

CINOR  
3 rue de la Solidarité - Le triangle  
97490 Sainte Clotilde

# Etude Préliminaire relative au confortement des berges de la Rivière des Pluies au droit de la RD45



Rapport d'étude

Réf. RE15-027/Etude  
préliminaire  
Mars 2016

## SUIVI ET VISA DU DOCUMENT

Réf. RE15-027

Etude : Etude Préliminaire relative au confortement des berges de la Rivière des Pluies au droit de la RD45

Phase : Etude préliminaire

Date de remise : Juin 2016

Version : 2.1

Statut du document : Définitif

Propriétaire du document : CINOR

Diffusion : Yvonnick CORBEL (CINOR)

---

Chef de projet : Clément THOMAS

---

Rédacteur : Clément THOMAS

Vérificateur : Mathieu COLLART

---

Co-traitants : SCP (Philippe SAURA)



ISO 9001-2008  
ISO 14001-2004



*Liberté • Égalité • Fraternité*

**RÉPUBLIQUE FRANÇAISE**

*Agrément Diques –  
Barrages*

*Arrêté du 13 juin 2014 portant  
agrément d'organismes  
intervenant pour la sécurité des  
ouvrages hydrauliques*



Ingénierie de l'eau - Maîtrise d'œuvre

Résidence les Kréolis - 8-10 rue Axel Dorseuil - 97410 SAINT PIERRE  
Tél : 02 62 96 82 45 - Fax : 02 62 32 69 05 - email : contact-reunion@hydretudes.com

## SOMMAIRE

PREAMBULE .....	6
1. INTRODUCTION.....	6
2. CADRE DU PROJET.....	7
3. <b>OBJET DE L'ETUDE</b> .....	7
4. <b>PERIMETRE DE L'ETUDE</b> .....	7
5. BIBLIOGRAPHIE.....	9
ANALYSE DU SITE.....	10
6. LOCALISATION .....	10
7. TOPOGRAPHIE.....	11
8. OBSERVATIONS DE TERRAIN.....	11
8.1. Secteur 1 : pont RN102 – virage de la RD45 (L = 140 mètres).....	11
8.2. Secteur 2 : virage de la RD45 – habitations amont (L = 240 mètres).....	13
8.3. Projets en cours.....	15
8.4. Définition des enjeux.....	16
9. ANALYSE DIACHRONIQUE .....	17
ANALYSE DES CONTRAINTES GEOTECHNIQUES (ETUDE DE SITE) .....	20
10. ANALYSE DE LA CARTE GEOLOGIQUE .....	20
11. GEOLOGIE DU SITE .....	21
12. SYNTHÈSE DES RECONNAISSANCES ET ÉTABLISSEMENT DE COUPES GEOLOGIQUES .....	22
13. HYPOTHESES SUR LES CARACTERISTIQUES MECANIQUES DES SOLS EN PLACE 24	
13.1. Lit de la rivière.....	24
13.2. Berges .....	24
13.3. Ouvrages de protection existants.....	25
ANALYSE DES CONTRAINTES HYDRAULIQUES ET HYDROGÉOMORPHOLOGIQUES.....	26
14. MODÉLISATION MATHÉMATIQUE 2D DES ÉCOULEMENTS DE LA CRUE CENTENNALE DE LA RIVIÈRE DES PLUIES .....	26
14.1. Description du scénario modélisé.....	26
14.2. <b>Mise en œuvre du modèle et présentation du logiciel Infoworks ICM</b> .....	27
14.2.1. Module 2D.....	27
14.2.2. Intérêt .....	27
14.2.3. Moteur hydraulique 2D .....	27
14.2.4. Maillageur 2D.....	28
14.3. Construction et architecture du modèle 2D.....	29
14.4. Conditions aux limites.....	30
14.5. Topographie .....	32
14.6. Calage du modèle .....	36
15. ANALYSE DES ÉCOULEMENTS.....	37
15.1. Scénario 1 : Pont Desbassyns actuel.....	37
15.1.1. Introduction .....	37
15.1.2. Résultats.....	37
15.2. Scénario 2 : Pont Desbassyns redimensionné .....	41
15.2.1. Introduction .....	41
15.2.2. Résultats.....	41
15.3. <b>Cotes d'inondation en crue centennale</b> .....	43
15.4. Analyse des crues intermédiaires .....	44
16. ÉROSION EXTERNE DE LA BERGE .....	47

16.1.	Introduction.....	47
16.2.	<b>Projection probabiliste d'érosion de la berge et de déstabilisation de la RD45</b>	<b>47</b>
16.2.1.	Analyse des évolutions de la berge en lien avec les évènements hydrauliques depuis 2006.....	47
16.2.2.	Analyse des crues de la Rivière des Pluies depuis 2006.....	48
16.2.3.	Etat des lieux de la vulnérabilité de la Route Départementale 45 vis-à-vis <b>du phénomène d'érosion de berges</b> .....	<b>49</b>
16.2.4.	Conclusions en termes de probabilités de déstabilisation de la berge au droit de la RD45.....	52
17.	AFFOUILLEMENTS LOCAUX ET AFFOUILLEMENTS GENERALISES.....	52
18.	INCISION DU LIT.....	53
	SPECIFICATION ET DIMENSIONNEMENT DES OUVRAGES (PRINCIPES GENERAUX DE CONSTRUCTION).....	54
19.	SOLUTIONS INITIALES ENVISAGEES.....	54
20.	<b>PRINCIPES D'AMENAGEMENTS PROPOSES</b> .....	<b>59</b>
20.1.	Types de protection envisageables.....	59
20.1.1.	Solution épis (proposition initiale étude Sogreah).....	59
20.1.2.	Solution longitudinale.....	59
20.2.	Coupes- <b>types d'aménagement</b> .....	63
20.3.	Niveaux de fondation et de crête.....	63
20.4.	Sectorisation des ouvrages (vues en plan).....	63
20.4.1.1.	Protection du secteur 1 (secteur aval).....	63
20.4.1.2.	Protection du secteur 1 + secteur 2 (secteur amont).....	64
21.	DISPOSITIONS CONSTRUCTIVES.....	65
21.1.	Recommandations pour la stabilité provisoire en phase travaux.....	65
21.2.	Recommandations vis-à-vis des enrochements bétonnés.....	65
21.3.	Incertitudes géotechniques et conséquences sur les solutions du projet.....	66
	INSERTION DES OUVRAGES DANS LEUR ENVIRONNEMENT.....	67
22.	INTRODUCTION.....	67
23.	<b>INTEGRATION DE L'OUVRAGE DE GENIE CIVIL</b> .....	<b>67</b>
24.	TRAITEMENT PAYSAGER DE LA PARTIE BASSE.....	69
25.	TRAITEMENT PAYSAGER DE LA PARTIE HAUTE.....	69
	ESTIMATION DU COUT DES DIFFERENTES SOLUTIONS.....	72
	CALENDRIER DE REALISATION.....	75
	PROGRAMME DES ETUDES COMPLEMENTAIRES A REALISER.....	77
26.	ETUDES GEOTECHNIQUES.....	77
27.	ETUDES ENVIRONNEMENTALES.....	77
	CONCLUSION.....	79
	ANNEXES.....	82

## LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Analyse diachronique de la morphologie de la Rivière des Pluies et du site <b>d'étude</b> .....	19
Tableau 2 : propriétés physiques des alluvions du fond de la Rivière des pluies .....	24
Tableau 3 : propriétés physiques des alluvions des berges.....	24
Tableau 4 : Débits intermédiaires étudiés de la Rivière des Pluies au droit de la RD45 ...	44
Tableau 5 : Débits intermédiaires étudiés de la Rivière des Pluies au droit de la RD45 et paramètres des écoulements associés.....	44
Tableau 6 : Débits mesurés au Pont Desbassyns depuis 2006 et périodes de retour estimées (CVH Réunion) .....	48
Tableau 7 : Analyse des avantages, inconvénients et coûts respectifs des solutions <b>techniques de protection contre l'érosion envisageables</b> .....	60
Tableau 8 : Quantitatif secteur 1 .....	72
Tableau 9 : Quantitatif Secteurs 1 et 2.....	72
Tableau 10 : Récapitulatif du chiffrage des travaux .....	72
Tableau 11 : Chiffrage Tronçon n°1 .....	73
Tableau 12 : Chiffrage Tronçon n°2.....	74
Tableau 13 : <b>Code de l'environnement</b> – Nomenclature 3.1.4.0 « Consolidation ou protection de berges » .....	77

## LISTE DES FIGURES

<b>Figure 1 : Localisation de la zone d'étude</b> .....	6
Figure 2 : Périmètre des aménagements (extrait CCTP).....	8
Figure 3 : <b>localisation de la zone d'étude et des photographies prise sur site</b> .....	10
Figure 4 : Bras vif en pied de berge au niveau du virage de la RD45 .....	12
Figure 5 : <b>Projet de giratoire en cours sur la zone d'étude</b> .....	15
Figure 6 : Projet de confortement du pont de la RN102 (détail de la culée droite).....	16
Figure 7 : Carte géologique de la Rivière des Pluies (source BRGM 2006).....	20
Figure 8 : trajectoire du lit vif.....	21
Figure 10 : <b>Coupe lithologique type de la berge à l'amont de la zone d'étude</b> .....	23
Figure 11 : <b>Coupe de l'ouvrage de protection construit au pied du secteur 2</b> .....	25
Figure 12 : Extrait 3D du MNT.....	26
Figure 13 : Architecture du modèle hydraulique 2D.....	29
Figure 14: Hydrogramme unitaire d'une crue centennale de la Rivière des Pluies au Pont Desbassyns .....	30
Figure 15 : Hydrogramme unitaire de la Ravine Cadet concomitant avec une crue centennale de la Rivière des Pluies à la confluence des 2.....	31
Figure 16 : Données topographiques utilisées et couvertures géographiques associées ....	33
Figure 17 : Epis de protection et piles des ouvrages RN2, RN6 et RN102 intégrés au MNT .....	35
Figure 18 : Ouvrage Desbassyns actuel intégré au Modèle 2D Scénario 1 .....	35
Figure 19 : Ouvrage Desbassyns et Rivière recalibrés intégrés au Modèle 2D Scénario 2	36
Figure 20 : Vue 3D des résultats - hauteurs d'eau Q100 état initial.....	37
<b>Figure 21 : Hauteurs d'eau maximales atteintes en m – Crue centennale à l'état initial</b> ... 38	
<b>Figure 22 : Vitesses d'eau maximales atteintes en m/s – Crue centennale à l'état initial</b> . 39	
Figure 23 : Orientations des vecteurs vitesses – <b>Crue centennale à l'état initial</b> .....	40
Figure 24 : Vue 3D des résultats - hauteurs d'eau Q100 état futur .....	41

<b>Figure 25 : Comparaison des hauteurs d'eau maximales d'une crue centennale – Etat actuel et Etat futur (pont Desbassyns recalibré)</b> .....	42
<b>Figure 26 : Lignes d'eau et paramètres des écoulements des crues intermédiaires de la Rivière des Pluies au droit de la RD45</b> .....	45
<b>Figure 27 : Lignes d'eau et paramètres des écoulements des crues intermédiaires de la Rivière des Pluies au droit de la RD45 – Zoom sur Rive droite</b> .....	46
<b>Figure 29 : Evolution topographique 2013-2014 (avec le niveau 2006 en rappel) de la Rivière des Pluies au droit du profil en travers de suivi n°45 (TOPEX, 2015)</b> .....	48
<b>Figure 30 : Visualisation de la proximité de la RD45 vis-à-vis du haut de berge rive droite de la Rivière des Pluies (Source : levé topographique Septembre 2015, SCP Declerck)</b> ...	49
<b>Figure 31 : Visualisation de la proximité de la RD45 vis-à-vis du haut de berge rive droite de la Rivière des Pluies – Ptrav 1 (Source : levé topographique Septembre 2015, SCP Declerck)</b> .....	49
<b>Figure 32 : Visualisation de la proximité de la RD45 vis-à-vis du haut de berge rive droite de la Rivière des Pluies – Ptrav 1 (Source : levé topographique Septembre 2015, SCP Declerck)</b> .....	50
<b>Figure 33 : Vulnérabilité de la berge au risque d'érosion</b> .....	51
<b>Figure 34 : Evolution de la cote de fil d'eau de la rivière au niveau du pont de la RN102</b>	53
<b>Figure 35 : Présentation des variantes techniques</b> .....	61
<b>Figure 36 : Proposition d'insertion paysagère du projet, sujette à adaptation</b> .....	71
<b>Figure 37 : Planning prévisionnel de l'opération</b> .....	75

## PREAMBULE

### 1. INTRODUCTION

Depuis 2011 il est constaté une érosion active de la berge en rive droite de la rivière des pluies, en amont immédiat de la RN102. Cette érosion menace la parcelle limitrophe mais également la RD45 accès principal au quartier de la Rivière des Pluies.

