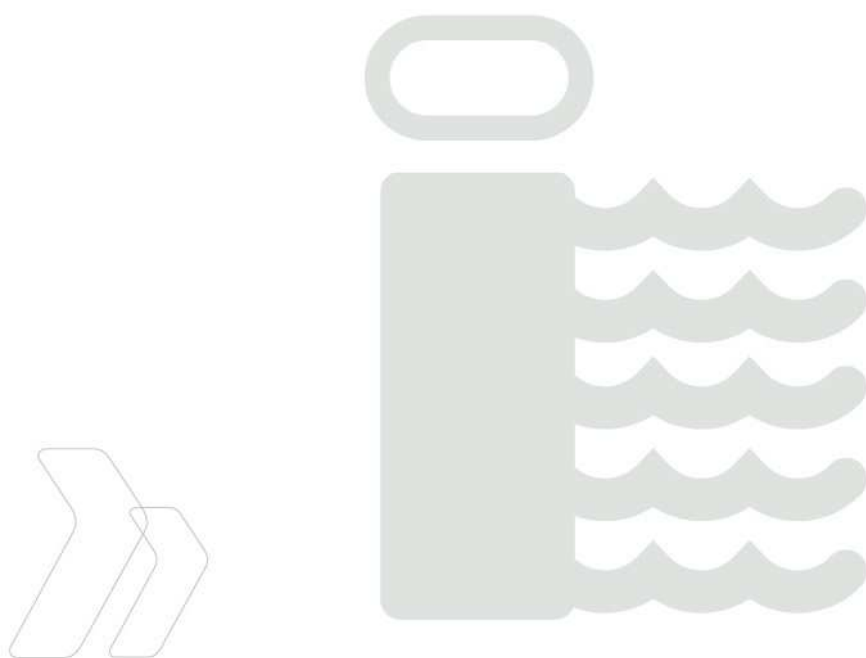


Infrastructures
Aménagements
hydrauliques



ETUDE DE GESTION ET DU RISQUE D'INONDATION ET DE RENATURATION DU BASSIN VERSANT DU BITOULET

Phases 1 et 2 : Etat des lieux, diagnostic et
définition des aménagements



Rapport n° : 15F-068-RM-1
Révision n° : B
Date : 11/03/2016

Votre contact :
Gwenaël CHEVALLET
chevallet@isl.fr

Rapport



ISL Ingénierie SAS - MONTPELLIER
65 rue Clément Ader
34000 - Castelnau-le-Lez
FRANCE
Tel. : +33.4.67.54.51.88
Fax : +33.4.67.54.52.05

www.isl.fr



Visa

Document actualisé le 11/03/2016.

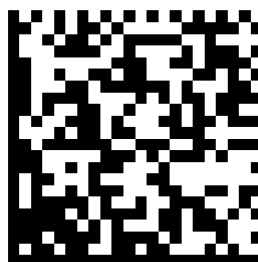
Révision	Date	Auteur	Chef de Projet	Superviseur	Commentaire
A	03/03/2016	CPL	GCH	GCH	
B	11/03/2016	CPL	GCH	GCH	

CPL : PLASSE Claire

GCH : CHEVALLET Gwenael

Rapport ISL
15F-068-RM-1
Revision B

<http://www.isl.fr/r.php?c=119347>



SOMMAIRE

1	CONTEXTE DE L'ETUDE	1
1.1	CONTEXTE ET OBJECTIFS	1
1.2	PRESENTATION DU DOMAINE D'ETUDE	1
2	ANALYSE HYDROLOGIQUE	3
2.1	CONTEXTE	3
2.2	SYNTHESE DES DONNEES EXISTANTES	3
2.2.1	DONNEES PLUVIOMETRIQUES	3
2.2.1.1	Plan de prévention des risques naturels d'inondation de la moyenne vallée de l'Orb – Hydretudes, 2004	3
2.2.1.2	Estimation des hauteurs de précipitations d'occurrence rare pour des durées de cumul de 1 à 10 jours sur 3 000 postes français – Météo France, juillet 1999	4
2.2.1.3	Barrage du Salagou – Eléments d'expertise pour le calcul de la crue de projet – Jacques LAVABRE, Août 2006	5
2.2.1.4	Données pluviométriques à la station de Montpellier	6
2.2.1.5	Coefficient Montana de Montpellier	7
2.2.1.6	Synthèse des données pluviométriques	8
2.2.2	DONNEES HYDROMETRIQUES	9
2.2.2.1	Plan de prévention des risques naturels d'inondation de la moyenne vallée de l'Orb – Hydretudes, 2004	9
2.2.2.2	Dossier loi sur l'eau de la RD908 – SIEE, novembre 2006	10
2.2.2.3	Stations hydrométriques de la Banque Hydro	10
2.3	ESTIMATION DES DEBITS A L'AIDE DES METHODES REGIONALES	11
2.3.1	METHODE DE BRESSAND-GOLOSSOF	11
2.3.2	METHODE DITE DES PPRI DE L'AUDE	12
2.4	SYNTHESE DE L'ANALYSE HYDROLOGIQUE	13
2.4.1	DONNEES PLUVIOMETRIQUES	13
2.4.2	DONNEES HYDROMETRIQUES	14
2.5	MODELE HYDROLOGIQUE GESRES	14
2.5.1	PRESENTATION DU LOGICIEL GESRES	14
2.5.2	DETERMINATION DU COEFFICIENT CN	15
2.5.3	DESCRIPTION DU MODELE	16
2.5.4	CALCULS DES HYDROGRAMMES DE PROJET	16

2.5.5	CARACTERISATION DE LA CRUE DE SEPTEMBRE 2014	17
2.5.6	CARACTERISATION DE LA CRUE DE NOVEMBRE 2014	19
3	INVESTIGATIONS DE TERRAIN	20
3.1	EXPERTISE DE TERRAIN - ISL	20
3.2	EXPERTISE DE TERRAIN - RIPARIA	20
4	DIAGNOSTIC HYDRAULIQUE	23
4.1	MODELE HYDRAULIQUE	23
4.1.1	ETENDUE DU MODELE	23
4.1.2	DONNEES TOPOGRAPHIQUES	25
4.1.3	HYPOTHESES DE CALCUL	26
4.1.3.1	Condition limite amont	26
4.1.3.2	Condition limite aval	26
4.1.3.3	Les coefficients de rugosité	26
4.1.3.4	Prise en compte des murs dans la partie urbanisée de Lamalou	26
4.2	RESULTATS DE LA MODELISATION	27
4.2.1	EMPRISE DE LA CRUE DE SEPTEMBRE 2014	27
4.2.2	ESTIMATION DE LA CAPACITE DU LIT EN ETAT ACTUEL	29
4.2.3	ESTIMATION DE LA CAPACITE DES OUVRAGES HYDRAULIQUES	30
4.2.4	LIGNES D'EAU EN LIT MINEUR	32
4.2.4.1	Préambule	32
4.2.4.2	Crue de période de retour 5 ans	32
4.2.4.3	Crue de période de retour 10 ans	37
4.3	INCIDENCE DES EMBACLES	42
4.3.1	PREAMBULE	42
4.3.2	SIMULATIONS AVEC EMBACLES	44
4.4	CONCLUSIONS CONCERNANT LA CAPACITE DU BITOULET DANS LA TRAVERSEE DU BOURG	45
5	DIAGNOSTIC MORPHOLOGIQUE	47
5.1	ANALYSE DIACHRONIQUE	47
5.2	EVOLUTION DE L'OCCUPATION DES SOLS ET DE LA VEGETATION RIVULAIRE	48
5.3	SYNTHESE DES APPORTS	49
5.3.1	PRODUCTION PRIMAIRE (VERSANTS)	49

5.3.2	PRODUCTION PRIMAIRE (AFFLUENTS)	53
5.3.3	PRODUCTION SECONDAIRE : EROSION LATERALE	55
5.4	PROFILS EN LONG	57
5.5	PROFIL EN TRAVERS	59
5.6	STOCK EN LIT MINEUR, EXHAUSSEMENT ET INCISION DU LIT	59
5.7	CONCLUSION SUR LE FONCTIONNEMENT MORPHOLOGIQUE DU BITOULET	61
5.7.1	CONCEPTS FONDAMENTAUX	61
5.7.2	SYNTHESE DU FONCTIONNEMENT MORPHOLOGIQUE DU BITOULET	62
5.8	VULNERABILITE DES ENJEUX FACE AUX EROSIONS	63
6	CONTINUITÉ ECOLOGIQUE	66
6.1	LA NOTION DE CONTINUITÉ ECOLOGIQUE	66
6.2	LE CONTEXTE RÉGLEMENTAIRE	66
6.3	LE CONTEXTE PISCICOLE	66
6.4	LA CONTINUITÉ ECOLOGIQUE SUR LE BITOULET	67
6.4.1	TRONÇON BÉTONNE AVAL	67
6.4.2	OBSTACLES À LA CONTINUITÉ ECOLOGIQUE	69
6.4.2.1	Seuil naturel à l'aval de l'ancien barrage de la Biconque	70
6.4.2.2	Seuil 5 (aval pont Grand)	71
6.4.2.3	Seuil 4 (amont Pont de Bardejean)	72
6.4.2.4	Seuil 3 (Rue de la Borie)	72
6.4.2.5	Seuil 2 (amont passerelle du Verdale)	73
6.4.2.6	Seuil 1 (au droit du stade)	73
6.4.3	CONCLUSION SUR LA CONTINUITÉ ECOLOGIQUE	73
7	PROPOSITIONS D'AMÉNAGEMENTS	74
7.1	OBJECTIFS	74
7.2	ENTRETIEN DES COURS D'EAU	74
7.3	ENTRETIEN DES OUVRAGES DE PROTECTION	75
7.4	TRAITEMENT DES OUVRAGES DE FRANCHISSEMENT	76
7.5	HOMOGENÉISATION DE LA CAPACITÉ DU BITOULET (ZONE BÉTONNÉE)	79
7.5.1	EN RIVE DROITE AU DROIT DU PARKING	82
7.5.2	EN RIVE GAUCHE AU DROIT DU PARKING	83

7.5.3	EN RIVE GAUCHE AU NIVEAU DU LOTISSEMENT LE MAIRAL _____	87
7.6	ZONES POTENTIELLES D'EXPANSION ET DE RENATURATION _____	91
7.6.1	AMONT DE LAMALOU-LES-BAINS _____	91
7.6.1.1	Principes d'aménagement _____	91
7.6.1.2	Réseaux _____	92
7.6.1.3	Stabilisation et végétalisation _____	92
7.6.1.4	Suppression des seuils – reprise du profil en long _____	93
7.6.1.5	Emprise du projet sur la vue en plan – effets sur le foncier _____	94
7.6.1.6	Impact hydraulique _____	97
7.6.1.7	Estimatif du coût des travaux _____	98
7.6.2	AVAL DE LAMALOU-LES-BAINS _____	99
7.6.2.1	Principes d'aménagement _____	99
7.6.2.2	Réseaux _____	101
7.6.2.3	Emprise du projet sur la vue en plan – effets sur le foncier _____	101
7.6.2.4	Impact hydraulique _____	103
7.6.2.5	Estimatif du coût des travaux _____	103
7.7	AMELIORATION DE LA PREVISION ET ALERTES _____	104
7.7.1	PREVISION _____	104
7.7.2	ALERTES _____	105

ANNEXE 1	CARTES DES RELEVES DE TERRAIN _____	1
-----------------	--	----------

ANNEXE 2	PRESENTATION GENERALE DU MODELE GESRES ____	6
-----------------	--	----------

TABLE DES ANNEXES

ANNEXE 1	CARTES DES RELEVES DE TERRAIN
-----------------	--------------------------------------

ANNEXE 2	PRESENTATION GENERALE DU MODELE GESRES
-----------------	---

TABLE DES FIGURES

Figure 1 : Bassin versant du Bitoulet _____	2
Figure 2 : Localisation des stations pluviométriques _____	4
Figure 3 : Localisation des stations hydrométriques _____	10
Figure 4 : Hyétogrammes de période de retour 5, 10, 20, 30, 50 et 100 ans _____	13

Figure 5 : Hydrogrammes issus du modèle hydrologique	16
Figure 6 : Hyétogrammes de la crue de 2014 à Lamalou les Bains	17
Figure 7 : Hydrogrammes de la crue de 2014 issus du modèle hydrologique	18
Figure 8 : Cumuls pluviométriques du 27 et 28 novembre 2014	19
Figure 9 : Terrain parcouru par RIPARIA	22
Figure 10 : Maillage 2D	23
Figure 11 : Profils en long des murs de protection en rive droite	27
Figure 12 : Profils en long des murs de protection en rive gauche	27
Figure 13 : Ligne d'eau pour la crue de période de retour 5 ans - Rive droite	33
Figure 14 : Ligne d'eau pour la crue de période de retour 5 ans - Rive gauche	35
Figure 15 : Ligne d'eau pour la crue de période de retour 10 ans - Rive droite	38
Figure 16 : Ligne d'eau pour la crue de période de retour 10 ans - Rive gauche	40
Figure 17 : Impact des embâcles sur la ligne d'eau pour une crue de période de retour 5 ans	44
Figure 18 : Impact des embâcles sur la ligne d'eau pour une crue de période de retour 10 ans	44
Figure 19 : Analyse diachronique du Bitoulet	47
Figure 20 : évolution de l'urbanisation entre 1947 et 2012 sur la partie urbaine de Lamalou-les-Bains	48
Figure 21 : Carte géologique de l'amont de la traversée urbaine (zone de gorges)	50
Figure 22 : Carte géologique de la traversée urbaine	52
Figure 23 : Carte des affluents du Bitoulet sur la zone d'étude + fond géologique	54
Figure 24 : Cartographie des protections de berges et des érosions dans la traversée de Lamalou-les-Bains	56
Figure 25 : Profil en long général partiellement interpolé depuis le barrage de la Biconque jusqu'au rond-point Carel	58
Figure 26 : Profil en long : zoom sur la partie aval (traversée urbaine)	58
Figure 27 : Localisation indicative du chenal d'étiage obstrué	60
Figure 28 : Balance de Lane	61
Figure 29 : Localisation des seuils sur le chenal d'étiage bétonné et des secteurs comblés de matériaux	68
Figure 30 : localisation des seuils sur la zone d'étude	69
Figure 31 :	83
Figure 32 : Coupe type au droit de la maison sinistrée RG	85
Figure 33 : Coupe type au droit de la piscine RG	86
Figure 34 : Coupes type 1 et 2, lotissement du Mairal RG	89
Figure 35 : Coupe type 3, lotissement du Mairal RG	90
Figure 36 : Section type proposée pour la renaturation de la zone amont	91
Figure 37 : Présence de réseaux en amont de Lamalou-les-Bains	92

Figure 38 : Principes de végétalisation/stabilisation de la zone amont _____	93
Figure 39 : Profil en long projeté sur la zone amont _____	93
Figure 40 : Emprise du projet de renaturation dans la zone amont (1/3) _____	94
Figure 41 : Emprise du projet de renaturation dans la zone amont (2/3) _____	95
Figure 42 : Section type proposée pour la renaturation de la zone amont au droit du stade ____	95
Figure 43 : Emprise du projet de renaturation dans la zone amont (3/3) _____	96
Figure 44 : Ligne d'eau en état aménagé pour la crue décennale _____	97
Figure 45 : Protection complémentaire rive droite _____	98
Figure 46 : Ligne d'eau pour la crue de période de retour 5 ans - Strickler modifié dans la partie bétonnée _____	99
Figure 47 : Ligne d'eau pour la crue de période de retour 10 ans - Strickler modifié dans la partie bétonnée _____	100
Figure 48 : Section type proposée pour la renaturation de la zone aval bétonnée _____	100
Figure 49 : Présence de réseaux en aval de Lamalou-les-Bains _____	101
Figure 50 : Emprise du projet de renaturation de la zone aval bétonnée _____	102
Figure 51 : Centre opérationnel de PREDICT Services _____	104
Figure 52 : Cumul de précipitations lors de l'évènement de septembre 2014 - PREDICT _____	105
Figure 53 : Coût de la mise en place d'un système de téléalerte _____	106

TABLE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Données pluviométriques journalières sur le BV de l'Orb - PPRI, 2004	3
Tableau 2 : Données pluviométriques journalières - Météo France, juillet 1999	4
Tableau 3 : Données pluviométriques SHYREG au barrage du Salagou, 2006	5
Tableau 4 : Données pluviométriques sur 1h à Montpellier, Météo France	6
Tableau 5 : Données pluviométriques sur 6h à Montpellier, Météo France	6
Tableau 6 : Coefficient de Montana à Montpellier	7
Tableau 7 : Synthèse des données pluviométriques disponibles.....	8
Tableau 8 : Caractéristiques morphologiques du BV du Bitoulet et de l'Orb - PPRI, 2004.....	9
Tableau 9 : Débits de référence retenus dans le PPRI.....	10
Tableau 10 : Débits issus des stations hydrométriques de la Banque Hydro.....	11
Tableau 11 : Extrapolation des débits de la Banque Hydro	11
Tableau 12 : Débits centennaux - Méthode de Bressand-Golossof	12
Tableau 13 : Débits centennaux - Méthode dite des PPRI de l'Aude.....	12
Tableau 14 : Données pluviométriques retenues	13

Tableau 15 : Synthèse des données hydrométriques.....	14
Tableau 16 : Grille de croisement des coefficients CN	15
Tableau 17 : Débits de pointe issus du modèle hydrologique GESRES ^{ISL}	17
Tableau 18 : Débits de pointe de la crue de septembre 2014 issus du modèle hydrologique.....	18
Tableau 19 : Cumuls pluviométriques enregistrés en novembre 2014	19
Tableau 20 : Débits de pointe de la crue de novembre 2014 issus du modèle hydrologique.....	19
Tableau 21 : Capacité du lit par tronçon.....	29
Tableau 22 : Tirant d'air pour différentes crues au droit des ouvrages hydrauliques	30
Tableau 23 : Tirant d'air pour les crues étudiées au droit des ouvrages hydrauliques.....	77
Tableau 24 : Caractéristiques des passerelles à modifier	77
Tableau 25 : Différents type de passerelle amovible	79
Tableau 26 : Synthèse des linéaires de murs à traiter.....	80
Tableau 27 : Capacité du lit sur le linéaire modifié	97

1 CONTEXTE DE L'ETUDE

1.1 CONTEXTE ET OBJECTIFS

Les inondations des 17 et 18 septembre 2014 sur la commune de Lamalou-les-Bains ont mis en évidence l'importance du risque inondation sur le territoire communal.

Suite à cet évènement, la commune de Lamalou-les-Bains a souhaité déterminer un plan d'action global et opérationnel à l'échelle du bassin versant du Bitoulet de sorte que le risque inondation puisse être mieux géré non seulement dans la traversée de la commune mais également sur l'ensemble du bassin versant.

Le programme d'action à proposer devra bien évidemment permettre de réduire les risques aux personnes mais également d'intégrer le souhait de la commune de profiter des aménagements pour renaturer le cours d'eau dans la traversée de Lamalou-les-Bains : restauration de champs d'expansion des crues, ralentissement dynamique de la rivière, réhabilitation écologique et fonctionnelle des milieux, amélioration de l'intérêt paysager de Lamalou-les-Bains dans la traversée urbaine.

L'étude se décompose en deux phases distinctes :

- Phase 1 : Etat des lieux, diagnostic et objectifs ;
- Phase 2 : Définition des aménagements.

Les tâches ont été réparties de la façon suivante au sein du groupement :

- **ISL** : aspects hydrologie et hydraulique, génie civil,
- **RIPARIA** : aspects renaturation et hydrogéomorphologie.

1.2 PRESENTATION DU DOMAINE D'ETUDE

Le Bitoulet prend sa source au pied de la forêt domaniale des Ecrivains-Combattants sur la commune de Combes. Après un parcours d'environ 9,5 km, le Bitoulet afflue en rive droite de l'Orb dans la commune de Lamalou-les-Bains.

Le bassin versant du Bitoulet à la confluence avec l'Orb draine une surface d'environ 18 km². Sa forme est assez allongée et il est orienté Nord/Sud. A l'entrée de la commune (pont Grand), le bassin versant draine 12,1 km². Le temps de concentration de ce bassin versant est de l'ordre de 2h, ce temps est représentatif de la réaction du bassin versant à une pluie. L'altitude moyenne du bassin versant est d'environ 400 mNGF.

La zone d'étude bénéficie d'un climat méditerranéen pouvant subir des influences atlantiques. Il est caractérisé par des étés très secs ponctués d'évènements orageux et des automnes et hivers pluvieux. Les pluies sont souvent caractérisées par des averses brèves et violentes conduisant à des écoulements torrentiels. La température moyenne annuelle est de l'ordre de 13,4°C.

Le bassin versant est constitué essentiellement de forêts et milieux naturels (78%), de territoires agricoles (14%) et de territoires artificialisés (8%).

Le Bitoulet s'écoule dans un lit canalisé (cuvelage bétonné avec cunette) sur 1 km entre le pont de l'avenue Ménard et le pont de la RD908 ; le cours d'eau est naturel sur le reste du linéaire bien que son tracé ait fait l'objet de modifications.

La carte ci-dessous présente le bassin versant du Bitoulet.

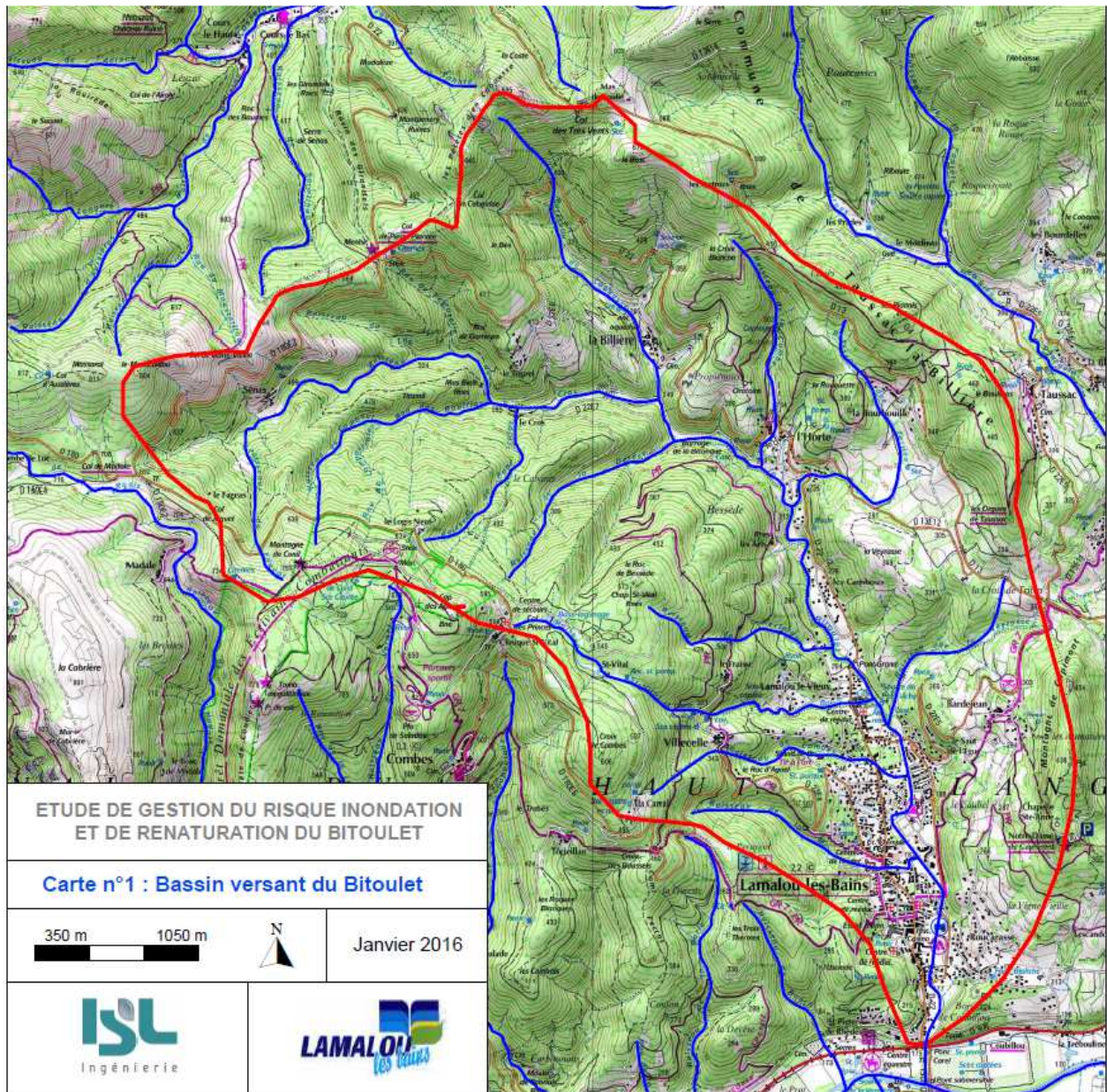


Figure 1 : Bassin versant du Bitoulet

2 ANALYSE HYDROLOGIQUE

2.1 CONTEXTE

Le climat de la zone d'étude est de type méditerranéen avec une influence atlantique.

Les principales crues marquantes sur le bassin versant du Bitoulet sont les suivantes :

- Au mois de mai 1992 : un épisode pluvieux intense s'est abattu sur Lamalou-les Bains pendant 6 jours. L'épicentre de la perturbation était situé à Saint-Gervais-sur-Mare. Il a provoqué de nombreux dégâts dans le centre de Lamalou : camping et lotissements ;
- Les 17 et 18 septembre 2014 : un cumul de l'ordre de 250 mm en 3h a été observé lors de cet évènement, supérieur aux données centennales. La faible taille du bassin versant et son temps de concentration de l'ordre de 2h ont contribué à la rapidité de la montée des eaux dans le centre de Lamalou-les-Bains. Les terrains étaient déjà saturés et de nombreux embâcles ont été charriés par le cours d'eau qui s'apparentait alors plus à un torrent. De nombreux dégâts ont été recensés dans la commune, des passerelles et véhicules ont été emportés et des maisons totalement détruites. Le bilan humain est également lourd : les inondations ayant provoqué la mort de 4 personnes.

2.2 SYNTHÈSE DES DONNÉES EXISTANTES

2.2.1 DONNÉES PLUVIOMÉTRIQUES

2.2.1.1 Plan de prévention des risques naturels d'inondation de la moyenne vallée de l'Orb – Hydretudes, 2004

Les données de pluie disponibles au droit des postes climatiques retenus dans le cadre du PPRI sont les suivantes :

Station de mesure météo	Altitude (m NGF)	Pluie journalière décennale (mm)	Pluie journalière centennale (mm)	Gradex des pluies (mm)	Taille de l'échantillon (années)
Bédarieux	370	169	263	40,0	80
Saint-Gervais sur Mare	330	186	275	37,9	90
Le Bousquet d'Orb	280	150	212	26,4	
Olargues	182	200	341	60,0	
Saint-Pons de Thomières	220	146	202	23,8	
Saint-Chinian	130	142	206	27,2	
Castanet-le-Haut	620	247	366	50,6	
Montpellier-Fréjorgues	5	120	171	21,7	

Tableau 1 : Données pluviométriques journalières sur le BV de l'Orb - PPRI, 2004

La carte suivante localise ces stations par rapport au bassin versant du Bitoulet.

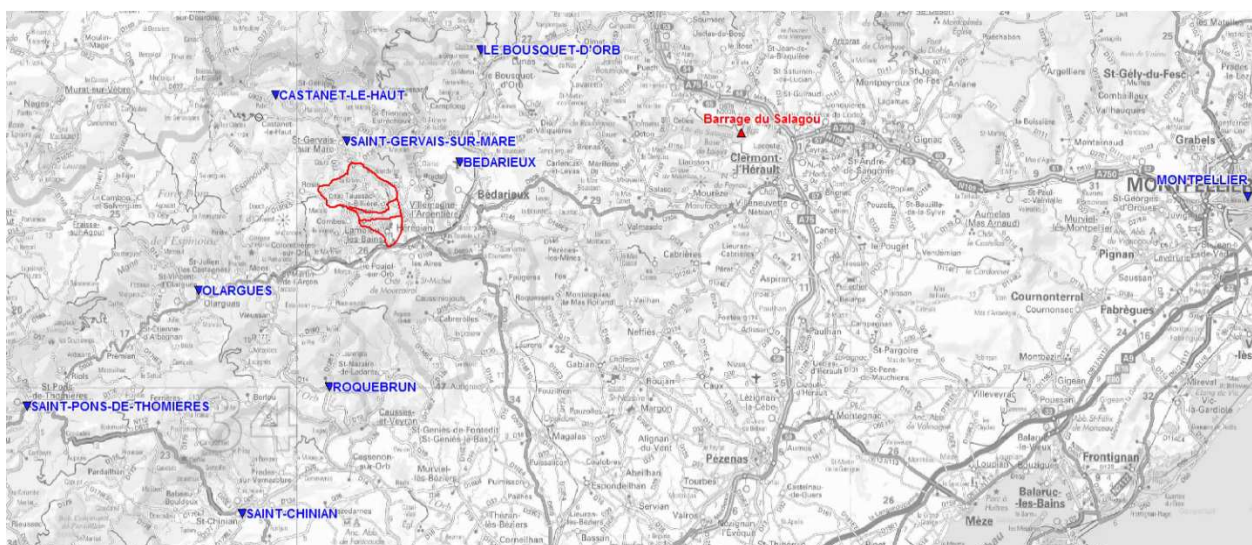


Figure 2 : Localisation des stations pluviométriques

Les trois stations les plus proches du bassin versant sont Bédarieux, Saint-Gervais-sur-Mare et Castenet-le-Haut. L'altitude moyenne du bassin versant du Bitoulet étant de 400 mNGF, nous proposons de retenir les valeurs de la station de Saint-Gervais, qui sont légèrement supérieures à celle de Bédarieux.

2.2.1.2 Estimation des hauteurs de précipitations d'occurrence rare pour des durées de cumul de 1 à 10 jours sur 3 000 postes français – Météo France, juillet 1999

Cette étude présente les hauteurs de précipitations cumulées en 1 jour pour les durées de retour comprises entre 5 et 100 ans. L'estimation est réalisée en utilisant la méthode du renouvellement. Les résultats présentés ci-dessous sont exprimés en mm avec les bornes de l'intervalle de confiance à 70%.

	5 ans	10 ans	20 ans	50 ans	100 ans
Bédarieux – 34028001	106 130 153	121 150 180	135 171 206	154 197 240	167 216 265
Olargues – 34187001	124 158 193	141 188 234	158 216 274	179 252 325	195 279 363
Roquebrun - 34232001	88 106 123	99 124 148	109 141 172	123 163 203	133 180 226
St-Gervais sur Mare - 34260001	130 162 195	144 190 236	158 217 275	176 251 326	189 277 365

Tableau 2 : Données pluviométriques journalières - Météo France, juillet 1999

Le bassin versant du Bitoulet se situe au centre de ces 4 stations (cf. Figure 2). Les stations d'Olargues et Roquebrun se situent respectivement à l'Ouest et au sud du bassin versant et sont plus éloignées du bassin du Bitoulet que les deux autres stations. Les données de Bédarieux et de Saint-Gervais sur Mare sont proches. Nous proposons de retenir la station de Saint-Gervais sur Mare, située sur le bassin versant voisin.

2.2.1.3 Barrage du Salagou – Eléments d'expertise pour le calcul de la crue de projet – Jacques LAVABRE, Août 2006

Dans cette étude, les données pluviométriques de SHYREG sont présentées. Elles sont issues du générateur de pluies horaires de la méthode SHYREG, développé par le CEMAGREF. Ce générateur a été régionalisé sur l'ensemble de la métropole, à une maille de 1 km².

La méthode n'utilise pas de loi de probabilité pour l'extrapolation. Les distributions de fréquence sont directement déduites des échantillons générés comme s'il s'agissait de distributions empiriques de données observées. Les distributions finales sont les distributions moyennes de 100 échantillons générés afin de se départir des fluctuations d'échantillonnages des chroniques générées.

Au niveau du barrage du Salagou, les données sont les suivantes

Période de retour	Pluie de durée			
	1 heure	1 jour	2 jours	3 jours
10 000 ans	150	583	706	789
5 000 ans	139	544	663	736
1 000 ans	114	449	558	620
100 ans	85	320	409	453
10 ans	54	186	236	268

Tableau 3 : Données pluviométriques SHYREG au barrage du Salagou, 2006

La pluie journalière est liée à la pluie centrée sur 24h par le coefficient de Weiss égal à 1,14.

2.2.1.4 Données pluviométriques à la station de Montpellier

Cumuls sur 1 heure

Le tableau ci-dessous présente l'estimation des cumuls sur 1h pour différentes période de retour selon la loi GEV. L'échantillon contient 50 valeurs (1957-2008).

Durée de retour	Hauteur estimée	Intervalle de confiance à 70 %	
5 ans	46,1 mm	43,1 mm	49,2 mm
10 ans	55,1 mm	50,9 mm	59,3 mm
20 ans	63,6 mm	57,7 mm	69,5 mm
30 ans	68,5 mm	61,3 mm	75,6 mm
50 ans	74,5 mm	65,4 mm	83,6 mm
100 ans	82,6 mm	70,4 mm	94,8 mm

Tableau 4 : Données pluviométriques sur 1h à Montpellier, Météo France

Les paramètres suivants ont été retenus pour l'ajustement :

- Paramètre de forme : $k=0,013$
- Paramètre d'échelle = 12,237
- Paramètre de localisation = 27,9727

Les précipitations en 1 heure sont issues de mesures de l'intensité des précipitations par pas de 6 minutes et sont décomptées sur 24 heures glissantes.

Cumuls sur 6 heures

Le tableau ci-dessous présente l'estimation des cumuls sur 6h pour différentes période de retour – selon la loi GEV. L'échantillon contient 50 valeurs (1957-2008).

Durée de retour	Hauteur estimée	Intervalle de confiance à 70 %	
5 ans	77,3 mm	70,8 mm	83,8 mm
10 ans	98,0 mm	86,9 mm	109,0 mm
20 ans	121,7 mm	102,5 mm	140,9 mm
30 ans	137,4 mm	111,4 mm	163,5 mm
50 ans	159,5 mm	122,3 mm	196,8 mm
100 ans	194,3 mm	136,0 mm	252,5 mm

Tableau 5 : Données pluviométriques sur 6h à Montpellier, Météo France

Les paramètres suivants ont été retenus pour l'ajustement :

- Paramètre de forme : $k=0,2496$
- Paramètre d'échelle = 17,1815

- Paramètre de localisation = 46,0705

Les précipitations en 6 heures sont issues de mesures de l'intensité des précipitations par pas de 6 minutes et sont décomptées sur 24 heures glissantes.

2.2.1.5 Coefficient Montana de Montpellier

Les coefficients de Montana pour des pluies de durée de 1 heure à 24 heures à la station de Montpellier sont présentés dans le tableau ci-dessous. La taille de l'échantillon est au minimum de 51 années (1957-2009).

	a	b
5 ans	16,87	0,746
10 ans	19,689	0,736
20 ans	21,922	0,722
30 ans	23,029	0,712
50 ans	24,182	0,699
100 ans	25,429	0,68

Tableau 6 : Coefficient de Montana à Montpellier

La formule de Montana permet, de manière théorique, de relier une quantité de pluie $h(t)$ recueillie au cours d'un épisode pluvieux avec sa durée t :

$$h(t) = a \times t^{1-b}$$

Les quantités de pluie $h(t)$ s'expriment en millimètres et les durées t en minutes.

Les coefficients de Montana (a , b) sont calculés par un ajustement statistique de type GEV entre les durées et les quantités de pluie ayant une durée de retour donnée.

Ce coefficient permettra de reconstituer les hyétogrammes de pluie connaissant la pluie journalière et la pluie horaire.

2.2.1.6 Synthèse des données pluviométriques

Le tableau suivant récapitule les données pluviométriques disponibles à proximité du bassin versant du Bitoulet.

	5 ans	10 ans	20 ans	30 ans	50 ans	100 ans	Gradex
Pluie journalière (en mm)							
Saint-Gervais-sur-Mare, PPRI 2004		186				275	37,9
Saint-Gervais-sur-Mare, Météo France 1999	162	190	217		251	277	
Barrage du Salagou, Jacques Lavabre 2006		186				320	
Pluie de 6 heures (en mm)							
Station pluviométrique de Montpellier, 2008	77,3	98	121,7	137,4	159,5	194,3	
Pluie horaire (en mm)							
Barrage du Salagou, Jacques Lavabre 2006		54				85	
Station pluviométrique de Montpellier, 2008	46,1	55,1	63,6	68,5	74,5	82,6	

Tableau 7 : Synthèse des données pluviométriques disponibles

Les valeurs sont homogènes entre les différentes sources de données. Nous proposons de retenir pour la suite de l'étude les pluies horaires et de 6h issues de la station de Montpellier ainsi que les pluies journalières au barrage du Salagou car plus récentes que les autres.

2.2.2 DONNEES HYDROMETRIQUES

2.2.2.1 Plan de prévention des risques naturels d'inondation de la moyenne vallée de l'Orb – Hydretudes, 2004

Le tableau ci-dessous présente les caractéristiques des points de calcul des débits utilisés dans le cadre du PPRI de 2004.

	Surface (km ²)	Longueur du BV (km)	Altitude max (mNGF)	Altitude min (mNGF)	Pente moyenne (%)	Allongement	Dénivelé (m)
Bitoulet à l'entrée de Lamalou	12,1	6,2	804	195	9,9	1,8	609
Bitoulet à la confluence de l'Orb	17,8	8,9	804	172	7,1	2,1	632
L'Orb à la confluence avec le Bitoulet	525,2	58,1	1064	172	1,5	2,5	892

Tableau 8 : Caractéristiques morphologiques du BV du Bitoulet et de l'Orb - PPRI, 2004

Les méthodes utilisées pour l'estimation du débit décennal sont :

- La méthode de CRUPEDIX, calée sur 630 bassins français ($Q_{10} = S^{0,8} \times \left(\frac{P_{10}}{80}\right)^2 \times R$ avec Q_{10} en m³/s, S la surface en km², P₁₀ la pluie journalière décennale en mm et R le coefficient régional de 1,5 dans l'Hérault) ;
- La méthode de Socose ;
- La méthode de transfert des bassins par une loi de Myer ($\frac{Q_r}{Q} = \left(\frac{S_r}{S}\right)^\alpha$ avec Q en m³/s, Q_r le débit de référence en m³/s, S_r la surface du bassin de référence en km², S la surface du bassin d'étude en km², α un exposant dépendant de la taille du BV (entre 0,7 et 0,9)) ;
- La relation pluie-débit ($Q = \frac{1}{3600} \times i \times C \times S$, avec Q en l/s, i l'intensité de la pluie décennale en mm/h pour une durée égale au temps de concentration du BV, C le coefficient de ruissellement, S la surface du BV en m²).

Les méthodes utilisées pour l'estimation du débit centennal sont :

- La méthode du Gradex ($Q_{100} = Q_{10} + 2,35 \times \frac{S \times G_p}{T} \times 100 \times C_p$ avec C_p le coefficient de pointe ; G_p le gradex des pluies en mm, T=86400 s) ;
- La relation pluie-débit ;
- Le débit de crue exceptionnel dans le secteur de l'Arc méditerranéen ($\frac{Q_{except}}{Q_{10}} = 3,35$).

Les débits retenus dans le cadre du PPRI pour le Bitoulet et l'Orb à la confluence avec le Bitoulet ont été les suivants.

	Surface (km ²)	Q10 ans	Q100 ans	Q _{excep}
Bitoulet à l'entrée de Lamalou	12,1	60 m ³ /s	140 m ³ /s	200 m ³ /s
Bitoulet à la confluence de l'Orb	17,8	80 m ³ /s	170 m ³ /s	268 m ³ /s
L'Orb à la confluence avec le Bitoulet	525,2	540 m ³ /s	900 m ³ /s	1810 m ³ /s

Tableau 9 : Débits de référence retenus dans le PPRI

2.2.2.2 Dossier loi sur l'eau de la RD908 – SIEE, novembre 2006

L'étude hydraulique réalisée dans le cadre du projet du réaménagement de la RD908 par SIEE en 2005 a retenu les débits suivants du Bitoulet à l'aval de Lamalou :

- Q_{10ans} = 81 m³/s,
- Q_{100ans} = 170 m³/s.

Ces valeurs sont analogues à celles du PPRI.

2.2.2.3 Stations hydrométriques de la Banque Hydro

Aucune station hydrométrique n'est présente sur le Bitoulet.

Trois stations hydrométriques sont en revanche présentes à proximité du bassin versant et possède des séries de données suffisantes. Elles sont localisées sur la carte suivante.

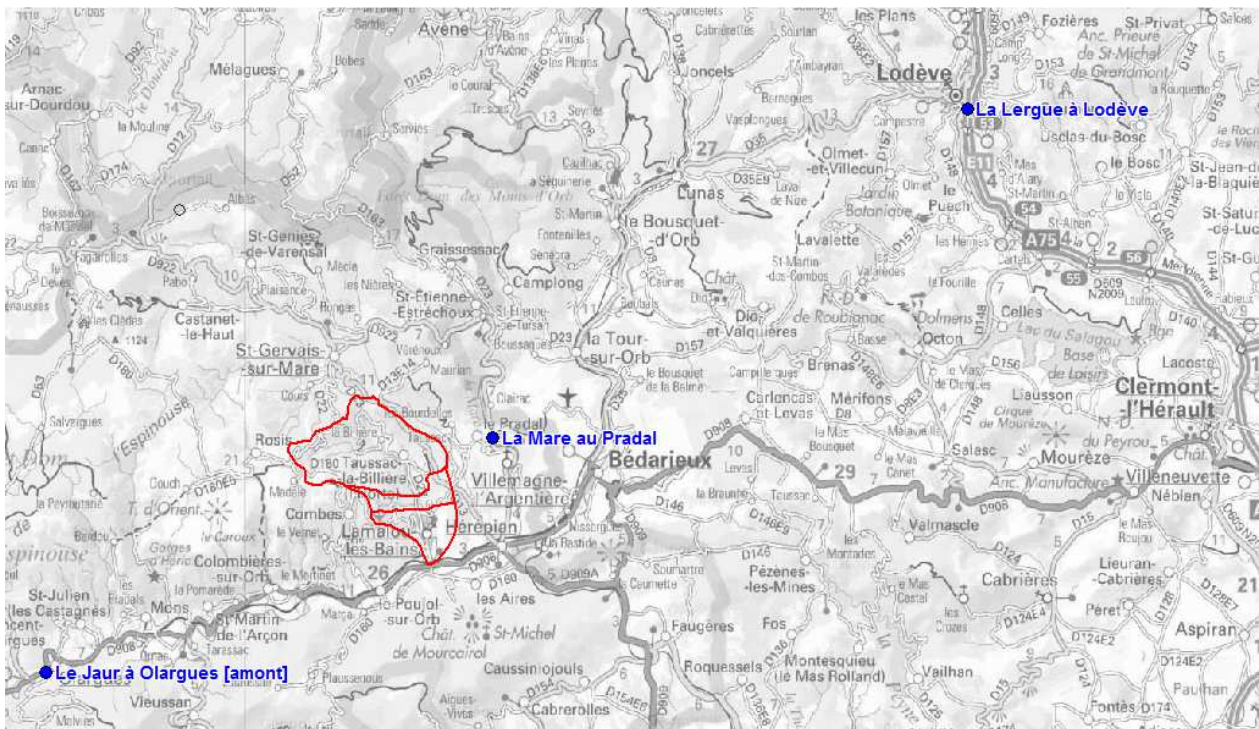


Figure 3 : Localisation des stations hydrométriques

Les caractéristiques de ces stations sont présentées dans le tableau suivant. Les débits sont exprimés en m³/s et correspondent aux débits de pointe des crues.

