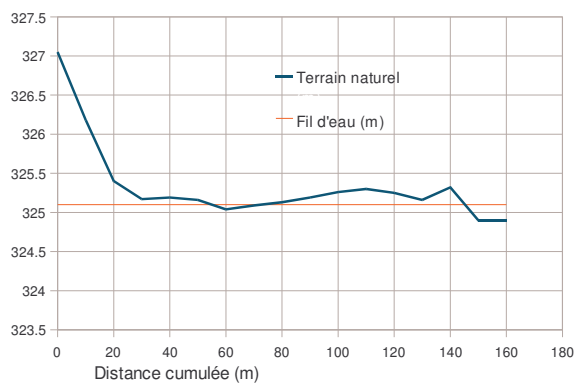
Profil en travers 7



Notre modélisation propose une surface inondée plus restreinte dans le secteur dit de la Petite Bastide. Le profil en travers établi à partir du MNT comme indiqué sur l'extrait photographique, couplé aux cotes d'eau modélisées confirment ce choix.

Zone industrielle - Pharmacie

Profil en travers 11

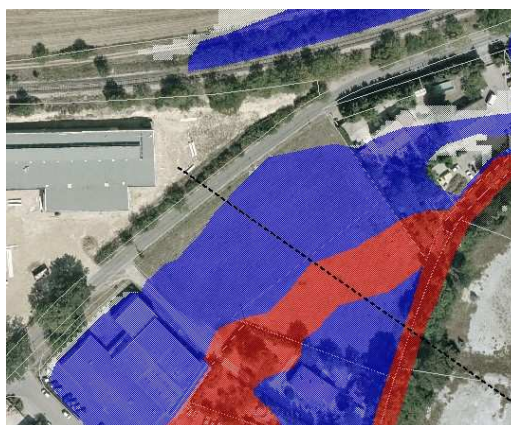
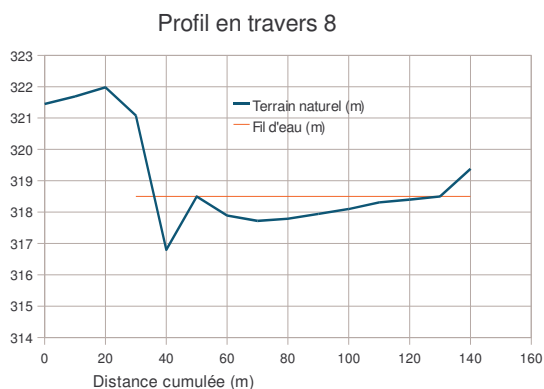


Le MNT montre que certaines « îles » apparaissent dans la partie inondée de la zone industrielle



TOULOUBRE AVAL

Touloubre aval – la rivière retrouve son lit historique



L'extrait cartographique représente ici la carte des vitesses d'écoulement que nous avons établie :

- en bleu : $v < 0.5 \text{ m/s}$
- en rose : $0.5 \text{ m/s} < v < 1 \text{ m/s}$
- en rouge : $v > 1 \text{ m/s}$

Notre modélisation nous permet de déterminer la répartition de débits entre le lit actuel (10 m³/s) et le lit historique (20 m³/s), mais également les conditions d'écoulements des différentes « tranches » du flot « historique ». Pour cette portion de pente 0.5% et dont le profil en travers est indiqué ci-dessus, nous obtenons pour les tranches de vitesse significative :

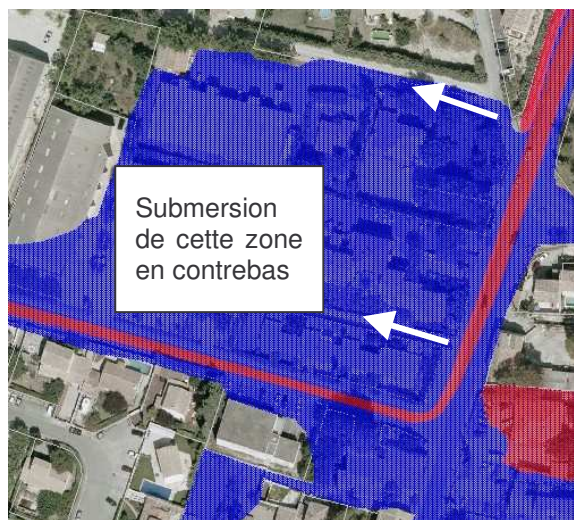
- Une bande centrée autour de l'axe d'écoulement de 20 m de large et de vitesse 1.2 m/s. Un coefficient de Stickler de 20 a été choisi pour cette tranche.
- Deux bandes de 5 m de large environ et de vitesse 0.6 m/s, de part et d'autre de la bande centrale rapide. Un coefficient de Stickler de 10 a été choisi pour cette tranche.