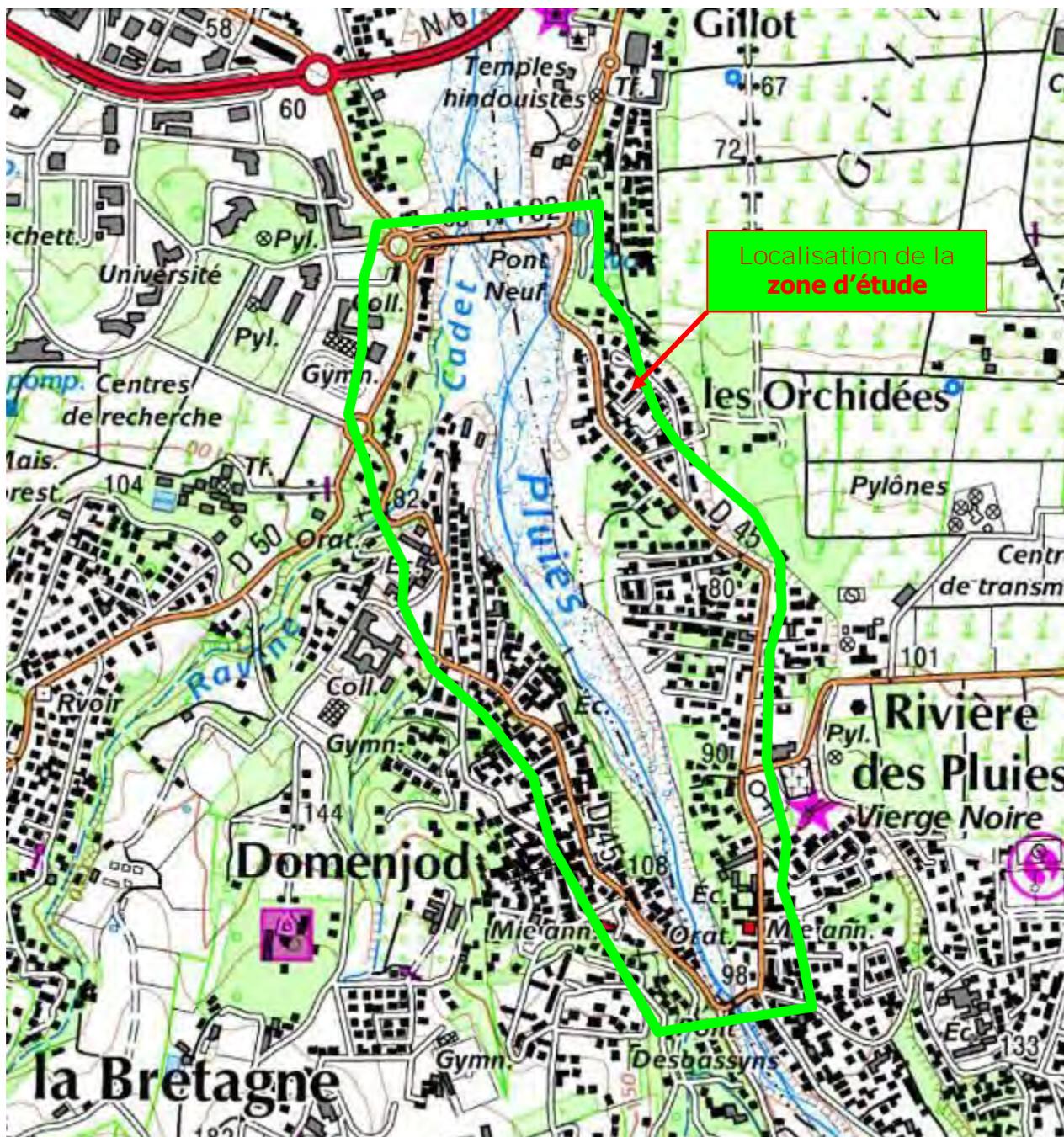


Figure 1 : Localisation de la zone d'étude

## 2. CADRE DU PROJET

La Rivière des Pluies draine un bassin versant de 46 km<sup>2</sup> environ sur les communes des Saint-Denis et de Sainte-Marie. **C'est l'un des cours d'eau majeurs de l'île de La Réunion** du fait non seulement de la superficie de son bassin versant mais aussi du très fort **transport solide qu'elle présente et des fortes crues auxquelles elle est soumise.**

Les pluies intenses sur le bassin versant de la Rivière de Pluies les 17 et 18 février 2006 (tempête tropicale modérée DIWA) et les 5 et 6 mars 2006 ont provoqué des dégâts **importants aux berges des rives droite et gauche du cours d'eau avec destruction de plusieurs habitations et mise en péril d'autres logements.**

**C'est dans ce contexte que la CINOR a lancé en 2008 une étude de protection** contre les crues de la Rivière des Pluies qui a compris 3 phases :

Phase 1 : Analyse des études et des données existantes sur la Rivière des Pluies ;

Phase 2 : **Etude du fonctionnement hydrogéomorphologique de la rivière sur l'ensemble** de son bassin versant

Phase 3 : **Propositions de solution de gestion et d'aménagement de protections pérennes contre les crues depuis l'école de l'Ilet Quinquina jusqu'au pont métallique de la RN 102.**

Après avoir éclairci le fonctionnement hydrogéomorphologique de la rivière dans la phase 2, la phase 3 a identifié les zones à enjeux soumises à des risques inondation et de proposer des solutions de gestion des risques

*Les secteurs du virage RD45 en amont du pont de la RN102 sont identifiés comme une **zone très vulnérable à l'érosion.** Le descriptif est détaillé par les fiches EQ4, EQ5 et H8 jointes au présent cahier des charges.*

## 3. OBJET DE L'ETUDE

**L'étude concerne** La mission Etude préliminaire relative au confortement des berges de la Rivière des pluies au droit de la RD45 sur la commune de Sainte Marie (ouvrage de protection des berges).