	Données disponibles	Surface BV	Q _{2ans}	Q _{5ans}	Q _{10ans}	Q _{20ans}	Q _{50ans}
La Lergue à Lodève	1959 – 2015	228 km ²	120	190	240	280	340
La Mare au Pradal	1966 – 2015	114 km ²	83	140	180	220	270
Le Jaur à Olargues [Amont]	1985 - 2015	226 km ²	150	230	290	340	420

Tableau 10 : Débits issus des stations hydrométriques de la Banque Hydro

En appliquant la formule d'extrapolation $Q = Q_r \times \left(\frac{S}{S_r}\right)^\alpha$ avec les surface en km², les débits en m³/s et en prenant $\alpha = 0.7$, on obtient les résultats suivants.

	La Lergue à Lodève			La Mare au Pradal			Le Jaur à Olargues [Amont]		
	Entrée de Lamalou	Pont de Bardejean	Confluence Orb	Entrée de Lamalou	Pont de Bardejean	Confluence Orb	Entrée de Lamalou	Pont de Bardejean	Confluence Orb
Surface (km ²)	12.1	14.4	17.7	12.1	14.4	17.7	12.1	14.4	17.7
Q _{2ans}	15.4	17.4	20.1	17.3	19.5	22.5	19.3	21.8	25.2
Q _{5ans}	24.3	27.5	31.8	29.1	32.9	38.0	29.6	33.5	38.7
Q _{10ans}	30.7	34.7	40.1	37.4	42.3	48.9	37.4	42.2	48.8
Q _{20ans}	35.9	40.5	46.8	45.8	51.7	59.7	43.8	49.5	57.2
Q _{50ans}	43.5	49.2	56.8	56.2	63.4	73.3	54.1	61.1	70.6

Tableau 11 : Extrapolation des débits de la Banque Hydro

Ces données sont significativement en retrait de celles issues du PPRI de 2004. Ceci peut notamment s'expliquer par le fait que les stations retenues (celles qui présentent une série de données suffisamment longue et récente) drainent des bassins versants bien plus étendus que le bassin versant du Bitoulet (10 à 20 fois supérieurs). Il est connu que pour ce type de bassins versants (S>50 km²) dans les régimes méditerranéens, les débits spécifiques sont généralement très en retrait par rapport aux petits bassins versants (S<20 km²).

Pour la suite de l'étude, nous ne retiendrons pas ces valeurs.

2.3 ESTIMATION DES DEBITS A L'AIDE DES METHODES REGIONALES

2.3.1 METHODE DE BRESSAND-GOLOSSOF

La méthode de Bressand-Golossof est prise en compte dans le cadre de l'élaboration des PPRI du Gard.

La formule utilisée est la suivante : $Q_{100} = 30 \times S^{0,75}$ avec Q_{100} en m³/s et S en km².

Le tableau suivant présente les débits centennaux issus de cette formule en différents points.

	Surface (km ²)	Q ₁₀₀ (m ³ /s)
Le Bitoulet à l'entrée de Lamalou	12,1	195
Le Bitoulet au pont de l'avenue de Bardejean	14,4	222
Le Bitoulet à la confluence avec l'Orb	17,7	259

Tableau 12 : Débits centennaux - Méthode de Bressand-Golossof

Cette méthode donne généralement des résultats satisfaisants mais a tendance à aboutir à des valeurs relativement fortes. Nous proposons de ne pas la retenir pour la suite de l'étude.

2.3.2 METHODE DITE DES PPRI DE L'AUDE

Cette méthode a été mise au point dans le cadre de la définition des Plans de Prévention du Risque Inondation de 101 communes du département de l'Aude. Elle permet d'apprécier les débits de pointe de crue rare (de l'ordre de 100 ans mais peut être adaptée à de plus faibles périodes de retour) en prenant en compte :

- Les conditions locales de pluviométrie saisonnière traduites par la pluie journalière centennale (Pj100) et le paramètre b100 de Montana intégré dans la formule ;
- La forme des bassins versants : surface, longueur, pente.

La pluie journalière centennale retenue est de 300 mm (soit une P_{24h} de 342 mm). Le tableau suivant présente les débits centennaux calculés par la méthode de l'Aude en trois points le long du Bitoulet.

	S _{BV} (km ²)	Pente Pondérée (m/m)	Cheminement hydrau (km)	Tc Aude (heures)	Q100 (m ³ /s)
Bitoulet entrée de Lamalou	12.1	0.038	6.7	1.4	183
Bitoulet au pont de l'avenue de Bardejean	14.4	0.034	7.4	1.6	203
Bitoulet à la confluence avec l'Orb	17.7	0.023	9.5	2.3	200

Tableau 13 : Débits centennaux - Méthode dite des PPRI de l'Aude

2.4 SYNTHÈSE DE L'ANALYSE HYDROLOGIQUE

2.4.1 DONNÉES PLUVIOMÉTRIQUES

Les données pluviométriques retenues pour le bassin versant du Bitoulet sont consignées dans le tableau ci-dessous.

	5 ans	10 ans	20 ans	30 ans	50 ans	100 ans
Pluie journalière (en mm)	143 *	186	227 *	251 *	280 *	320
Pluie de 6 heures (en mm)	77,3	98	121,7	137,4	159,5	194,3
Pluie horaire (en mm)	46,1	55,1	63,6	68,5	74,5	82,6

Tableau 14 : Données pluviométriques retenues

*La pluie journalière de 5, 20, 30 et 50 ans a été estimée en appliquant le Gradex des pluies entre 10 et 100 ans.

Les hyétogrammes reconstitués sont présentés ci-dessous.

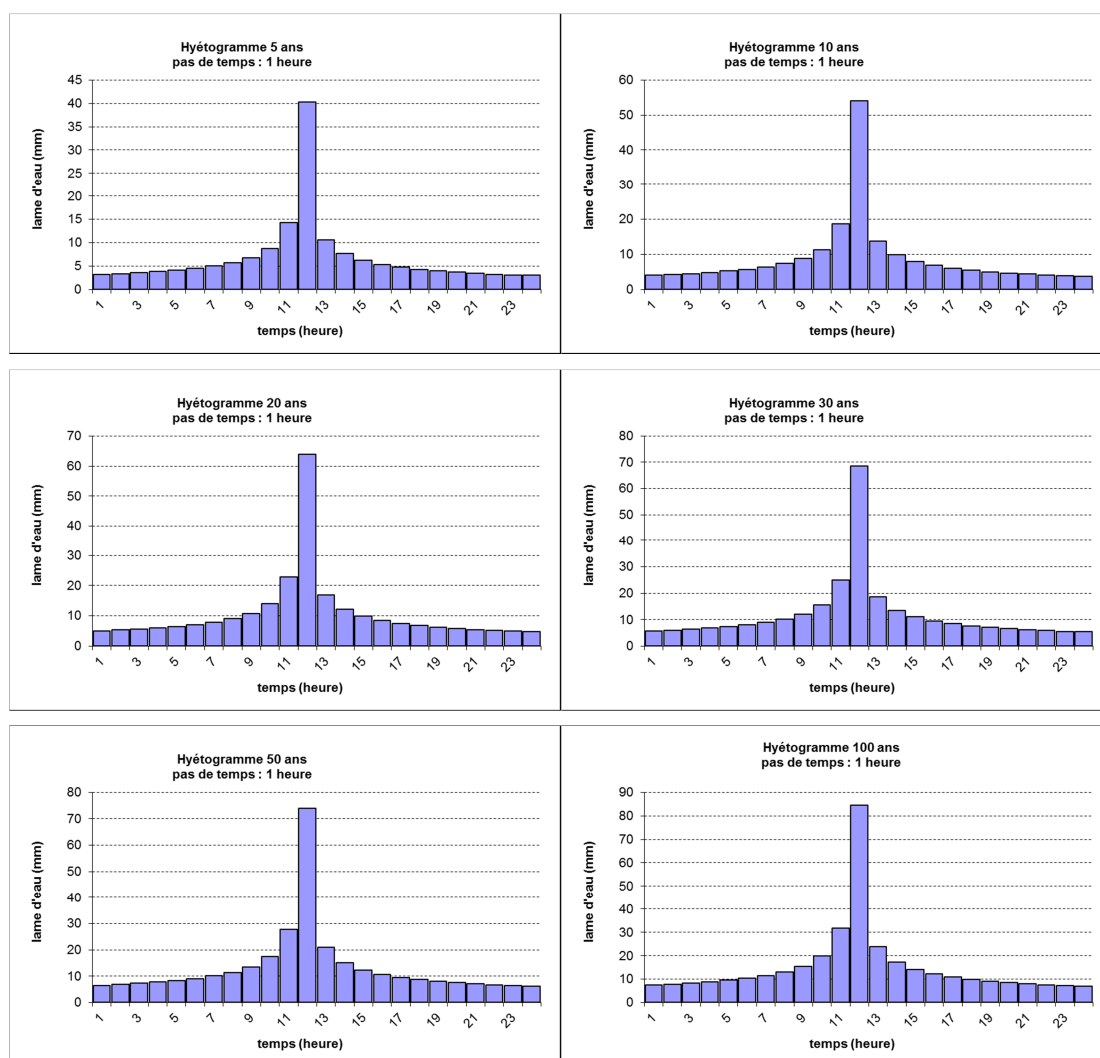


Figure 4 : Hyétogrammes de période de retour 5, 10, 20, 30, 50 et 100 ans

2.4.2 DONNEES HYDROMETRIQUES

Les débits de pointe retenus en première approche sont présentés dans le tableau suivant. Ils seront ensuite comparés à ceux issus du modèle Pluie/Débit présenté au paragraphe suivant.

	Surface (km ²)	Q10 ans - PPRI	Q100 ans - PPRI	Q100 ans - Aude	Q _{except} - PPRI
Bitoulet à l'entrée de Lamalou	12,1	60 m ³ /s	140 m ³ /s	183 m ³ /s	200 m ³ /s
Bitoulet à la confluence de l'Orb	17,8	80 m ³ /s	170 m ³ /s	200 m ³ /s	268 m ³ /s
L'Orb à la confluence avec le Bitoulet	525,2	540 m ³ /s	900 m ³ /s	-	1810 m ³ /s

Tableau 15 : Synthèse des données hydrométriques

2.5 MODELE HYDROLOGIQUE GESRES

Le logiciel GESRES^{ISL} permet de calculer les hydrogrammes de crue à partir des hyétogrammes précédemment calculés.

2.5.1 PRESENTATION DU LOGICIEL GESRES

Le logiciel GESRES^{ISL} est un modèle de gestion de la ressource en eau basé sur la simulation hydrologique ; il a été développé par ISL dans le cadre de son activité de recherche et développement.

Il intègre les résultats de modèles locaux plus précis sous la forme de courbes de tarage amont et aval. Le code de calcul s'articule autour de trois modules :

- Le **module hydrologique** réalise la transformation pluie-débit sur une distribution de bassins versants ;
- Le **module de propagation** réalise la propagation et la combinaison des débits résultant de la transformation pluie-débit dans le réseau hydrographique ;
- Le **module gestion des réservoirs** permet d'intégrer une gestion fine des ouvrages réservoirs disposés sur le réseau hydrographique et d'associer à chacun des nœuds prélèvements et apports.

Le modèle comprend un ensemble de nœuds, deux nœuds délimitant un bief. Un nœud reçoit les apports :

- De son propre bassin versant (modèle pluie-débit),
- Du bief amont (modèle de propagation).

Ces apports sont ensuite propagés dans le bief aval avec la possibilité d'introduire, avant la propagation, un écrêtement par une retenue. Il est possible d'associer à chacun des nœuds une table H/Q (hauteur ou cote/Débit) issu d'un calcul hydraulique local ou d'études déjà réalisées.

Le modèle peut aussi bien être utilisé pour des simulations « événementielles » (typiquement simulations de crues) que pour des simulations « continues » sur des périodes de plusieurs années.

Dans cette étude, le modèle pluie-débit utilisé dans le logiciel GESRES^{ISL} est du type de l'hydrogramme unitaire SCS (Soil Conservation Service). Cette méthode permet dans un premier temps le calcul du volume d'eau ruisselé via le coefficient CN (Curve Number), et dans un second temps la construction d'un hydrogramme unitaire.

Le CN est un coefficient représentatif de la nature du sol, de son occupation et des antécédents pluvieux. L'appréciation des volumes d'eau ruisselés se ramène donc à l'évaluation du paramètre CN.

2.5.2 DETERMINATION DU COEFFICIENT CN

Un croisement est réalisé entre l'occupation du sol et la géologie de la zone. Le modèle a été décomposé en 3 zones :

- Le bassin versant amont dont l'exutoire est le pont Grand, constitué essentiellement de forêts et milieux semi-naturels et de territoires agricoles sur un sol granitique. Le CN est fixé à une valeur de 76 ;
- Le bassin entre le pont Grand et le pont de l'avenue de Bardejean (amont du modèle hydraulique), constitué de forêts et milieux semi-naturels, de territoires agricoles et de territoire artificialisé sur un sol granitique. Le CN est fixé à 78 ;
- Le bassin aval jusqu'à la confluence avec l'Orb principalement constitué de territoire artificialisé, forêts et milieux semi-naturels et territoires agricoles sur un sol granitique. Son CN est de 82.

Le tableau suivant présente la grille des CN suite au croisement entre l'occupation du sol et le type de sol.

Valeur de CN		1	2	3	4
		Granites Schistes	Calcaires marneux	Calcaires massifs	Alluvions
1	Aéroports, Centres bourgs et Centres anciens	95	93	91	90
2	Réseau routier	95	93	91	90
3	Zones industrielles et commerciales, Zones portuaires, Habitats continus collectifs et individuels	95	90	87	85
4	Habitats discontinus collectifs et individuels	85	78	73	70
5	Territoires agricoles	86	78	73	70
6	Zones boisées feuillus et résineux dominants	75	65	58	55
7	Chantiers mines décharges, Espaces de sport et loisir, Zones humides, Lagunes, Marais salant, Zones végétalisées non boisées	82	74	68	65
8	Zones peu ou pas végétalisées, Roches nues	80	75	72	70
9	Cours d'eau, Plans d'eau	100	100	100	100

Tableau 16 : Grille de croisement des coefficients CN

Cette grille a été élaborée en considérant des antécédents pluvieux moyens. Ainsi, il sera nécessaire d'ajuster, pour chaque événement pluvieux étudié, les valeurs de CN au moyen d'un coefficient correcteur global C_{CN} ($C_{CN} > 1$ pour des antécédents pluvieux forts, $C_{CN} < 1$ pour des antécédents pluvieux faibles).

2.5.3 DESCRIPTION DU MODELE

Le modèle hydrologique est constitué de :

- Un bassin versant amont de 12,10 km², dont le temps de concentration est pris égal à 2,1h et le coefficient CN à 76 ;
- Un second bassin versant permettant d'avoir le débit en amont du modèle hydraulique (pont de Bardejean) de 2,30 km² et de coefficient CN égal à 78 et ayant un temps de concentration de 0,48h ;
- Un troisième bassin versant à la confluence du Bitoulet avec l'Orb de 3,33 km², dont le temps de concentration est pris égal à 1h et le coefficient CN à 81 ;
- Des pluies de projet affectées aux bassins versants.

2.5.4 CALCULS DES HYDROGRAMMES DE PROJET

Les hydrogrammes de projet calculés par le modèle figurent ci-dessous.

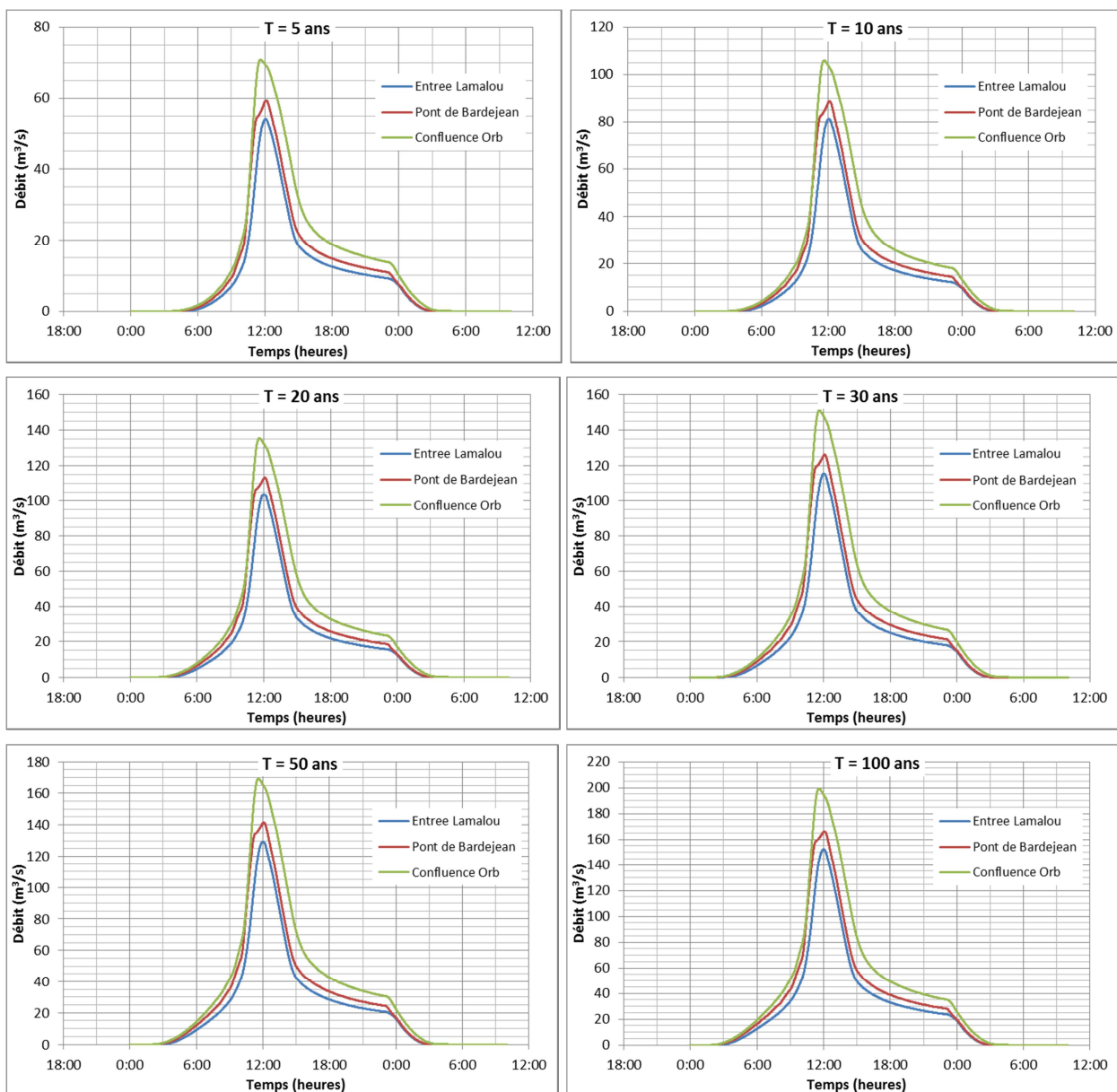


Figure 5 : Hydrogrammes issus du modèle hydrologique

Les débits de pointe en m³/s correspondants sont les suivants :

Période de retour	Modèle GESRES ^{ISL}			Valeurs PPRI		Valeurs méthode de l'Aude	
	Entrée de Lamalou	Pont de Bardejean	Confluence avec l'Orb	Entrée de Lamalou	Confluence avec l'Orb	Entrée de Lamalou	Confluence avec l'Orb
5 ans	54	59	71				
10 ans	81	89	106	60	80		
20 ans	104	113	135				
30 ans	116	126	151				
50 ans	129	142	169				
100 ans	152	166	199	140	170	183	203

Tableau 17 : Débits de pointe issus du modèle hydrologique GESRES^{ISL}

Les valeurs issues de la modélisation hydrologique sont cohérentes avec les différentes estimations réalisées.

2.5.5 CARACTERISATION DE LA CRUE DE SEPTEMBRE 2014

Plusieurs hyétogrammes relatifs à l'évènement de septembre 2014 ont été fournis par le SPC :

- Les pluies élémentaires du 16 au 19 septembre 2014 sur les bassins versants élémentaires de la zone 1 à Lamalou ;
- Les hyétogrammes moyen et max entre les 16 et 19 septembre 2014 du Bitoulet (18 km²) issus des images satellites.

Ces trois hyétogrammes au pas de temps horaires sont présentés sur le graphe suivant.

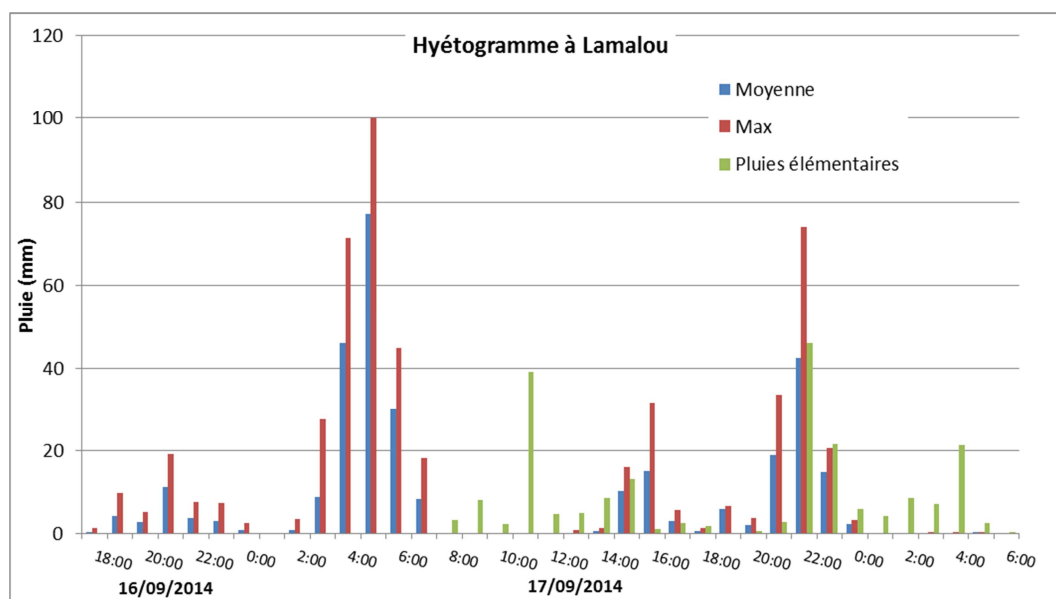


Figure 6 : Hyétogrammes de la crue de 2014 à Lamalou les Bains

Les hydrogrammes obtenus à l'aide du modèle hydrologique à la confluence entre le Bitoulet et l'Orb sont présentés sur le graphe ci-dessous.

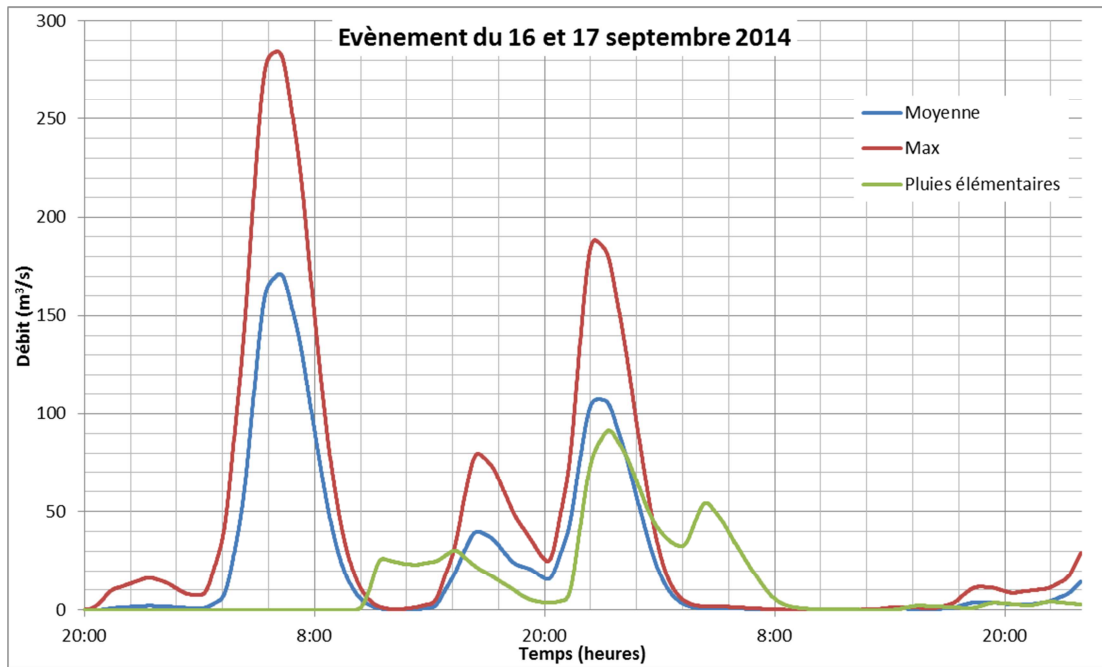


Figure 7 : Hydrogrammes de la crue de 2014 issus du modèle hydrologique

Les débits de pointe maximaux obtenus pour les trois pluies sont les suivants :

Hyétogramme moyen	Hyétogramme maximal	Pluies élémentaires
171,5 m ³ /s	284,5 m ³ /s	91,5 m ³ /s

Tableau 18 : Débits de pointe de la crue de septembre 2014 issus du modèle hydrologique

L'hydrogramme obtenu en appliquant les pluies élémentaires au bassin versant du Bitoulet semble faible compte tenu de l'ampleur de l'évènement. Il est également très en retrait de ceux reconstitués sur la base des pluies issues des images satellite.

Nous proposons ainsi de retenir un hydrogramme issu de la moyenne des hyétogrammes moyen et maximal. L'hydrogramme résultant est caractérisé par un débit de pointe de l'ordre de 230 m³/s (soit légèrement supérieur au débit retenu pour un évènement centennal).

2.5.6 CARACTERISATION DE LA CRUE DE NOVEMBRE 2014

Un autre épisode pluvieux est survenu quelques semaines après l'évènement de septembre 2014, ne causant cette fois que des dégâts mineurs. Les données au droit des pluviomètres à proximité du bassin versant du Bitoulet ont été analysées. Ainsi, le graphe suivant présente les cumuls pluviométriques horaires relevés entre le 27 et le 28 novembre 2014 à Bédarieux, Saint-Gervais et Villemagne.

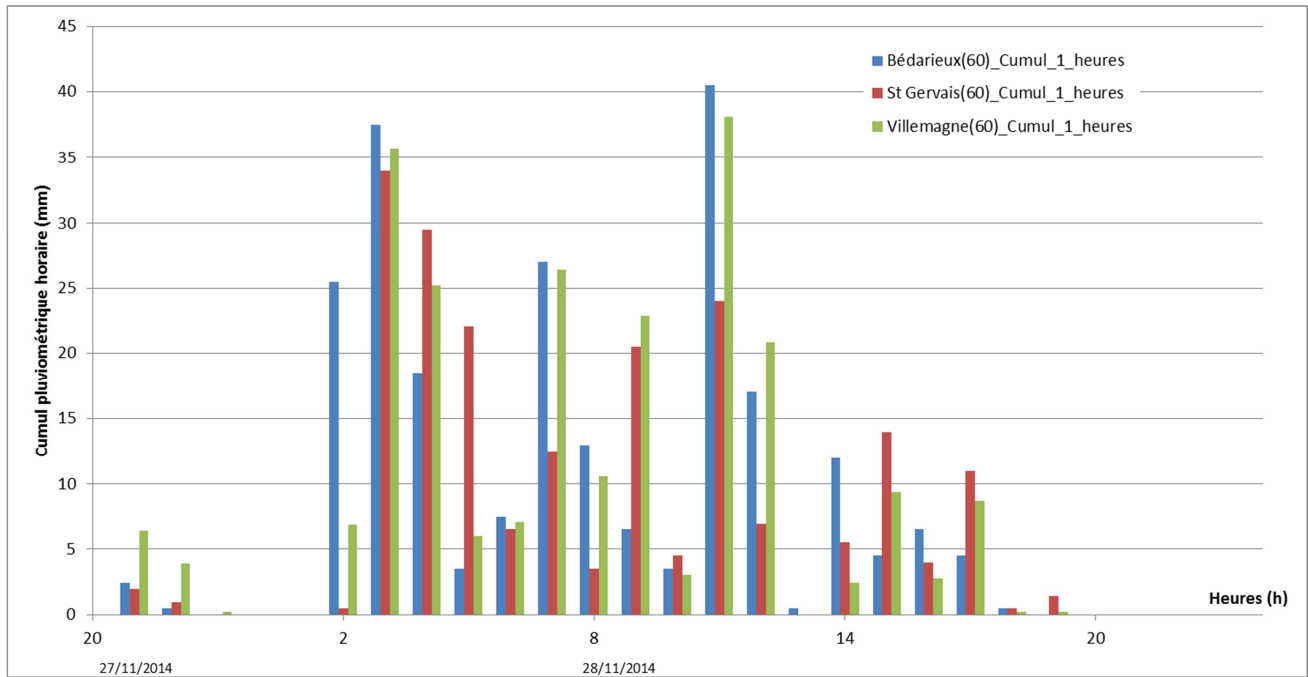


Figure 8 : Cumuls pluviométriques du 27 et 28 novembre 2014

Les cumuls maximaux enregistrés en 1h et en 24 h lors de cet évènement sont consignés dans le tableau suivant.

	Cumul 24 h (mm)	Cumul 1h max (mm)
Bédarieux	228.5	40.5
St Gervais	201.0	34.0
Villemagne	226.5	38.1

Tableau 19 : Cumuls pluviométriques enregistrés en novembre 2014

Ces cumuls de pluies sont caractérisés par une période de retour 20 ans pour un pas de temps journalier et inférieure à 5 ans au pas de temps horaire.

Les débits de pointe obtenus à l'aide du modèle hydrologique pour la pluie enregistrée à la station de Bédarieux (pluie maximale) sont les suivants :

Entrée de Lamalou	Pont de Bardejean	Confluence avec l'Orb
70 m ³ /s	79 m ³ /s	91 m ³ /s

Tableau 20 : Débits de pointe de la crue de novembre 2014 issus du modèle hydrologique

La crue de novembre 2014 est donc caractérisée par une période de retour comprise entre 5 et 10 ans.

3 INVESTIGATIONS DE TERRAIN

3.1 EXPERTISE DE TERRAIN - ISL

Une visite de terrain a été réalisée par deux ingénieurs d'ISL en juin 2015 afin de relever l'ensemble des éléments utiles pour l'étude. Ont été relevés :

- Le type de lit : naturel ou canalisé,
- La présence et la hauteur des murs de protection ou de soutènement par rapport au fond du lit en rives droite et gauche,
- La protection des berges,
- Les zones d'érosion,
- Les ouvrages présents en lit mineur,
- La présence potentielle de réseaux,
- Les zones d'aménagement possible.

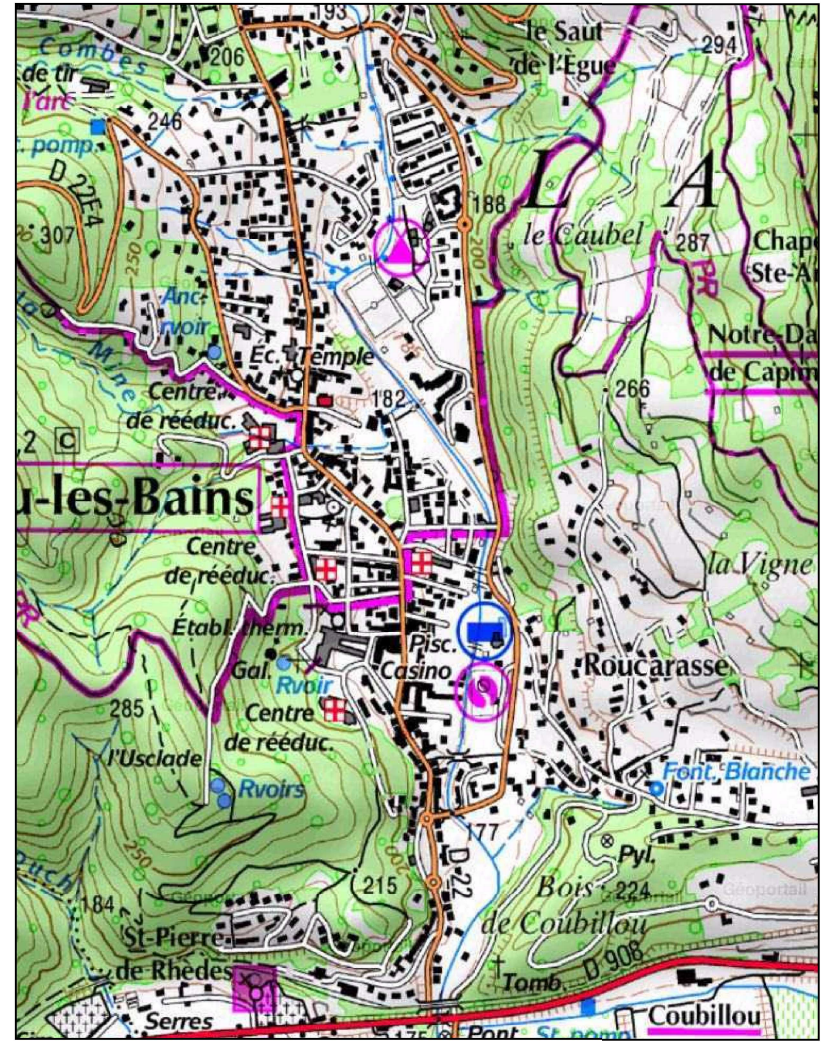
La carte insérée en page suivante présente l'ensemble de ces relevés, les cartes en ANNEXE 1 recensent également les relevés avec un niveau de zoom plus important.

3.2 EXPERTISE DE TERRAIN - RIPARIA

Le Bitoulet a été parcouru à pied par deux ingénieurs de Riparia, depuis le lit mineur de façon exhaustive depuis l'embouchure de l'Orb jusqu'au barrage de la Biconque, excepté les 150 derniers mètres à l'aval du barrage, en raison de la difficulté d'accès (gorges, niveau d'eau important au niveau des vasques et qualité de l'eau médiocre ne permettant pas une visibilité du fond du lit).

Le linéaire à l'amont du barrage a été parcouru ponctuellement en voiture, au niveau des points d'accès.

Localisation du secteur



Seuil de 1,80 m en enrochements/blocs maçonnés ensablé jusqu'à la crête

Petit seuil de hauteur 1m
Protection de berge avec enrochements

Seuil bétonné de hauteur 1,50 m -> point noir

Enrochements bétonnés ou libre

Seuil bétonné - Hauteur = 1m

Passerelle, sous cavage de part et d'autre de la passerelle

Enrochements

Enrochements bétonnés

Passerelle

Enrochements bétonnés

Enrochements bétonnés

Pont : 2,60 m de hauteur sous le tablier

Passerelle détruite pendant la crue de 2014

Passerelle détruite pendant la crue de 2014

Pont avec 4 ouvrages de décharge

Passerelle de 2m de hauteur

Passerelle très haute

Pont

Pont SNCF : travaux réouverture arche RG

ETUDE DE GESTION DU RISQUE INONDATION ET DE RENATURATION DU BITOULET

Carte n°2 : Synthèse des observations de terrain

Observations

- Lit naturel
- Lit canalisé
- Zone d'érosion de berge
- Protection de berge
- Présence potentielle de réseaux
- Ouvrages
- Zone d'aménagement possible

Hauteur des murs

- Supérieur à 4m
- De 3,5 à 4 m
- De 3 à 3,5 m
- De 2,5 à 3 m
- De 2 à 2,5 m
- De 1,5 à 2 m
- De 1 à 1,5 m
- De 0,9 à 1 m

50 m 150 m



Janvier 2016

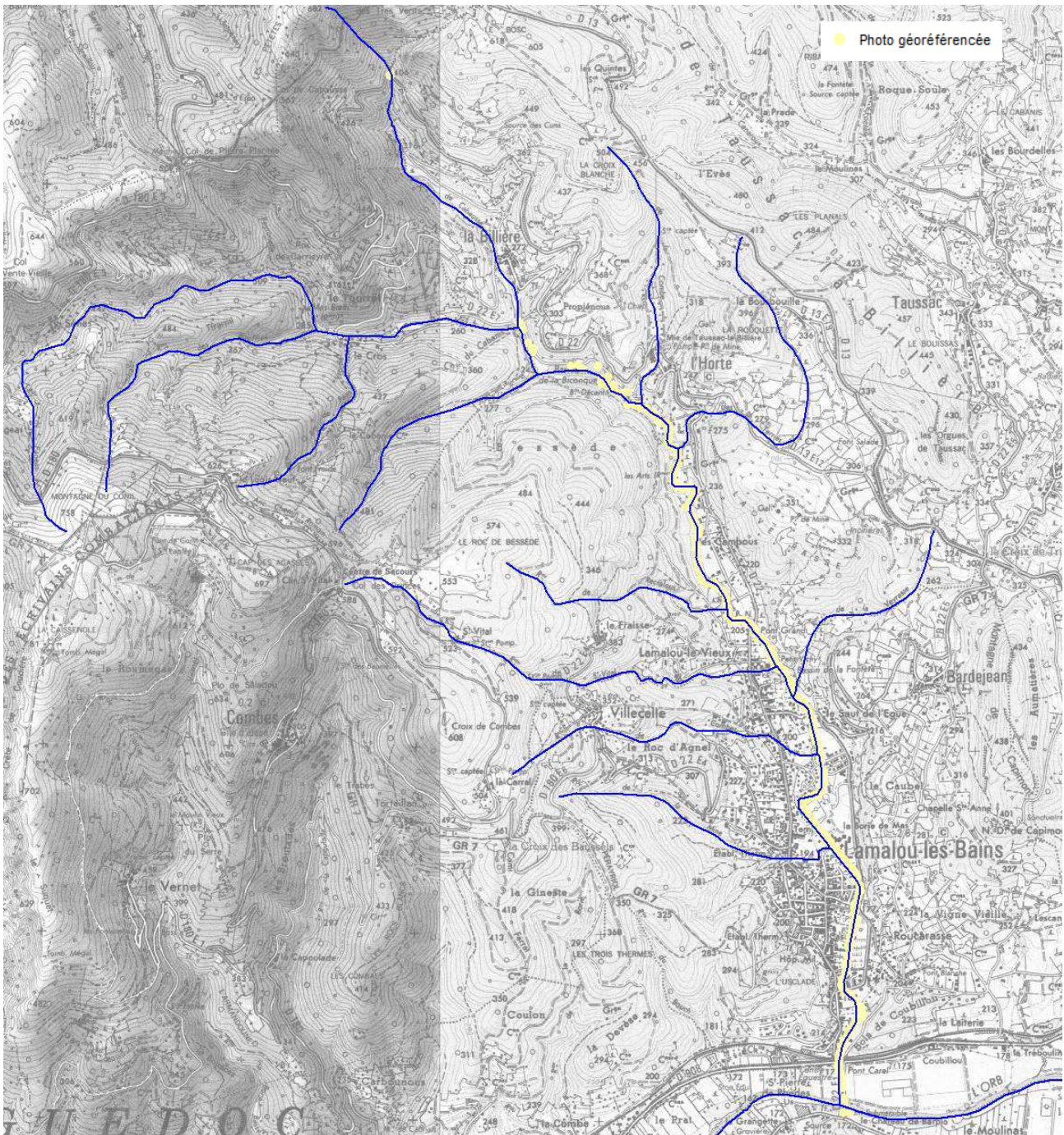


Figure 9 : Terrain parcouru par RIPARIA

4 DIAGNOSTIC HYDRAULIQUE

4.1 MODELE HYDRAULIQUE

L'écoulement du Bitoulet dans la traversée de Lamalou-les-Bains est apprécié à l'aide d'un modèle hydraulique 1D/2D, à l'aide du logiciel HEC-RAS¹. Cette première analyse hydraulique a pour objectifs :

- De valider la pertinence du modèle hydraulique en simulant la crue de septembre 2014,
- D'identifier les zones à traiter afin d'assurer l'homogénéité de la capacité avant débordement du lit mineur du Bitoulet dans la traversée de Lamalou.

4.1.1 ETENDUE DU MODELE

Le modèle hydraulique réalisé couvre la commune de Lamalou-les-Bains ; il s'étend du pont de Bardejéan en amont jusqu'à la confluence avec l'Orb en aval. Le modèle s'étend donc sur 2340 m.

L'implantation des profils en travers utilisés dans le modèle hydraulique est présentée sur la carte page suivante.

Le maillage du modèle 2D (figure ci-dessous) couvre les lits majeurs en rive gauche et en rive droite. Les dimensions moyennes des mailles sont de 20 m.