La hauteur moyenne de la lame d'eau de ces deux tranches est de 78 cm.

Touloubre aval – parcelles adjacentes à la rue de la Touloubre



Aléa Daragon



Aléa G2C environnement



5. ANNEXES

5.1. Détermination des coefficients de ruissellement associés à chaque sous bassin versant

Lors de l'étude SOGREAH pour l'élaboration d'une cartographie des zones inondables de la Touloubre, le modèle a été calé grâce aux événements extrêmes de 1993 et 1994. Le tableau suivant présente les résultats de cette modélisation pour une pluie de période de retour 100 ans et de durée 12 heures :

Coefficient de ruissellement moyen au cours de l'épisode	Cumul de la pluie brute (mm)
56 %	176

En considérant que le bassin versant de Venelles se divise en une zone imperméable et une zone perméable et que A_{IMP} est le pourcentage de surface imperméabilisée par rapport à la surface totale, la pluie nette totale sera égale à :

$$Pn_{tot} = Pn_{rurale} \times (1 - A_{IMP}) + Pn_{urbanisé} \times A_{IMP}$$

$$\text{Donc : } 0,56 \times Pb = Cr_{rural} \times Pb \times (1 - A_{IMP}) + Cr_{urbanisé} \times Pb \times A_{IMP}$$

$$\text{d'où : } 0,56 = Cr_{rural} \times (1 - A_{IMP}) + Cr_{urbanisé} \times A_{IMP}$$

$$\text{Avec } Cr_{urbanisé} = \frac{Pn_{urbanisé}}{Pb} = \frac{170}{176} = 0,97 \text{ et } A_{IMP} = 0,2$$

$$Cr_{rural} = \frac{(0,56 - 0,97 \times A_{IMP})}{(1 - A_{IMP})} = 0,46$$

$$\text{La méthode SCS donne : } Pn = \frac{(Pb - 0,2 \times S)^2}{(Pb + 0,8 \times S)} = Cr \times Pb$$

Avec : P_n et P_b les pluies nette et brute, S la rétention potentielle maximum et C_r le coefficient de ruissellement.

S étant constant sur une zone donnée, le coefficient de ruissellement dépend d'après la méthode SCS de la pluie brute.

Période de retour (an)	Pluie 1993	100	30	10
Pluie brute (mm)	176	95	79	64
Cr _{rural}	0,46	0,26	0,20	0,14

Les coefficients de ruissellement de chaque bassin versant ont ensuite été obtenus au prorata des surfaces situées dans les différentes zones. Pour les zones imperméabilisées, les taux de raccordement suivants ont été considérés pour les événements de période de retour 10 et 30 ans :

- un taux de raccordement de 90 % pour les zones peu urbanisée, lotissement, centre, Venelles le haut et industrielle,
- un taux de raccordement de 100 % pour l'autoroute.

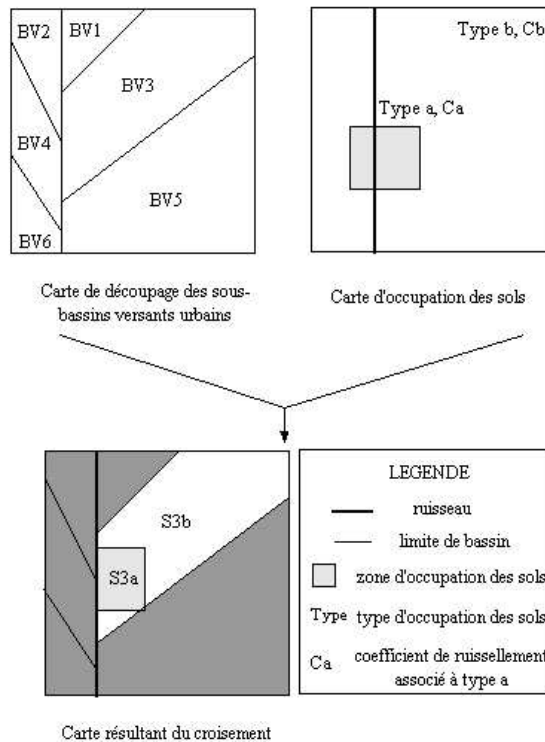


■ **Calcul des coefficients de ruissellement pour les différentes zones types en fonction du pourcentage imperméabilisé :**