*Les éléments de la mission sont des « éléments normalisés » définis dans les applications pratiques de la loi MOP (annexe III de l'arrêté interministériel du 21 décembre 1993)*

## 4. PERIMETRE DE L'ETUDE

Le périmètre de l'étude correspond à l'ensemble du linéaire d'influence des écoulements de la Rivière des Pluies sur le tronçon à conforter. Ainsi, il sera nécessaire de réaliser un modèle mathématique des écoulements débutant suffisamment en amont du site pour **intégrer les conditions aux limites (idem en aval avec l'intégration des ouvrages (seuils, ponts et routes) existants.**

Le périmètre des aménagements de protection à mettre en œuvre est défini sur la carte ci-dessous :

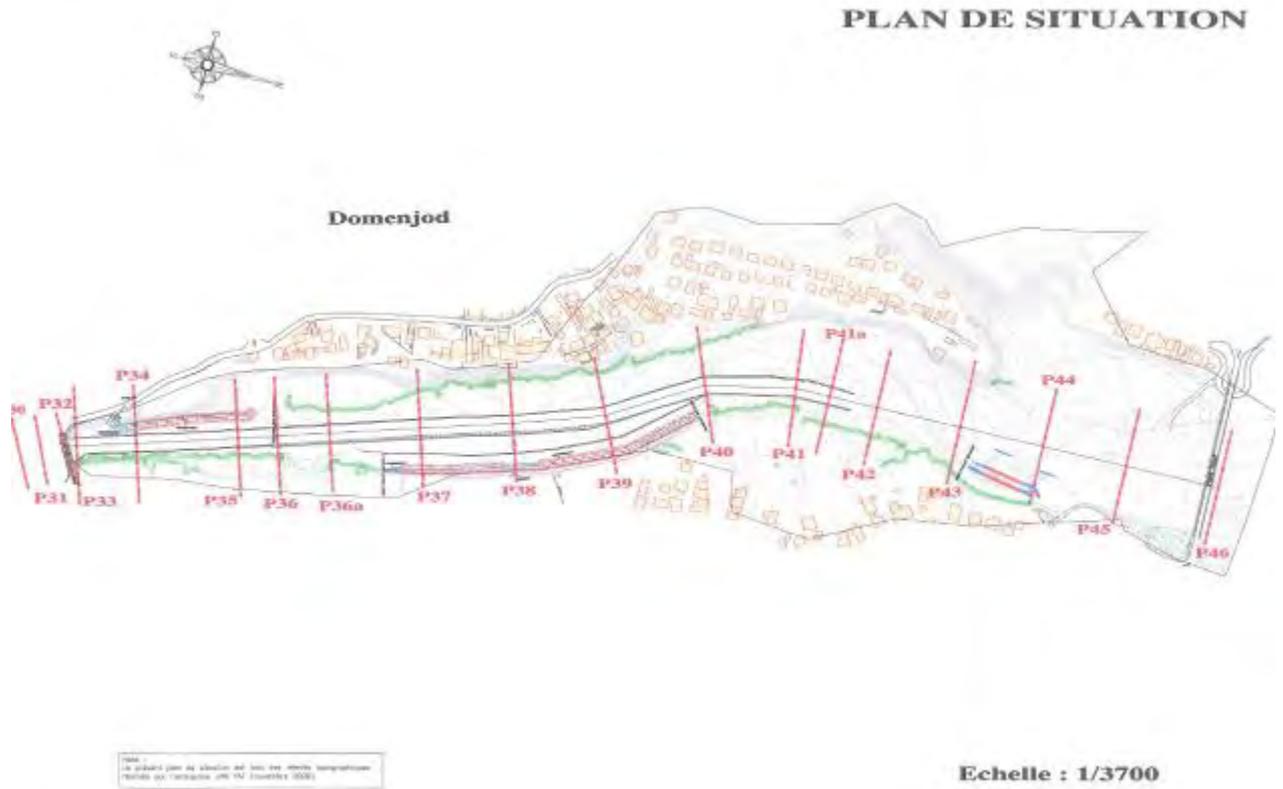


Figure 2 : Périmètre des aménagements (extrait CCTP)

## 5. BIBLIOGRAPHIE

Afin de pouvoir réaliser notre analyse, nous avons recueilli et utilisé les données suivantes :

1. Travaux de protection des berges relatifs à la sécurisation de certains secteurs de la Rivière des Pluies ; compte-rendu motivé ; CINOR ; DDE Réunion ; 2006
2. **Plan de recollement des massifs d'enrochements mis en place suite à DINA**, CINOR, 2006
3. Etude de protection contre les crues de la Rivière des Pluies ; fiches EQ4, EQ5, H8 et plan de localisation des risques ; 2009
4. Etude de faisabilité géotechnique des ouvrages de protection contre les crues de la **rivière des pluies dans les secteurs situés entre l'Ilet Quinquina et le pont de la RN102** ; FORINTECH ; CINOR ; 2012
5. Etudes préliminaires relatives à la protection contre les crues de la Rivière des Pluies Secteur Ilet Quinquina – Pont de la RN102 ; ARTELIA ; CINOR ; 2013
6. RN 102 – confortement des appuis du pont de la RN102 – Rivière des Pluies – Etude hydraulique – ARTELIA, GEOLITHE ; Conseil régional de la Réunion ; 2012
7. RN 102 – confortement des appuis du pont de la RN102 – Rivière des Pluies – Etude géotechnique de projet – ARTELIA, GEOLITHE ; Conseil régional de la Réunion ; 2014
8. **Plan d'aménagement du carrefour RN102 – RD45** ; Région Réunion ; 2015
9. Plan topographique – Berge de la Rivière des Pluies à Sainte Marie ; 2015
10. Suivi topographique des niveaux du fond de la rivière des Pluies ; 2006-2015

Les données topographiques de la Litto 3D (photogrammétrie réalisée par l'IGN sur l'ensemble de la Réunion) ont été utilisées dans cette étude, notamment pour la **délimitation fine des bassins versants et l'extension du Modèle Numérique de Terrain sur les zones d'expansion de crues potentielles.**

## ANALYSE DU SITE

## 6. LOCALISATION

La zone d'étude est située en rive droite de la Rivière des Pluies, entre le pont de la RN102 à l'aval et les premières habitations situées à l'amont, jusqu'à une distance d'environ 400 mètres du pont.