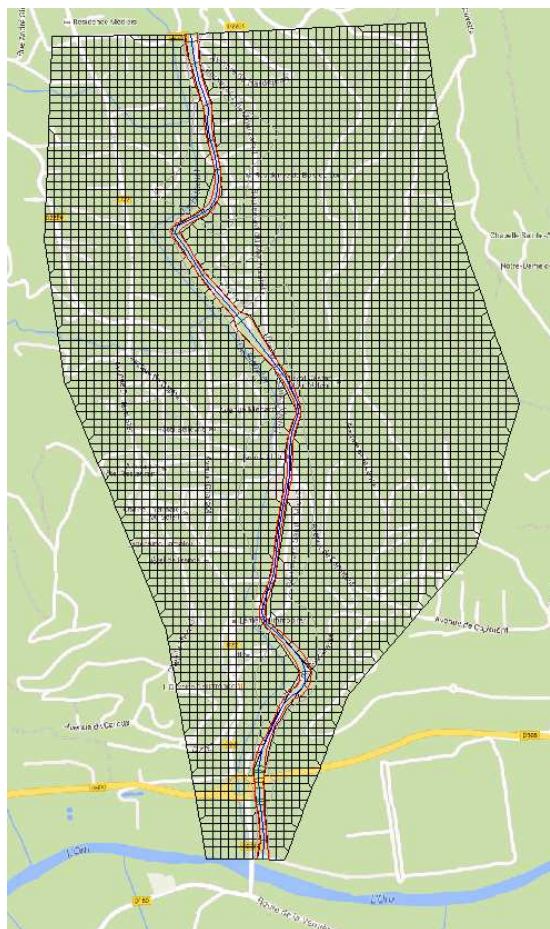


Figure 10 : Maillage 2D

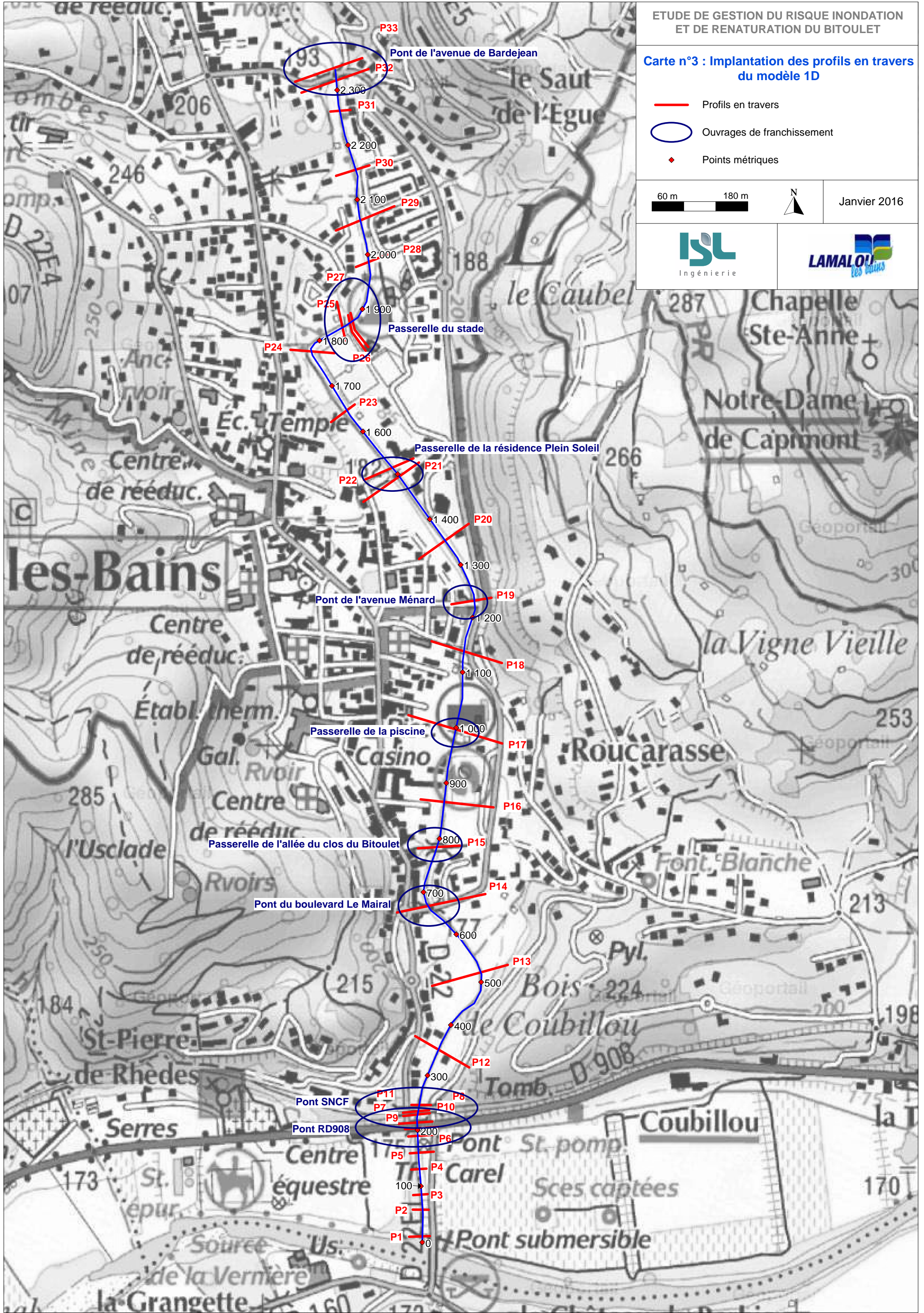
¹ Logiciel HEC-RAS version 5.0, développé par le corps des ingénieurs de l'armée américaine, www.hec.usace.army.mil

Carte n°3 : Implantation des profils en travers
du modèle 1D

- Profils en travers
- Ouvrages de franchissement
- ◆ Points métriques



Janvier 2016



4.1.2 DONNEES TOPOGRAPHIQUES

Les données topographiques utilisées pour la construction du modèle sont :

- 16 profils en travers issus du PPRI réalisé en 2003 ;
- Des levés en lit mineur issus du PPRI réalisé en 2003 ;
- 11 profils en travers à proximité de la RD908 levés par le cabinet Roque levés dans le cadre de l'étude de la création d'un giratoire sur la RD 908, réalisée en 2006 ;
- 10 plans topographiques existants de Lamalou les Bains, assemblés par le cabinet Roque en 2014 ;
- Des compléments topographiques levés en 2014 dans Lamalou les Bains par le Cabinet Roque ;
- Le MNT SIG-LR pour compléter la topographie en lit majeur

Les profils retenus et intégrés dans le modèle sont localisés sur la Figure 10.

La topographie des ponts présents sur le Bitoulet est extraite du PPRI excepté les ponts du giratoire de la RD908 et le pont SNCF qui proviennent de l'étude de la création d'un giratoire sur la RD 908. Les ouvrages pris en compte dans le modèle sont les suivants (d'amont en aval) :

- Le pont de l'avenue de Bardejean,
- La passerelle du stade,
- La passerelle de la résidence Plein Soleil,
- Le pont de l'avenue Ménard,
- La passerelle de la piscine,
- La passerelle de l'allée du Clos du Bitoulet,
- Le pont du boulevard Le Mairal,
- Le pont SNCF,
- Le pont de la RD908 amont,
- Le pont de la RD908 aval.

Ces ponts sont localisés page précédente sur la carte n°3.

4.1.3 HYPOTHESES DE CALCUL

4.1.3.1 Condition limite amont

Les débits à injecter dans le modèle ont été présentés précédemment.

4.1.3.2 Condition limite aval

La condition limite aval est fixée par les niveaux de l'Orb. Les hypothèses suivantes ont été retenues :

Crue de période de retour < 10 ans	Z = 169 mNGF
Crue de période de retour > 10 ans	Cote atteinte pour la crue de 10 ans de l'Orb, soit 170,95 mNGF

4.1.3.3 Les coefficients de rugosité

Les coefficients de Manning retenus sont les suivants :

En amont de la partie bétonnée

- n = 0.05 pour le lit mineur (K = 20)
- n = 0.06 pour le lit majeur (K = 17)

Pour la partie bétonnée

- n = 0.018 pour le lit mineur (K = 55)
- n = 0.06 pour le lit majeur (K = 17)

En aval de la RD908

- n = 0.05 pour le lit mineur (K = 20)
- n = 0.061 pour le lit majeur (K = 17)

4.1.3.4 Prise en compte des murs dans la partie urbanisée de Lamalou

Sur les berges rive droite et rive gauche, des murs de soutènement ou de protection sont présents le long du Bitoulet dans la traversée du bourg. La hauteur de ces murs a été levée lors d'une visite sur le terrain en juin 2015. Les figures suivantes présentent les profils en long des murs en rive droite et en rive gauche.

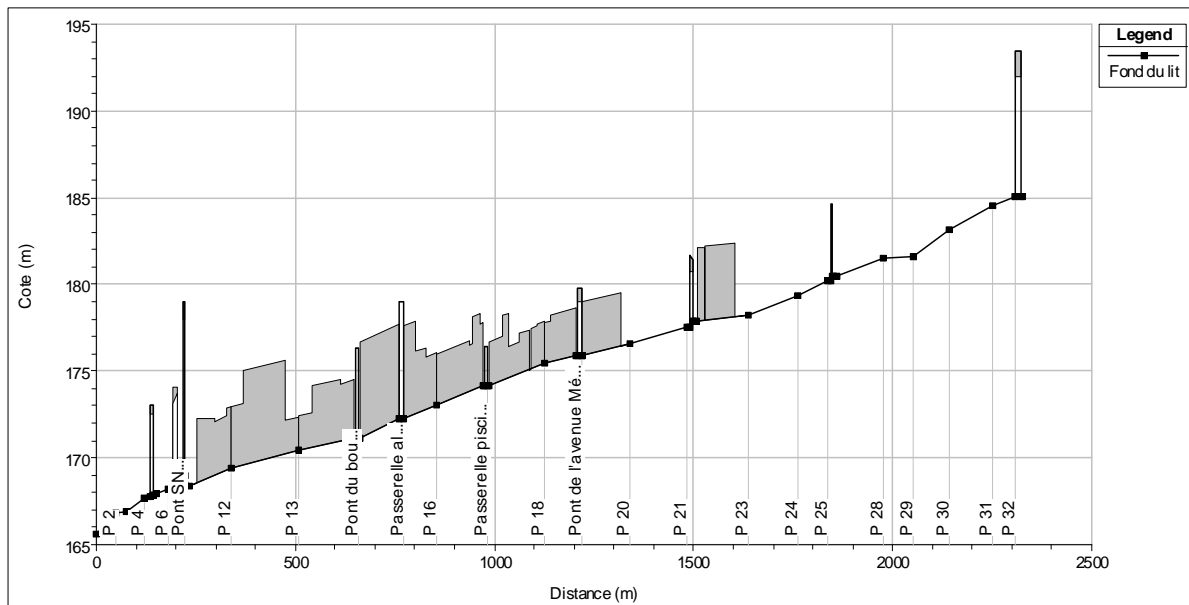


Figure 11 : Profils en long des murs de protection en rive droite

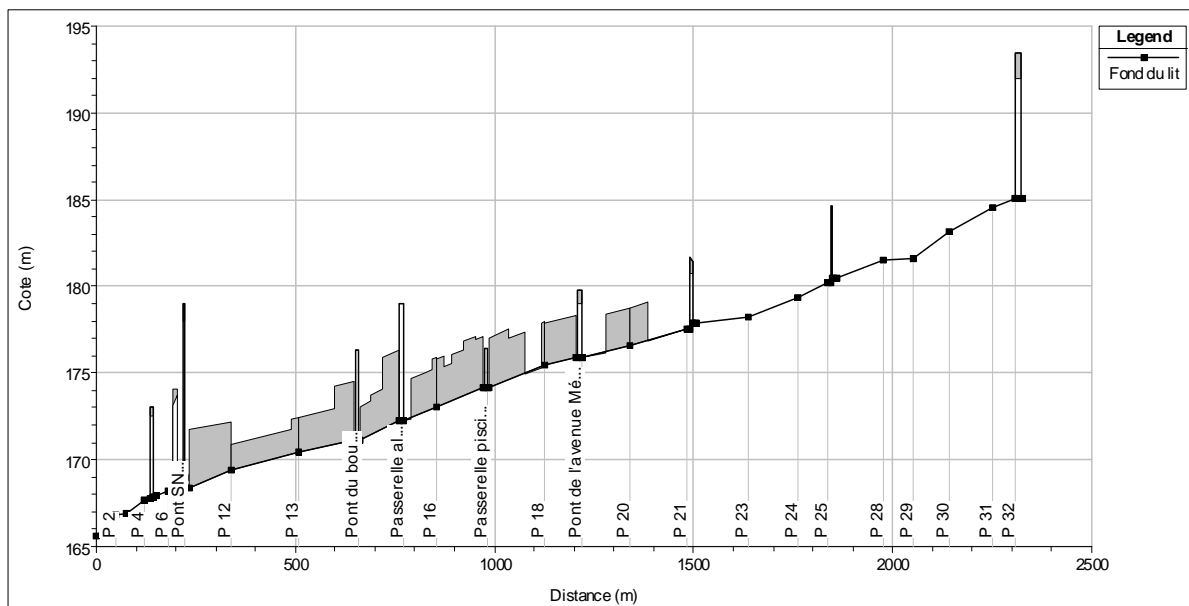


Figure 12 : Profils en long des murs de protection en rive gauche

4.2 RESULTATS DE LA MODELISATION

4.2.1 EMPRISE DE LA CRUE DE SEPTEMBRE 2014


Compte tenu des nombreux embâcles observés lors de la crue de 2014 et des ruptures d'ouvrages, il est apparu vain d'essayer de caler le modèle hydraulique.

L'emprise de la zone inondée calculée par le modèle a cependant été comparée à celle fournie par le Syndicat Mixte des Vallées de l'Orb et du Libron pour s'assurer de la cohérence des résultats. La carte ci-après présente les résultats.

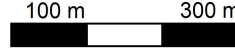
Carte n°4 : Zone inondable de la crue de
septembre 2014

Hauteurs d'eau



 Emprise approximative de la ZI de
l'épisode du 18 septembre 2014

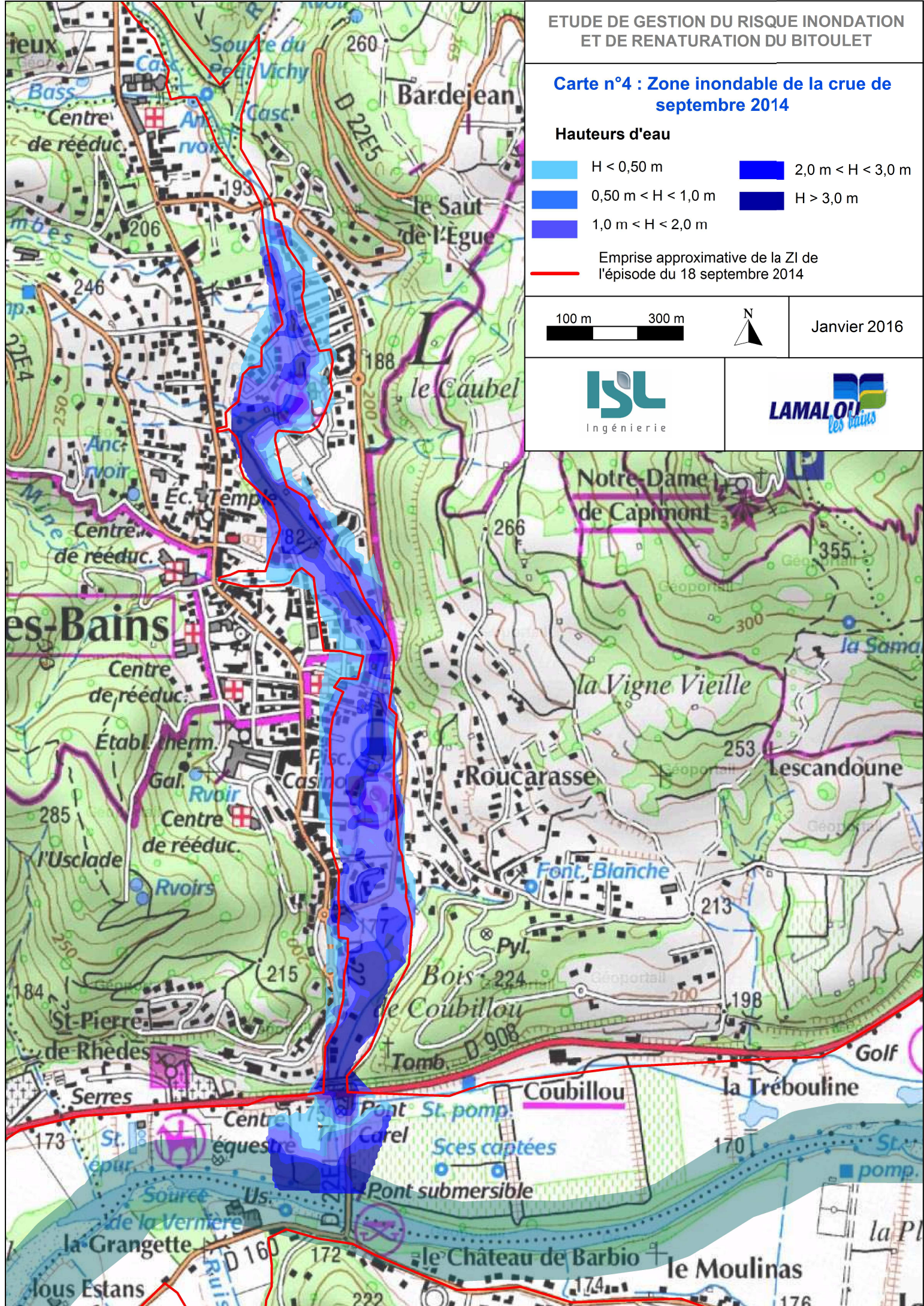
100 m 300 m



Janvier 2016

ISL
Ingénierie

LAMALOU
les bains



4.2.2 ESTIMATION DE LA CAPACITE DU LIT EN ETAT ACTUEL

Le modèle a été mis en œuvre pour apprécier la capacité du lit par tronçon (pour cette analyse, les potentiels débordements par-dessus les murs ou les berges ne sont pas pris en compte).

La localisation des différents tronçons homogènes est présentée sur la carte n°5, synthèse du diagnostic hydraulique.

Les tronçons 1, 2 et 3 correspondent à la partie naturelle du lit, les tronçons 4 à 6 correspondent au lit bétonné.

Les débits présentés dans le tableau suivant traduisent la capacité intrinsèque de chaque tronçon du lit sans présence d'embâcles.

Tronçon	Longueur	Limite amont	Limite aval	Capacité du lit	Profil de débordement préférentiel
1	465 m	Pont de Bardejean (P 33)	Seuil du stade (P 27)	45 m ³ /s (environ Q5 ans)	P 28 (amont de l'ancien camping en rive gauche)
2	350 m	Seuil du stade (P 26)	Résidences Plein Soleil (P 22)	70 m ³ /s (entre Q5 ans et Q 10 ans)	P 23 (aval du stade en rive gauche)
3	265 m	Résidences Plein Soleil (P 21)	Avenue Ménard (P 19)	65 m ³ /s (entre Q5 ans et Q 10 ans)	P 21 (aval de la passerelle des résidences en rive droite)
4	445 m	Avenue Ménard (P 18)	Allée du clos du Bitoulet (P 15)	100 m ³ /s (entre Q10 ans et Q 20 ans)	P 17 (amont de la passerelle de la piscine en rives droite et gauche)
5	110 m	Allée du clos du Bitoulet (P 15)	Boulevard Le Mairal (P 14)	> 200 m ³ /s (supérieur à Q 100 ans)	P 14 (amont du pont du boulevard Le Mairal en rive gauche)
6	440 m	Boulevard Le Mairal (P 14)	Pont SNCF (P 10)	85 m ³ /s (environ Q10 ans)	P 13 (150 m en aval du pont du boulevard Le Mairal en rives droite et gauche)

Tableau 21 : Capacité du lit par tronçon

La capacité du lit croit de l'amont vers l'aval excepté pour le dernier tronçon où elle décroît. Cependant, la capacité du dernier tronçon est environ deux fois supérieure à celle du tronçon 1.

La capacité du lit est celle du tronçon dont la capacité est la plus faible, soit environ 50 m³/s, correspondant au tronçon 1.

4.2.3 ESTIMATION DE LA CAPACITE DES OUVRAGES HYDRAULIQUES

Le modèle a également permis d'estimer la capacité des différents ouvrages de franchissement présents le long du Bitoulet. Pour chaque ouvrage et pour différentes crues, le tirant d'air correspondant à la hauteur maximale entre la ligne d'eau et la sous-face du tablier est précisé.

Pont	T = 5 ans	T = 10 ans	T = 20 ans	T = 50 ans	T = 100 ans
Pont de l'avenue de Bardejean	4,15 m	3,60 m	3,20 m	2,75 m	2,40 m
Passerelle du stade	1,75 m	1,20 m	0,80 m	En charge	Surverse
Passerelle de la résidence Plein Soleil	0,80 m	0,45 m	0,15 m	En charge	En charge
Pont de l'avenue Ménard	0,80 m	0,20 m	En charge	En charge	En charge
Passerelle de la piscine	0,70 m	Surverse	Surverse	Surverse	Surverse
Passerelle de l'allée du Clos du Bitoulet	4,50 m	4,00 m	3,70 m	2,50 m	2,10 m
Pont du boulevard Le Mairal	3,20 m	2,90 m	2,70 m	2,50 m	2,25 m
Pont SNCF	7,00 m	6,60 m	6,00 m	5,40 m	4,90 m
Pont de la RD908 amont	1,90 m	1,40 m	1,00 m	0,60 m	0,30 m
Pont de la RD908 aval	1,70 m	1,20 m	0,80 m	0,40 m	0,10 m

Tableau 22 : Tirant d'air pour différentes crues au droit des ouvrages hydrauliques

Ces ouvrages sont illustrés d'amont vers l'aval sur les photos ci-dessous.



Pont de l'avenue de Bardejean



Passerelle du stade



Passerelle de la résidence Plein Soleil



Pont de l'avenue Ménard



Passerelle de la piscine



Passerelle de l'allée du Clos du Bitoulet



Pont du boulevard Le Mairal



Pont SNCF



Pont de la RD908 amont



Pont de la RD908 aval

Les ouvrages potentiellement en charge ou objet d'une surverse pour la gamme de débits étudiés (à savoir T=5 à 100 ans) sont les suivants :

- La passerelle du stade,
- La passerelle de la résidence Plein Soleil,
- Le pont de l'avenue Ménard,
- La passerelle de la piscine.

On notera de plus que les ouvrages de la RD908 amont et aval présentent un tirant faible de l'ordre de quelques décimètres pour l'événement centennal.

Enfin, la crue de septembre 2014 a mis en relief la possibilité d'embâcles très importants, y compris au droit du pont SNCF qui présente pourtant un tirant d'air très élevé. A ce titre, un test de sensibilité relatif à la présence d'embâcles est présenté dans le chapitre 4.3.

4.2.4 LIGNES D'EAU EN LIT MINEUR

4.2.4.1 Préambule

Les différentes crues ont été simulées **sans formation d'embâcles** afin de mettre en évidence les éventuels points bas qu'il serait utile de traiter pour assurer l'homogénéité de la protection contre les crues du Bitoulet dans sa partie aval, sa partie canalisée donc. Les lignes d'eau correspondant aux crues de période de retour 5 et 10 ans sont présentées ci-dessous. **L'objectif de protection est en effet fixé à des crues fréquentes à courantes.** L'implantation des profils en travers est reprise dans la carte de diagnostic hydraulique.

Il est important de noter que dans certaines zones, les murs pris en compte dans le modèle correspondent à des murs de soutènement, la crête de la berge au contact de ces derniers est caractérisé par une cote supérieure. La photo ci-dessous illustre ces propos.



Exemple de mur de soutènement

Il est ainsi nécessaire de distinguer :

- **Les points bas en rive** (cote de crête des murs ou du terrain naturel) qui peuvent être à l'origine de débordements,
- **Les points bas des protections** qui correspondent à des discontinuités de la cote de crête des murs et qui peuvent être à l'origine de désordres (voire de débordements si c'est également un point bas de la rive).

4.2.4.2 Crue de période de retour 5 ans

Les profils en long insérés dans les pages suivantes distinguent la cote de crête des berges et la cote de crête des murs de protection (qui parfois sont confondues) ainsi que la ligne d'eau calculée pour la crue de période de retour 5 ans (cette analyse distingue les rives droite et gauche).

Crue de 71 m³/s à la confluence avec l'Orb (Période de retour 5 ans) - Rive droite

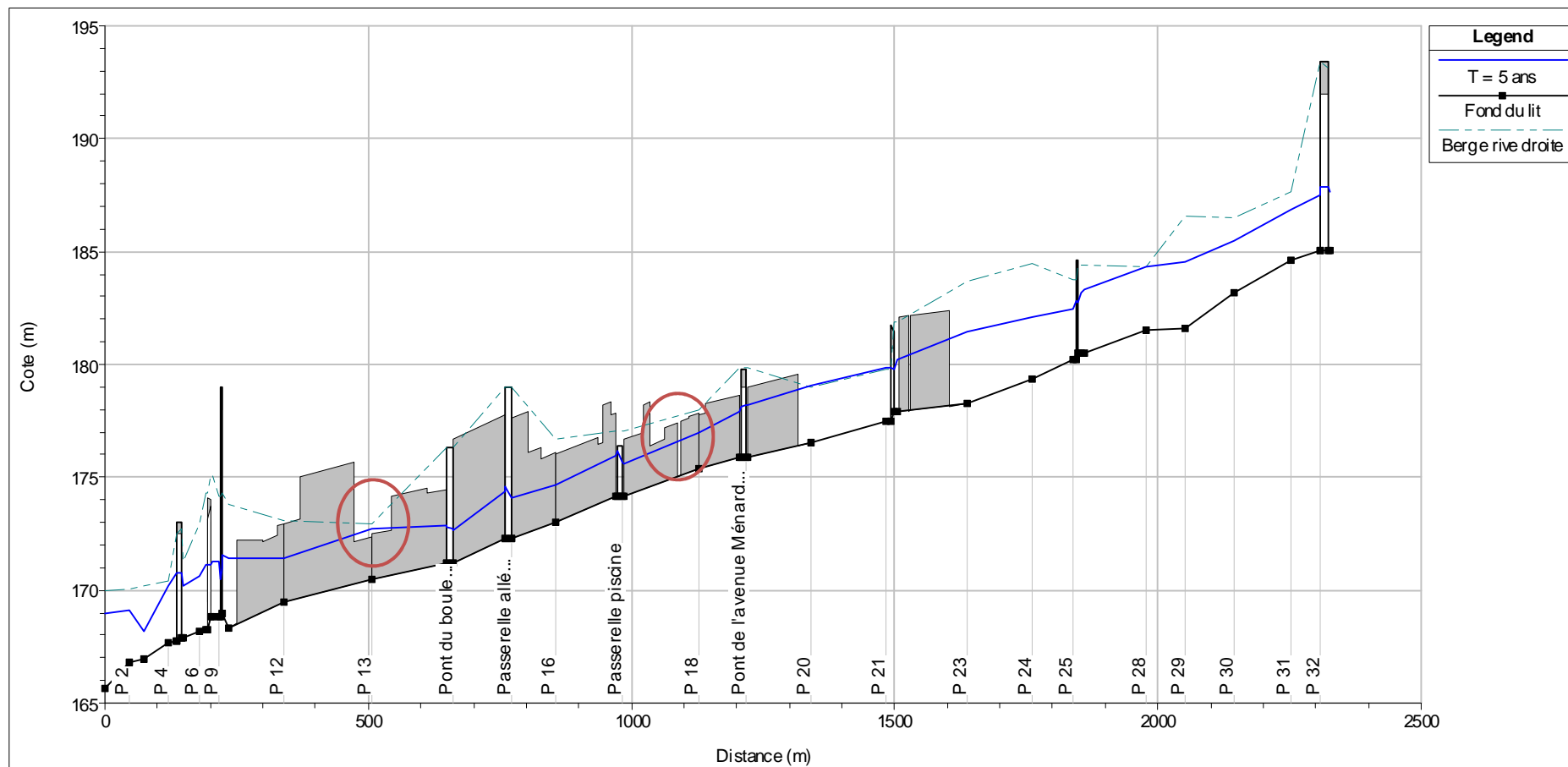


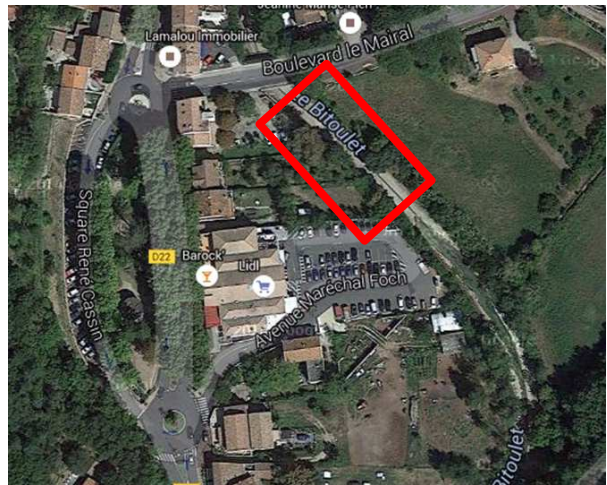
Figure 13 : Ligne d'eau pour la crue de période de retour 5 ans - Rive droite

En rive droite, pour cette crue de période de retour 5 ans, deux zones sensibles sont notables.

Profil P18 (RD) : Un premier point bas a été relevé au débouché d'un chemin (cf. figure suivante). Cependant, le terrain naturel quelques mètres plus loin semble atteindre une altitude proche de la crête des murs.



Profil P13 (RD) : La seconde discontinuité de la protection correspond à une zone où la cote de berge est supérieure à celle des murs. De plus, cette zone est située dans la partie aval du Bitoulet, sans enjeux au contact du cours d'eau. Cette zone ne présente donc pas de problème particulier pour cette crue quinquennale.



Crue de 71 m³/s à la confluence avec l'Orb (Période de retour 5 ans) - Rive gauche

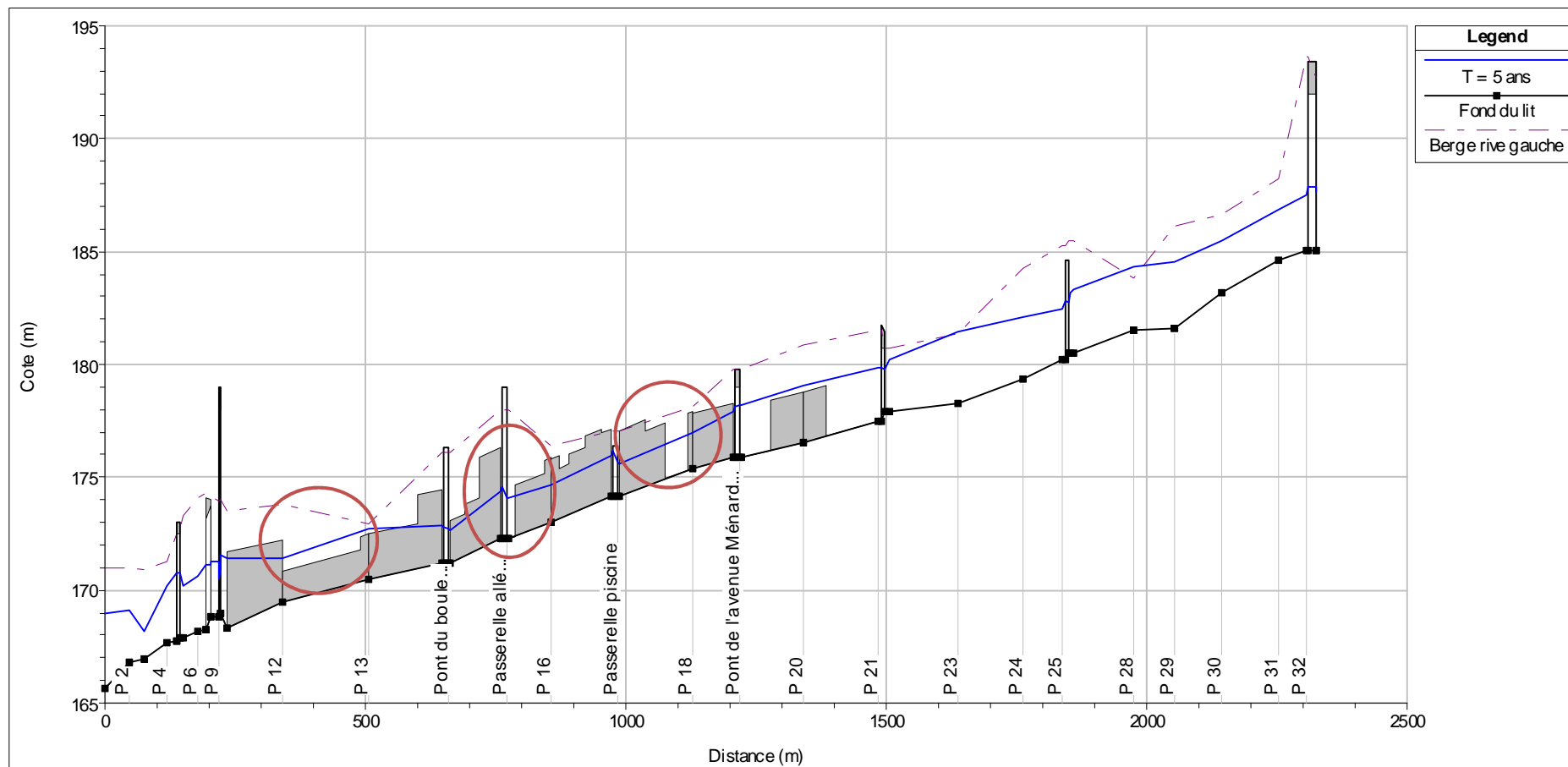


Figure 14 : Ligne d'eau pour la crue de période de retour 5 ans - Rive gauche

Profil P18 (RG) : On note un point bas au droit de la maison à proximité de la société d'ambulances et de taxis, habitation sinistrée lors de la crue de 2014. Le mur a été détruit à cette occasion et a généré des débordements importants notamment vers le secteur de la piscine municipale. La crête de la berge semble cependant atteindre une cote suffisante permettant d'éviter les débordements pour la crue de période de retour 5 ans.



Passerelle de l'allée du clos du Bitoulet (RG) : Un point bas de la crête des murs est situé en amont de la passerelle de l'allée du clos du Bitoulet. La cote de la berge est cependant supérieure à celle de la ligne d'eau de la crue de période de retour 5 ans.

Par ailleurs, dans cette zone, le remblai du théâtre en plein air, perpendiculaire au lit du Bitoulet, est susceptible de dévier les débordements en lit majeur vers le boulevard Saint-Michel (cf. flèche sur la photo suivante) comme cela a été observé lors de la crue de septembre 2014.



Profils P13 à P12 (RG) : Dans ce secteur, les murs en rive gauche ont pour but de cuveler le lit mineur et de protéger la berge contre les écoulements des crues courantes. Dans cette zone, la ligne d'eau de la crue de période de retour 5 ans est supérieure à la cote de crête des murs mais inférieure à la cote de berge. Compte tenu de l'absence d'enjeux à proximité immédiate du cours d'eau, cet situation de fait n'est pas préoccupante.



4.2.4.3 Crue de période de retour 10 ans

Les profils en long insérés dans les pages suivantes distinguent la cote de crête des berges et la cote de crête des murs de protection (qui parfois sont confondues) ainsi que la ligne d'eau calculée pour la crue de période de retour 10 ans (cette analyse distingue les rives droite et gauche).

Crue de 106 m³/s à la confluence avec l'Orb (Période de retour 10 ans) – Rive droite

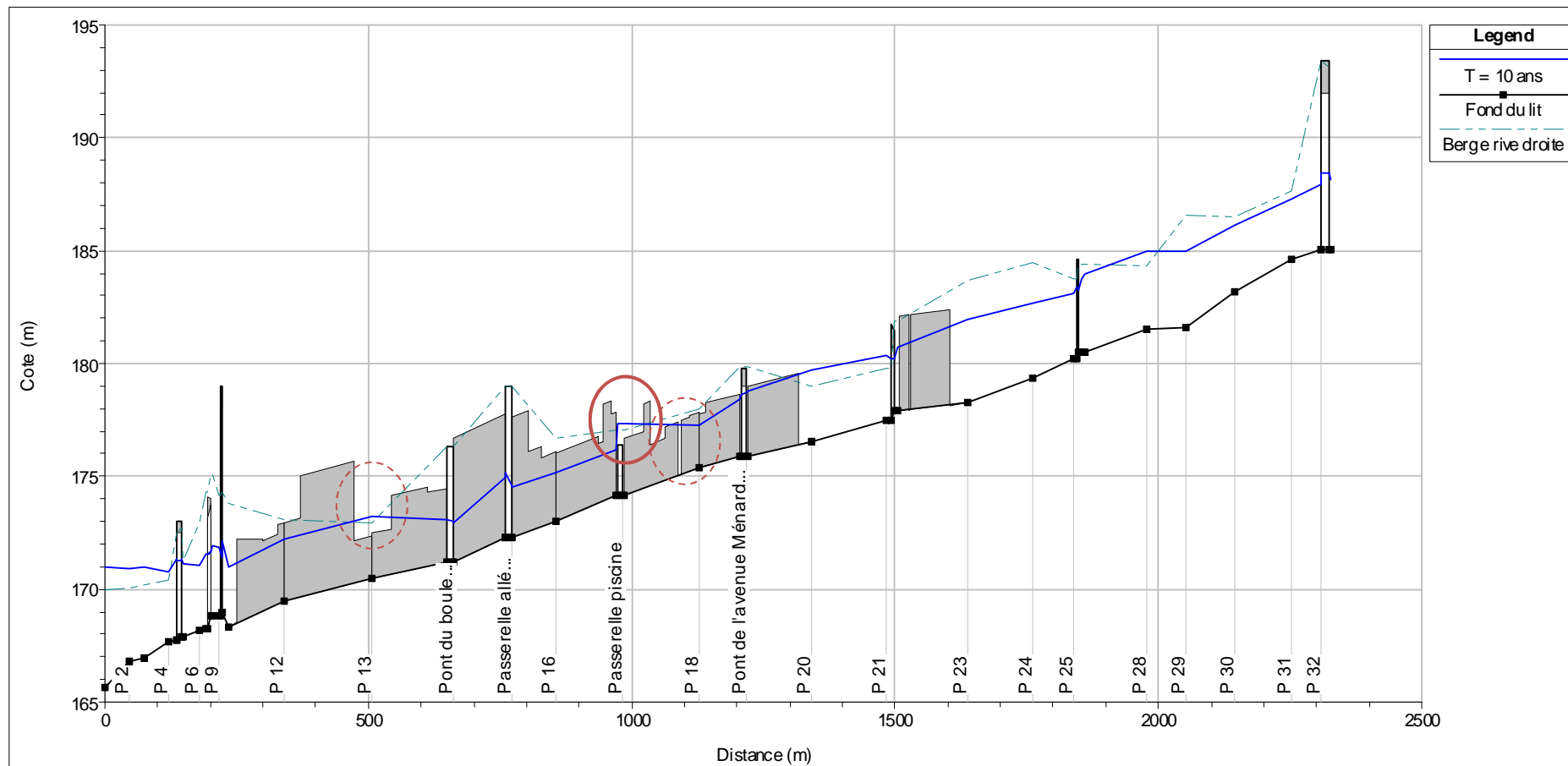


Figure 15 : Ligne d'eau pour la crue de période de retour 10 ans - Rive droite

Abords de la passerelle de la piscine (RD) : Dans ce secteur, les murs ont été emportés par la crue de septembre 2014 en amont et en aval de la passerelle. Ils constituent aujourd'hui un point bas de la berge rive droite et donc une zone préférentielle de débordement pour la crue de période de retour 10 ans.



Crue de 106 m³/s à la confluence avec l'Orb (Période de retour 10 ans) – Rive gauche

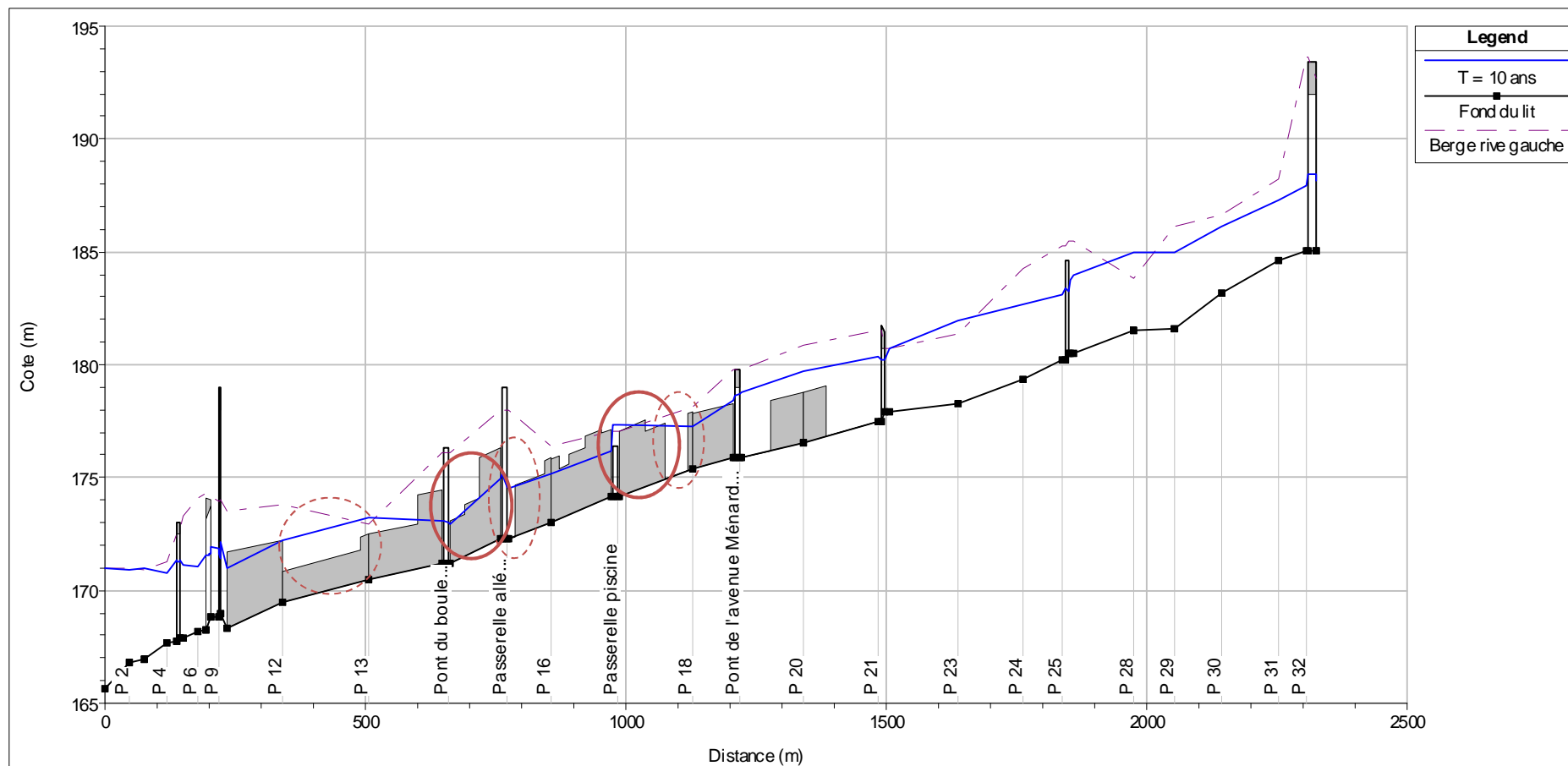


Figure 16 : Ligne d'eau pour la crue de période de retour 10 ans - Rive gauche

Pour cette crue, deux zones sensibles supplémentaires s'ajoutent à celles déjà évoquées pour la crue de période de retour 5 ans.