Zones	Peu urbanisée	Lotissement	Centre	Venelles le haut	Industrielle	Autoroute
% imperméabilisé	0,20	0,44	0,53	0,63	0,72	1
CR pour une pluie de période de retour 10 ans	0,29	0,46	0,53	0,60	0,67	0,97
CR pour une pluie de période de retour 30 ans	0,33	0,50	0,56	0,62	0,68	0,97
CR pour une pluie de période de retour 100 ans	0,40	0,57	0,64	0,71	0,77	0,97
CR pour la pluie du 22 septembre 1993	0,54	0,64	0,68	0,72	0,78	0,97

■ **Calcul du CR de chaque sous BV au prorata des surfaces de chaque zone type représentée :**

Le schéma de principe pour le calcul du coefficient de ruissellement de chaque bassin versant est exposé ci-après :



Le calcul du coefficient de ruissellement moyen se fait de la façon suivante. Dans le cas du sous-bassin BV3 du schéma ci-dessus, de superficie totale S3 et de coefficients de ruissellement C3a et C3b, on a :

$$C3 = \frac{(S3a \times C3a + S3b \times C3b)}{S3}$$



5.2. Méthodologie de transfert Pluie-Débit utilisée pour la modélisation de la crue de référence au niveau du bassin versant de la Touloubre

Les pluies de projet retenues sont transformées en débits à injecter aux différents nœuds du réseau modélisé.

Il existe un décalage entre le moment où la pluie est la plus intense et le moment où le débit en sortie du bassin versant est le plus fort. Ce décalage est appelé lag-time. Il représente en quelque sorte le retard du ruissellement sur la pluie.

A partir des données météorologiques (intensité de la pluie) et des caractéristiques physiques des bassins versants (superficie, coefficient de ruissellement, lag-time) il est possible d'évaluer le débit en sortie de chaque bassin versant. Ce calcul est issu du modèle du réservoir linéaire qui repose sur une fonction de production et une fonction de transfert.

■ Fonction de production : modèle du réservoir linéaire

La fonction de production de ce modèle du réservoir linéaire est basée sur un coefficient de ruissellement constant. La relation peut s'écrire de la manière suivante :

$$Q = \frac{C \times i \times S}{360}$$

- Avec : **Q** le débit de pointe (m³/s),
- **C** le coefficient de ruissellement,
- **i** l'intensité de la pluie (mm/h),
- **S** la superficie (ha).

■ Fonction de transfert : le réservoir linéaire

La fonction de transfert du type réservoir linéaire, est basée sur les deux équations suivantes :

- équation de continuité :

$$\frac{dV_s}{dt} = Q_e(t) - Q_s(t)$$

- équation de stockage :

$$V_s = K \times Q_s(t)$$

- Avec : **Q_e(t)** et **Q_s(t)** les débits entrant et sortant,
- **V_s(t)** le volume stocké dans le réservoir,
- **K** le temps de réponse ou lag-time.

Le lag-time est calculé par la formule proposée par DESBORDES qui permet d'obtenir des résultats cohérents avec CAQUOT si la pluie de projet utilisée est une pluie synthétique double-triangle.



Cette formule est valable pour les bassins versants dont l'imperméabilité est supérieure à 20% :

$$K = \frac{(50 \times (\frac{A}{10000})^{0,18} \times (100 \times i)^{0,36} \times (1+C)^{1,9} \times L^{0,15} \times Dt^{0,21} \times Ht^{-0,07}}{60}$$

- Avec : **K** le temps de réponse ou lag-time en minutes,
- **A** la surface du bassin versant en m²,
- **i** la pente moyenne du bassin versant en %,
- **C** l'imperméabilité du bassin versant (0,2<CR<1),
- **L** la longueur du plus long chemin hydraulique en m,
- **Dt** la durée totale de l'épisode pluvieux en seconde,
- **Ht** la hauteur totale de précipitations en m.