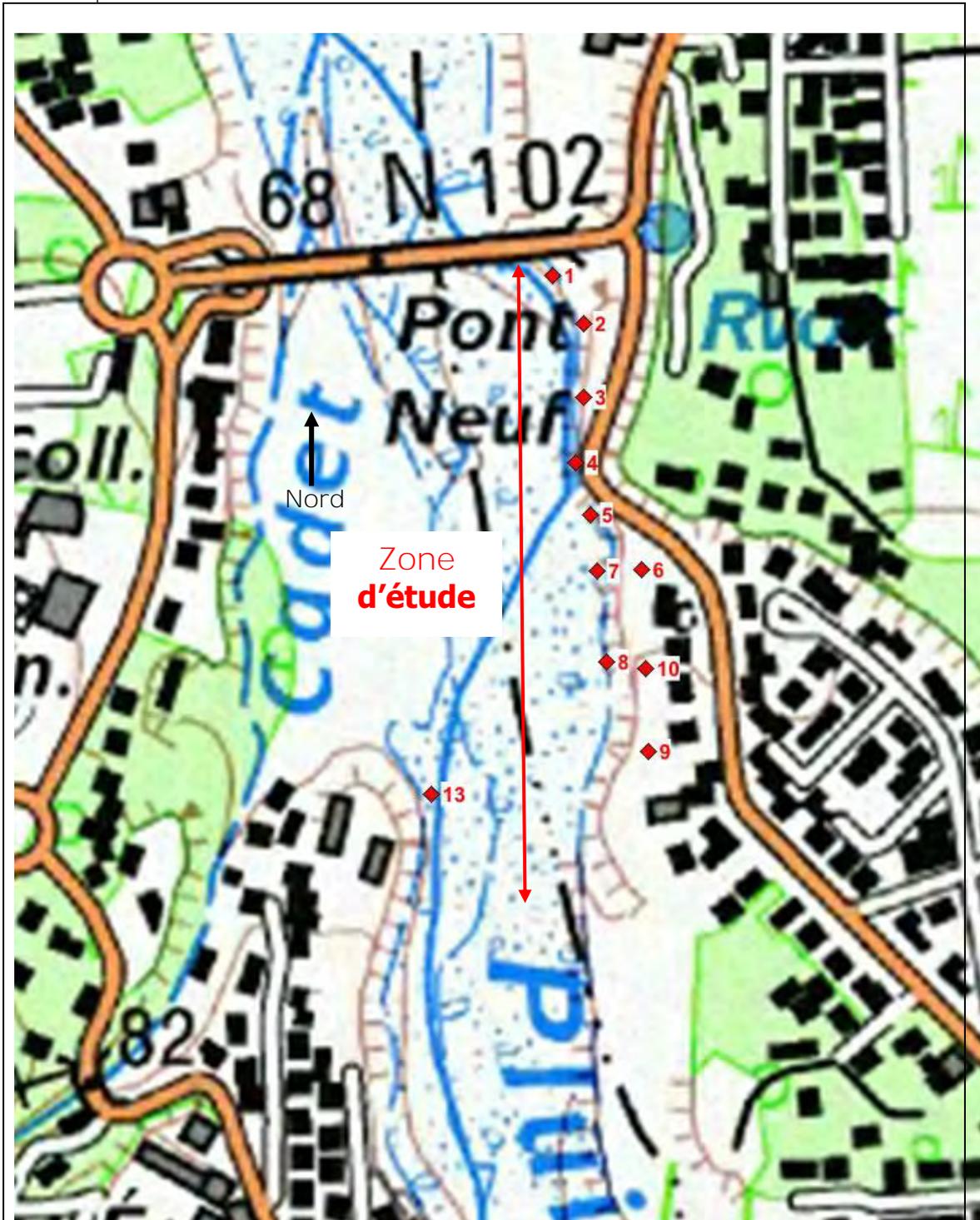


Figure 3 : localisation de la zone d'étude et des photographies prise sur site

## 7. TOPOGRAPHIE

Un levé topographique terrestre au 1/200<sup>ème</sup> a été réalisé sur la zone d'étude par le cabinet Deklerck le 22/09/2015.

Il est présenté en Annexe 1.

## 8. OBSERVATIONS DE TERRAIN

Une inspection visuelle complète de la berge a été réalisée afin de cartographier les caractéristiques morphologiques externes de la berge (pentes, matériaux constitutifs) et les désordres structurels (crête, talus et pieds de talus). **De l'aval vers l'amont, les constats sont les suivants** (les photos numérotées sont localisées sur la Figure 3 : localisation de la zone d'étude et des photographies prise sur site).

### 8.1. SECTEUR 1 : PONT RN102 – VIRAGE DE LA RD45 (L = 140 METRES)

La berge est constituée de matériaux alluvionnaires majoritairement non consolidés, excepté à l'aplomb du virage de la RD45 où on constate la présence de bancs de cailloux et de blocs cimentés en pied de talus. Sur tout le secteur, la berge est nue ou faiblement végétalisée et les pentes de talus **sont fortes (supérieures à 1/1) à subverticales**. Ceci témoigne d'un processus d'érosion récent et encore actif.



*Photo 1 : Enrochements libres protégeant la culée droite du pont de la RN102*



*Photo 2 : Talus alluvionnaire subvertical en amont immédiat du pont (gabions en pied de talus)*



Photo 3 : Talus alluvionnaire pente ~1/1 environ 100 mètres en amont du pont



Photo 4 : Talus alluvionnaire consolidé subvertical environ 120 m en amont du pont au niveau du virage de la RD45

Cette érosion est principalement imputable à la présence d'un bras vif de la rivière, qui vient buter contre la berge au niveau du virage de la RD45 (Figure 4). Sur tout le secteur, la berge a été sapée par la rivière en pied de talus lors des dernières crues.