Abords de la passerelle de la piscine (RG) : Pour la crue de période de retour 10 ans, la passerelle de la piscine crée un remous susceptible de créer des débordements en rive gauche.



Lotissement de la rue du Mairal (entre la passerelle du clos du Bitoulet et le pont du boulevard Le Mairal) : Les murs en béton du cuvelage sont surmontés de murs en maçonneries (certainement des murs de particuliers). La crue de période de retour 10 ans engendre des niveaux supérieurs à la crête des murs en béton et vient solliciter les ouvrages en maçonneries. Cela est d'autant plus problématique que le terrain naturel aval est nettement plus bas que la crête des ouvrages (environ 1m) et que leur état général est mal connu et peu visible en raison d'une végétation dense.



4.3 INCIDENCE DES EMBACLES

4.3.1 PREAMBULE

Les embâcles ont constitué un facteur aggravant majeur dans les événements catastrophiques de septembre 2014.

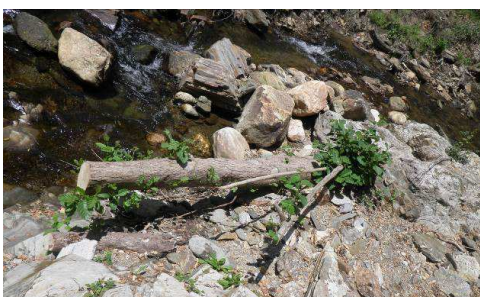
Des bouchons d'embâcles se sont formés au niveau des ouvrages de franchissement, et ce dès le pont de la Rue Bardejean à l'amont de la zone urbaine. Ils ont formé un barrage qui a rompu, créant alors une onde transitant vers la zone urbaine. Ils ont également créé la rehausse des niveaux d'eau en amont, augmentant de fait les débordements.

Les photos ci-dessous illustrent certains des embâcles observés suite à la crue de septembre 2014 :



Embâcles observés suite à la crue de septembre 2014

D'importants travaux de nettoyage de la végétation ont été réalisés par la Communauté de Communes suite à la crue, d'une part pour dégager la traversée urbaine mais également dans la zone de gorges et dans la retenue du barrage de la Biconque.



Ainsi, suite à notre passage sur le terrain, aucun désordre notable n'est à signaler. M Giniest des services techniques de Lamalou-les-Bains nous a par ailleurs confirmé que la crue suivante de novembre 2014 n'a pas fait l'objet d'un charriage d'embâcles problématiques, dans la mesure où le lit avait été nettoyé entre temps.

Trace d'entretien dans les gorges

La source principale d'embâcles est identifiée comme étant à l'amont du Barrage de la Biconque, où de nombreux chablis sont restés en place après la crue. La mise en place d'un piège à embâcles a d'ailleurs été réalisée dans le cadre de l'effacement du barrage. La photo ci-dessous illustre ces travaux.



Peigne à embâcles réalisé en lieu et place de l'ancien barrage de la Biconque

Nous pensons néanmoins que la zone de gorge est également une source potentielle d'embâcles : la végétation arborée est bien présente, parfois sur des versants schisteux sujets à l'effondrement par pans entier.

Sans suggérer un entretien drastique, cette végétation étant à la fois indispensable au bon fonctionnement écologique du milieu en place et à la tenue des versants, des solutions complémentaires pourraient être envisagées (entretien ciblé régulier, mise en place d'un piège à embâcles complémentaire à la sortie des gorges, au niveau du seuil n°4 [cf. « Figure 30 : localisation des seuils sur la zone d'étude »]).



Arbres tombés et instables dans les gorges

4.3.2 SIMULATIONS AVEC EMBACLES

Afin d'être en mesure de quantifier l'impact de la présence d'embâcles, les simulations hydrauliques ont été réalisées avec une obstruction de 50% de la surface offerte à l'écoulement sous tous les ouvrages de franchissement.

Les lignes d'eau obtenues pour les crues de période de retour 5 et 10 ans sont comparées aux lignes d'eau sans la prise en compte des embâcles sur les figures suivantes.

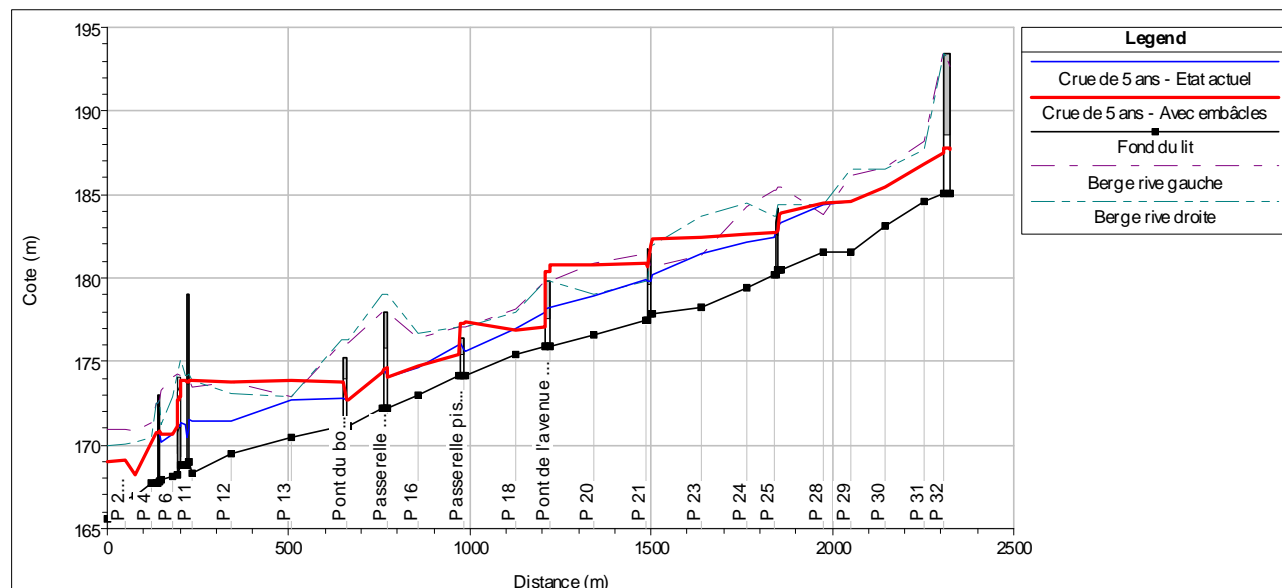


Figure 17 : Impact des embâcles sur la ligne d'eau pour une crue de période de retour 5 ans

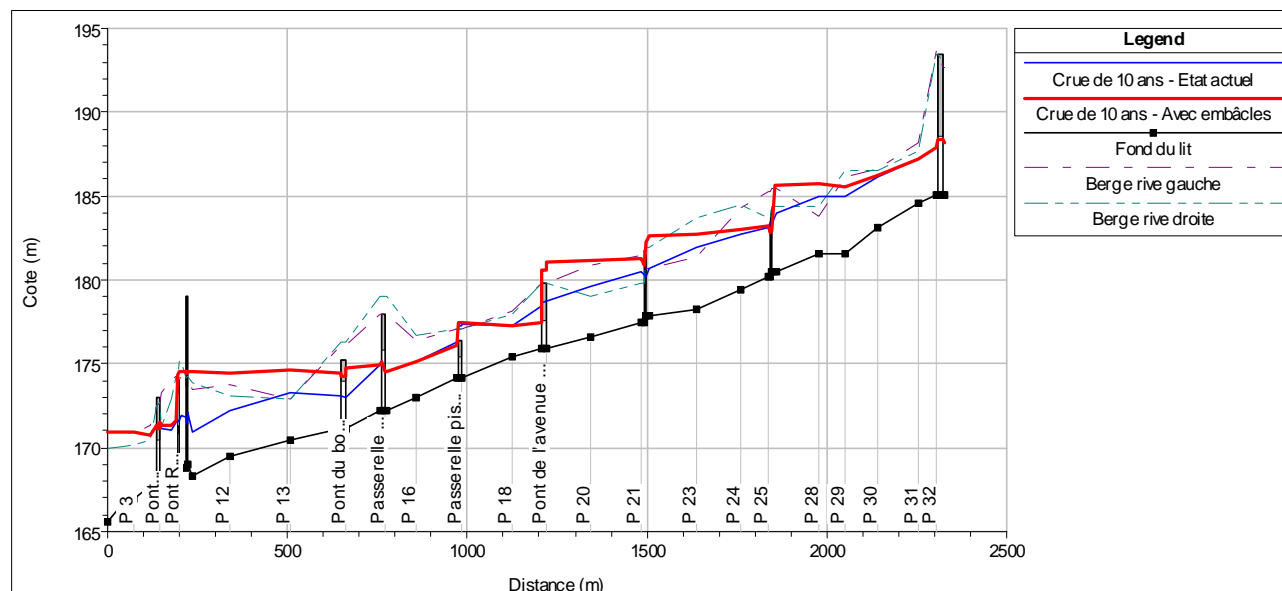


Figure 18 : Impact des embâcles sur la ligne d'eau pour une crue de période de retour 10 ans

La prise en compte des embâcles entraîne une rehausse de la ligne d'eau pouvant aller jusqu'à 2,50 m pour la crue de période de retour 5 ans et jusqu'à 3,60 m pour la crue décennale. Ces rehaussements impliquent des débordements sur toute la quasi-totalité du linéaire étudié.

4.4 CONCLUSIONS CONCERNANT LA CAPACITE DU BITOULET DANS LA TRAVERSEE DU BOURG

La capacité du lit du Bitoulet est estimée de l'ordre d'une crue de période de retour 5 ans (soit environ 60 à 70 m³/s depuis l'amont jusqu'à l'aval de la zone d'étude) dans l'état actuel des ouvrages et sans formation d'embâcles.

Pour une crue de période de retour 10 ans (soit 106 m³/s à la confluence avec l'Orb), les débordements tendent à se généraliser notamment à la faveur de points bas créés par la crue de septembre 2014 mais aussi en raison des remous générés par certains ouvrages de franchissement (la passerelle de la piscine notamment).








La carte en page suivante présente une synthèse du diagnostic hydraulique.

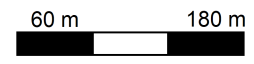
Enfin, il semble, à la vue de cette analyse, que la crue décennale représente un objectif de protection réaliste nécessitant, a priori, des aménagements d'ampleur modérée.

Par ailleurs, une analyse de l'incidence des embâcles a été réalisée. Elle a abouti aux conclusions suivantes :

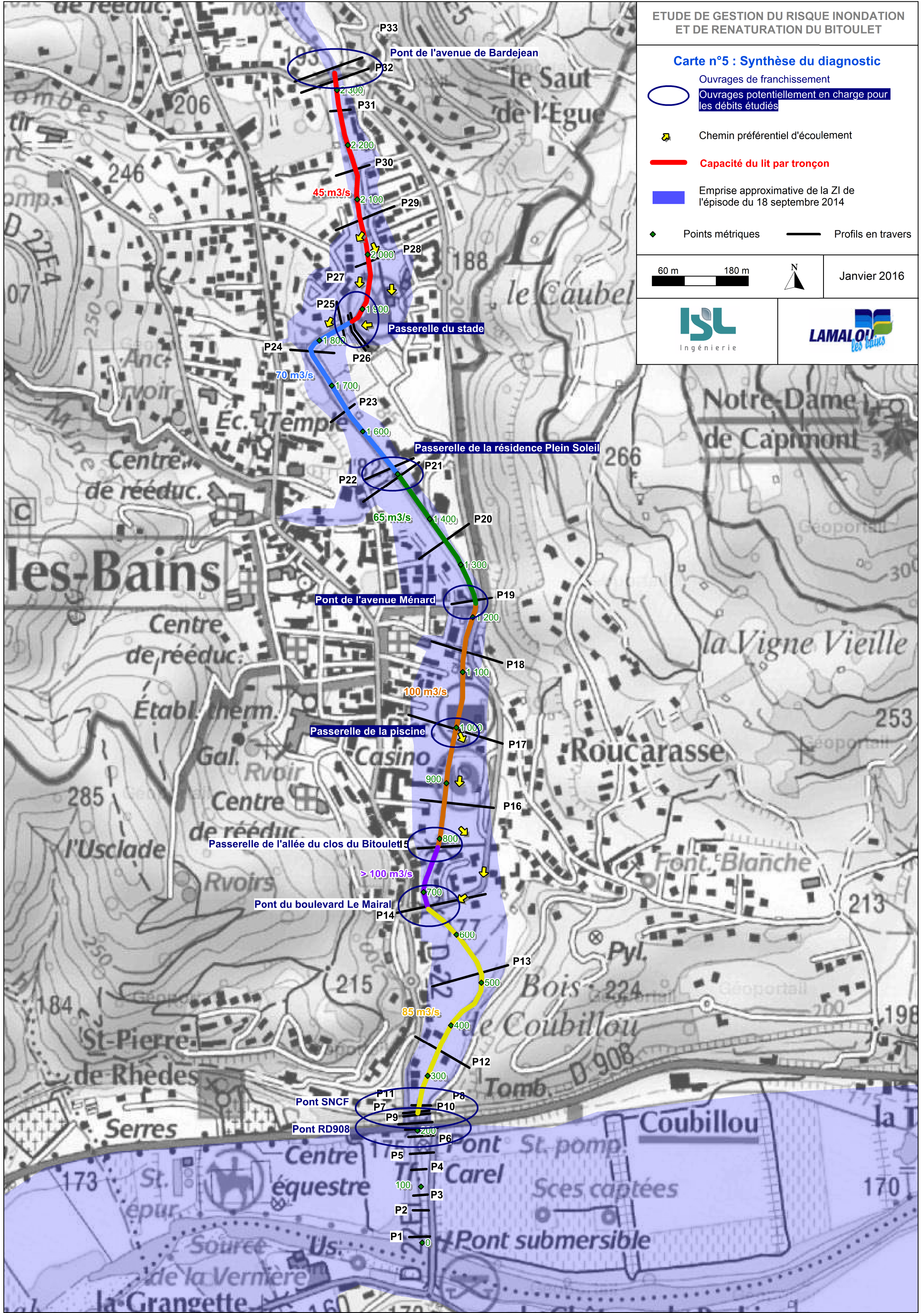
- Pour un événement de période de retour 5 ans : réhausse de la ligne d'eau jusqu'à 2,50 m,
- Pour un événement de période de retour 10 ans : réhausse de la ligne d'eau jusqu'à 3,60 m.

Carte n°5 : Synthèse du diagnostic

-  Ouvrages de franchissement
-  Ouvrages potentiellement en charge pour les débits étudiés
-  Chemin préférentiel d'écoulement
-  Capacité du lit par tronçon
-  Emprise approximative de la ZI de l'épisode du 18 septembre 2014
-  Points métriques
-  Profils en travers



Janvier 2016



5 DIAGNOSTIC MORPHOLOGIQUE

5.1 ANALYSE DIACHRONIQUE

L'analyse diachronique est réalisée à partir des fonds suivants :

- carte d'Etat-major (≈1870),
- Photo aérienne de 1947,
- Orthophoto de 2012.

Le résultat de la digitalisation est présenté sur la figure ci-après. Compte-tenu de l'absence de modification du tracé en plan du Bitoulet entre ces différentes époques, il n'a pas été jugé nécessaire de multiplier les dates de digitalisation.

Le Bitoulet est un cours d'eau peu mobile sur les 250 dernières années.

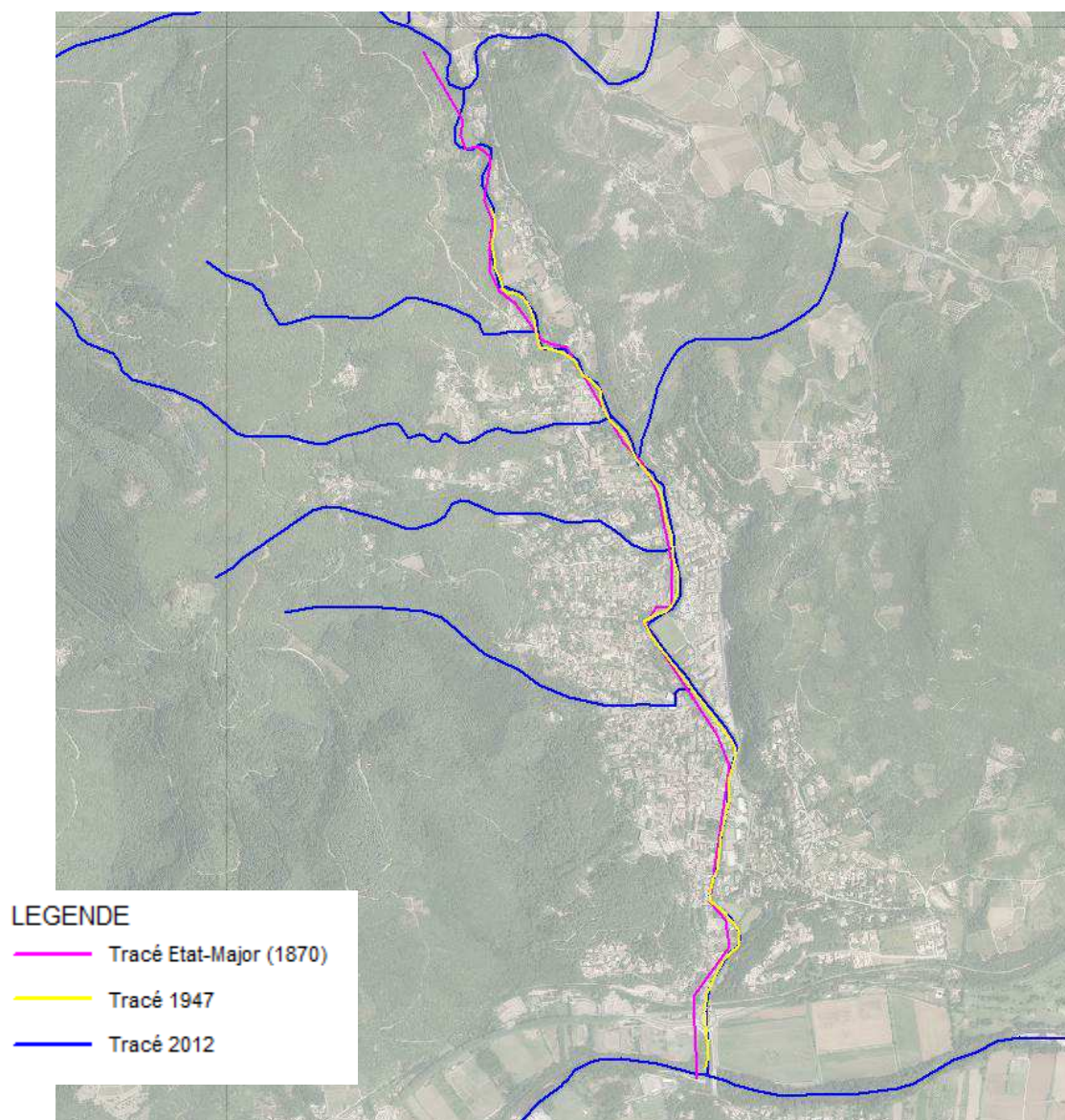


Figure 19 : Analyse diachronique du Bitoulet

5.2 EVOLUTION DE L'OCCUPATION DES SOLS ET DE LA VEGETATION RIVULAIRE

Sans réaliser une étude quantifiée ni approfondie, nous pouvons apporter des éléments de réflexion sur l'évolution de l'occupation des sols et de la végétation rivulaire.

Les photos ci-dessous de 1947 et 2012 montrent la forte évolution de l'urbanisation : cantonnée en rive droite au milieu du XXème siècle et plutôt en retrait de la berge, elle s'étend aujourd'hui sur les deux rives englobant le Bitoulet.

La végétation rivulaire semble plutôt avoir progressé : au niveau de la partie actuellement bétonnée, aucune trace de végétation continue n'apparaît sur la photo aérienne de 1947. La ripisylve semble d'amont en aval présente mais étroite, puis totalement absente, et enfin discontinue dans sa partie terminale.

Excepté dans sa partie bétonnée, la ripisylve s'est donc a minima maintenue, voire élargie sur la partie amont de la figure ci-avant.

Enfin, les grands travaux de bétonnage du lit mineur dans la traversée de Lamalou ont eu lieu dans les années 60 d'après les photos aériennes.

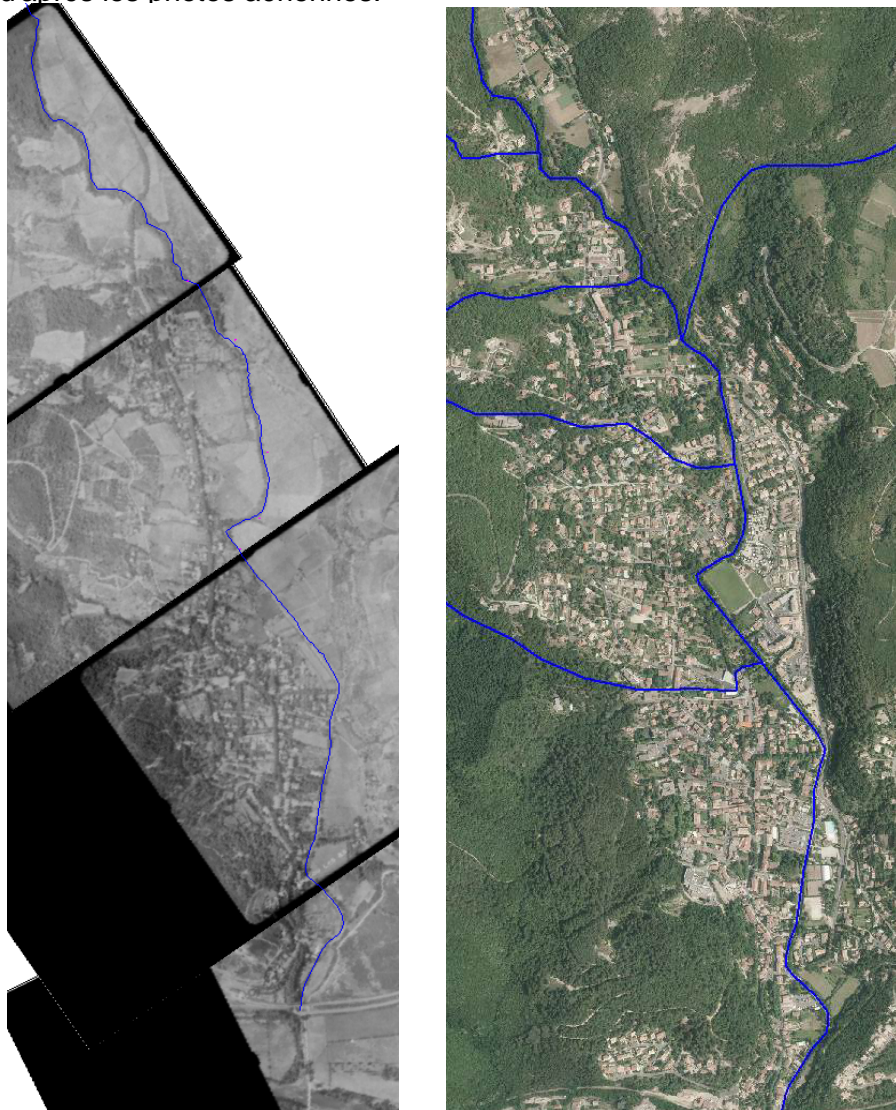


Figure 20 : évolution de l'urbanisation entre 1947 et 2012 sur la partie urbaine de Lamalou-les-Bains

5.3 SYNTHÈSE DES APPORTS

5.3.1 PRODUCTION PRIMAIRE (VERSANTS)

La zone de gorges, entre le barrage de la Biconque et le seuil à l'amont du pont Bardejan, est une source très importante de production primaire : Le Bitoulet s'écoule entre des falaises de schistes (cf. carte géologique de la zone en question, figure insérée en page suivante), qui se délitage et constituent un apport important de matériaux grossiers à la rivière.

Ces versants sont très minéraux, localement peu boisés, ce qui renforce le rôle de ces falaises dans la production de matériaux. Sans avoir la connaissance du site avant la crue, nous apportons l'hypothèse de possibles phénomènes d'effondrements par ruissellement des versants et d'érosion directe du cours d'eau lors de la crue de septembre 2014, qui auraient entraîné la chute des arbres alors présents sur les versants et une production de matériaux. En attesteraient de la présence de pans de falaises à nue et la production d'embâcles très importante lors de cet événement (voir chapitre spécifique).



Production primaire dans la zone de gorge entre la Biconque et Lamalou-les-Bains

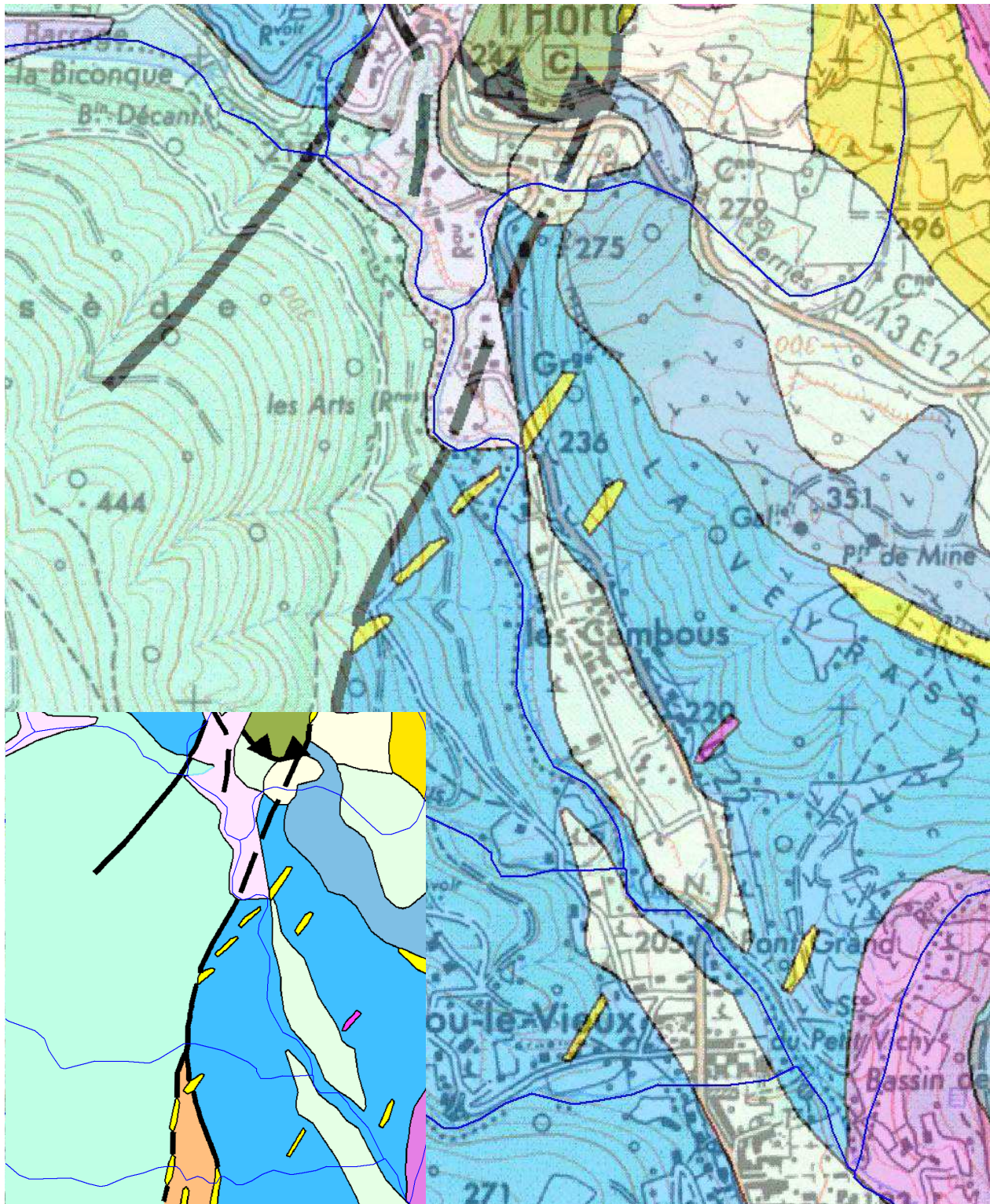






Figure 21 : Carte géologique de l'amont de la traversée urbaine (zone de gorges)

Sur la partie aval des gorges, la production primaire est limitée, en raison d'une part de :

- la topographie (élargissement de la vallée alluviale, versants moins abrupts),
- la géologie : traversée d'une langue de marne de part et d'autre de la vallée alluvionnaire ;
- l'occupation des sols : la zone est très urbanisée sur les deux versants du Bitoulet ;
- de la déconnexion physique des versants au lit mineur en raison de la chenalisation et de l'emmurement des berges du Bitoulet.



Faible connexion avec les versants

- | | | | |
|---|--|---|---|
|  | Grès massifs plus ou moins carbonatés (Induen) |  | Alluvions argilo-sableuses à graviers et galets, limons des terrasses holocènes |
|  | Marnes rouges et vertes (Induen) |  | Blocs, galets et graviers de calcaires siliceux, de grès, de quartz, de lydienes, de porphyrites et de débris basaltiques (Terrasses glaciaires Würm) |

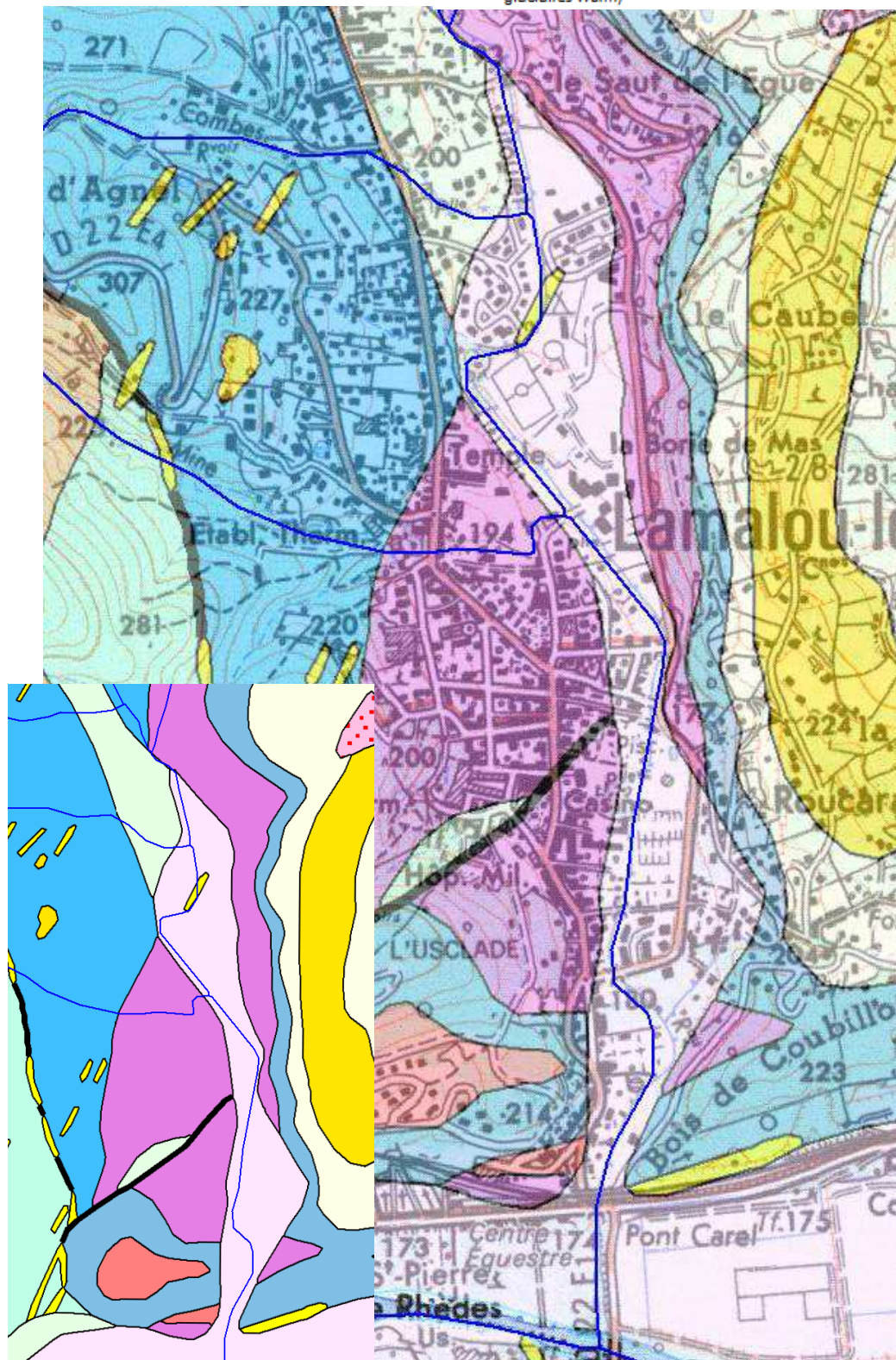


Figure 22 : Carte géologique de la traversée urbaine

5.3.2 PRODUCTION PRIMAIRE (AFFLUENTS)

6 affluents sont recensés sur la carte IGN sur la zone d'étude.

Quatre sont situés dans la zone de gorges :

- Ruisseau des Terriès (Rive gauche),
- Ruisseau de Rectalous (Rive droite),
- Ruisseau de la Veyrasse (Rive gauche),
- Ruisseau de Saint-Vital (Rive droite),

Deux sont situés au niveau de la traversée urbaine :

- Ruisseau de Combes (Rive droite),
- Ruisseau de la Mine (Rive droite).

Les affluents rive droite traversent les terrains schisteux du Bitoulet. Cependant, ils semblent moins "enfoncés" dans la roche et présentent des versants boisés. Aucun cône de déjection n'a été identifié au niveau des confluences avec le Bitoulet. **L'apport de matériaux en provenance des affluents semble faible.**



Ruisseau de la Combe



Ruisseau des Terriès

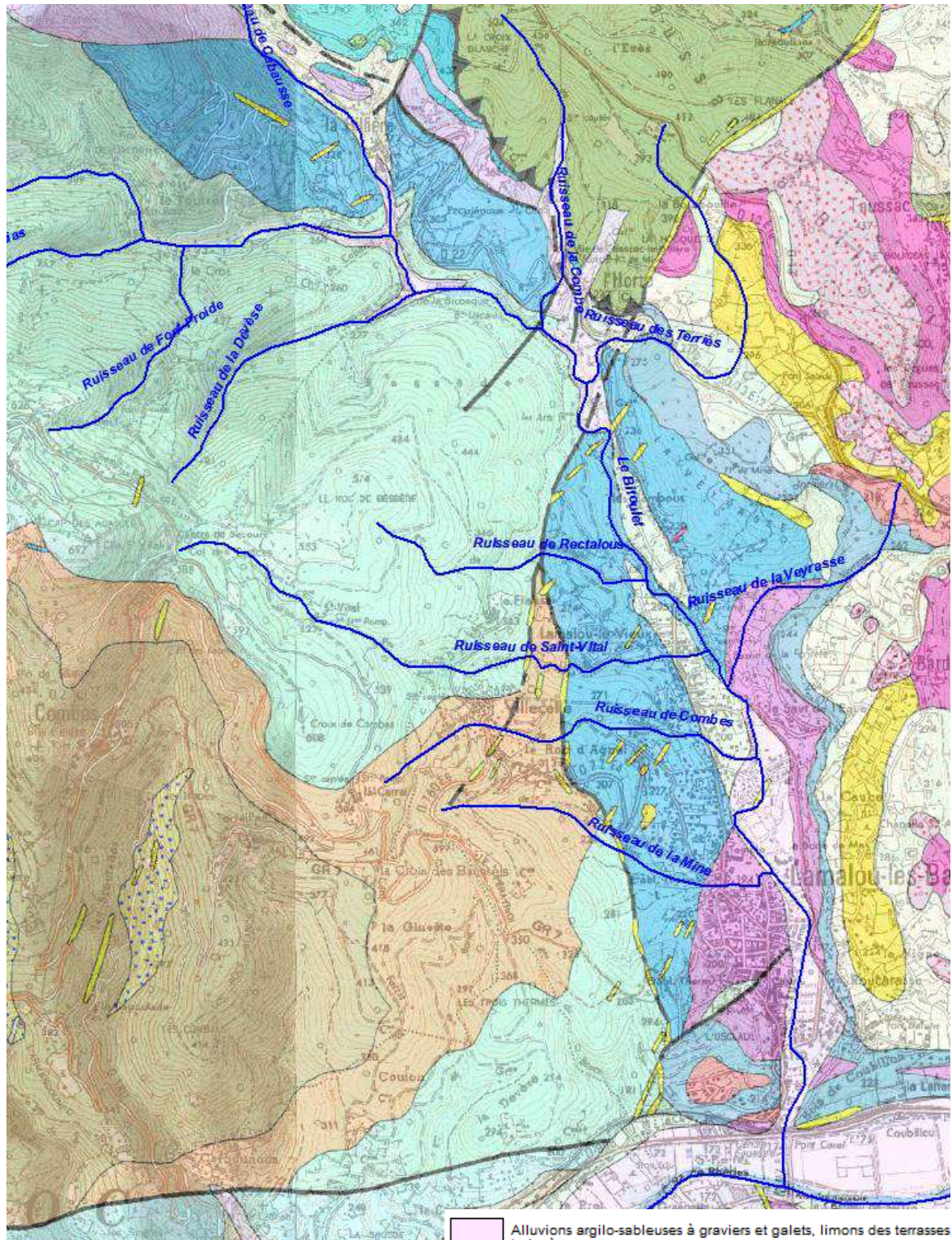


Ruisseau de Saint-Vital



Ruisseau de Combes

Confluences de certains affluents avec le Bitoulet



- Grès à clastes à passées de schistes noirs ; métacrinérites de Lamalou - Ensemble du groupe de Cabardès (Cambro-ordovicien probable)
- Micaschistes quartzo-feldspathiques (faciès "demi-deuil") de Sénas - le Cros - Série de Lamalou - Saint-Gervais (Cambro-ordovicien probable)
- Micaschistes carbonatés à niveaux graphiteux - Ensemble du groupe de Saint Pons (Cambro-ordovicien probable)

- Alluvions argilo-sableuses à graviers et galets, limons des terrasses holocènes
- Blocs, galets et graviers de calcaires siliceux, de grès, de quartz, de lydienes, de porphyrites et de débris basaltiques (Terrasses glaciaires Würm)
- Grès massifs plus ou moins carbonatés (Induen)
- Marnes rouges et vertes (Induen)

Figure 23 : Carte des affluents du Bitoulet sur la zone d'étude + fond géologique

5.3.3 PRODUCTION SECONDAIRE : EROSION LATERALE

Au niveau des gorges, il n'y a pas à proprement parlé d'érosions de berges : les falaises de schistes ne sont pas à proprement parler "érodées" par le cours d'eau, mais se délitent au grès des intempéries. Nous avons considéré qu'il s'agissait d'une production primaire et donc traité au paragraphe précédent.

Dans la partie aval, l'analyse des érosions de berges ne peut se faire sans parallèle avec le relevé des protections de berges : comme le montre la carte insérée en page suivante, le Bitoulet présente des berges minéralisées sur la quasi-intégralité de la traversée urbaine. Il s'agit soit de murs bétonnés, soit de murs maçonnés, soit d'enrochements, libres ou liaisonnés.

Quelques érosions ont été relevées à la sortie des gorges, entre le pont de l'avenue de Bardejan et la passerelle du chemin de Verdale (camping).

La zone de berge érodable représente un linéaire d'environ 500 m de cours d'eau, soit 1 km de berge. Les érosions actives relevées représentent un cumul de 300 m de berge.

La production en matériaux grossiers en lien avec ces érosions est de plus faible : les terrains sont en majorité constitués de matériaux terreux avec une matrice de pierres qui représente environ 20 à 30 % du volume. Ces matériaux s'apparentent à des remblais exogènes (qualité des matériaux et hauteur de berge largement supérieure à la hauteur de berges naturelles situées à l'amont de la zone d'érosions). Seul le socle de la berge est constitué de matériaux grossiers.



Matériaux constitutifs des berges sur le linéaire érodé

L'érosion des berges ne représente pas en l'état actuel une source de matériaux dans le lit du Bitoulet.