Ainsi, par le biais de ces fonctions de production et de transfert, il est possible de déterminer les débits à l'exutoire de chaque bassin versant pour une pluie donnée et un pas de temps donné. Une attention toute particulière est portée au débit maximal atteint, notamment à l'exutoire des vallons.

Le pas de temps adopté pour l'ensemble des modélisations hydrologiques et hydrauliques réalisées pour cette partie de l'étude est de 6 minutes.

5.3. Modélisation hydraulique des écoulements avec le logiciel XPSWMM

L'ensemble des réseaux modélisés avec le logiciel XPSWMM est représenté sous forme d'un agencement de nœuds et de biefs d'écoulements. Afin de bien visualiser le modèle, ce dernier est calé sur le fond de plan cadastral.

Le modèle est basé sur la résolution des équations complètes de Barré de St Venant.

Ces équations régissent la propagation des ondes dynamiques dans les écoulements à surface libre.

Le système d'équations est le suivant :

<p>• Continuité :</p> $\frac{dS}{dt} + \frac{dQ}{dt} = q$ <p>• Énergie :</p> $\frac{dQ}{dt} + \frac{d}{dx} \left(a \frac{Q^2}{S} \right) + gS \frac{dZ}{dx} = -gS (J + J_s) + kqV$	
<p>Avec :</p>	
<p>S la section mouillée t le temps Q le débit q les pertes ou apports latéraux (ruissellement, pluie, ...) x l'abscisse a le coefficient de quantité de mouvement</p>	<p>g la gravité Z la côte de la surface libre J les pertes de charge linéaires J_s les pertes de charge singulières k = 1 si q<0, k = 0 sinon V la vitesse moyenne</p>



Le logiciel de modélisation XPSWMM permet une résolution numérique rapide de ce système d'équations. La résolution numérique repose sur une combinaison d'un schéma numérique implicite et explicite. En effet, l'équation de continuité aux noeuds du modèle est résolue explicitement alors que l'équation d'énergie dans les biefs et les ouvrages particuliers est résolue implicitement.

Le modèle calcule hauteurs d'eau et débits en tout point du domaine représenté.

Il nous permet donc de connaître et de visualiser sous forme de graphiques et de profils en long les écoulements des eaux de pluie dans les réseaux modélisés.

Une attention particulière est portée à la prise en compte des pertes de charges à l'entrée et à la sortie des différents ouvrages hydrauliques (pertes de charge singulières)

Ces pertes dues à la contraction et à l'expansion de l'écoulement sont supérieures aux pertes par frottement dans les ouvrages (pertes linéaires). Elles sont calculées par la formule suivante :

$$\Delta H = \left(\frac{Q}{K.S.R^{2/3}} \right)^2 \cdot L + (C_{contraction} + C_{expansion}) \cdot \frac{Q^2}{2gS^2}$$

- Avec : ΔH la perte de charge totale à la traversée de l'ouvrage,
- Q le débit,
- K le coefficient de frottement dans l'ouvrage (Coefficient de Strickler),
- S la section d'écoulement,
- R le rayon hydraulique,
- L la longueur de l'ouvrage,
- $C_{contraction}$ le coefficient de pertes de charge par contraction à l'entrée de l'ouvrage,
- $C_{expansion}$ le coefficient de pertes de charge par expansion à la sortie de l'ouvrage,
- g l'accélération de la pesanteur.



6. ANNEXES CARTOGRAPHIQUES

Planche 1 (format A3): Versant Durance et Touloubre

Planche 2 (format A3): Sous bassin versant

Planche 3 (format A3) : Trame du réseau pluvial

Planche 4 (format A3) : extrait du réseau modélisé pour la partie urbaine

Planche 5 (format A3) : Découpage des bassins versants en sous bassins versants

Planche 6 (format A3) : Organisation des écoulements pour la crue de référence

Planche 7 (format A3) : Organisation des écoulements pour la crue de référence

Planche 8 (format A0): cartographie des hauteurs d'eau pour la crue de référence sur les zones urbaines (U) de la commune

Planche 9 (format A0): cartographie des vitesses d'écoulement pour la crue de référence sur les zones urbaines (U) de la commune

Planche 10 (format A0) : détail des aménagements prévus dans le cadre de la mise à jour du schéma directeur eau pluviale