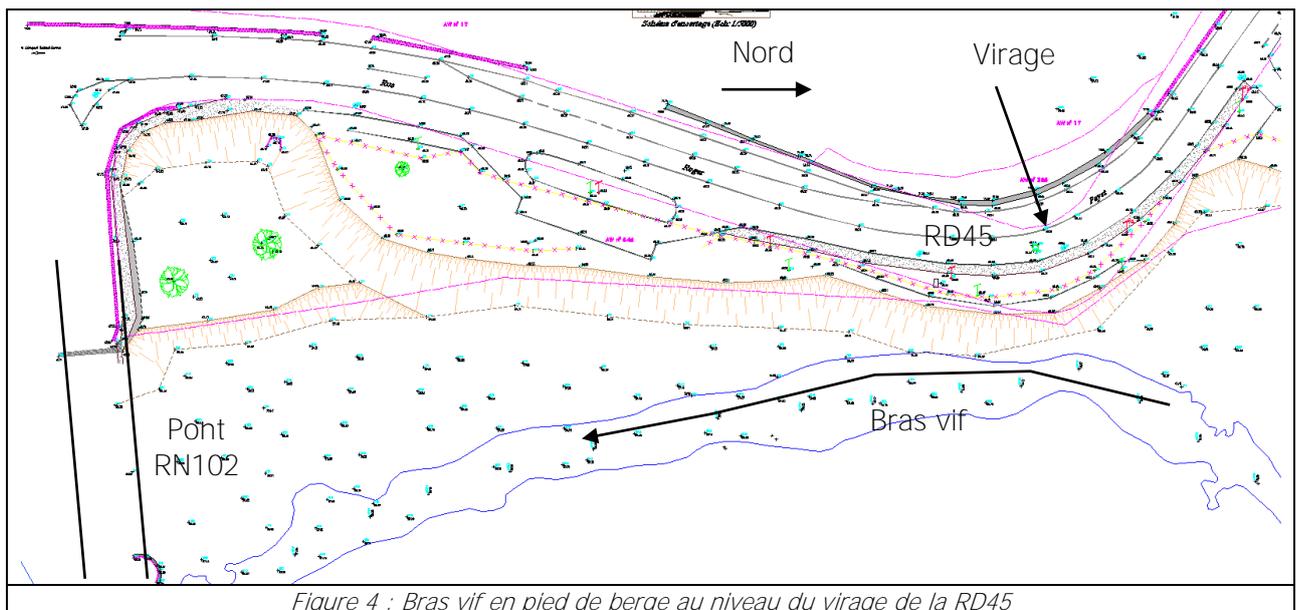


Figure 4 : Bras vif en pied de berge au niveau du virage de la RD45

## 8.2. SECTEUR 2 : VIRAGE DE LA RD45 – HABITATIONS AMONT (L = 240 METRES)

Sur une longueur d'environ 25 mètres en amont immédiat du virage (Photo 5), la berge est subverticale et constituée de matériaux alluvionnaires. Sur cette zone, le tracé de la berge est en saillie dans le lit de la rivière (Figure 4), ce qui la soumet fortement aux affouillements. Le haut de talus, du fait des érosions, a reculé sensiblement et se situe aujourd'hui à une distance très faible de la voirie (entre 2 et 5 mètres).



Photo 5 : Haut de talus en bordure de voirie (amont immédiat du virage)



Photo 6 : parc de stationnement érodé en crête de talus (40 m en amont du virage)

Sur les 25 m suivants (Photo 6 et Photo 7), la berge est moins pentue (1/1) et toujours alluvionnaire. Elle est couverte par une végétation assez jeune (~10 ans) qui témoigne d'une pause dans le processus d'érosion ces dernières années. Des indices d'une érosion plus ancienne sont visibles en haut de talus (parc de stationnement), vraisemblablement liées à la crue de 2006.



Photo 7 : berge érodée au pied du parc de stationnement



Photo 8 : enrochements bétonnés le long de la terrasse inférieure

Sur les 200 derniers mètres, on trouve une zone pavillonnaire (5 habitations) située sur une terrasse haute.

Cette terrasse surplombe de 3 à 4 mètres une terrasse intermédiaire, elle-même située 3 à 4 mètres au-dessus du fil d'eau de la rivière.

**Le talus de la terrasse inférieure est recouvert d'enrochements bétonnés en partie basse et d'enrochements libres en partie haute (Photo 8). Un bras secondaire de la rivière passe au pied de ce talus. Cette terrasse est couverte d'une végétation ligneuse assez jeune (~10 ans). On observe sur la terrasse la présence de blocs vraisemblablement charriés par la rivière.**



Photo 9 : terrasse inférieure végétalisée et couverte de blocs



Photo 10 : Terrasse supérieure : parcours sportif en bordure des habitations

Sur le bord de la terrasse supérieure et le long de la zone pavillonnaire, on trouve un **parcours sportif d'environ 5 à 6 mètres** de large, qui démarre au droit du parc de stationnement mentionné plus haut (Photo 6).

Les deux terrasses sont, au moins pour leur frange ouest (la plus proche de la rivière), constituées de matériaux alluvionnaires.

### 8.3. PROJETS EN COURS

Un projet de création de giratoire au droit du croisement RN102 / RD45 est à l'étude (Région Réunion). Le nouveau carrefour giratoire sera construit en retrait de la berge.

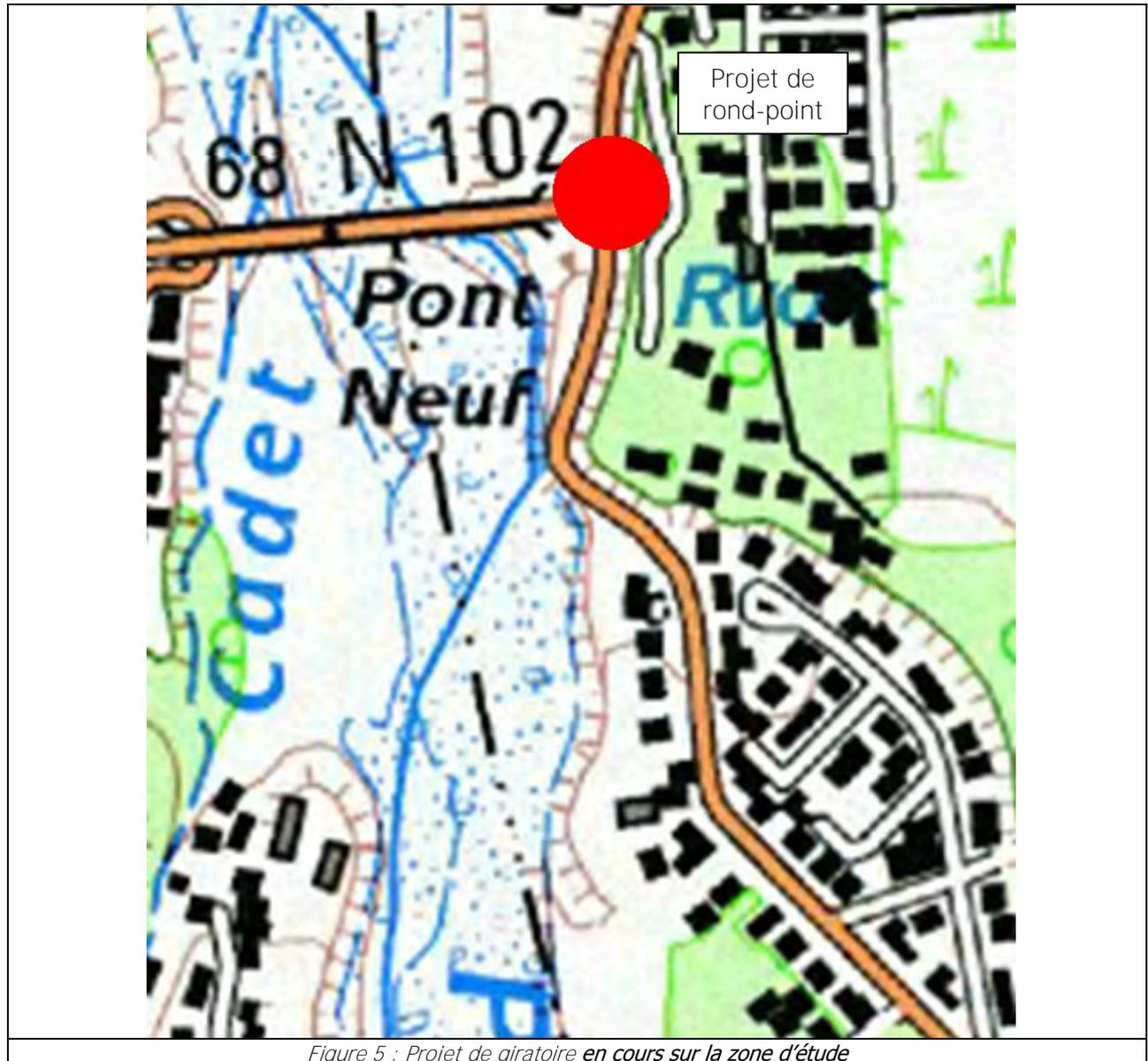
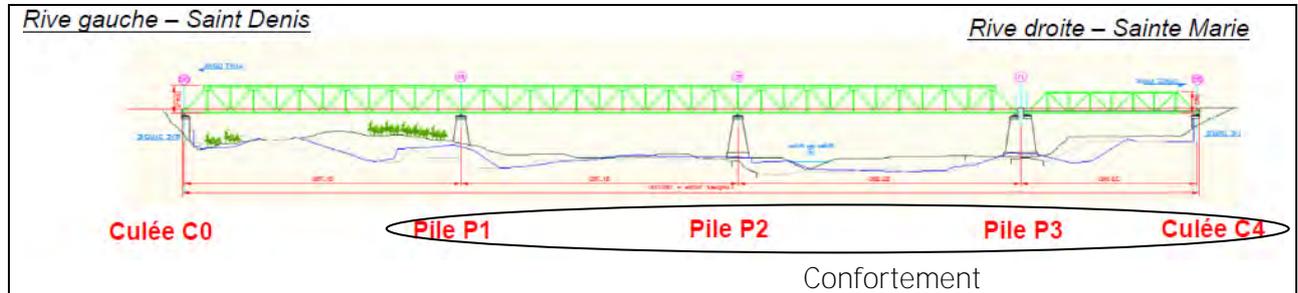