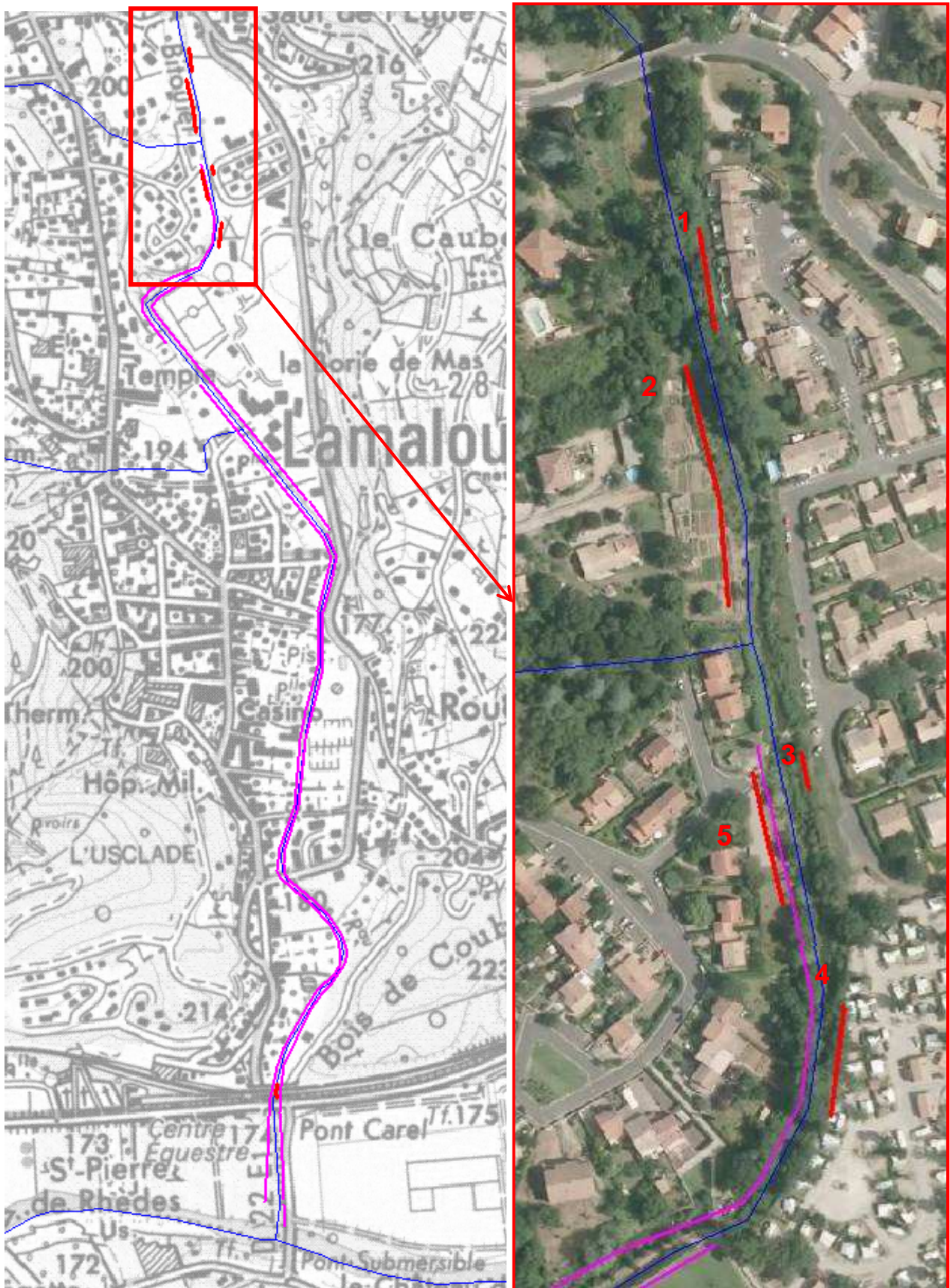


Figure 24 : Cartographie des protections de berges et des érosions dans la traversée de Lamalou-les-Bains

5.4 PROFILS EN LONG

Nous disposons de trois sources de données topographiques :

- Un relevé topographique compilé datant de décembre 2014 : ce fichier (142093) présente des points en lit mineur qui permettent de tracer le profil en long du Bitoulet depuis le pont du Saut de l'Egue jusqu'au rond-point du Pont Carel, incluant toute la traversée urbaine de Lamalou-les-Bains.
- Ce fichier intègre la topographie du PPRi, datant de 2002-2003 environ, qui présente plusieurs profils en travers antérieur à la crue de septembre 2014 notamment. **Il est donc impossible en l'état de discerner la topographie de 2014 de celle du PPRi, et donc de juger de la mobilité du lit mineur (incision, exhaussement, largeur du lit mineur etc.).**
- Un relevé topographique d'avril 2015 au niveau du barrage de la Biconque, qui permet d'estimer la pente moyenne du cours d'eau dans la zone de gorges.

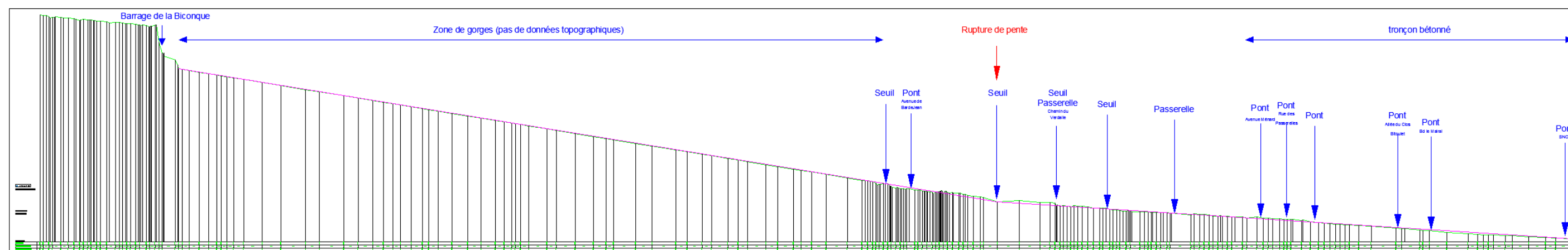


Figure 25 : Profil en long général partiellement interpolé depuis le barrage de la Biconque jusqu'au rond-point Carel

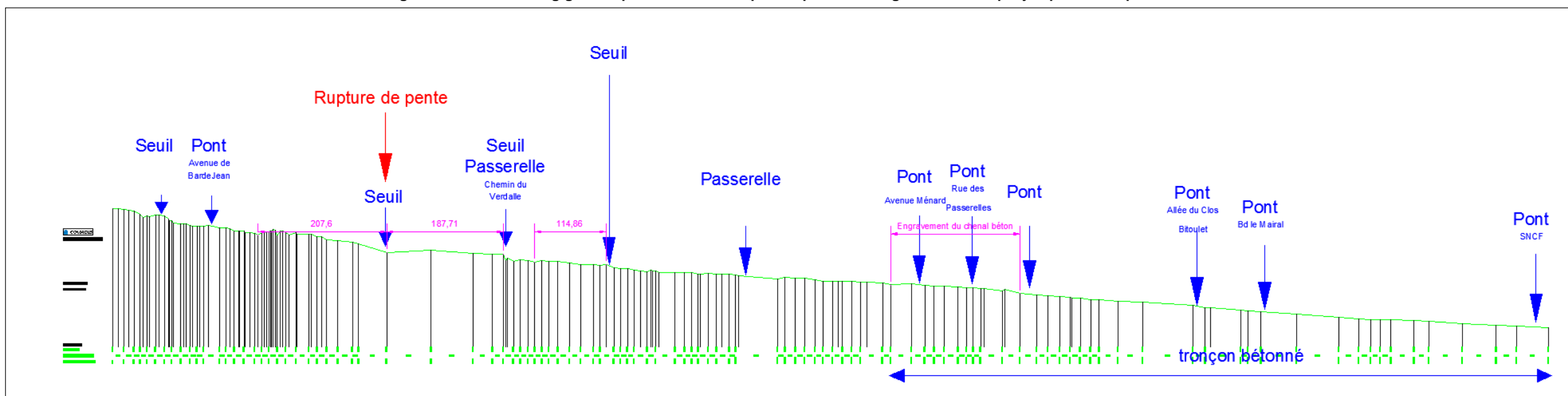


Figure 26 : Profil en long : zoom sur la partie aval (traversée urbaine)

L'analyse du profil en long fait apparaître les observations suivantes :

- La pente du cours d'eau est régulière depuis le pont jusqu'au premier seuil (passerelle de Vardalle). Ainsi, le profil en long est régulier entre la partie naturelle et la partie bétonnée. Il en est de même entre l'aval du seuil de la Biconque et la rupture de pente identifiée.
- On constate quelques zones d'exhaussement par rapport à la pente moyenne du cours d'eau. Ces variations fines sont néanmoins difficiles à prendre en considération, dans la mesure où le relevé topographique n'avait pas pour finalité la réalisation d'un profil en long : les points relevés ne sont donc pas forcément les points les plus bas du chenal. Il peut s'agir d'atterrissements sur une partie du lit mineur et non pas sur toute la largeur du chenal.
- Au niveau de la partie bétonnée, la zone d'exhaussement à l'amont peut être mise en lien avec un engrèvement important du chenal.
- A l'amont de chaque seuil, on constate la présence d'un remous solide d'environ 150 à 200 m de longueur en fonction de la hauteur du seuil et de la pente du cours d'eau, excepté sur le seuil le plus à l'amont, dont l'effet sur le profil en long semble très localisé. L'effet de ces seuils sera discuté plus en détail dans le chapitre spécifique relatif à la continuité écologique.

D'après l'analyse du profil en long, les deux zones de pentes distinctes identifiées ont pour valeur :

- Du seuil Rue Caubel à l'aval du barrage de la Biconque: **1,63 %**
- Du seuil (lotissement Rue du Caubel) au pont SNCF à l'aval de Lamalou-les-Bains : **0,65 %**

5.5 PROFIL EN TRAVERS

Nous disposons des profils en travers réalisés dans le cadre du PPRi. Les profils sont consultables dans les annexes de l'étude.

Cependant, nous ne disposons pas de relevés nous permettant de juger finement de l'évolution du profil en travers suite à la crue de septembre 2014.

Nous pouvons néanmoins estimer de visu l'évolution des profils en travers par rapport aux profils topographiques disponibles dans la zone érodée, à savoir :

- Un élargissement probable du lit mineur au niveau des érosions,
- Une verticalisation des berges.

Il est néanmoins délicat de juger de l'évolution de la hauteur de berge sans relevé précis.

5.6 STOCK EN LIT MINEUR, EXHAUSSEMENT ET INCISION DU LIT

Compte tenu de l'importance des atterrissements en sus du matelas alluvionnaire, ils n'ont pas fait l'objet d'un relevé précis.

Le stock de matériau alluvial en lit mineur est important tout au long du linéaire d'étude, excepté dans la partie bétonnée qui a fait l'objet d'un entretien par la communauté de commune suite aux événements de septembre 2014.

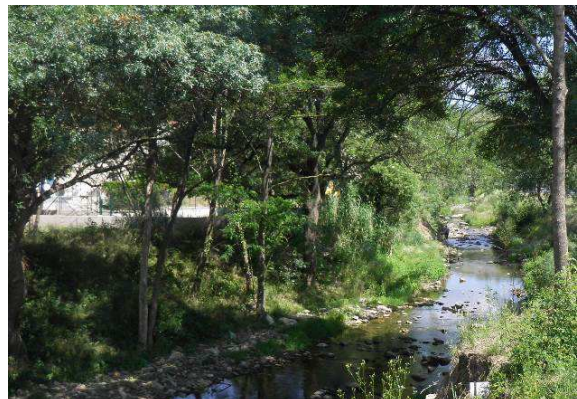


Omniprésence du matelas alluvionnaire dans la traversée urbaine et à la sortie des gorges

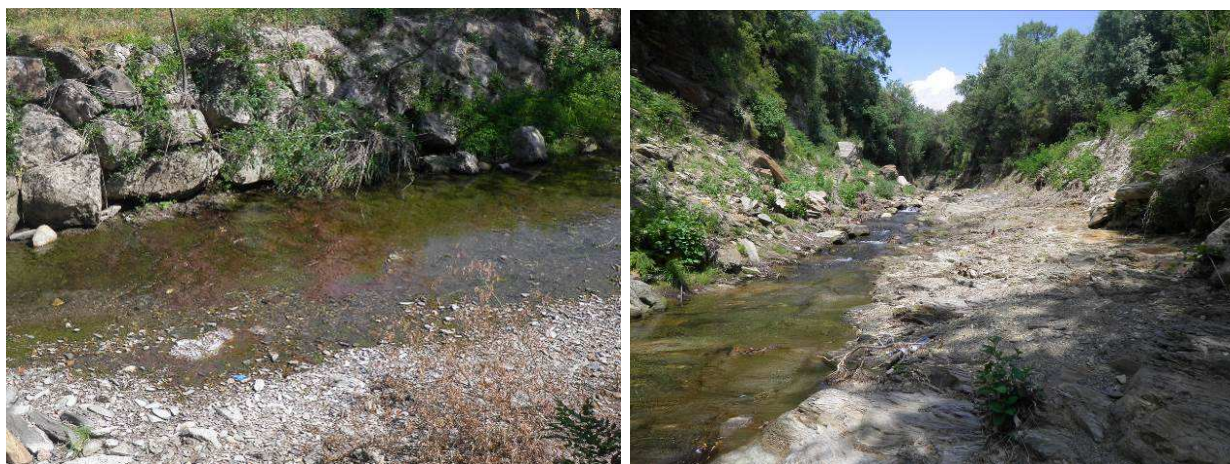
Nous n'avons observé ni indices d'incision ni indices d'exhaussement sur le linéaire d'étude. Seul un relevé de profil en long nous permettrait de statuer à ce sujet.

Nous notons néanmoins les points suivants :

- Pas de déchaussement de végétation,
- Le substratum n'est affleurant que ponctuellement, dans la traversée des gorges (plaques de schistes au niveau de zones d'accélération du courant) et une zone de marnes dans la traversée urbaine.



Enracinement des arbres en place bien calés par rapport au fil d'eau



Affleurement ponctuel de marne à l'aval du seuil de la passerelle du Verdale et plaques de schistes dans les gorges

Nous manquons néanmoins d'éléments sur l'épaisseur du matelas alluvial, qui, excepté ponctuellement, semble à vue d'œil conséquent, et sur l'évolution de cette épaisseur avant/après la crue.

A noter les effets de la crue dans la partie bétonnée :

- Désordres importants dans la partie terminale de la zone bétonnée :



Lit bétonné endommagé et érosion de berge à l'arrière du chenal bétonnée à l'aval de la zone d'étude

- Accumulation de matériaux dans le chenal d'étiage ("reste" des matériaux évacués par les services techniques), sur un linéaire cumulé estimé à 300 m :



Figure 27 : Localisation indicative du chenal d'étiage obstrué



Chenal d'étéage béton obstrués par des sédiments

5.7 CONCLUSION SUR LE FONCTIONNEMENT MORPHOLOGIQUE DU BITOULET

5.7.1 CONCEPTS FONDAMENTAUX

L'équilibre sédimentaire d'un cours d'eau est atteint lorsque la charge de matériaux qu'il peut transporter (quantité, granulométrie...) est en adéquation avec l'énergie hydraulique qu'il développe (fonction du débit liquide, de la pente). C'est ce que retranscrit la balance de Lane, schématisée ci-dessous :

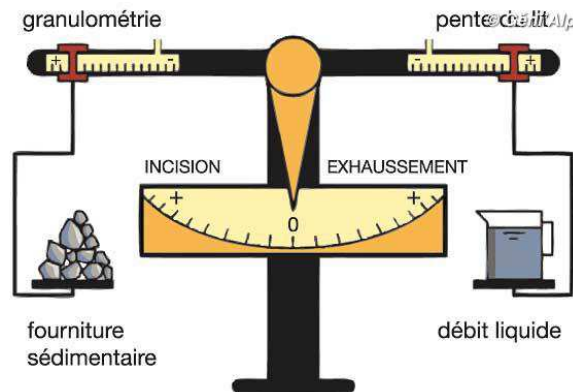


Figure 28 : Balance de Lane

De nombreux paramètres influent dans l'ajustement de ces variables d'entrée tels que l'imperméabilisation des sols, la végétation des berges et des versants, l'hydrologie, ...

Avec la variation de ces données d'entrée, le cours d'eau opère un ajustement permanent de sa morphologie, par des processus d'érosion-dépôts. Des variations importantes peuvent aboutir à des ajustements en profondeur de la morphologie d'un cours d'eau (largeur, profondeur, tracé en place, style fluvial, sinuosité etc). C'est ce qu'on appelle un cours d'eau en "équilibre dynamique".

Certains facteurs, souvent anthropiques (recalibrage, curages, stabilisation de berges...), parfois naturels (hydrologie...), sont à l'origine de modifications telles qu'il ne s'agit plus d'un réajustement du cours d'eau mais de véritables dysfonctionnements, qui ont alors des conséquences plus ou moins irréversibles sur le fonctionnement morphologique globale du système (répercussions amont – aval) et sur de nombreux compartiments transversaux (biologique – faune-flore, qualité de l'eau, ...).

A noter que les enjeux humains s'en retrouvent eux-mêmes confrontés : les phénomènes d'incisions, d'érosions ne sont plus réversibles à une échelle de temps très grande et les infrastructures s'en retrouvent menacées.

Enfin, en dernier lieu, il est impératif d'avoir à l'esprit qu'un problème résolu ponctuellement par des méthodes lourdes (bétonnage du lit, par exemple) peut avoir des répercussions en cascades sur l'ensemble du système hydrographique, y compris les affluents et les cours d'eau de rang supérieur (l'Orb, dans notre cas).

5.7.2 SYNTHÈSE DU FONCTIONNEMENT MORPHOLOGIQUE DU BITOULET

Le transit sédimentaire dans la partie naturelle du Bitoulet semble présenter un équilibre dynamique satisfaisant malgré l'évènement exceptionnel de septembre 2014 : le stock en transit est important tout au long du linéaire malgré un évènement exceptionnel qui a eu un effet de chasse certain sur les alluvions. La production primaire a pu compenser l'augmentation brutale de la charge hydraulique, de sorte que le débit solide s'est retrouvé largement augmenté sans incision notable du lit mineur.

A l'inverse aucune accumulation problématique vis-à-vis d'enjeux humains n'a été relevée, nonobstant les matériaux enlevés par les services techniques suite à la crue dans la partie bétonnée.

Les berges naturelles se sont comportées de deux manières différentes :

- les berges présentant une hauteur modérée (1 à 3 m), en pente douce, et éventuellement végétalisées ne présentent pas de désordres particuliers. Ce type de berges sont peu présentes, cantonnées entre la sortie des gorges et les premiers lotissements ;
- les berges présentant une hauteur importante (>3m), remblayés de matériaux inappropriés, ont été le fruit de plusieurs érosions de berge.

Les protections de berges ont parfaitement joué leur rôle sur l'ensemble du linéaire concerné. Aucune répercussion en terme morphologique n'est apparue, compte tenu du fait que ces protections se succèdent de manière continue jusqu'à la confluence avec l'Orb. Si répercussion dynamique il y a, c'est plus vis-à-vis de l'Orb qu'il serait intéressant de l'estimer (augmentation des vitesses d'écoulements, donc de l'énergie au niveau de la confluence).

De même, le bétonnage du fond du lit ne semble pas avoir de répercussions sur l'amont du Bitoulet : la pente du cours d'eau est telle que les influences se répercutent plutôt de l'amont vers l'aval (érosion ou incision progressive) que l'inverse (érosion ou incision régressive).

Ainsi, on peut dire que le Bitoulet présente un équilibre satisfaisant dans sa partie naturelle. A l'inverse, la partie bétonnée, y compris les berges artificialisées par des enrochements ou autres protections, ne permet plus de réajustement dynamique, mais aucune répercussion n'est visible à l'échelle du Bitoulet dans la mesure où l'artificialisation concerne le dernier kilomètre de cours d'eau jusqu'à l'embouchure avec l'Orb. A noter néanmoins les premiers signes de désordres qui sont apparus dans la partie terminale de la zone bétonnée, et qui présagent de dysfonctionnements croissants en l'état. Ils sont le témoin d'une certaine vulnérabilité des aménagements en dur face à un système nécessitant une certaine plasticité pour réajuster son équilibre dynamique.

Les cas particuliers des seuils, y compris le barrage de la Biconque, sont traités spécifiquement dans le paragraphe sur la continuité écologique. Ils n'ont pas d'effet généralisé sur le tronçon étudié.

5.8 VULNERABILITE DES ENJEUX FACE AUX EROSIONS

Nous avons vu qu'en l'état actuel, seul le linéaire compris entre le lotissement Rue des Yeuses et la passerelle du Chemin du Verdale présentait une problématique d'érosion de berge prononcée. Les enjeux en présence face aux érosions relevées sont, d'amont en aval (voir localisation Figure 24 p.56):

1. Rive gauche : lotissement de la Rue des Yeuses (40 m):

Les jardins en arrière de maisons sont directement menacés par une érosion d'environ 3-4 m de hauteur et d'un fruit supérieur à 1/1. Les maisons sont situées à environ 6 m du front d'érosion. Les matériaux sont de type argilo-limoneux, mélangés à de nombreux remblais, ce qui rend d'autant plus instable le terrain.

Des travaux d'enrochements ont été réalisés depuis.



2. Rive droite : Jardins potagers (90 m) :

Erosion active, qui s'étend sur l'ensemble des jardins, jusqu'à la confluence avec le Ruisseau de Combes. Initialement, la berge était abrupte et sans aucune ripisylve structurante. La photo ci-contre présente une vue de juin 2013, sur laquelle on aperçoit une haie qui a disparue suite à la crue (source : Google Street).

A noter que les enjeux structurants sont situés bien en retrait (habitations à 25-30 m du front d'érosion).

Un redéploiement de ripisylve permettrait à la fois de stabiliser le talus sur le long terme et de créer de l'habitat et de l'ombrage au cours d'eau.



3. Rive gauche, le long de la Rue de Borie (10 m)

Cette érosion est située à l'aval immédiat d'un petit seuil qui semble protéger une canalisation. Les terrains sont constitués de terre mélangée à une matrice pierreuse, le tout étant peu cohésif. L'absence de végétation ainsi que la hauteur des berges (environ 3 m) en font une berge facilement érodable.

A l'arrière immédiat de l'érosion, se trouve la voirie communale. Un tampon a été mis à nu, des plantations arrachées.

Une bande enherbée de 8 m de large environ sépare la voirie du pied de berge.

Une stabilisation de berges en techniques végétales semblerait indiquée afin d'éviter tout nouveau désordre.



4. Rive gauche, le long du camping (40 m)

Cette érosion est dans le "prolongement" de la précédente, bien que non contiguë. Elle présente les mêmes caractéristiques.

De la disponibilité foncière est présente au niveau du camping.

Une stabilisation de berges en techniques végétales semblerait indiquée afin d'éviter tout nouveau désordre.



5. Rive droite, aval seuil (50 m)

cette érosion se situe entre l'enrochement au niveau du seuil et une zone plus boisée, présentant es berges a priori plus stables.

Les matériaux constitutifs de la berge sont de mauvaise qualité : il s'agit de remblais de gravats mélangés à une matrice terreuse. L'absence de végétation (présence de canne de Provence) l'ont rendu particulièrement vulnérable à l'érosion.

A l'arrière de berge, une plateforme de terre a priori inutilisée (pas de stockage ni d'activité lors de notre passage ni sur les prises de vue aériennes disponibles).

A noter la présence d'un tractopelle lors de notre passage.



Il nous apparaît essentiel de traiter l'ensemble de la zone d'un seul tenant, dans le cadre d'un projet global sur l'ensemble des deux berges entre le lotissement de la Rue des Yeuses et la passerelle du chemin du Verdale.

6 CONTINUITÉ ÉCOLOGIQUE

6.1 LA NOTION DE CONTINUITÉ ÉCOLOGIQUE

La continuité écologique d'un cours d'eau consiste à permettre :

- la libre circulation des organismes vivants (poissons...) et leur accès aux zones de reproduction, de croissance, d'alimentation, ou d'abri ;
- Le transport naturel des sédiments de l'amont à l'aval d'un cours d'eau ;
- Le bon fonctionnement des lieux de reproduction, d'alimentation, de repos, souvent situés au sein des végétaux aquatiques ou sous les blocs de pierre au fond des cours d'eau.

Il s'agit donc d'une continuité longitudinale, c'est-à-dire amont-aval ou aval-amont.

L'extension directe de la continuité écologique appliquée aux cours d'eau réside dans le concept de "trame verte et bleue" : il s'agit de corridors biologiques qui permettent le déplacement des organismes vivants d'un réservoir biologique à un autre. Une continuité écologique fonctionnelle à l'échelle d'un cours d'eau assure donc la fonction d'une "trame bleue". On peut néanmoins l'élargir à l'état des berges et de la ripisylve, qui assure également une continuité et un rôle de corridor biologique.

6.2 LE CONTEXTE RÉGLEMENTAIRE

L'article L214-17 du Code de l'environnement définit deux listes de cours d'eau :

- Une liste 1 concerne des cours d'eau en très bon état écologique, ces cours d'eau nécessitant une protection complète des poissons migrateurs amphihalins (Alose, Lamproie marine et Anguille sur le bassin Rhône-Méditerranée). Ainsi, sur les cours d'eau ou tronçons de cours d'eau figurant dans cette liste, **aucune autorisation ou concession ne peut être accordée pour la construction de nouveaux ouvrages s'ils constituent un obstacle à la continuité écologique** (cf article R214-109 du code de l'environnement).
- Une liste 2 concerne les cours d'eau ou tronçons de cours d'eau nécessitant des actions de restauration de la continuité écologique (transport des sédiments et circulation des poissons). **Tout ouvrage faisant obstacle doit y être géré, entretenu et équipé selon des règles définies par l'autorité administrative**, en concertation avec le propriétaire ou, à défaut, l'exploitant. Ces obligations s'appliquent à l'issue d'un délai de cinq ans après publication des listes.

En Rhône Méditerranée, l'arrêté préfectoral du 19 juillet 2013 établit la liste 1 et la liste 2 des cours d'eau au sens de l'article L214-17. **Le Bitoulet n'est pas concerné par ce classement.**

6.3 LE CONTEXTE PISCICOLE

Après contact avec la fédération de la pêche de l'Hérault, il existe peu de données sur le bassin versant. Récemment, trois pêches ont été réalisées récemment sur le Bitoulet :

- Une pêche au printemps 2015, pêche de sauvegarde avant les travaux de démolition du barrage de la Biconque. Cette pêche a été réalisée à l'aval du barrage, selon la méthode De Lury afin de permettre une exploitation des données (en cours).
- Une pêche à l'amont du barrage en octobre 2015,
- Une pêche sur un affluent Rive gauche.

Les données de ces pêches n'ont pas été fournies au moment du rendu de cette étude.

6.4 LA CONTINUITÉ ÉCOLOGIQUE SUR LE BITOULET

Nous identifions deux facteurs d'altération majeurs de la continuité écologique sur le Bitoulet :

- La zone aval bétonnée, qui représente une rupture majeure entre la partie amont du bassin et l'Orb,
- La présence de seuils,

Nous allons traiter point par point de manière succincte les effets de chaque ouvrage sur la continuité écologique.

Remarque : La franchissabilité piscicole est estimée vis-à-vis de la truite. Elle nécessiterait un réajustement en cas de prise en considération d'espèce plus exigeantes (cyprinicoles d'eau vive, petits sujets...).

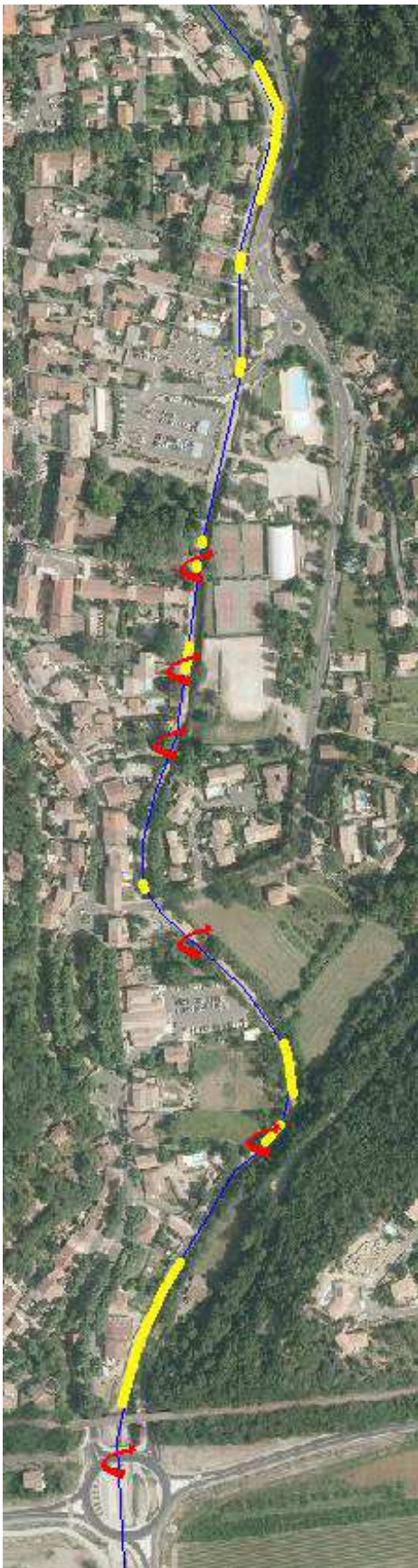
6.4.1 TRONÇON BETONNE AVAL

Cet aménagement, datant des années 1960, présente des effets majeurs dans l'altération de la continuité écologique au sens strict mais également du rôle de corridor biologique du Bitoulet :

- Absence d'habitats aquatiques et terrestres,
- Impossibilité pour les espèces aquatiques et en particulier piscicole de franchir cette zone entre l'Orb et l'amont du réseau hydrographique,
- Le transit sédimentaire est moins affecté, dans la mesure où la production primaire est assurée par les zones amont (voir diagnostic morphologique ci-avant). Les matériaux transit donc jusqu'à l'Orb au sein de la traversée bétonnée.

La présence d'un chenal d'étiage continu entre la partie naturelle et la sortie de Lamalou-les-Bains dans la partie bétonnée permettrait un transit des populations : d'une largeur de 50 cm environ, il permet une concentration des écoulements, donc un tirant d'eau suffisant pour permettre le déplacement des poissons. Nous avons pu constater la présence d'alevins au sein du chenal d'étiage de la partie bétonnée, dont la qualité de l'eau, *de visu*, semble bonne (eau limpide). Cependant, plusieurs facteurs altèrent la continuité écologique au sein même du chenal d'étiage bétonnée :

- L'obstruction complète du chenal par des alluvions et des embâcles de type parpaings béton. Ces bouchons au sein du chenal d'étiage entraînent l'étalement de l'eau empêchant toute circulation piscicole ;
- La variation de hauteur d'eau : le tirant d'eau varie tout au long du linéaire, soit en lien avec les matériaux présents, soit en lien avec la géométrie même du chenal ;
- La présence de "mini-seuils" au sein du chenal d'étiage : une succession de petits seuils ont été observés, qui peuvent être infranchissables pour un certain nombre d'espèces, d'autant plus qu'ils se cumulent souvent avec les deux problématiques précédentes, par rétention sédimentaire à l'amont du seuil,
- L'absence de ce chenal d'étiage sur la partie aval entre l'Orb et Lamalou-les-Bains : les écoulements sont étalés sur un fond de lit bétonné, ne permettant pas le déplacement des poissons.



Fond du lit bétonné à la confluence avec l'Orb : étalement de la lame d'eau



Exemple de seuils au sein du chenal d'étiage

Figure 29 : Localisation des seuils sur le chenal d'étiage bétonné et des secteurs comblés de matériaux

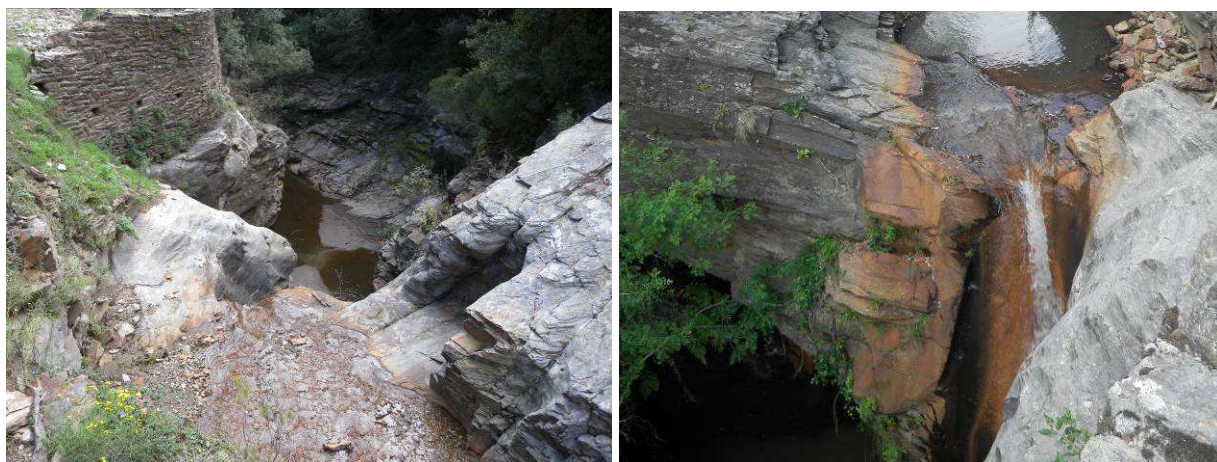
6.4.2.1 Seuil naturel à l'aval de l'ancien barrage de la Biconque

La destruction du barrage de la Biconque ne permet pas de rétablir une continuité piscicole à la montaison : en effet, la présence d'un saut naturel de plusieurs mètres de hauteur juste à l'aval est lui-même infranchissable.

Malgré une relative transparence au transit sédimentaire (barrage quasi-comblé), son effacement facilite néanmoins le transit sédimentaire, assurant une continuité totale à cet égard. De plus, la vidange des sédiments stockés, évalués à 100 000 m³ dans le dossier réglementaire ISL/Aquascop seront autant de matériaux restitués au système, et notamment au fleuve Orb. Il s'agit néanmoins majoritairement de sédiments fins.



Barrage de la Biconque avant et après dérasement



Seuil naturel à l'aval de l'ancien barrage

6.4.2.2 Seuil 5 (aval pont Grand)

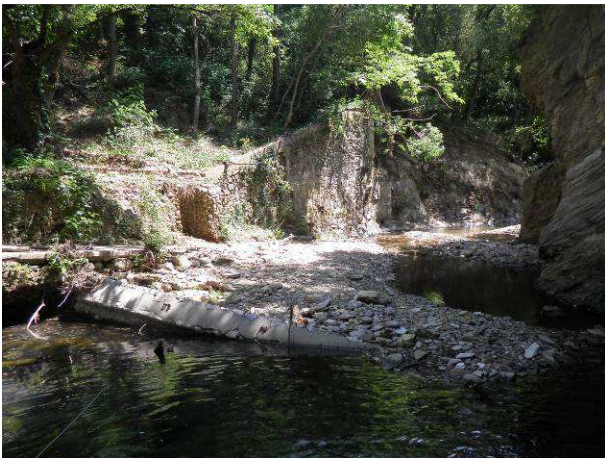
Ce seuil de 1,5 m de hauteur environ constitue un obstacle au franchissement piscicole.

Il ne constitue plus un obstacle au transit sédimentaire (retenue comblée). Il subsiste néanmoins une retenue d'eau d'une dizaine de mètres de long environ.

Aucun usage ne semble associé à cet ouvrage : les berges, aménagées sur les deux rives, semblent abandonnées et les parements bétons en mauvais état.



Seuil n°5 et plan d'eau à l'amont



Aménagement rive droite et rive gauche abandonnés

6.4.2.3 Seuil 4 (amont Pont de Bardejean)

Ce seuil de 1,5 m de hauteur environ constitue un obstacle au franchissement piscicole.

Il ne constitue plus un obstacle au transit sédimentaire (retenue comblé). Il subsiste néanmoins une retenue d'eau d'une dizaine de mètres de long environ.

Aucun usage ne semble associé à cet ouvrage.



Seuil n°4 et plan d'eau à l'amont

6.4.2.4 Seuil 3 (Rue de la Borie)

Ce seuil présente une hauteur modérée (environ 50 cm) mais une longueur importante (environ 6 m de longueur) avec une faible hauteur de la lame d'eau et une accélération des vitesses sur le radier béton ainsi constitué. Il est considéré comme temporairement franchissable, en hautes eaux.

Il ne constitue pas un obstacle au transit sédimentaire. Il est situé dans un secteur sensible aux érosions de berges (cf. § 5.8), et une encoche d'érosion importante se situe à l'aval immédiat rive gauche.

Compte tenu de la présence d'un tampon en rive gauche et d'une protection de berge en rive droite, il semble que cet ouvrage béton ait été construit en protection d'une canalisation.



Seuil n°3

6.4.2.5 Seuil 2 (amont passerelle du Verdale)

Ce seuil présente une hauteur d'environ 50 cm. Il est dans un état dégradé : l'eau passe intégralement sous l'ouvrage, qui est lié à la protection de berge en enrochement liaisonné sous la passerelle, le tout étant affouillé. Il est considéré comme franchissable, en condition de lame déversante et de hauteur d'eau suffisante au-dessus de l'ouvrage. Il ne constitue pas un obstacle au transit sédimentaire.

L'usage associé n'a pas été identifié : canalisation ? blocage du profil en long en lien avec la passerelle ?



Seuil n°2

6.4.2.6 Seuil 1 (au droit du stade)

Ce seuil, d'une hauteur d'environ 1 m, présente une longueur de 5 m en pierres maçonnées. Il est considéré comme infranchissable à la faune piscicole. Totalement comblé, il ne représente pas un obstacle au transit sédimentaire.

Aucun usage associé n'a été identifié.



Seuil n°1

6.4.3 CONCLUSION SUR LA CONTINUITÉ ÉCOLOGIQUE

D'un point de vue sédimentaire, le Bitoulet ne présente pas de dysfonctionnement notable, d'autant plus que le dérèglement du barrage de la Biconque va dans le sens d'un transit amélioré.

Du point de vue de la circulation piscicole, il est à l'inverse totalement cloisonné, d'une part entre l'Orb et la partie bétonnée, puis plus à l'amont entre les différents obstacles physiques qui ne permettent pas une remontaison aisée vers les sites de frayères identifiés dans la partie des gorges.

7 PROPOSITIONS D'AMENAGEMENTS

7.1 OBJECTIFS

Les aménagements projetés poursuivent différents objectifs :

- La protection des biens et des personnes,
- Les possibilités de renaturation du Bitoulet,
- De meilleures anticipations des événements et gestion de crise (prévision des crues et alerte de la population).

Les propositions d'actions à mettre en œuvre sont détaillées dans les paragraphes suivants.

7.2 ENTRETIEN DES COURS D'EAU

La maîtrise des embâcles, facteur aggravant du risque inondation, est un enjeu majeur identifié sur le Bitoulet. Pour le traiter, une action coordonnée et continue des communes du bassin versant sur les cours d'eau est nécessaire.

Il est nécessaire de veiller dans le cours d'eau :

- à l'absence de troncs d'arbres, embâcles, atterrissements en particulier à proximité des ouvrages,
- au bon entretien de la végétation des berges et des haies perpendiculaires au sens d'écoulement.

Les frais liés à cet entretien sont réputés inclus dans les coûts de fonctionnement du syndicat de bassin versant.

Il est préconisé :

- un passage de reconnaissance sur l'ensemble des linéaires de gorges (de l'amont du pont de Bardejean jusqu'à l'ancien barrage) ainsi qu'au niveau du piège à embâcles de fréquence biennale + suite à chaque crue;
- une intervention mécanique / manuelle en fonction des volumes en place et de la localisation des embâcles.

Concernant la gestion des atterrissements : les interventions doivent privilégier l'arrachage de la végétation ligneuse et semi-ligneuse dès son apparition, ainsi que des opérations de scarification en cas de stabilisation importante des sédiments par une végétation herbacée (graminées, héliophytes). Ces interventions sont préconisées dans la partie urbaine depuis le pont de Bardejean jusqu'à la confluence avec l'Orb.

En cas d'accumulation importante de matériaux à l'amont d'ouvrage, il est préconisé le curage de ces derniers avec remise en place à l'aval afin de conserver la charge solide nécessaire à l'équilibre sédimentaire de l'hydrosystème. En fonction de la position de ces matériaux, ils pourront être remis en place dans le Bitoulet lui-même, ou dans l'Orb si les zones aval sont considérées comme trop sensibles au niveau du Bitoulet.

Remarque : toute intervention mécanique dans le lit mineur doit faire l'objet d'une procédure de type déclaratif à minima auprès des services de la DDTM de l'Hérault.

7.3 ENTRETIEN DES OUVRAGES DE PROTECTION

La partie aval du Bitoulet, bétonnée, permet actuellement de canaliser les écoulements dans la traversée du village. Dans certaines zones, des désordres ont été observés (hormis bien entendu les portions d'ouvrages emportés ou effondrés), notamment :

- la présence récurrente de végétation (qui gêne/empêche l'inspection et qui peut déstructurer les ouvrages),
- des déjoints dans les maçonneries (cf. photo ci-après),
- des fissurations, désaffleurements,
- des amorces de basculement...



Il convient ainsi d'approfondir la connaissance de l'état de l'ensemble des murs de protection à travers un diagnostic spécifique.

Une inspection de l'ensemble des murs de protection devra être réalisée de manière régulière (au moins une fois par an) pour vérifier son état et la présence éventuelle de désordres. Cette inspection pourra être réalisée avant la fin du mois d'août, période de basses eaux et précédant la période des crues. Elle devra être réalisée après nettoyage du cours d'eau et entretien de la végétation. Il est rappelé que toute végétation au droit des murs de protection nuit à l'inspection des ouvrages et à l'identification des désordres.

En cas de détection d'anomalies sur les ouvrages, ces derniers devront être surveillés plus régulièrement et en cas d'aggravation confortés.

Des travaux d'entretien des maçonneries devront également être entrepris à l'issue de l'émission des recommandations du diagnostic.

En première approche, le coût du premier diagnostic visuel détaillé de ces ouvrages et de la proposition des premières pistes de solution de confortement peut être estimé de l'ordre de **20 000 €HT**.

7.4 TRAITEMENT DES OUVRAGES DE FRANCHISSEMENT

Quatre ponts ou passerelles présentent des tirants d'air insuffisants pour le passage des crues fréquentes à rares. Il est généralement conseillé d'avoir un tirant d'air de l'ordre de 1 à 2 m pour les crues modélisées sans embâcles afin de minimiser les risques liés à ces derniers (cela reste toutefois en partie théorique, les embâcles observés au droit de l'ouvrage SNCF en étant le parfait contre exemple). Les ouvrages présentant de faibles tirants d'air pour la gamme de crue étudiée sont les suivants :

- La passerelle du stade,
- La passerelle de la résidence Plein Soleil,
- Le pont de l'avenue Ménard,
- La passerelle de la piscine.

Ces ouvrages sont localisés sur la carte de synthèse du diagnostic insérée en page 46.

Pour rappel, le tirant d'air pour chaque ouvrage et pour les crues étudiées est présenté dans le tableau suivant.

Pont	T = 5 ans	T = 10 ans	T = 20 ans	T = 50 ans	T = 100 ans
Pont de l'avenue de Bardejean	4,15 m	3,60 m	3,20 m	2,75 m	2,40 m
Passerelle du stade	1,75 m	1,20 m	0,80 m	En charge	Surverse
Passerelle de la résidence Plein Soleil	0,80 m	0,45 m	0,15 m	En charge	En charge
Pont de l'avenue Ménard	0,80 m	0,20 m	En charge	En charge	En charge
Passerelle de la piscine	0,70 m	Surverse	Surverse	Surverse	Surverse
Passerelle de l'allée du Clos du Bitoulet	4,50 m	4,00 m	3,70 m	2,50 m	2,10 m
Pont du boulevard Le Mairal	3,20 m	2,90 m	2,70 m	2,50 m	2,25 m
Pont SNCF	7,00 m	6,60 m	6,00 m	5,40 m	4,90 m
Pont de la RD908 amont	1,90 m	1,40 m	1,00 m	0,60 m	0,30 m
Pont de la RD908 aval	1,70 m	1,20 m	0,80 m	0,40 m	0,10 m

Tableau 23 : Tirant d'air pour les crues étudiées au droit des ouvrages hydrauliques

La ville de Lamalou-les-Bains comporte plusieurs centres spécialisés dans le thermalisme et la rééducation fonctionnelle. Il est donc impératif de conserver des passerelles accessibles à tous et conserver des pentes sur les passerelles inférieures à 5 %.




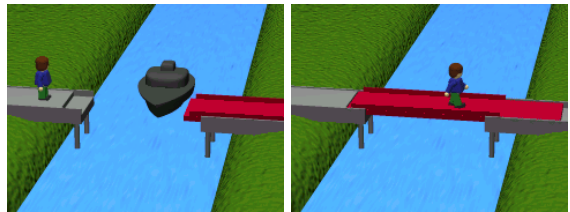
Ainsi, il n'apparaît pas envisageable de rehausser les passerelles existantes. La solution proposée est l'installation de passerelles amovibles.

Le tableau ci-dessous présente les dimensions, prix et contraintes de 4 passerelles identifiées comme problématiques.

Pont	Largeur	Longueur	Prix pour une passerelle amovible	Contraintes
Passerelle du stade	2 m	13 m	210 k€	
Passerelle de la résidence Plein Soleil	3 m	14 m	340 k€	
Pont de l'avenue Ménard	10 m	25 m	2 000 k€	Pont routier
Passerelle de la piscine	3,5 m	20 m	560 k€	

Tableau 24 : Caractéristiques des passerelles à modifier

Différents types de solutions existent pour mettre en œuvre des passerelles amovibles. Elles sont présentées dans le tableau inséré en page suivante.

Type	Principe	Photo	Exemple
Pont levant	Tablier soulevé entre piliers		Passerelle de Mont de Marsan au dessus de la Midouze (40)
	Câbles enroulés sur 2 cylindres		Passerelle levante du port de la Coupure à Bruges (Belgique)
Pont basculant	Travées manœuvrées par vérins hydrauliques		Port de Le Palais à Belle-Ile-en-Mer (56)
Pont rétractable	Tablier coulissant		


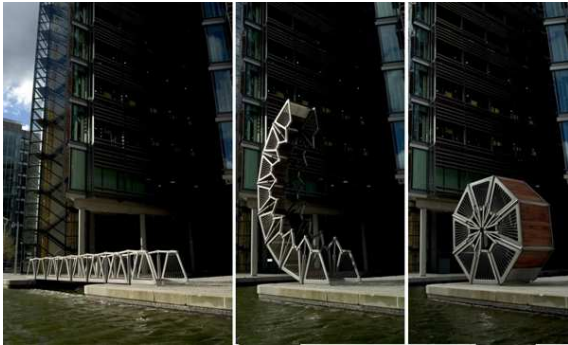
Type	Principe	Photo	Exemple
Passerelle pivotante	Rotation de la passerelle autour d'un pivot		Pont tournant de Port-en-Bessin-Huppain (14)
Passerelle levante à enroulement	Série de vérins hydrauliques intégrés dans la balustrade		The Rolling Bridge à Londres (Angleterre)

Tableau 25 : Différents type de passerelle amovible

7.5 HOMOGENEISATION DE LA CAPACITE DU BITOULET (ZONE BETONNEE)

L'objectif poursuivi par cet aménagement est d'homogénéiser la capacité avant débordement du Bitoulet dans la zone bétonnée de la traversée du bourg de Lamalou-les-Bains pour un débit de période de retour 10 ans d'environ 100 m³/s **sans présence d'embâcles** (objectif retenu à l'issue du diagnostic hydraulique).

L'objectif est donc bien ici de traiter les points bas (générés ou pas, par le passage de la crue de septembre 2014) pouvant provoquer des débordements. Il ne s'agit pas de conforter des murs de soutènement dont l'état général, la constitution et les conditions de fondation sont mal connus. Ce programme de travaux d'entretien ou de confortement ne pourra être entrepris qu'après les études spécifiques évoquées au paragraphe 7.3.

Dans cette analyse, nous intégrerons toutefois les murs en maçonneries surmontant le cuvelage en béton du lotissement du Mairal. En effet, ces deniers présentent un dénivelé amont-aval de l'ordre d'un mètre et peuvent provoquer en cas de rupture une libération importante d'eau dans le lotissement.

Les propositions d'aménagements se heurtent à l'hétérogénéité des ouvrages ainsi qu'au manque d'informations les concernant, que les observations de terrain n'ont pas permis de lever (notamment en raison de la présence importante de végétation). Pour définir précisément les aménagements, il est nécessaire de connaître la géométrie et la structure des ouvrages (état général, nature et zonage des matériaux, conditions de fondation...).

Pour ce faire, il est nécessaire de prévoir :

- Le débroussaillage complet des ouvrages,
- Des levés topographiques complémentaires,
- Des reconnaissances intrusives (forage),
- Des observations de la partie aval des murs (côté riverains).

Nous ne pouvons donc formuler que des propositions générales, qu'il faudra affiner dans des études complémentaires. Les incertitudes nous conduisent donc à adopter des dispositions prudentes dont les propositions technico-économiques seront à affiner.

Deux objectifs sont recherchés pour ces aménagements :

- Assurer le niveau de protection recherché par le maître d'ouvrage, à savoir se protéger contre une crue décennale,
- Assurer la sécurité des personnes pour des crues de période de retour supérieure.

La figure insérée en page suivante présente les secteurs qu'il est proposé de traiter dans ce scénario.




Pour chacun de ces secteurs, le tableau suivant présente les travaux, linéaires et coûts associés.

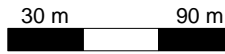
Ces éléments sont détaillés par la suite.

Secteur		Travaux	Linéaire ou Surface	Hauteur des murs par rapport		Coûts
				au fond du lit	au TN aval	
Rive droite au droit de l'ancien parking	Mur en maçonnerie en amont de l'ancienne passerelle	Rejointoiment	15 m	2,0 m	0,3 m	3 500 € HT
	Mur en maçonnerie au droit du parking en partie détruit lors de la crue de 2014	Confortement/ Reconstruction	110 m	3,0 m	1,6 m	187 000 € HT
Rive gauche au droit de l'ancien parking	Au droit de la maison sinistrée	Reconstruction	35 m	2,5 m	0,5 m	77 000 € HT
	En amont de la piscine	Reprise du béton du fond du lit	25 m ²	-	-	4 000 € HT
	Au droit de la piscine	Rehausse	50 m	3,0 m	0,7 m	110 000 € HT
Lotissement Le Mairal	Mur en maçonnerie	Confortement	100 m	3,0 m	1,0 m	115 000 € HT

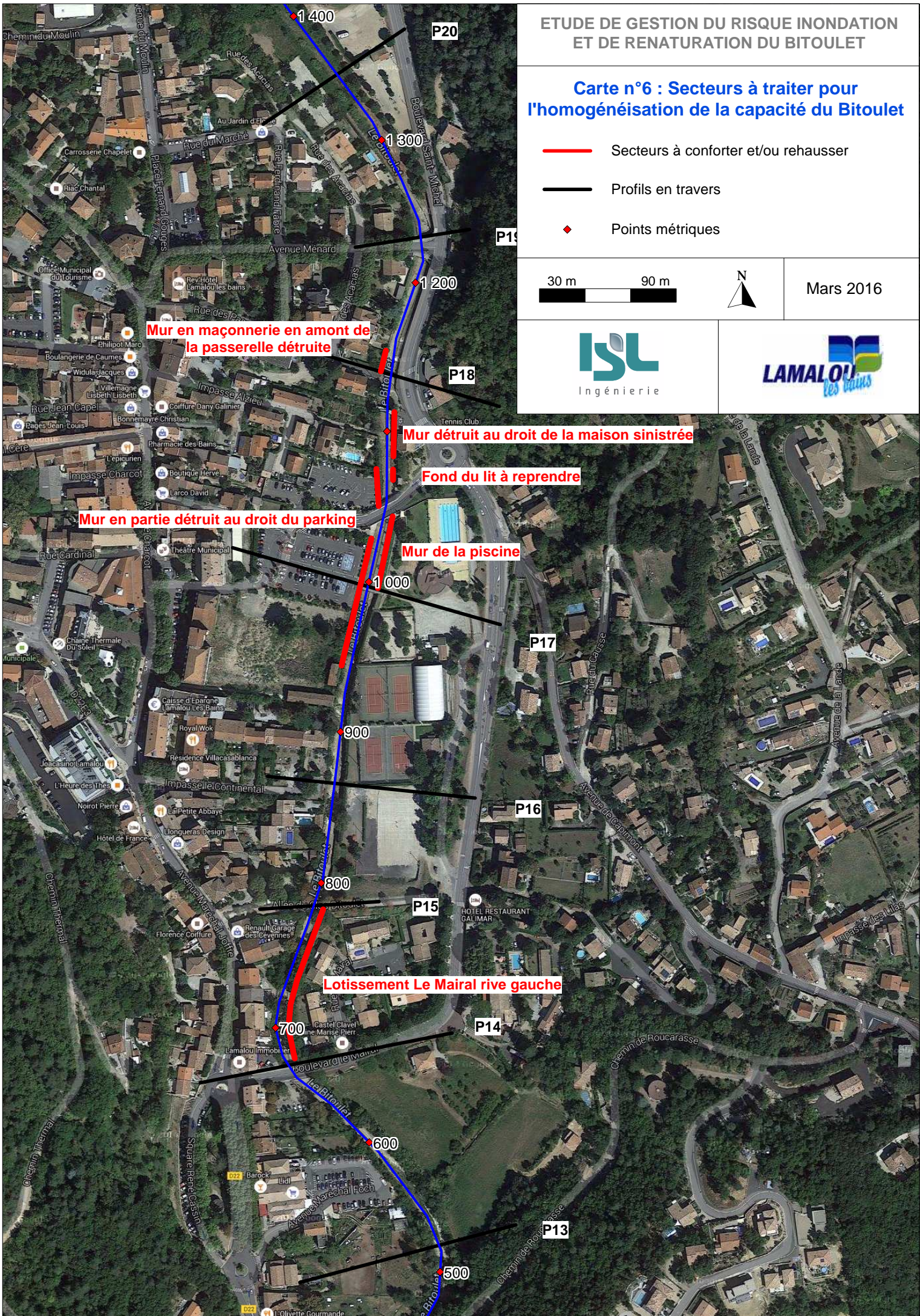
Tableau 26 : Synthèse des linéaires de murs à traiter

**Carte n°6 : Secteurs à traiter pour
l'homogénéisation de la capacité du Bitoulet**

-  Secteurs à conforter et/ou rehausser
-  Profils en travers
-  Points métriques



Mars 2016



7.5.1 EN RIVE DROITE AU DROIT DU PARKING

Le linéaire concerné s'étend en rive droite de l'amont de l'ancienne passerelle (rue des passerelles) aux terrains de tennis, soit un linéaire de 210 m environ. La structure du mur est hétérogène sur le linéaire : mur en maçonnerie, mur en béton, banquette en béton armé. Actuellement, dans ce secteur, la cote du terrain naturel en aval des murs est proche de la cote de crête de ces derniers.

Lors de la crue de septembre 2014, des tronçons de murs en maçonnerie ont été emportés au droit du parking. Les photos suivantes illustrent les structures décrites ci-dessus.



Pour atteindre l'objectif de protection décennal, la hauteur des murs depuis le fond du lit doit être fixée à environ 3 m sur tout ce linéaire.

Concernant la sécurité pour des crues de période de retour supérieures à 10 ans, l'état de dégradation des ouvrages et le manque de données ne permet pas de garantir des marges de sécurité suffisantes.

Plusieurs secteurs nécessitent ainsi des confortements ou des reconstructions.

- **En amont de l'ancienne passerelle détruite (RD)**

Le mur maçonné dans ce secteur est fortement dégradé et certaines zones en partie supérieure semblent avoir été endommagées pendant la crue de septembre 2014. Ce mur s'étend sur environ 15 ml.

Nous recommandons dans ce secteur de nettoyer, remaçonner et rejointoyer le mur en maçonnerie et d'homogénéiser la crête du mur comme indiqué sur la figure ci-dessous. Le prix estimatif de ces travaux est de **3 500 € HT** (nettoyage, rejointoiement, reprise du mur et aléas).



- **Au droit du parking (RD)**

La crue de septembre 2014 a entraîné la ruine d'une grande partie du mur en maçonnerie au droit du parking en rive droite. Les travaux envisagés visent à restaurer le niveau de protection dans la traversée de Lamalou-les-Bains.

Dans ce secteur, nous proposons de démolir les restes du mur en maçonnerie et de reconstruire un mur poids en béton sur un linéaire d'environ 110 m.

La coupe type est présentée ci-dessous.

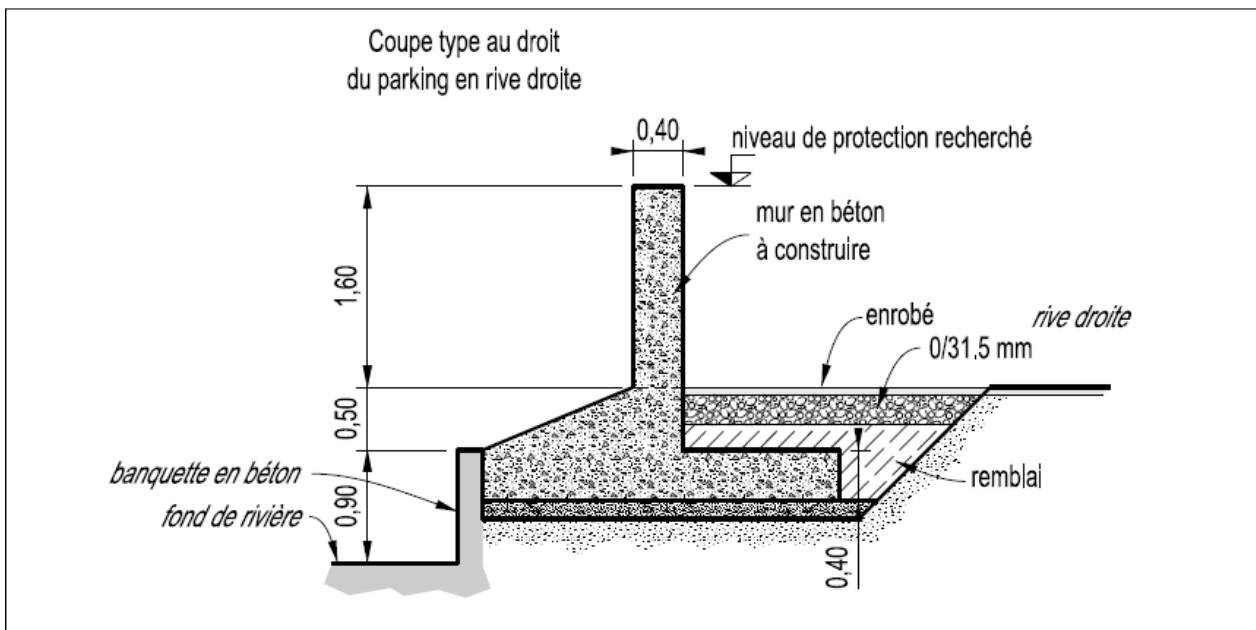


Figure 31 : Coupe type au droit du parking RD

Le prix de cet ouvrage a été estimé à 800 €/ml, représentant un coût total de l'ordre de **187 000 €HT** (démolition de l'existant, nettoyage, reconstruction du mur, installation, travaux généraux et aléas). Il suppose la possibilité de mettre en œuvre une fondation superficielle.

7.5.2 EN RIVE GAUCHE AU DROIT DU PARKING

Le linéaire concerné s'étend en rive gauche de l'amont de la maison sinistrée à la passerelle de la piscine, soit un linéaire de 115 m environ.

La structure du mur est hétérogène sur le linéaire : mur en maçonnerie en partie détruit pendant la crue, mur en béton, banquette en béton armé surmontée d'un mur en béton ou en parpaing. Actuellement, dans ce secteur, la cote du terrain naturel en aval des murs est proche de la cote de crête de ces derniers.

Lors de la crue de septembre 2014, des murs en maçonnerie ont été emportés au droit de la maison sinistrée. Les photos suivantes illustrent les structures décrites ci-dessus.



Pour atteindre l'objectif de protection décennal, la hauteur des murs depuis le fond du lit doit être comprise entre 2,5 m et 3,0 m d'amont en aval.

Concernant la sécurité pour des crues de période de retour supérieures à 10 ans, l'état de dégradation des ouvrages et le manque de données ne permet pas de garantir des marges de sécurité suffisantes.

Plusieurs secteurs nécessitent ainsi des confortements ou des reconstructions.

- **Au droit de la maison sinistrée (RG)**

Le mur maçonné dans ce secteur a été fortement endommagé par le passage de la crue de septembre 2014. Les travaux envisagés visent à restaurer un niveau de protection décennal dans cette zone.

Nous proposons de démolir les restes du mur en maçonnerie et de reconstruire un mur en béton sur un linéaire d'environ 35 m. Les travaux comprennent un mur en béton armé, une semelle et un remblai côté terre. Par ailleurs, on considère que la maison est démolie.

La coupe type est présentée ci-dessous.



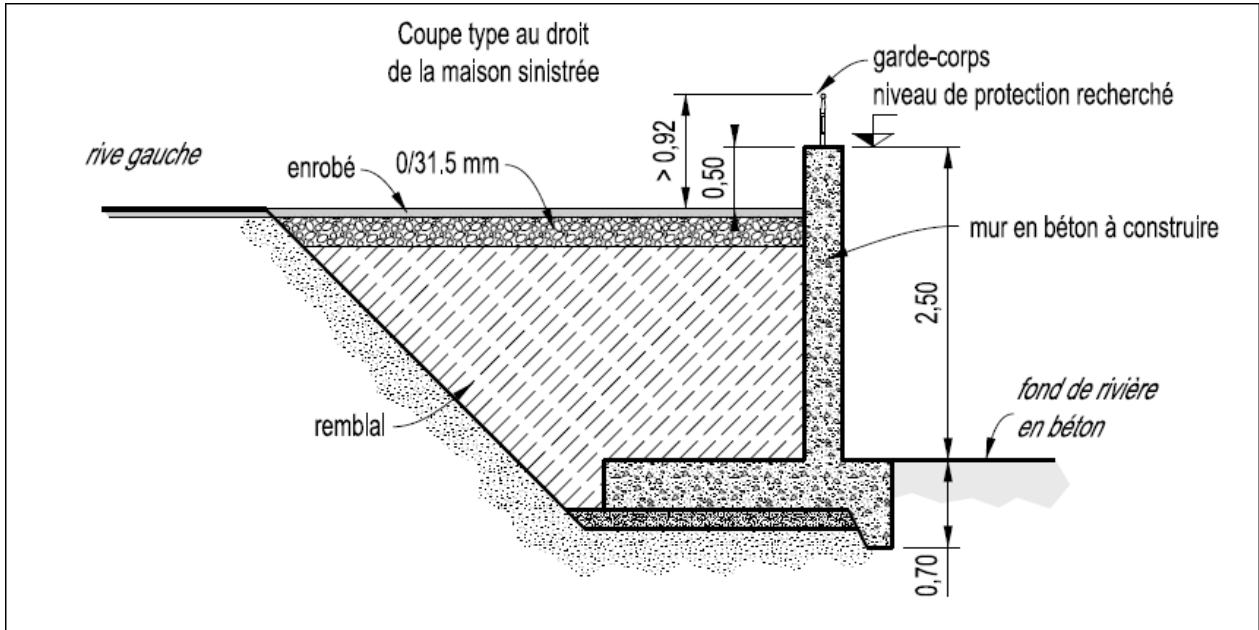


Figure 32 : Coupe type au droit de la maison sinistrée RG

Le prix estimatif des travaux de l'ordre de **77 000 € HT** (démolition de l'existant et évacuation, nettoyage, reconstruction du mur, remblai, revégétalisation, garde-corps, installation, travaux généraux et aléas). Il suppose la possibilité de mettre en œuvre une fondation superficielle.

- **En amont de la piscine (RG)**

Dans ce secteur, le fond du lit est endommagé et une banquette en béton présente sur la gauche du lit est également altérée. Dans ce secteur, nous proposons de démolir la banquette en béton et de reprendre le béton des zones altérées sur une surface d'environ 25 m².

Le prix estimatif de ces travaux est de **4 000 € HT** (démolition, reprise béton et aléas).



- **Au droit de la piscine (RG)**

Dans ce secteur, la cote de crête du mur est hétérogène et la structure du mur n'est pas connue (présence de parpaings non banchés d'après la visite sur site pouvant compromettre la stabilité du mur).

Nous proposons donc de reconstruire le mur situé au dessus de la semelle en béton à une hauteur constante de 3 m par rapport au fond du lit sur un linéaire d'environ 50 m. Les travaux comprennent un mur en béton armé, une semelle et un remblai côté terre. Ces travaux sont cependant incompatibles avec la passerelle de la piscine en état actuel, qu'il faudra également reprendre.

La coupe type est présentée ci-dessous.

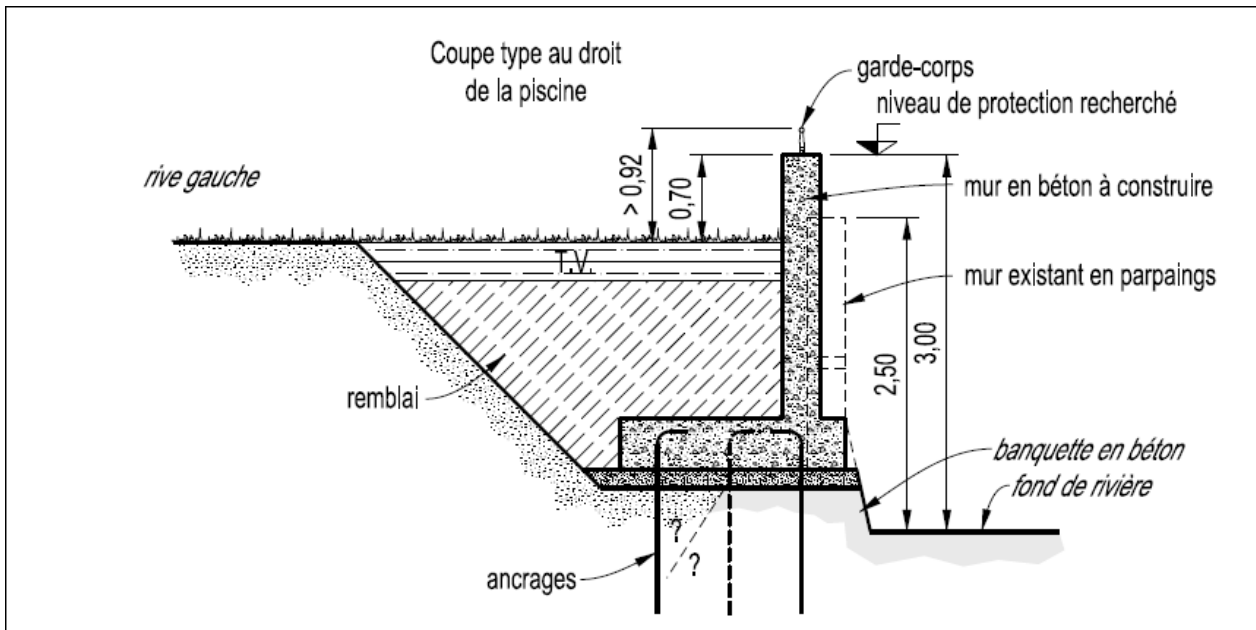


Figure 33 : Coupe type au droit de la piscine RG

Le prix estimatif des travaux est de l'ordre de **110 000 € HT** (démolition de l'existant et évacuation, nettoyage, reconstruction du mur, ancrages, remblai, revégétalisation, garde-corps, installation et travaux généraux et aléas). Il suppose la possibilité de mettre en œuvre une fondation superficielle.

7.5.3 EN RIVE GAUCHE AU NIVEAU DU LOTISSEMENT LE MAIRAL

Le linéaire concerné s'étend de la passerelle de l'allée du clos du Bitoulet au pont du boulevard le Mairal, soit un linéaire de 100 m environ.

Les murs situés en rive gauche présente une structure variable qui est décrite ci-dessous suivant les observations de terrain :

- En partie haute, est présent un vieux mur maçonné grossier localement très pauvre en liant (surtout dans sa partie supérieure),
- La partie basse est hétérogène, constituée d'une carapace en béton sur les premiers mètres puis d'un mur en béton,
- La partie aval (50 mètres en amont du pont du boulevard le Mairal) est constituée d'un ouvrage mixte avec une partie basse en béton, une berge probablement en remblai vu la présence de végétation importante (dont des arbres de plus de 10 m de haut) et un mur en maçonnerie en partie supérieure,
- Le terrain naturel derrière le mur est situé environ 1 m au dessous de la cote de la crête du mur.

Les photos suivantes illustrent les structures décrites précédemment.



Murs RG au droit du lotissement du Mairal

Pour atteindre l'objectif de protection décennal, la rehausse de ces ouvrages n'est pas nécessaire.

Pour la crue décennale, les murs en maçonneries (partie haute de l'ouvrage) sont faiblement mis en charge, leur stabilité ne semble donc pas être remise en question pour cet événement. De plus, l'ouvrage a supporté la crue de septembre 2014.

En revanche, dans la partie aval, des problèmes peuvent se poser dans la partie en remblai :

- érosion des matériaux autour des racines des arbres,
- chute des arbres (provoquée par le vent) qui peut déstructurer le parapet et la stabilité du remblai,
- érosion interne sur l'ensemble du linéaire du mur provoquée par des écoulements au sein des zones en remblais ou à la faveur des déjoints du mur maçonné.

Concernant la sécurité pour des crues de période de retour supérieures à 10 ans, l'état de dégradation des ouvrages ne permet pas de garantir des marges de sécurité suffisantes au regard des habitations situées en aval (environ 15 maisons) à proximité immédiate du mur (les plus proches sont à 7 ou 8 m du parapet).

Fort de ce constat, nous émettons les recommandations suivantes :

- Recommandation non structurelle : organiser la mise en sécurité des populations soumises au risque de rupture (actions particulières à spécifier dans le PCS pour ce lotissement),
- Recommandations structurelles :
 - Effacer le mur pour prévenir tout risque de rupture en crue,
 - **OU** Conforter la partie supérieure (au dessus de la banquette en béton armé) c'est-à-dire démolir le mur existant et le reconstruire.

Trois coupes types ont été retenues sur ce secteur compte tenu de la disparité de la géométrie actuelle. Les travaux envisagés sont les suivants :

- **Solution 1 (objectif de protection décennal)** : démolition du mur en maçonnerie situé au dessus de la banquette en béton, reconstruction d'un mur en béton (mur en béton armé, une semelle et un remblai côté terre) avec pour objectif de protection la crue décennale (H = 2,10 m depuis le fond du lit), mise en place d'un garde-corps,
- **Solution 2 (conservation de la cote de crête actuelle)** : démolition du mur en maçonnerie situé au dessus de la banquette en béton, reconstruction d'un mur en béton (mur en béton armé, une semelle et un remblai derrière le mur) à la cote de crête actuelle, à savoir 3 m depuis le fond du lit.

Les coupes type de ces deux solutions pour les 3 coupes type sont présentées ci-dessous.

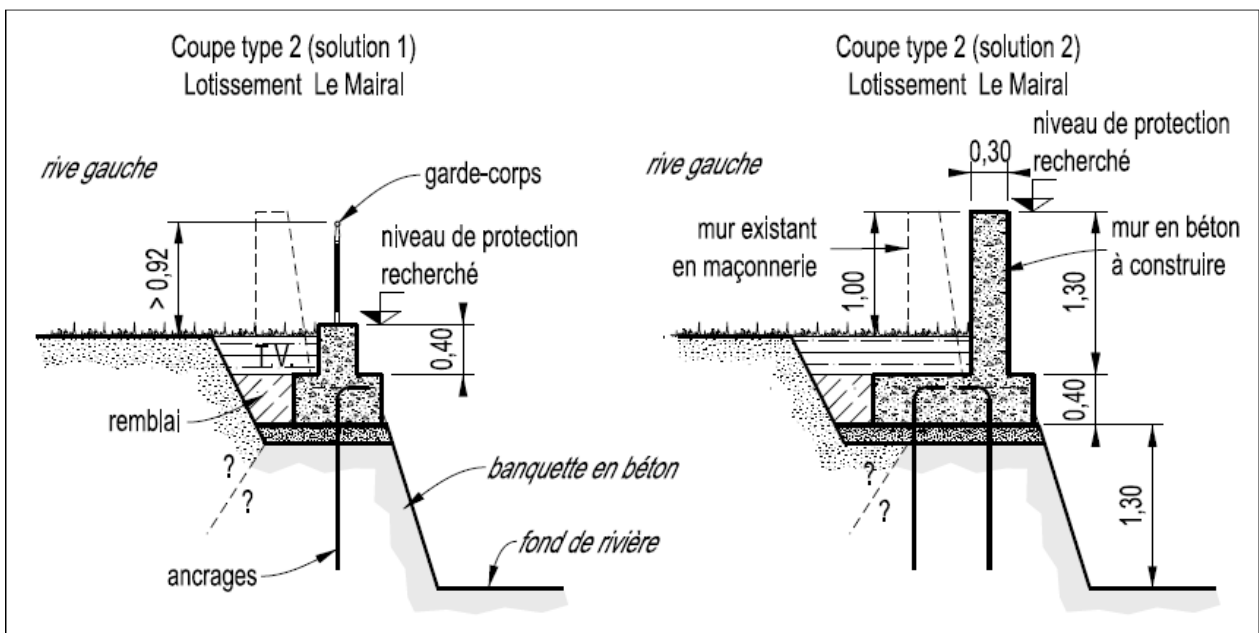
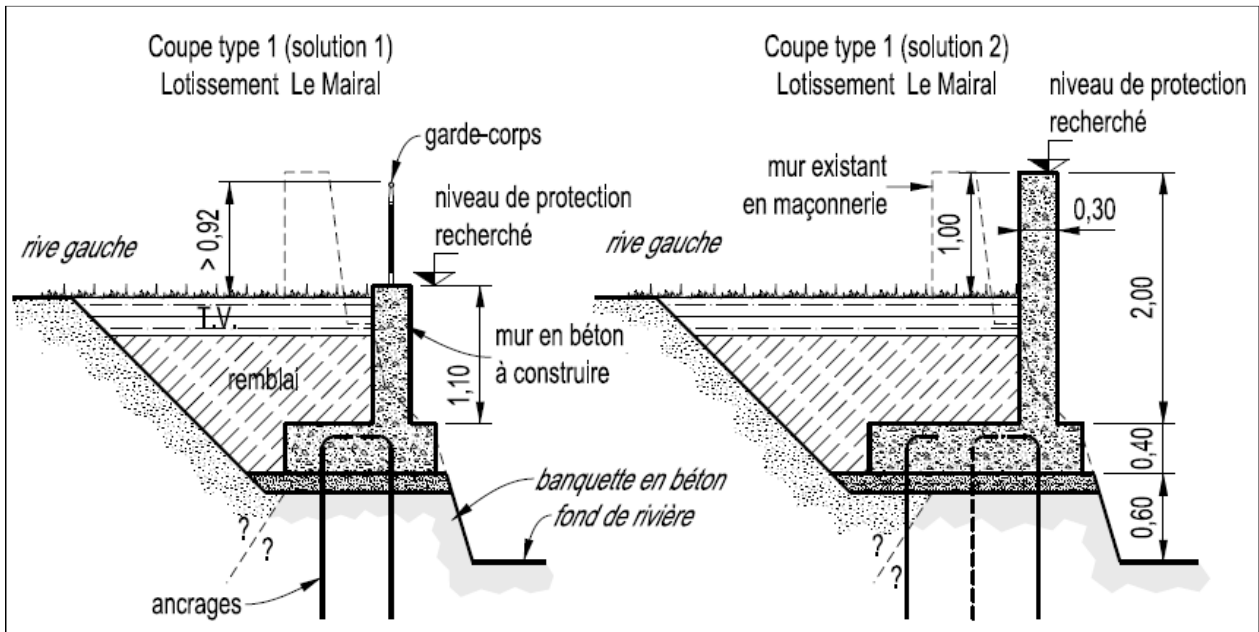


Figure 34 : Coupes type 1 et 2, lotissement du Mairal RG

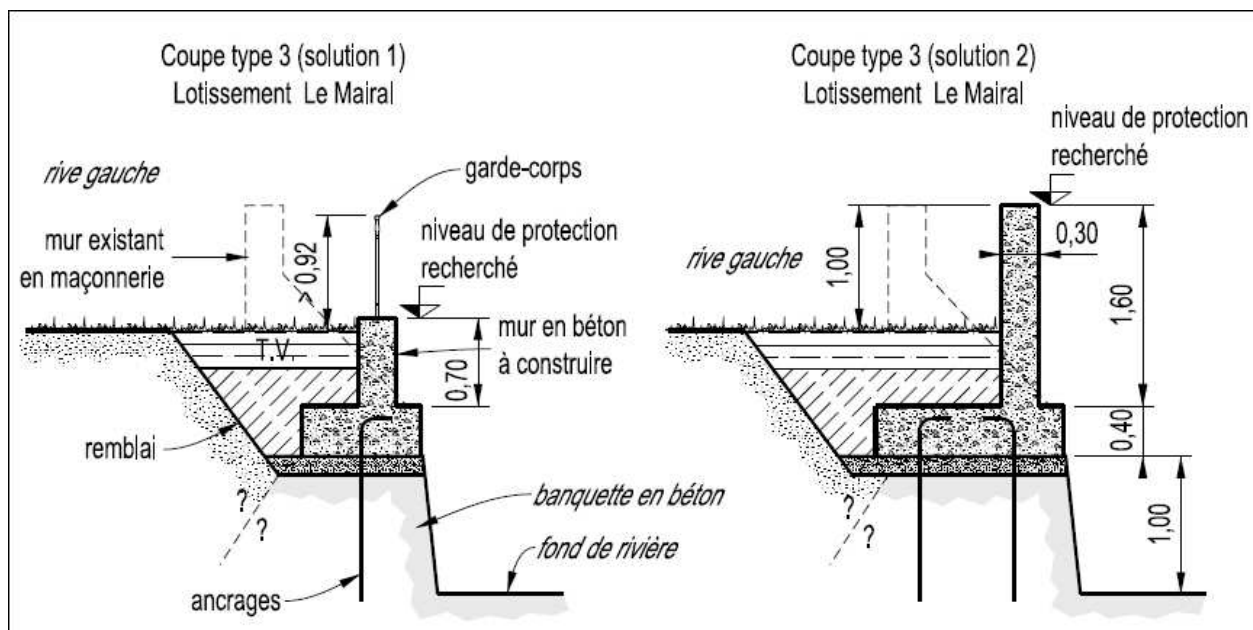


Figure 35 : Coupe type 3, lotissement du Mairal RG

Le prix estimatif des travaux de l'ordre de **115 000 € HT pour les 2 solutions** (démolition de l'existant et évacuation, nettoyage, reconstruction du mur, remblai, revégétalisation, garde-corps, installation et travaux généraux et aléas). Le prix de la solution 1 dépend du garde-corps mis en place, dans l'estimation réalisée, il s'agit d'un garde-corps ouvragé en acier galvanisé avec une fixation durable. Ces prix supposent la possibilité de mettre en œuvre une fondation superficielle.

7.6 ZONES POTENTIELLES D'EXPANSION ET DE RENATURATION

7.6.1 AMONT DE LAMALOU-LES-BAINS

Depuis le pont de Bardejean jusqu'au pont de l'avenue Ménard : il s'agit de la partie naturelle du lit du Bitoulet.

7.6.1.1 Principes d'aménagement

Les aménagements proposés se veulent à ce stade optimum tant du point de vue hydraulique (réduction du risque inondation) qu'écologique (reconstitution du corridor écologique).

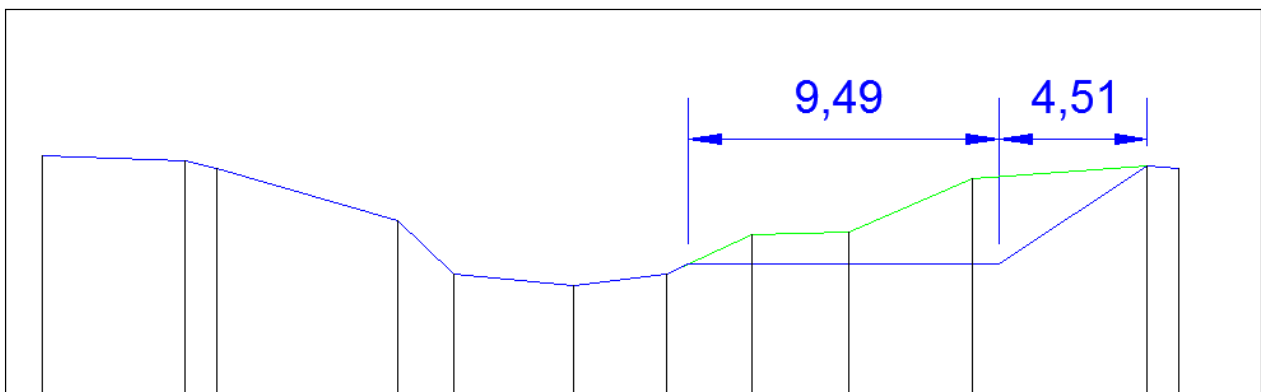
Sur le plan hydraulique, les préceptes d'aménagement sont les suivants :

- Ouverture de la section hydraulique au maximum en tenant compte de l'occupation des sols (préservation du bâti, des accès aux habitations) ;
- Suppression des seuils,
- Destruction et reconstruction des passerelles piétonnes présentes sur le tronçon au nouveau gabarit.

Sur le plan écologique, les préceptes d'aménagements sont les suivants :

- Principe des lits emboîtés, en conservant le lit mineur actuel : création d'une risberme d'environ 30 cm de hauteur au niveau des sections élargies,
- Suppression des obstacles à la continuité piscicole,
- Pente de raccord aux talus abruptes lorsque la disponibilité foncière est limitée, la topographie élevée, ou la configuration du cours d'eau le justifie (extrados de méandre) : 3H/2V, permettant le déploiement d'une végétation arbustive.
- Pente de raccord au talus plus doux lorsque la disponibilité foncière le permet afin de permettre le déploiement d'une végétation stabilisatrice : 3H/1V.

La section type proposée est donc la suivante :



En vert : terrain naturel actuel (relevé topographique d'avant la crue)

En bleu : section de projet proposée

Figure 36 : Section type proposée pour la renaturation de la zone amont

7.6.1.2 Réseaux

Les demandes de renseignements auprès des concessionnaires de réseaux ont été effectuées : plusieurs réseaux sont traversants au niveau de la zone de projet et nécessiteraient un dévoiement.

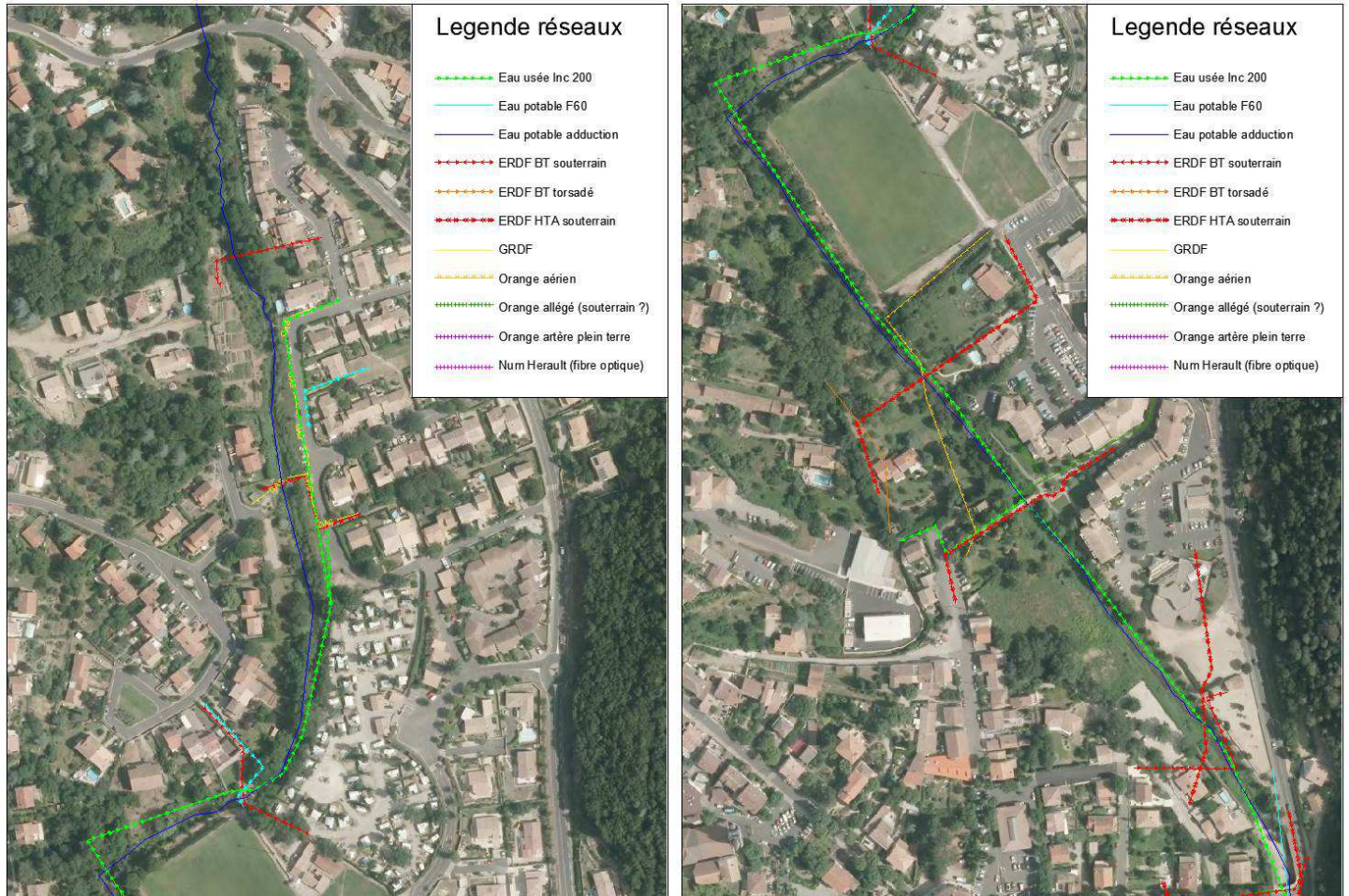


Figure 37 : Présence de réseaux en amont de Lamalou-les-Bains

7.6.1.3 Stabilisation et végétalisation

L'objectif de l'aménagement est double : réduire le risque d'inondation et reconquérir un corridor biologique fonctionnel. Actuellement, les berges sont naturelles à l'amont du stade et enrochées à l'aval du stade jusqu'à la partie bétonnée. L'agrandissement de la section hydraulique nécessitant leur dépose, nous proposons de conserver des berges naturelles correctement végétalisées afin d'assurer leur stabilité :

- Les berges à 3H/2V présentant un enjeu à l'arrière seront stabilisées à l'aide de techniques végétales structurantes –fascines de saules et couches de branches,
- Les berges plus douces sans enjeux à l'arrière seront uniquement végétalisées par des plants et un ensemencement adapté.