Figure 5 : Projet de giratoire en cours sur la zone d'étude

Un projet de confortement du pont de la RN102 est également en cours et piloté par la Région Réunion (stade DCE). Ce projet consiste en un confortement des 3 piles et de la culée rive droite.

La solution de confortement retenue est la suivante :



- forage de rideaux de micropieux autour de la culée et des piles,
- **consolidation des terrains de fondation par injection de coulis à l'intérieur des rideaux de micropieux.**

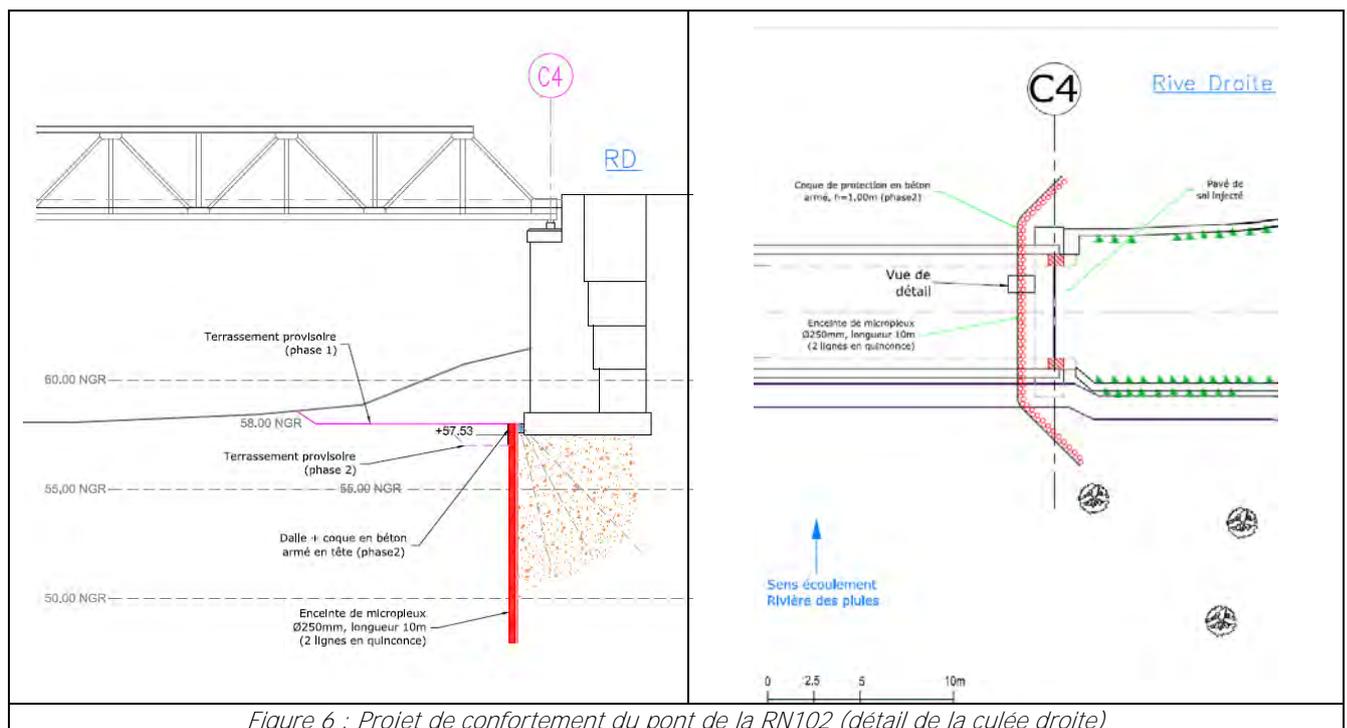


Figure 6 : Projet de confortement du pont de la RN102 (détail de la culée droite)