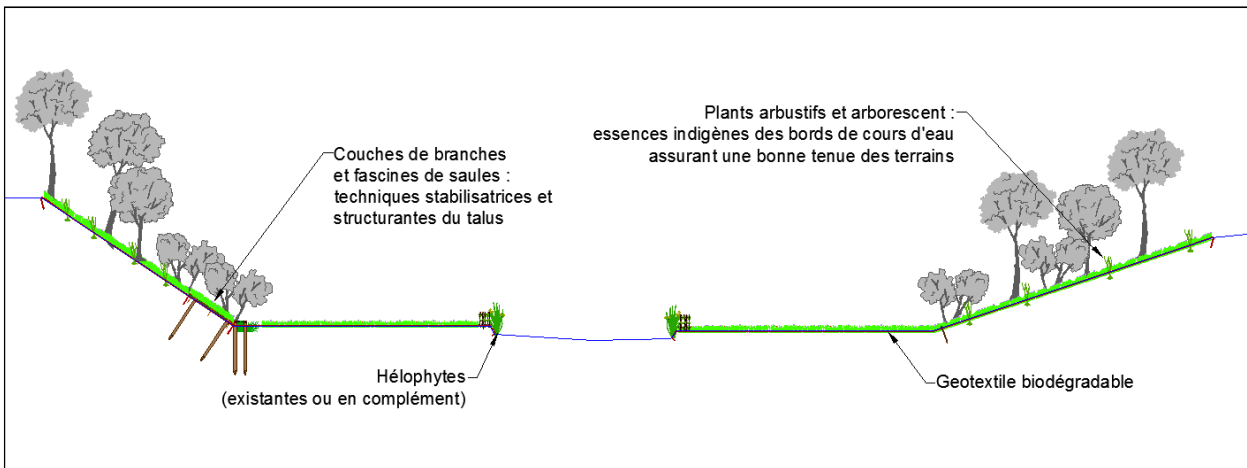


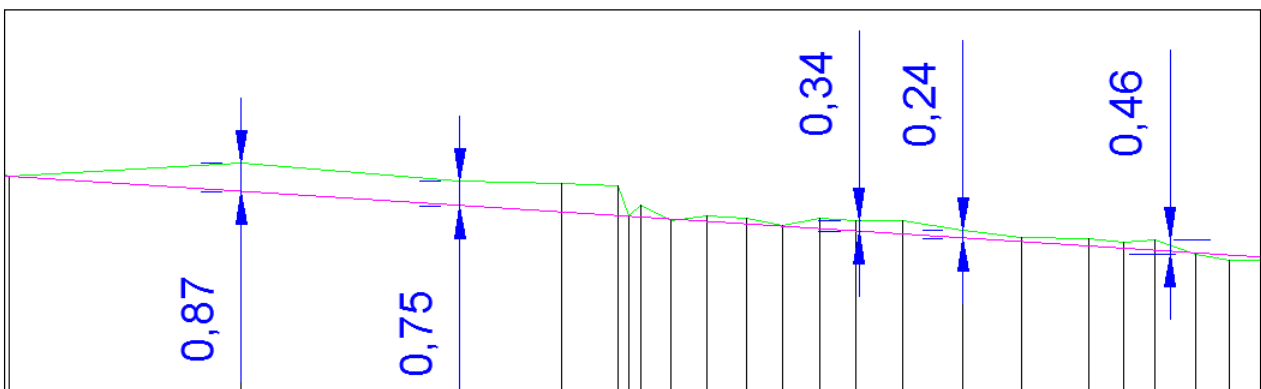
Figure 38 : Principes de végétalisation/stabilisation de la zone amont

Il n'est pas prévu une remise en œuvre des enrochements sur les sections retravaillées, excepté à la jonction des passerelles. Les berges enrochées non retravaillées (cf. scénarios ci-après) garderont les enrochements en place (stade, notamment).

7.6.1.4 Suppression des seuils – reprise du profil en long

L'aménagement intègre la suppression des trois seuils présents sur le secteur amont de la traversée de Lamalou, qui présente le double avantage d'aller dans le bon sens d'un point de vue de l'effet sur les niveaux d'eau, et d'assurer la bonne circulation des espèces piscicoles et des sédiments.

La suppression des seuils a pour effet une incision du lit mineur à l'amont des ouvrages que nous avons estimée sur la base de l'analyse du profil en long à l'échelle du cours d'eau (notion de "profil d'équilibre", cf. § 5.4). L'incidence de cette incision a été intégrée dans les profils "projet", qui intègrent un abaissement du lit pris en compte dans le calcul du modèle hydraulique "projet".



En vert : TN topographique

En rose : profil d'équilibre théorique estimé

Sous réserve d'une topographie actualisée, car antérieure à la crue de 2014

Figure 39 : Profil en long projeté sur la zone amont

7.6.1.5 Emprise du projet sur la vue en plan – effets sur le foncier

Du pont de Bardejean au stade :

Les incidences sur le foncier seront les suivantes, d'amont en aval :

- Emprise sur les terrains naturels et jardins en rive droite à l'aval du pont, jusqu'à l'affluent,
- Emprise rive gauche sur la Rue du Caubel et la Rue de la Borie : l'ouverture du Bitoulet démarrera à l'aval d'une entrée de propriété qui se retrouverait sinon enclavée. La fin de la Rue du Caubel et la Rue de la Borie le long du Bitoulet sont supprimées, les entrées des trois maisons se faisant actuellement Rue de l'Egue et Rue de la Borie perpendiculairement au Bitoulet. Seuls les portillons d'accès donneront alors sur le cours d'eau, et des places de parkings seraient supprimées. De plus, les rues du Caubel et de la Borie deviendraient alors des impasses, ne permettant plus de faire le tour du lotissement :

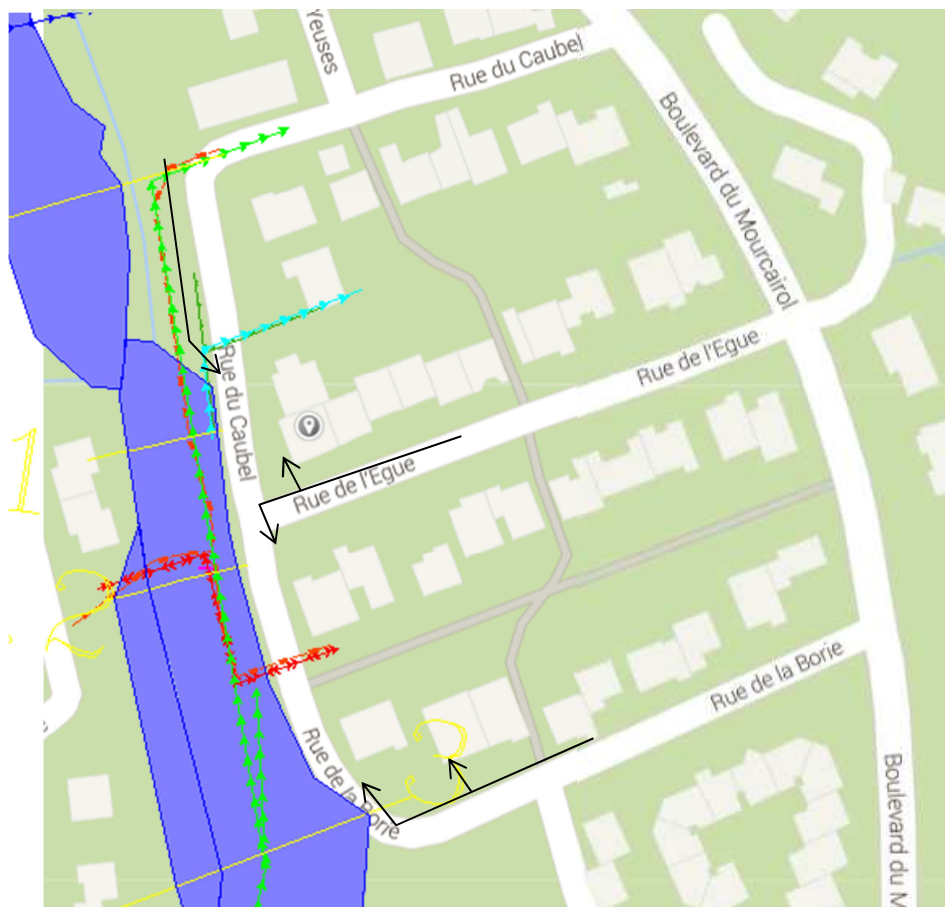


Figure 40 : Emprise du projet de renaturation dans la zone amont (1/3)

- Une emprise sur les terrains situés rive droite face à la rue de la Borie,
- Une emprise importante au niveau du stade ; les terrains face au stade ne sont pas touchés, ou très peu en cas de reprise du profil en long suite à la suppression du seuil de la passerelle.



Figure 41 : Emprise du projet de renaturation dans la zone amont (2/3)

Du stade à la passerelle reliant la rue du Moulin au Verdale :

Deux scénarios sont ici proposés :

- **Scénario 1** : le projet empiète sur le stade pour augmenter le gain hydraulique et recréer des berges naturelles (suppression des enrochements),
- **Scénario 2** : le projet conserve le stade et exploite les terrains situés en rive droite, tout en reprenant les enrochements devant le stade pour optimiser la section hydraulique :

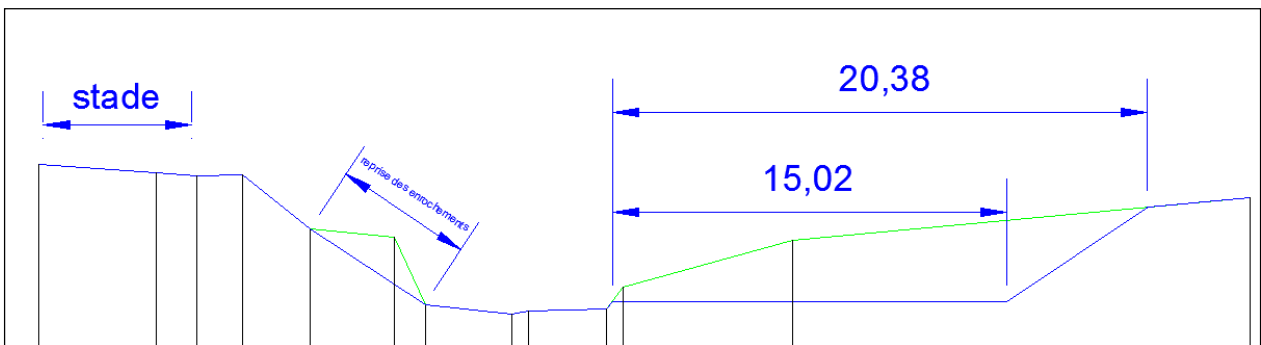
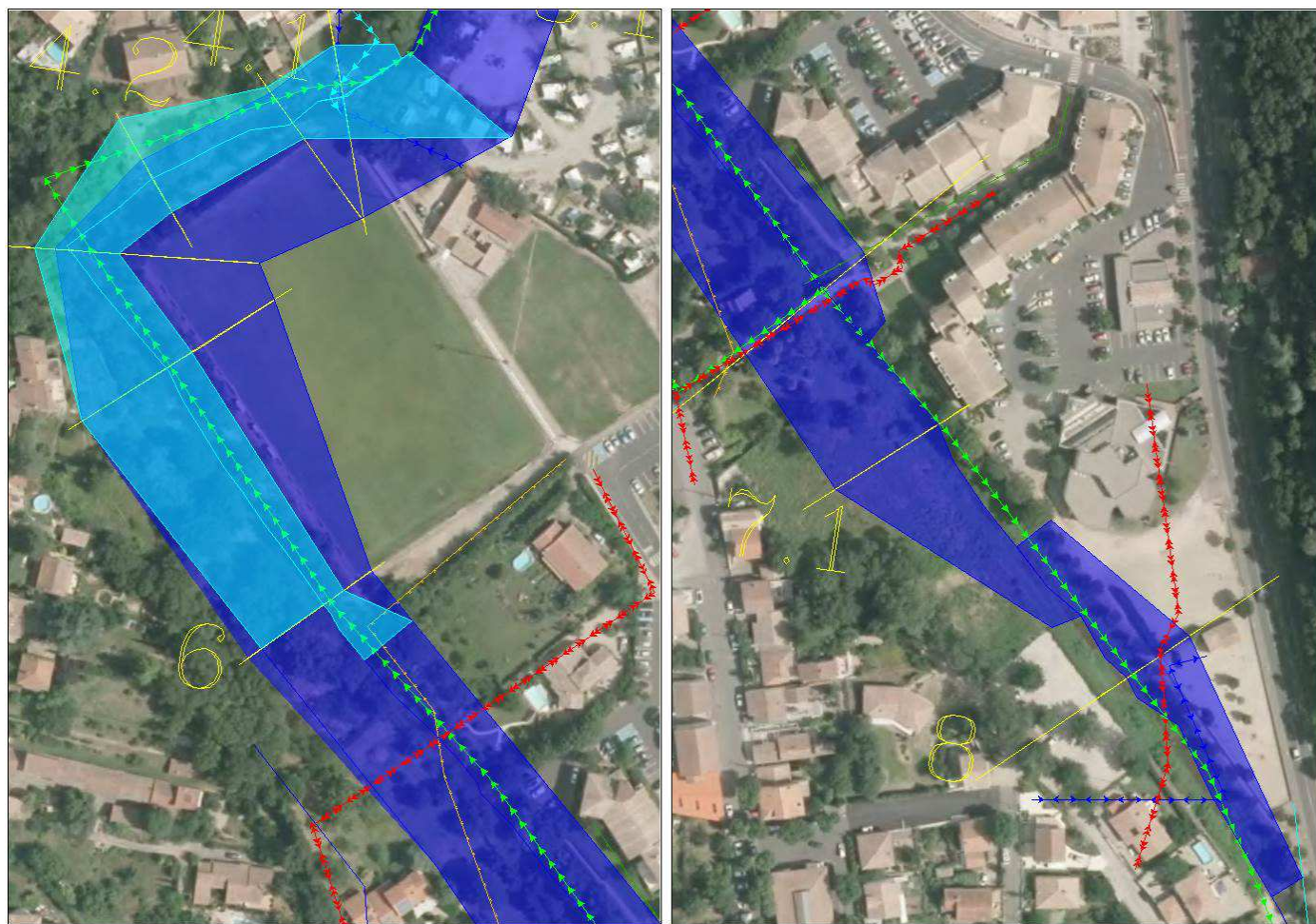


Figure 42 : Section type proposée pour la renaturation de la zone amont au droit du stade

Outre l'emprise du stade pour le scénario 1, les conséquences foncières sont les suivantes :

- Emprise rive droite à l'amont de la passerelle (cheminement piéton ?),
- Emprise rive droite sur les zones naturelles et l'arrière des habitations,
- Destruction de murets en pierre,
- Destruction d'un bâtiment à l'amont de la passerelle rive droite (toilettes publiques ?),
- Destruction et reconstruction des deux passerelles piétonnes au nouveau gabarit hydraulique,
- Suppression de quelques places de parking rive gauche à l'aval du stade,
- Empiètement sur un chemin piéton rive gauche qui pourrait être intégré à la nouvelle berge,
- Parcelle aval passerelle rive droite actuellement "naturelle" exploitée,
- Parcelle du boulodrome exploitée en tenant compte du bâti présent.



En bleu : scénario 1

En cyan : scénario 2

Figure 43 : Emprise du projet de renaturation dans la zone amont (3/3)

7.6.1.6 Impact hydraulique

Les lignes d'eau obtenues pour la crue décennale pour les scénarios 1 et 2 sont comparées à la ligne d'eau en état actuel sur la figure suivante.

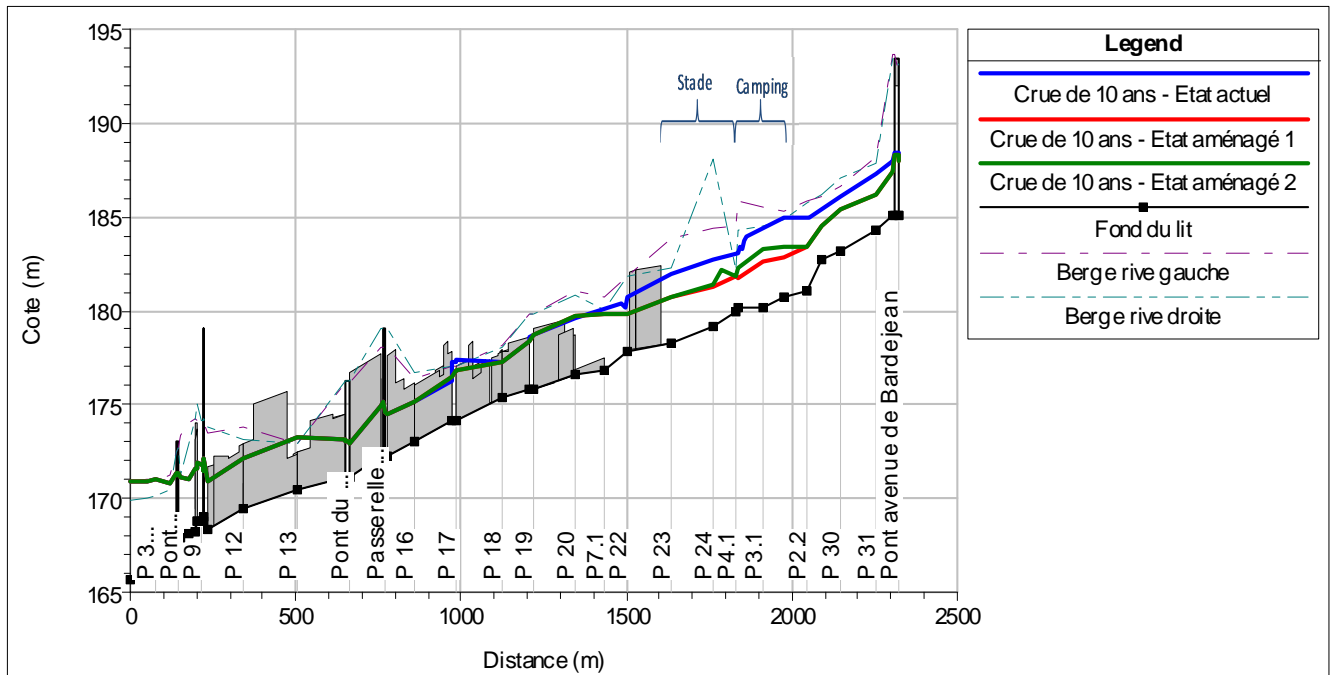


Figure 44 : Ligne d'eau en état aménagé pour la crue décennale

Pour la crue décennale, la baisse des niveaux d'eau est significative :

- Pour le scénario d'aménagement n°1 : baisse moyenne de l'ordre de 1,0 à 2,0 m ;
- Pour le scénario d'aménagement n°2 : baisse moyenne de l'ordre de 0,9 à 1,6 m ;

La capacité du lit dans la partie naturelle du Bitoulet devient supérieure à 100 m³/s (à savoir l'objectif de protection) :

Tronçon	Limite amont	Limite aval	Capacité du lit en état actuel	Capacité du lit en état aménagé – Sc 1	Capacité du lit en état aménagé – Sc 2
1	Pont de Bardejean (P 33)	Seuil du stade (P 27)	45 m ³ /s	> 200 m ³ /s	> 200 m ³ /s
2	Seuil du stade (P 26)	Résidences Plein Soleil (P 22)	70 m ³ /s	160 m ³ /s	125 m ³ /s
3	Résidences Plein Soleil (P 21)	Avenue Ménard (P 19)	65 m ³ /s	120 m ³ /s	120 m ³ /s
4	Avenue Ménard (P 18)	Allée du clos du Bitoulet (P 15)	100 m ³ /s	120 m ³ /s	120 m ³ /s

Tableau 27 : Capacité du lit sur le linéaire modifié

7.6.1.7 Estimatif du coût des travaux

Les prix des travaux de génie civil (donc hors maîtrise foncière) des scénarios 1 et 2 ont été estimés au stade préliminaire. Les postes suivants ont été pris en compte :

- Installation de chantier et débroussaillage,
- Terrassements (déblais, évacuation, reprofilage, remblais),
- Végétalisation (dont mise en œuvre de géotextile),
- Dévoiement de réseaux,
- Ouvrages – Génie civil (dont les passerelles du stade et de la résidence Plein Soleil),
- Etudes et reconnaissances complémentaires (topographie et géotechnique).

Cette estimation a abouti à un montant de l'ordre de :

- **4,3 millions d'€ HT pour le scénario 1,**
- **4,1 millions d'€ HT pour le scénario 2.**

En complément de ces travaux, il pourrait être envisagé de mettre en œuvre une protection rapprochée en rive droite sur un linéaire de l'ordre de 250 m jusqu'à la passerelle du stade (cf. figure ci-dessous). Le projet de renaturation permet dans cette zone le passage d'une crue rare sans débordement majeur. De ce fait, il pourrait être envisagé de coupler un projet de renaturation moins ambitieux avec cette protection en rive droite. Cette possibilité pourra faire l'objet de détails dans les études à venir.

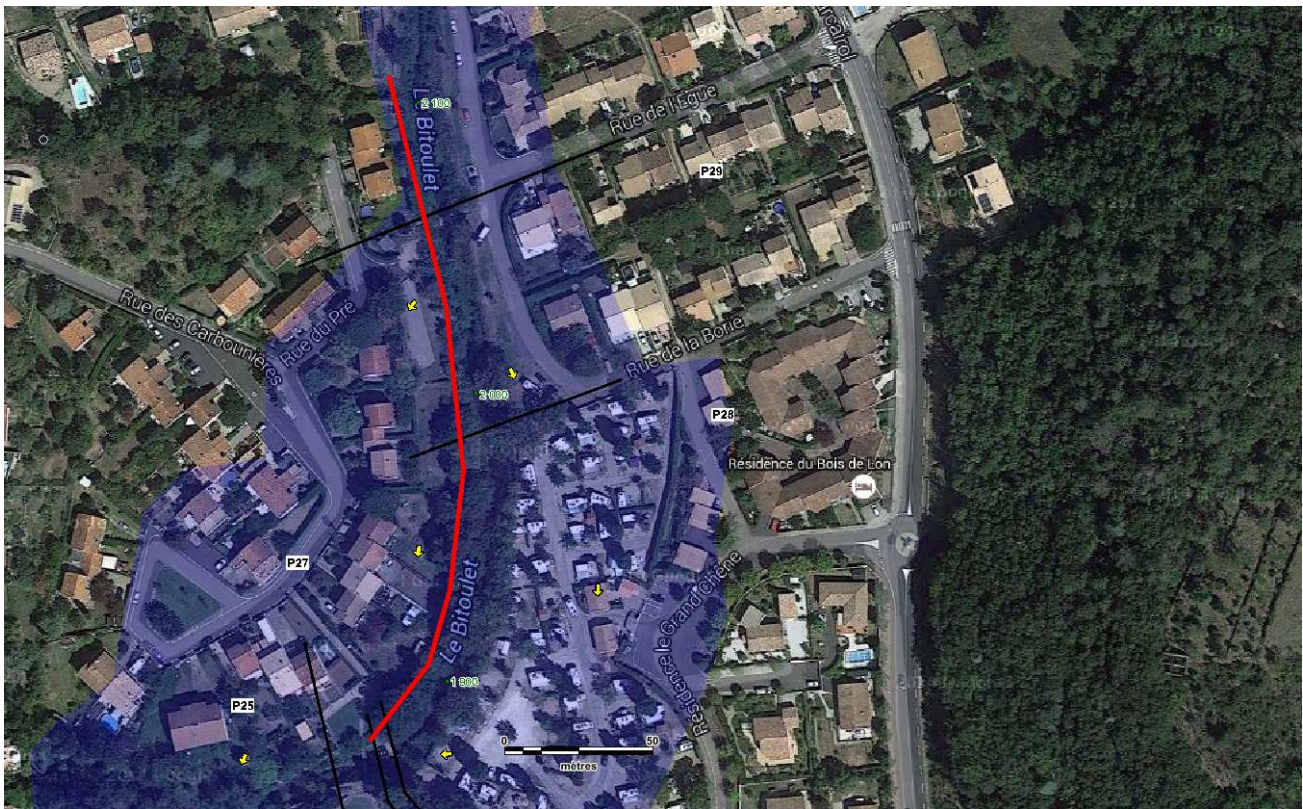


Figure 45 : Protection complémentaire rive droite

7.6.2 AVAL DE LAMALOU-LES-BAINS

Depuis le pont de l'avenue Ménard jusqu'à la confluence avec l'Orb : il s'agit de la partie artificielle du lit du Bitoulet, excepté à l'aval de la zone urbaine.

7.6.2.1 Principes d'aménagement

La situation actuelle peut être synthétisée de la manière suivante :

- **Hydraulique** : excepté des hauteurs de murs hétérogènes aboutissant à des "points bas", il est difficile d'améliorer l'hydraulicité du lit actuel compte tenu du caractère totalement bétonné et de la disponibilité foncière, en tenant compte des bâtiments et infrastructures existantes ;
- **Ecologique** : A l'inverse, la situation actuelle ne présente aucune capacité d'accueil de la faune et la flore inféodée au cours d'eau. La partie bétonnée du Bitoulet constitue une rupture de la continuité écologique entre le Bitoulet naturel et l'Orb.

Deux approches sont donc proposées :

- **Un scénario purement hydraulique, sans impact foncier** : il s'agit d'homogénéiser les hauteurs des murs de protections de la traversée bétonnée du Bitoulet ; il a été présenté plus tôt dans le rapport,
- **Un scénario de renaturation écologique et de réduction du risque d'inondation** : l'amélioration écologique passant par une reconquête du caractère naturel du cours d'eau.

Pour le scénario de renaturation écologique, il n'est pas envisageable, en conservant l'emprise actuelle du lit mineur, de conserver la capacité avant débordement du Bitoulet (estimée de l'ordre d'une crue de période de retour 5 ans). Des tests ont été réalisés sur modèle hydraulique en modifiant les coefficients de Strickler du lit afin de prendre en compte les effets de la renaturation. Les profils en long ci-dessous exposent les résultats de cette analyse pour les événements de période de retour 5 ans et 10 ans :

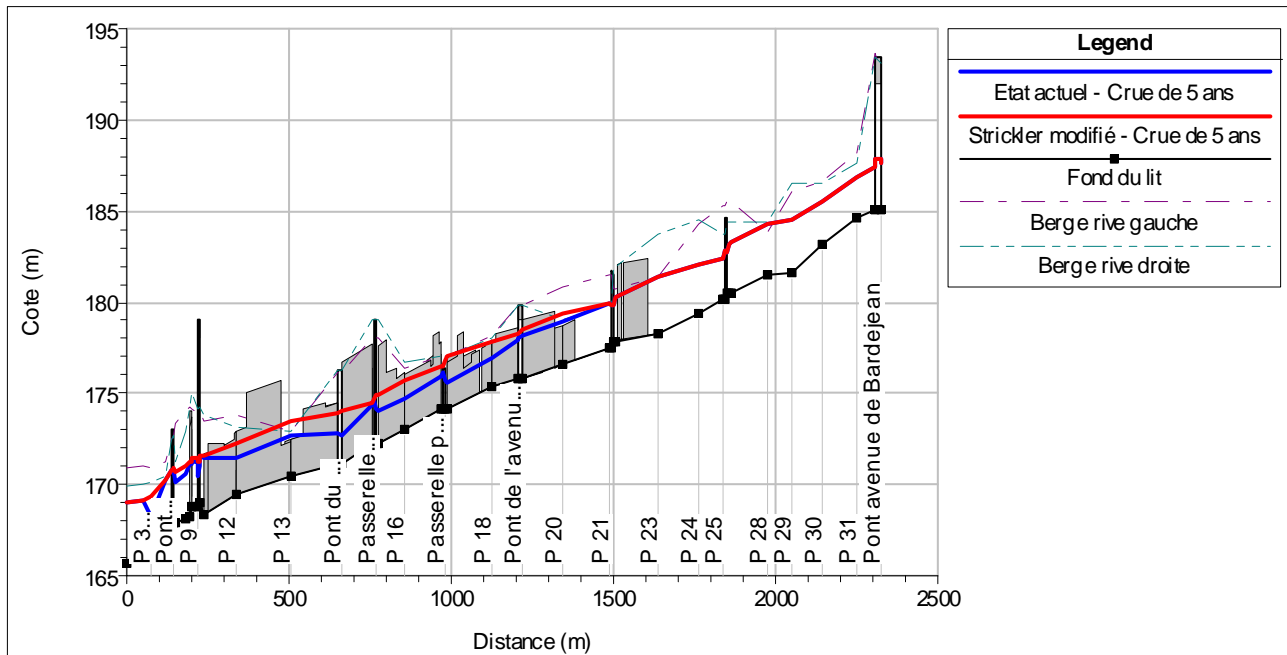


Figure 46 : Ligne d'eau pour la crue de période de retour 5 ans - Strickler modifié dans la partie bétonnée

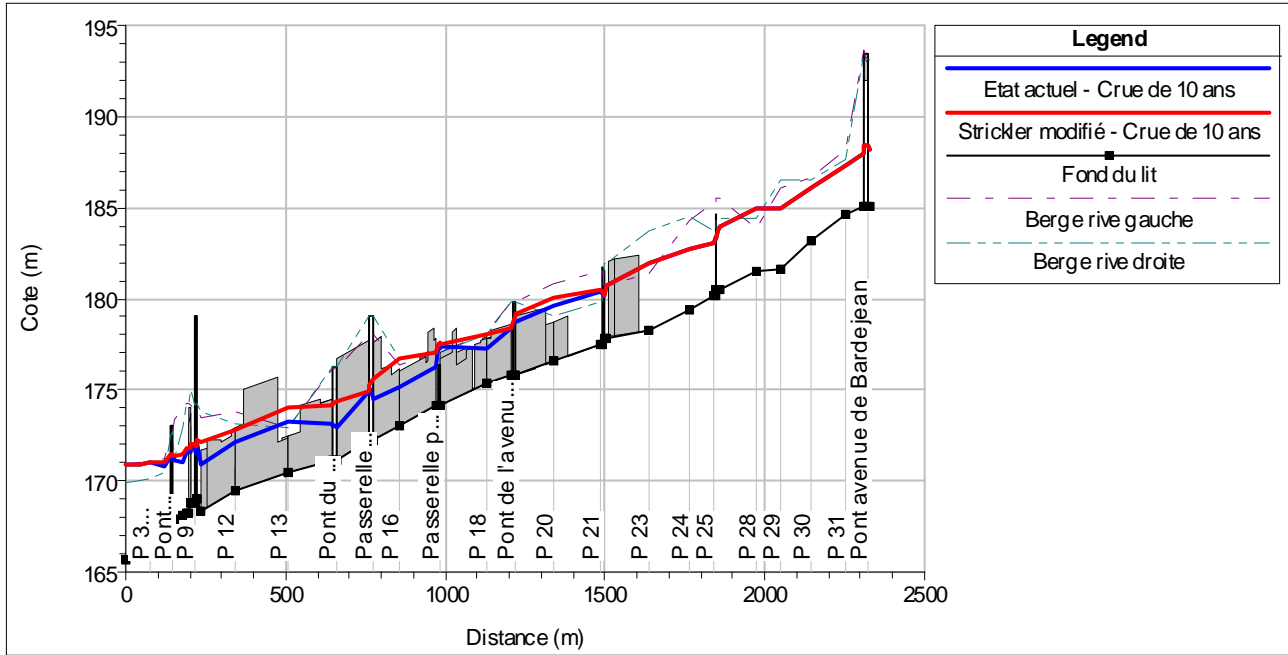


Figure 47 : Ligne d'eau pour la crue de période de retour 10 ans - Strickler modifié dans la partie bétonnée

La renaturation de la partie artificialisée du Bitoulet en conservant l'emprise actuelle du lit mineur entraîne une augmentation moyenne de la ligne d'eau comprise entre 0,5 m et 1,5 m pour la crue de période de retour 10 ans et entre 0,5 m et 1,4 m pour la crue de période de retour 5 ans. Ces rehausses ne sont pas acceptables au vu des enjeux touchés par les débordements du cours d'eau.

De fait, la seule solution permettant de conserver le double objectif écologique et hydraulique, est de regagner de la place pour le cours d'eau. Un profil type de renaturation est présenté ci-dessous :

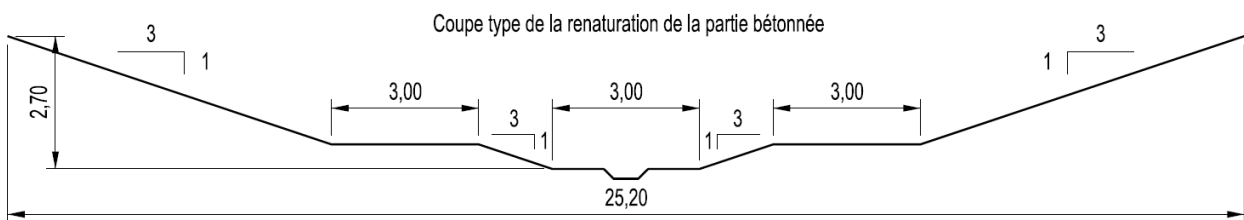


Figure 48 : Section type proposée pour la renaturation de la zone aval bétonnée

7.6.2.2 Réseaux

Les demandes de renseignements auprès des concessionnaires de réseaux ont été effectuées : plusieurs réseaux longent le cours d'eau ou sont traversants.

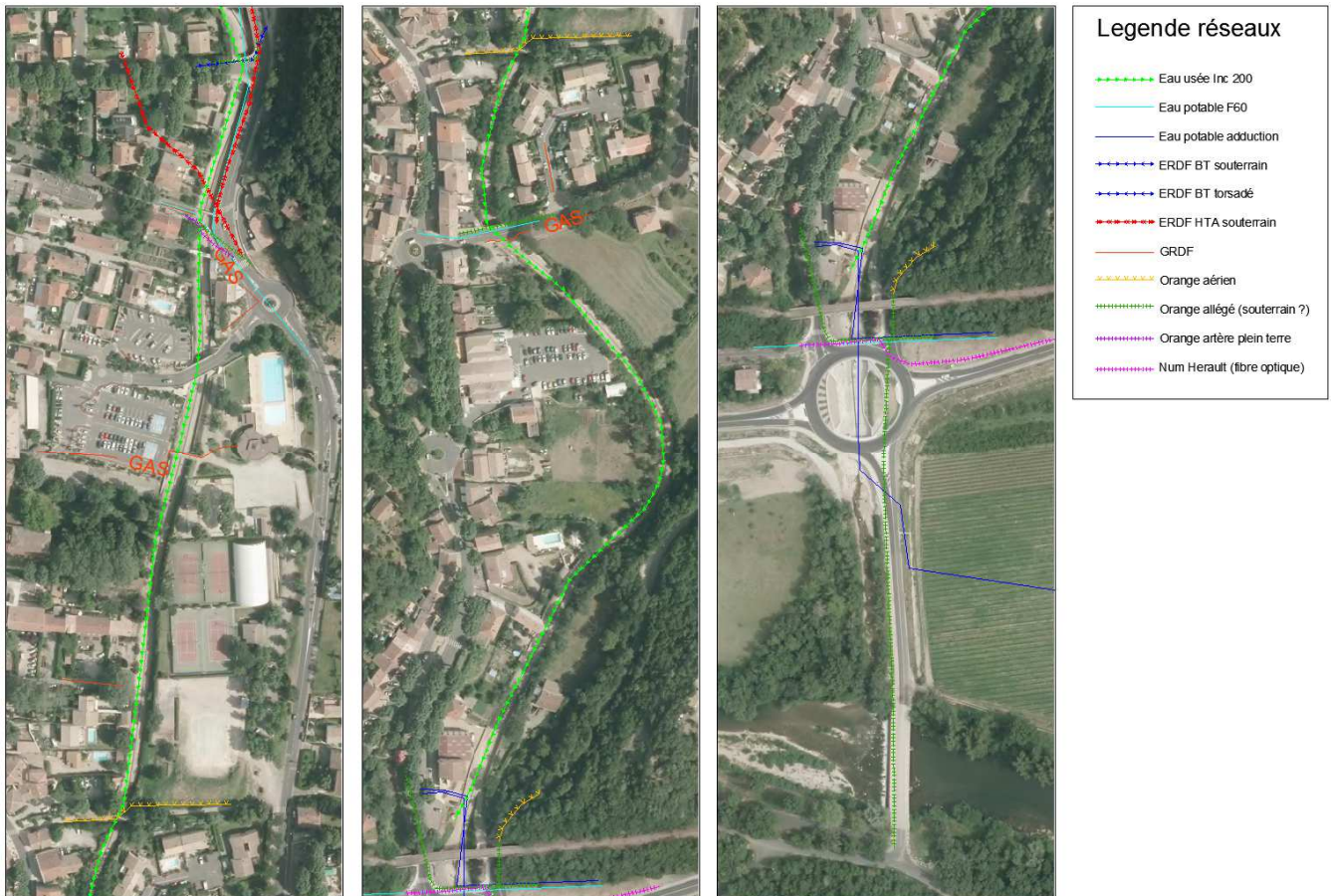


Figure 49 : Présence de réseaux en aval de Lamalou-les-Bains

7.6.2.3 Emprise du projet sur la vue en plan – effets sur le foncier

Compte tenu de la complexité de ce projet et notamment des contraintes foncières qu'il implique, il est apparu prématuré de l'étudier en détails.

Seule une emprise approximative, adaptée a minima en fonction de l'occupation des sols et des infrastructures est proposée ci-dessous. Elle donne une indication des bâtiments et infrastructures publiques impactées par un tel projet.

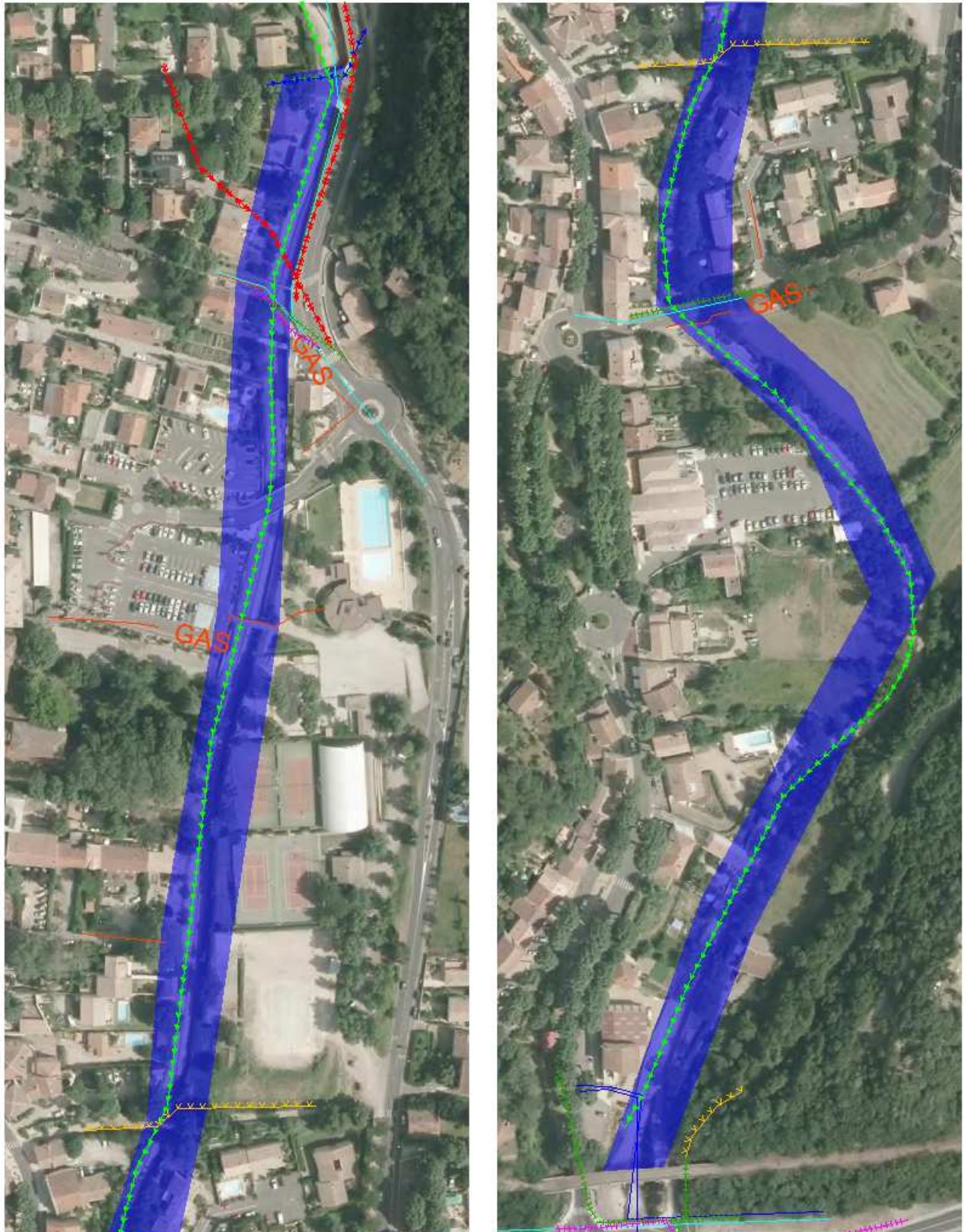


Figure 50 : Emprise du projet de renaturation de la zone aval bétonnée

7.6.2.4 Impact hydraulique

La section type présentée dans les paragraphes précédents permet le transit d'une crue décennale sans débordement.

7.6.2.5 Estimatif du coût des travaux

Devant l'importance des incertitudes, des contraintes foncières, allant jusqu'à la faisabilité sociale, politique et économique de ce scénario, nous ne proposons pas à ce stade de chiffrage. Une étude spécifique devra être engagée en cas de décision de poursuivre dans cette voie.

7.7 AMELIORATION DE LA PREVISION ET ALERTES

7.7.1 PREVISION

La commune de Lamalou-les-Bains dispose déjà de plusieurs outils pour la vigilance et l'alerte en cas de crue :

- **La vigilance météorologique de Météo France** : elle est conçue pour informer la population et les pouvoirs publics en cas de phénomènes météorologiques dangereux. Elle vise à attirer l'attention de tous sur les dangers potentiels d'une situation météorologique (vent violent, vagues-submersion, pluie-inondation, inondation, orage, neige/verglas, avalanche, canicule, grand froid) et à faire connaître les précautions pour se protéger. Quatre niveaux de vigilance sont possibles : vert, jaune, orange et rouge. La diffusion de cette information se fait aux autorités compétentes (préfectures qui relaient aux communes) mais aussi au grand public par le biais des médias et d'internet. Cette vigilance est cependant émise à une échelle départementale entraînant des alertes sur un département entier même si une seule partie est touchée.
- La commune de Lamalou-les-Bains a décidé suite à la crue de septembre 2014 de s'abonner **aux services de la société Predict**. Cette société offre aux communes une vigilance plus détaillée, à l'échelle communale, et en temps réel. Ce système offre une veille hydro-météorologique permanente (24h/24 et 7j/7) qui permet d'informer immédiatement les utilisateurs (communes, entreprises, particuliers...) lors de risques d'inondations, de submersion, de tempête ou de fortes chutes de neiges. Les outils de PREDICT permettent d'anticiper, localiser et analyser précisément le risque induit, sa chronologie et son intensité. Grâce à ces informations, il est possible de fournir des conseils pertinents et personnalisés pour la gestion de la crise et l'activation, à bon escient, de plans communaux de sauvegarde (PCS).



Figure 51 : Centre opérationnel de PREDICT Services

Par ailleurs, la commune est dotée d'un Plan Communal de Sauvegarde (PCS) qui a été mis à jour à la lumière des événements de septembre 2014.

La figure suivante présente la carte du cumul de précipitations lors de l'évènement de septembre 2014 réalisée par PREDICT sur le bassin de l'Orb et de ses affluents.

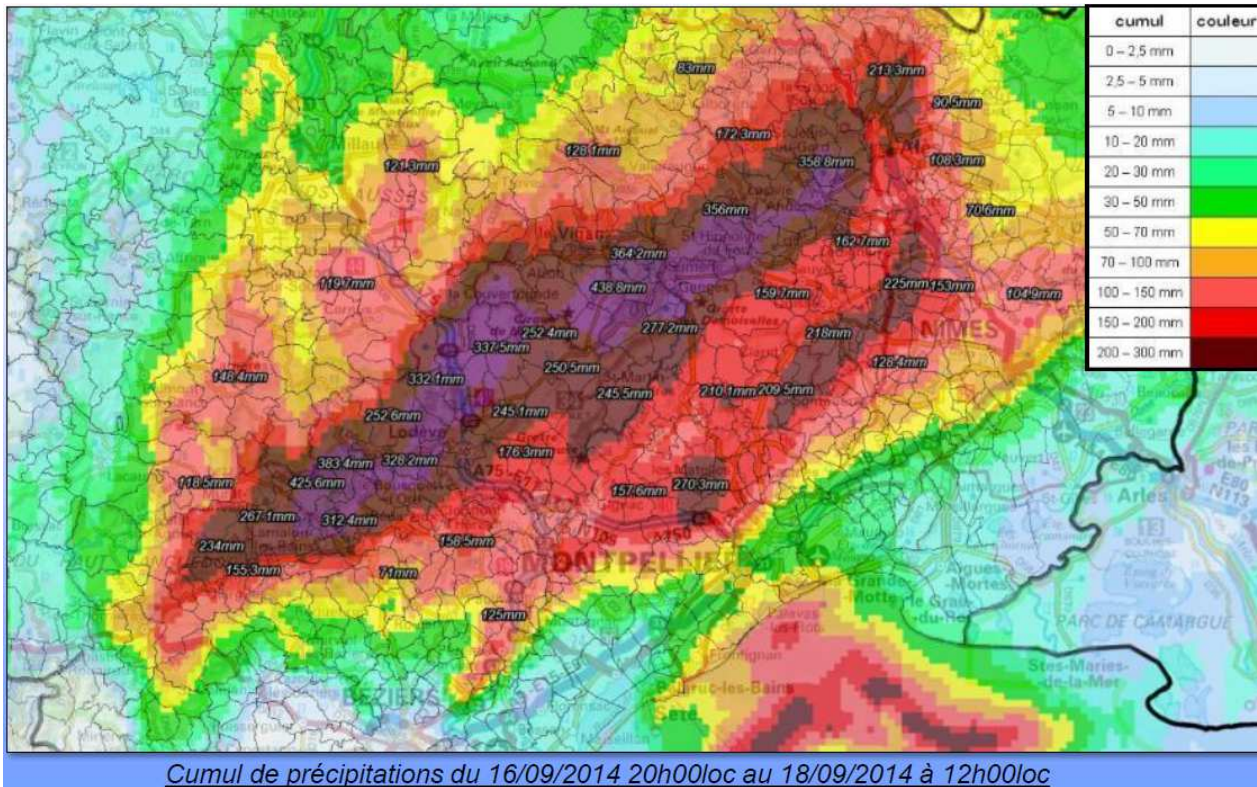


Figure 52 : Cumul de précipitations lors de l'évènement de septembre 2014 - PREDICT

ISL s'est rendu dans les locaux cette dernière afin de savoir si des pistes d'amélioration de la prévision via le système PREDICT existaient (la pose d'un pluviomètre télétransmis au sein du bassin versant du Bitoulet notamment). La réponse fut négative.

Ainsi, en l'état actuel des choses, la commune dispose des outils de prévision les plus précis et les plus récents.

7.7.2 ALERTES

L'actuel système d'alerte développé par la Mairie de Lamalou-les-Bains comprend l'appel à toutes les personnes situées en zone vulnérable par des agents communaux. Il constitue un outil précieux pour la prévention des dommages aux personnes et aux biens.

Par ailleurs, la commune dispose d'un véhicule équipé de hauts parleurs pour prévenir la population.

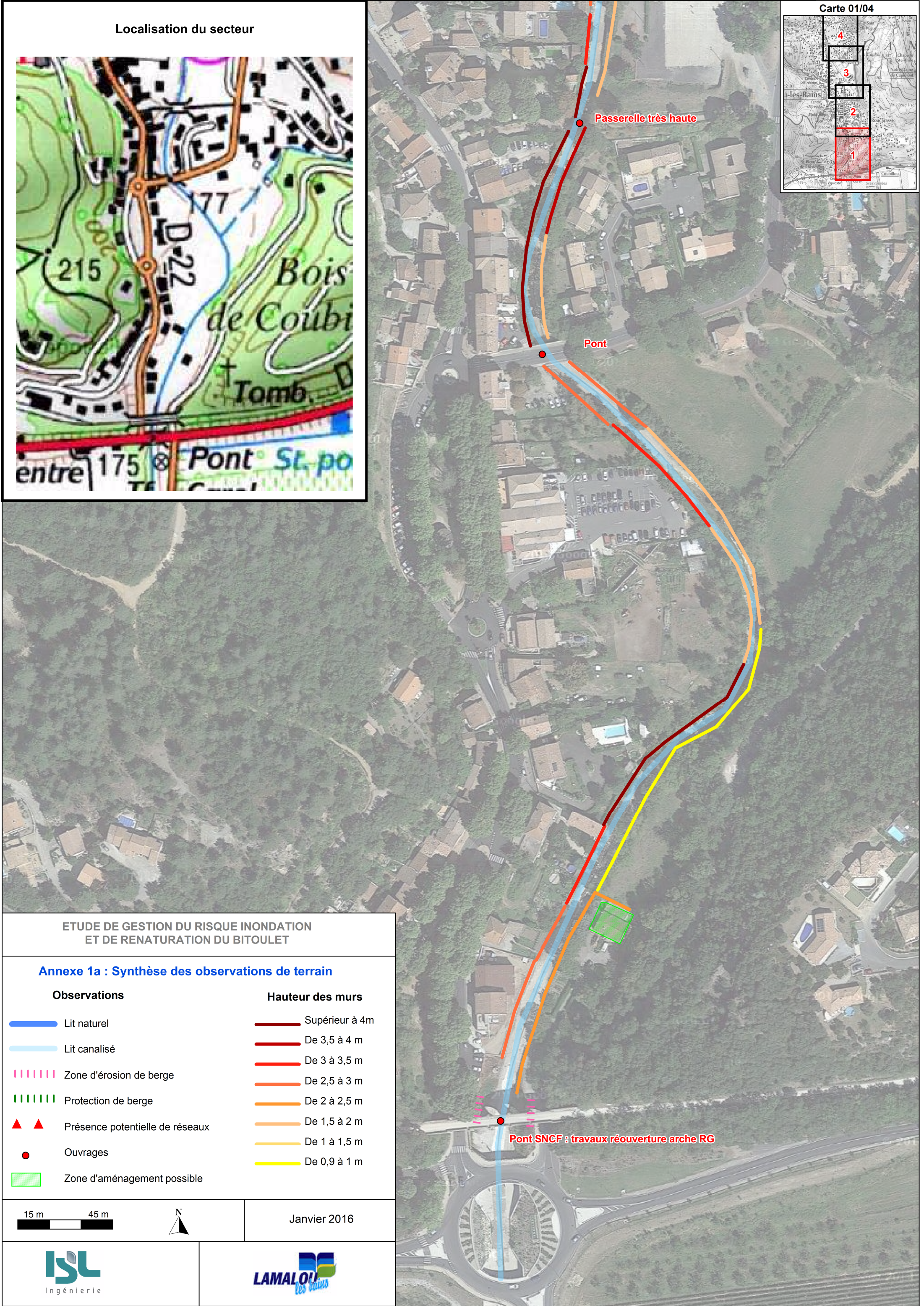
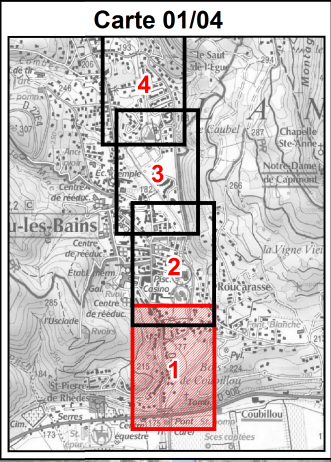
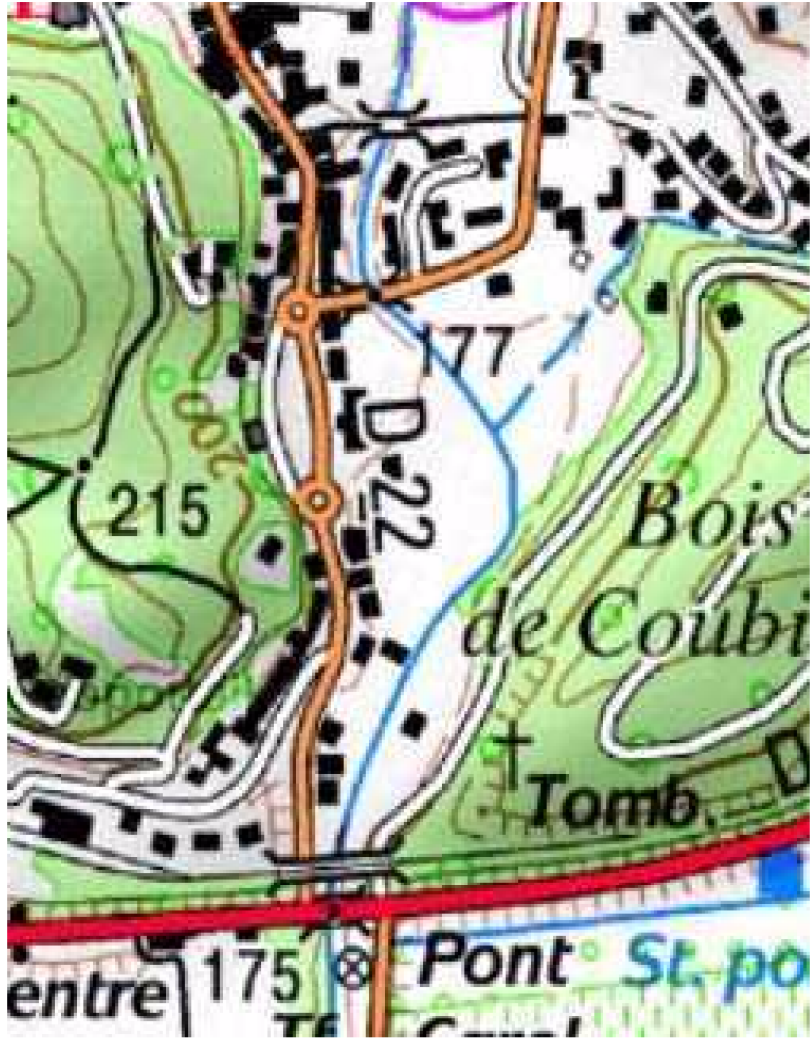
La commune ne possède cependant pas de système d'alerte automatique. En 2014, la mairie de Lamalou-les-Bains a demandé un devis à la société Gedicom pour un abonnement à un service de téléalerte. Les prix proposés par Gedicom sont synthétisés dans le tableau ci-après.

Service	Coûts
Mise en œuvre du service	1 500 € HT
Coût annuel de maintenance du service	2 400 € HT / an
Tarif des communications :	
• Vers les téléphones fixes	0,05 € HT / minute
• Vers les mobiles	0,12 € HT / minute
• Envoi d'un SMS	0,12 € HT
• Envoi d'un fax	0,15 € HT / page
• Envoi d'un e-mail	gratuit
Option 1 : Interface cartographique	900 € HT
Option 2 : Inscription sur internet des coordonnées des destinataires	850 € HT

Figure 53 : Coût de la mise en place d'un système de téléalerte

ANNEXE 1 CARTES DES RELEVÉS DE TERRAIN

Localisation du secteur



ETUDE DE GESTION DU RISQUE INONDATION ET DE RENATURATION DU BITOULET

Annexe 1a : Synthèse des observations de terrain

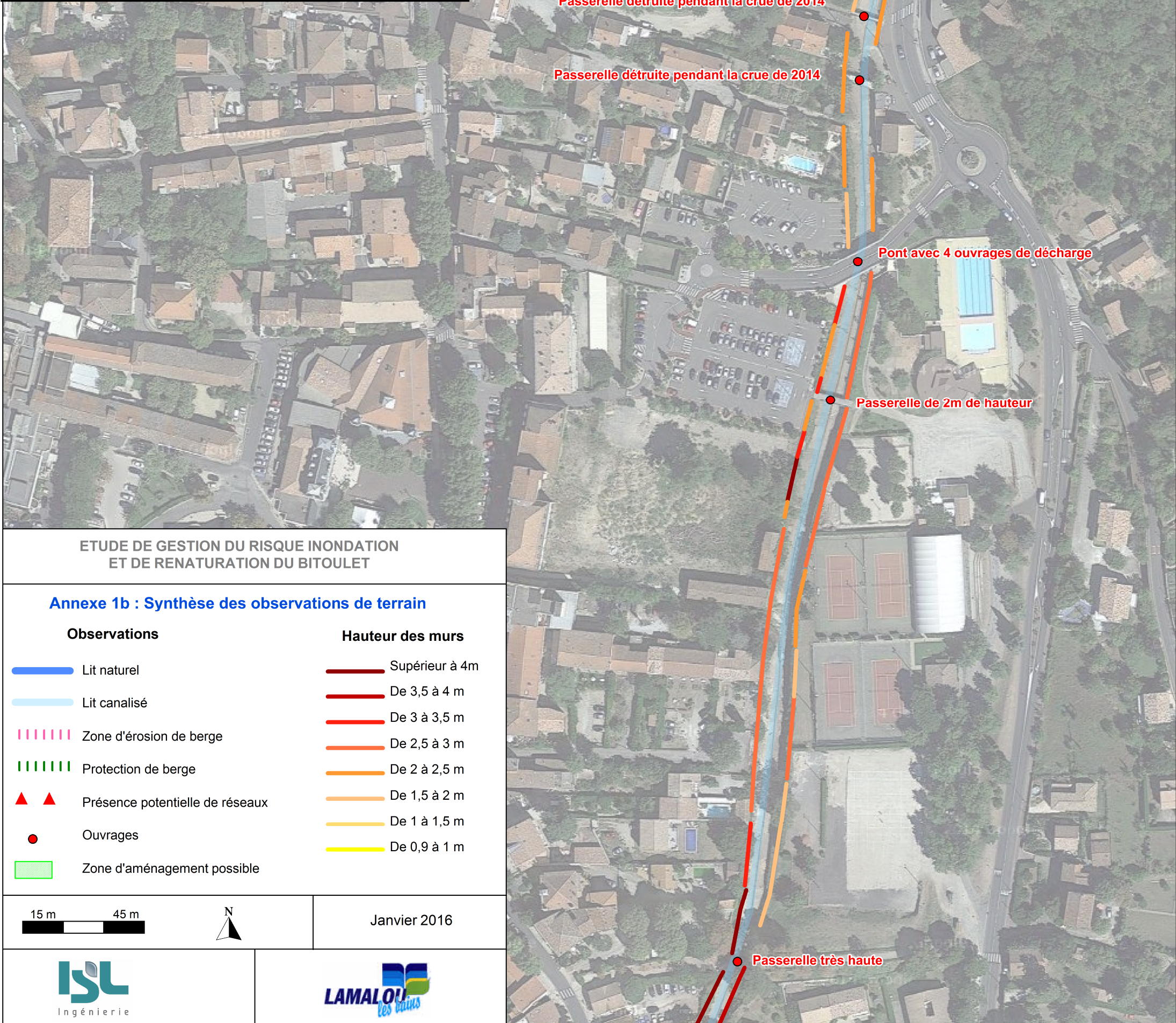
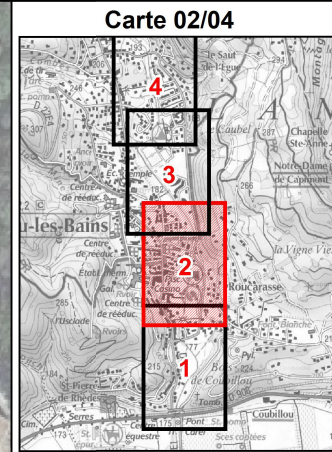
Observations	Hauteur des murs
Lit naturel	Supérieur à 4m
Lit canalisé	De 3,5 à 4 m
Zone d'érosion de berge	De 3 à 3,5 m
Protection de berge	De 2,5 à 3 m
Présence potentielle de réseaux	De 2 à 2,5 m
Ouvrages	De 1,5 à 2 m
Zone d'aménagement possible	De 1 à 1,5 m
	De 0,9 à 1 m



Janvier 2016



Localisation du secteur



ETUDE DE GESTION DU RISQUE INONDATION ET DE RENATURATION DU BITOULET

Annexe 1b : Synthèse des observations de terrain

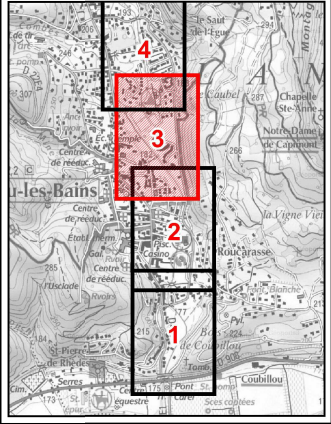
Observations

- Lit naturel
- Lit canalisé
- Zone d'érosion de berge
- Protection de berge
- Présence potentielle de réseaux
- Ouvrages
- Zone d'aménagement possible

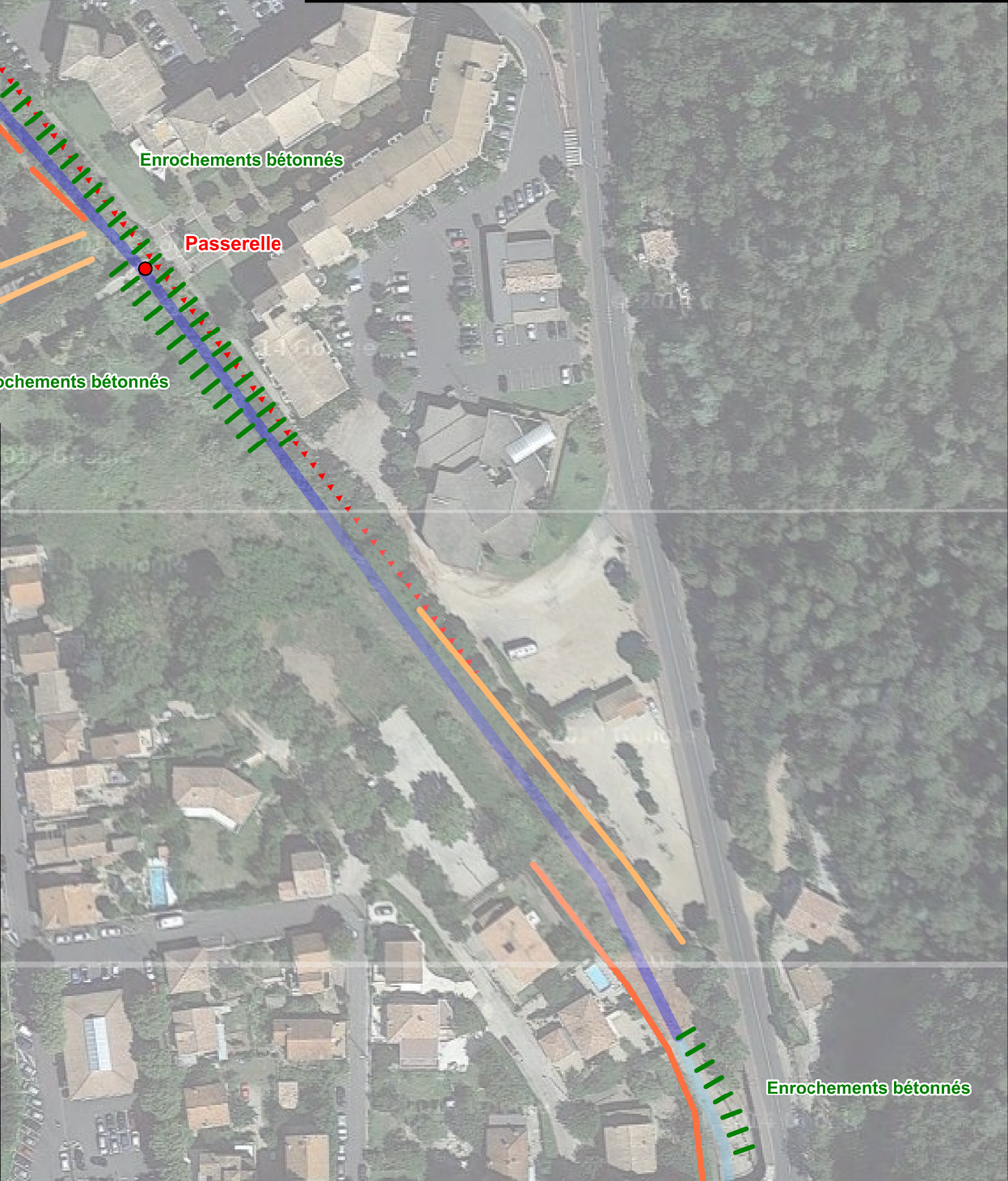
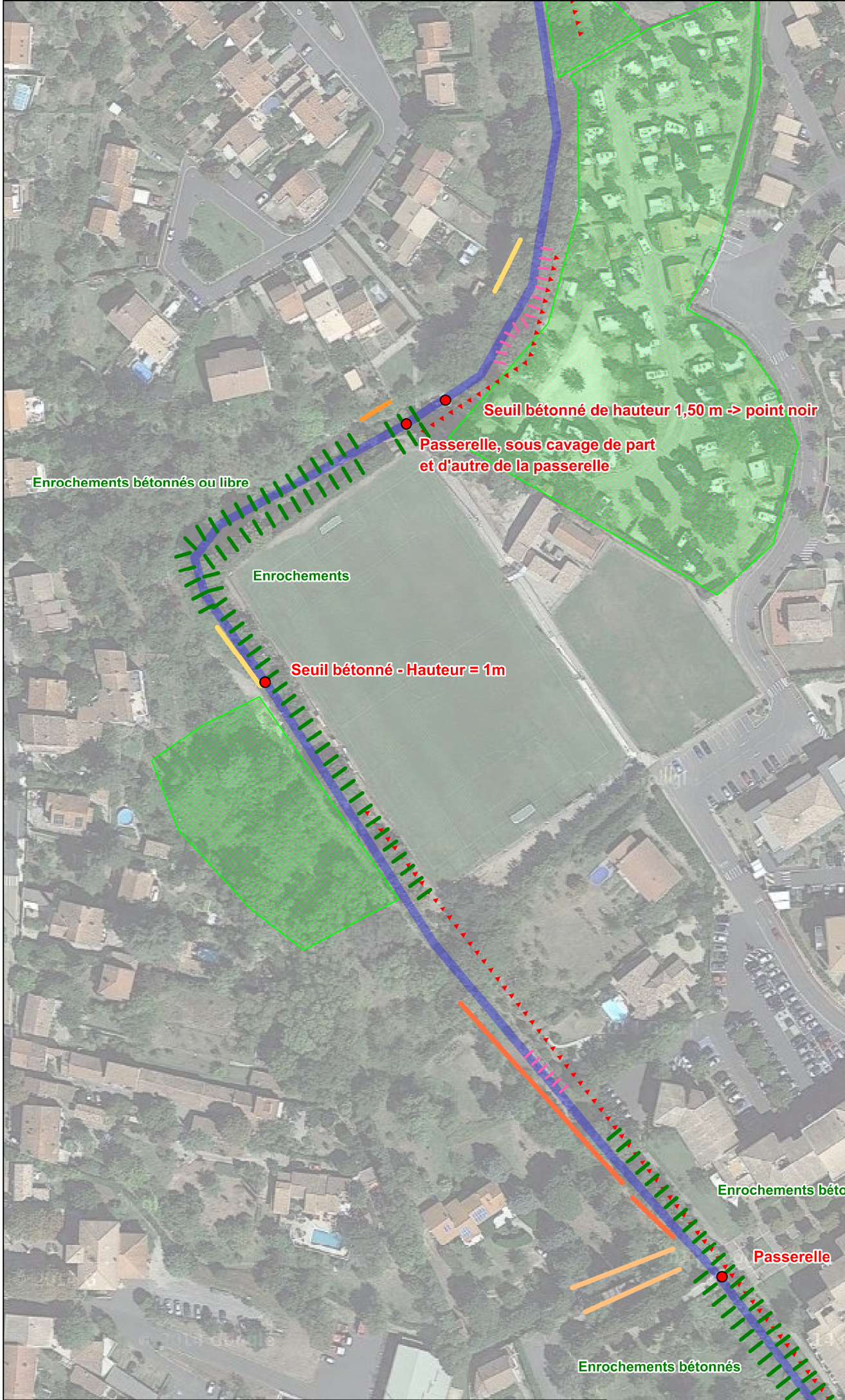
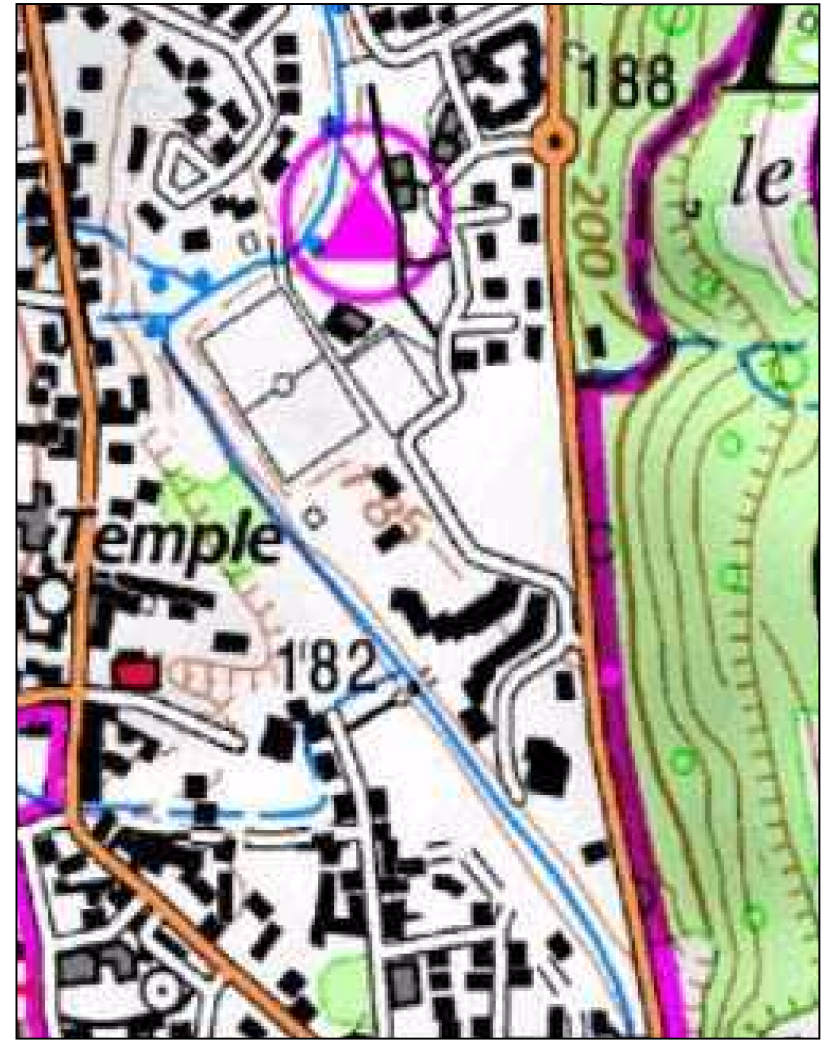
Hauteur des murs

- Supérieur à 4m
- De 3,5 à 4 m
- De 3 à 3,5 m
- De 2,5 à 3 m
- De 2 à 2,5 m
- De 1,5 à 2 m
- De 1 à 1,5 m
- De 0,9 à 1 m

Janvier 2016




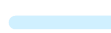





Localisation du secteur










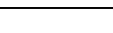
ETUDE DE GESTION DU RISQUE INONDATION ET DE RENATURATION DU BITOULET

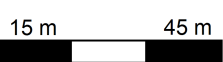
Annexe 1c : Synthèse des observations de terrain

Observations

-  Lit naturel
-  Lit canalisé
-  Zone d'érosion de berge
-  Protection de berge
-  Présence potentielle de réseaux
-  Ouvrages
-  Zone d'aménagement possible

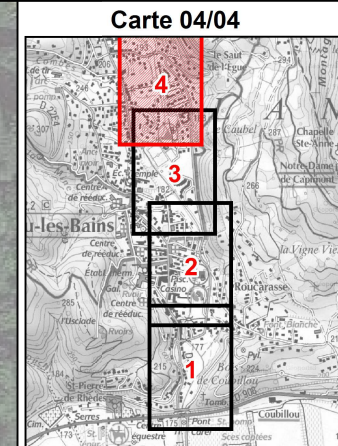
Hauteur des murs

-  Supérieur à 4m
-  De 3,5 à 4 m
-  De 3 à 3,5 m
-  De 2,5 à 3 m
-  De 2 à 2,5 m
-  De 1,5 à 2 m
-  De 1 à 1,5 m
-  De 0,9 à 1 m

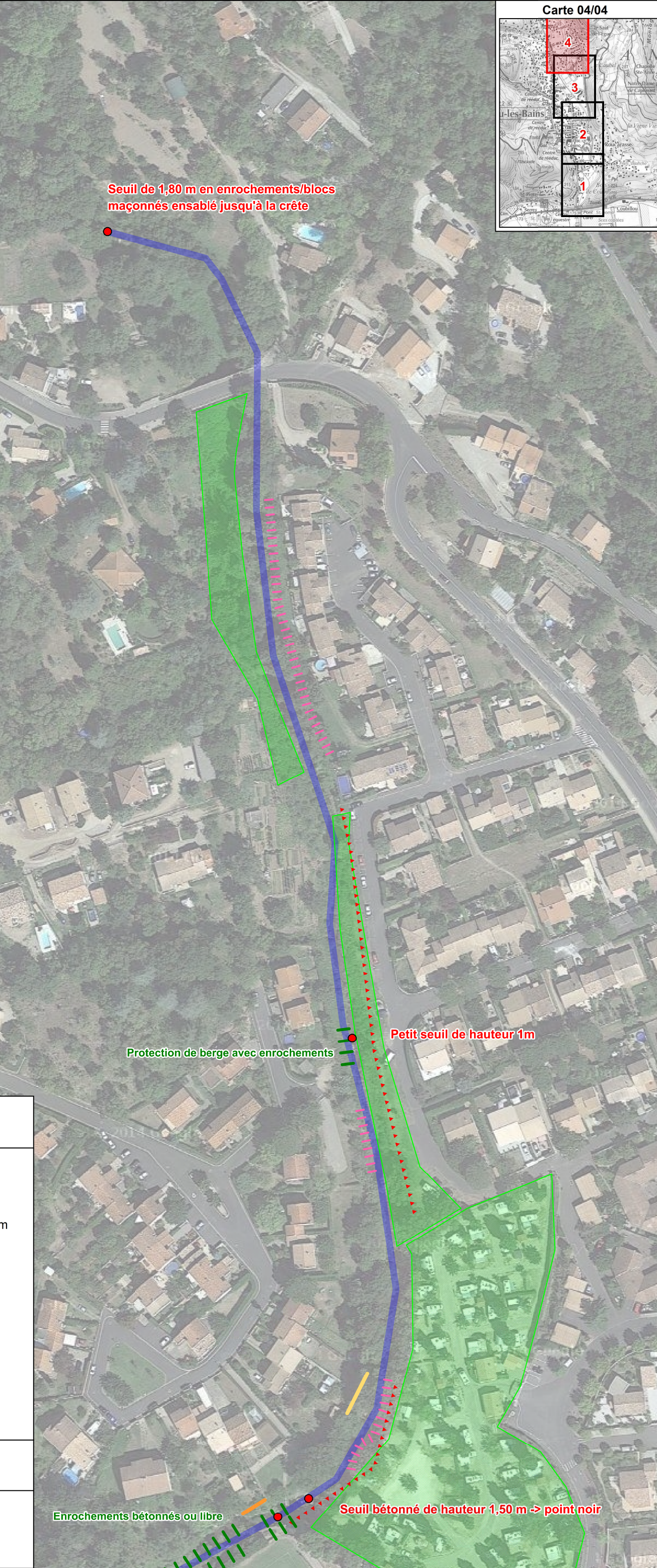


Janvier 2016

Localisation du secteur



Seuil de 1,80 m en enrochements/blocs maçonnés ensablé jusqu'à la crête



Protection de berge avec enrochements

Petit seuil de hauteur 1m

ETUDE DE GESTION DU RISQUE INONDATION ET DE RENATURATION DU BITOULET

Annexe 1d : Synthèse des observations de terrain

Observations	Hauteur des murs
Lit naturel	Supérieur à 4m
Lit canalisé	De 3,5 à 4 m
Zone d'érosion de berge	De 3 à 3,5 m
Protection de berge	De 2,5 à 3 m
Présence potentielle de réseaux	De 2 à 2,5 m
Ouvrages	De 1,5 à 2 m
Zone d'aménagement possible	De 1 à 1,5 m
	De 0,9 à 1 m



Janvier 2016



Enrochements bétonnés ou libre

Seuil bétonné de hauteur 1,50 m -> point noir

ANNEXE 2 PRESENTATION GENERALE DU MODELE GESRES

Architecture du modèle

Le modèle construit sur le bassin du Bitoulet a été établi à partir du logiciel GESRES^{ISL} développé spécifiquement par ISL dans le cadre d'études similaires.

Ce modèle, une fois calé, permet d'obtenir le débit en tout point du modèle et d'étudier l'efficacité des ouvrages de rétention.

Le système mis en œuvre comprend :

- un modèle pluie-débit de type hydrogramme unitaire ;
- un modèle de propagation et de sommation des hydrogrammes de type Muskingum.

Le modèle comprend un ensemble de **NOEUDS**, 2 nœuds délimitant un **BIEF**. Un nœud reçoit les apports :

- de son bassin versant propre (modèle pluie-débit) ;
- du bief amont (modèle de propagation).

Ces apports sont ensuite propagés dans le bief aval avec la possibilité d'introduire, avant la propagation, un écrêtement par une retenue ou la mobilisation d'une zone d'expansion naturelle ou artificielle en dérivation (création d'un déversoir sur une digue).

Il est possible d'associer à chacun des nœuds une table H/Q/S (hauteur ou cote, débit, section) issue d'un calcul hydraulique local ou des études déjà réalisées.

Les nœuds doivent être positionnés de manière stratégique sur le bassin versant :

- à l'exutoire des principaux sous-bassins versants ;
- au droit des différentes retenues d'eau.

Le modèle GESRES^{ISL} est de plus couplé à une base de données géographique au format Mapinfo qui permet d'extraire de manière automatique les caractéristiques des différents éléments structurels du modèle renseignées dans le système d'information géographique (nœuds, biefs, bassins versants).

Lois utilisées

Module hydrologique

Le modèle pluie-débit utilisé dans le logiciel GESRES^{ISL} est du type de l'hydrogramme unitaire SCS (Soil Conservation Service). Cette méthode permet dans un premier temps le calcul du volume d'eau ruisselé, via le coefficient CN (Curve Number), et dans un second temps la construction d'un hydrogramme unitaire.

- **Evaluation du ruissellement - Détermination des coefficients CN**

La méthode SCS part du constat que pour une pluie très importante le ruissellement maximum potentiel R tend vers P, le volume total de pluie : $\frac{R}{P} \rightarrow 1$.

Parallèlement, le volume d'eau non ruisselé P-R tend vers S la rétention potentielle maximale du terrain : $\frac{P - R}{S} \rightarrow 1$.

Pour cette pluie limite, on a donc : $\frac{R}{P} = \frac{P - R}{S}$.

Plus exactement, lorsque la pluie commence à tomber, il y a stockage superficiel (dû aux aspérités du terrain naturel, à la végétation...). La relation précédente s'écrit alors (avec « Ia », la quantité de pluie retenue avant le début du ruissellement) : $\frac{R}{P - Ia} = \frac{(P - Ia) - R}{S}$.

Cette relation permet la détermination du ruissellement R : $R = \frac{(P - Ia)^2}{P - Ia + S}$.

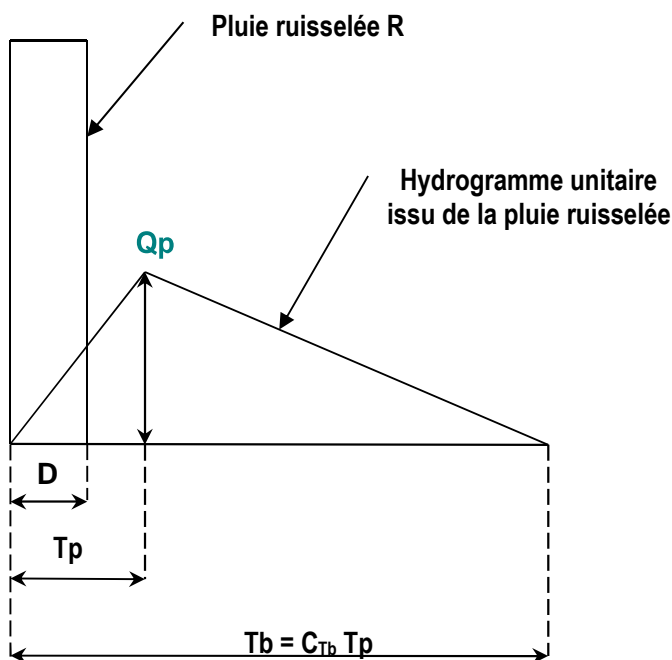
La méthode propose, en l'absence d'information plus précise, la formulation empirique : $Ia = 0,2S$.

L'infiltration potentielle maximale S est liée au paramètre de ruissellement CN par la relation suivante : $S = 25.4 \left(\frac{1000}{CN} - 10 \right)$.

CN est un coefficient représentatif de la nature du sol, de son occupation et des antécédents pluvieux. L'appréciation des volumes d'eau ruisselés se ramène donc à l'évaluation du paramètre CN. La détermination de ce paramètre est détaillée dans le paragraphe consacré à la définition des bassins versants du modèle.

- **Hydrogramme unitaire**

La construction de l'hydrogramme unitaire est réalisée en répartissant le volume d'eau ruisselé selon un triangle unitaire pour chaque pas de temps D (cf. schéma suivant) :



La méthode de l'hydrogramme unitaire suppose que le pic de débit arrive après un temps T_p , temps de montée de l'hydrogramme unitaire.

Le temps de base T_b , ou temps total sur lequel se répartit le volume d'eau ruisselé à un instant t , est estimé voisin de 2,7 à 3,2 T_p . En cherchant à répartir le volume d'eau ruisselé sous la forme d'un triangle, on aboutit à un débit de pointe Q_p issu de la relation suivante :

$$R \times S = \frac{T_b \times Q_p}{2}$$

Avec S = surface du bassin versant drainé

R = lame d'eau ruisselée

Module de propagation

Pour les calculs de propagation de l'hydrogramme le long des biefs, GESRES^{ISL} utilise la méthode de Muskingum, développée par Mc Carty en 1938 lors de l'étude de la rivière de Muskingum. Cette méthode est basée sur un concept simple qui consiste à écrire que le volume d'eau stocké dans un bief est proportionnel à une moyenne pondérée des débits observés au même instant aux deux extrémités du bief :

$$V = K(\alpha \cdot Q_e + (1 - \alpha) \cdot Q_s)$$

En tenant compte également de l'équation de continuité :

$$dV = (Q_e - Q_s)dt$$

Mc Carty aboutit à la relation suivante :

$$Q_s(t + \Delta t) = a_0 \cdot Q_e(t + \Delta t) + a_1 \cdot Q_e(t) + a_2 \cdot Q_s(t)$$

Avec

$$a_0 = \frac{\frac{\Delta t}{2} - \alpha \cdot K}{\frac{\Delta t}{2} + (1 - \alpha) \cdot K} \quad a_1 = \frac{\frac{\Delta t}{2} + \alpha \cdot K}{\frac{\Delta t}{2} + (1 - \alpha) \cdot K} \quad a_2 = \frac{(1 - \alpha) \cdot K - \frac{\Delta t}{2}}{(1 - \alpha) \cdot K + \frac{\Delta t}{2}}$$

- K est homogène à un temps et peut-être assimilé au temps de transfert de la crue au sein d'un bief ;
- α est un coefficient d'atténuation compris entre 0 et 0,5. La valeur 0 correspond à une atténuation maximale de la crue, la valeur 0,5 à une atténuation nulle.