#### 8.4. DEFINITION DES ENJEUX

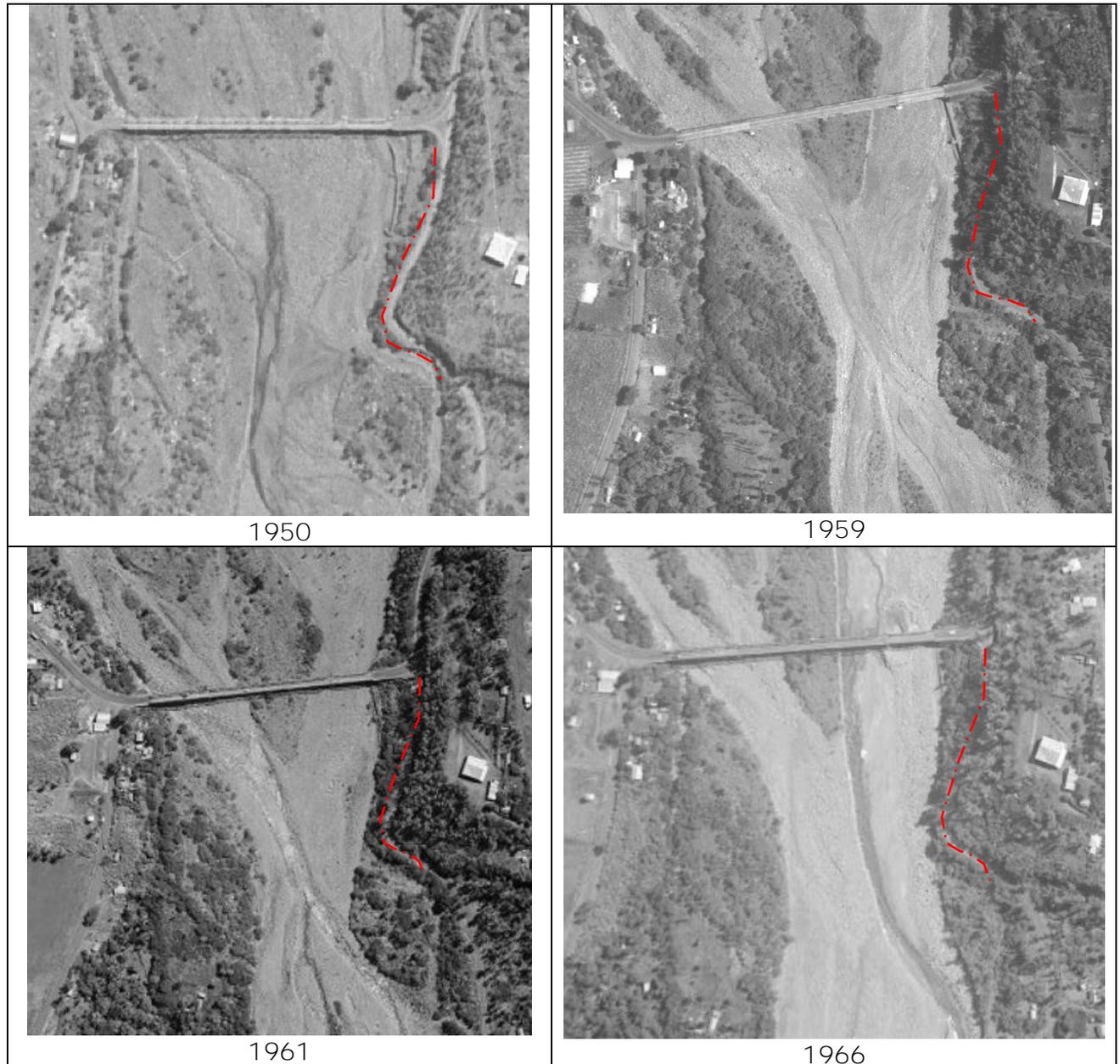
Les enjeux associés à ce projet sont les suivants :

- protection de la RD45 sur le secteur compris entre le pont de la RN102 et le virage de la RD45 (L = 140 m), suite au constat d'érosion importante de la berge, notamment depuis l'épisode de 2006. Un kiosque et une aire de pique-nique ont été démantelés face au risque induit.
- protection de la zone habitée située à l'amont (environ 240 mètres).

## 9. ANALYSE DIACHRONIQUE

Une étude de l'évolution morphologique du secteur d'étude a été réalisée par analyse diachronique basée sur les prises de vue aériennes disponibles.

Le point de calage est le Pont métallique de la RN102 qui apparaît sur la prise de vue la plus ancienne et datant de 1950.





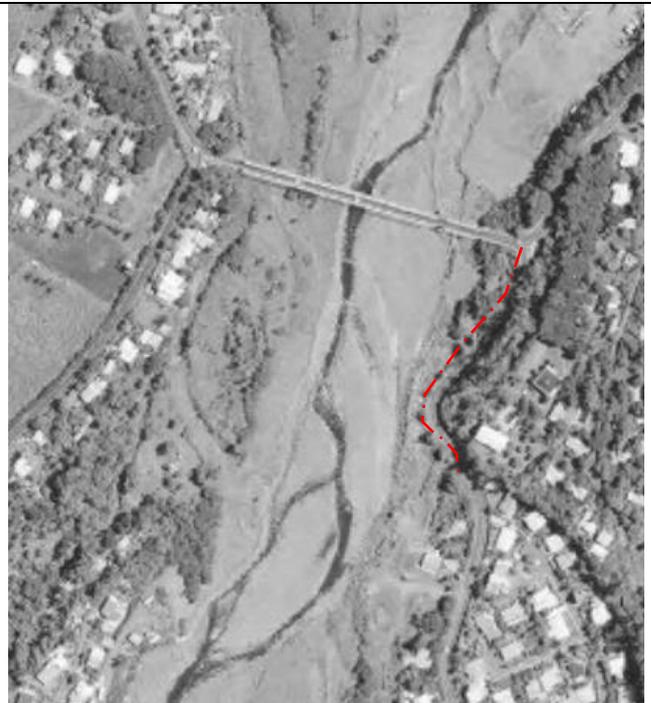
1973



1978



1984



1989



1997



Tableau 1 : Analyse diachronique de la morphologie de la Rivière des Pluies et du site d'étude

L'analyse diachronique des prises de vue aériennes montre que le site d'étude, soit la berge rive droite en amont direct du Pont de la RN102 (antérieur à 1950), offre une morphologie quasiment constante.

Il apparaît que l'éperon en rive droite offre une courbure marquée qui est présente depuis 1950 et ne semble pas avoir évolué de façon majeure.

Il n'empêche que l'épisode DINA a provoqué une érosion importante qui menace aujourd'hui la stabilité de la RD45.

On constate un méandrage du lit mineur qui évolue dans le temps et des axes préférentiels d'écoulements qui fluctuent, là où aujourd'hui la berge rive droite est plus directement sollicitée et induit un phénomène d'érosion du talus soutenant la RD45.

## ANALYSE DES CONTRAINTES GEOTECHNIQUES (ETUDE DE SITE)

Une étude de site<sup>1</sup> a été réalisée sur la base des observations de terrain ainsi que de l'analyse des sondages réalisés dans le cadre d'études antérieures, dans la zone d'étude ou à proximité immédiate (aucun sondage géotechnique complémentaire n'a été réalisé).

### 10. ANALYSE DE LA CARTE GEOLOGIQUE

L'analyse de la carte géologique montre que la rive droite de la Rivière des Pluies au droit de la zone d'étude est constituée d'alluvions anciennes, avec quelques affleurements d'alluvions récentes, contrairement à la rive gauche constituée de coulées basaltiques.

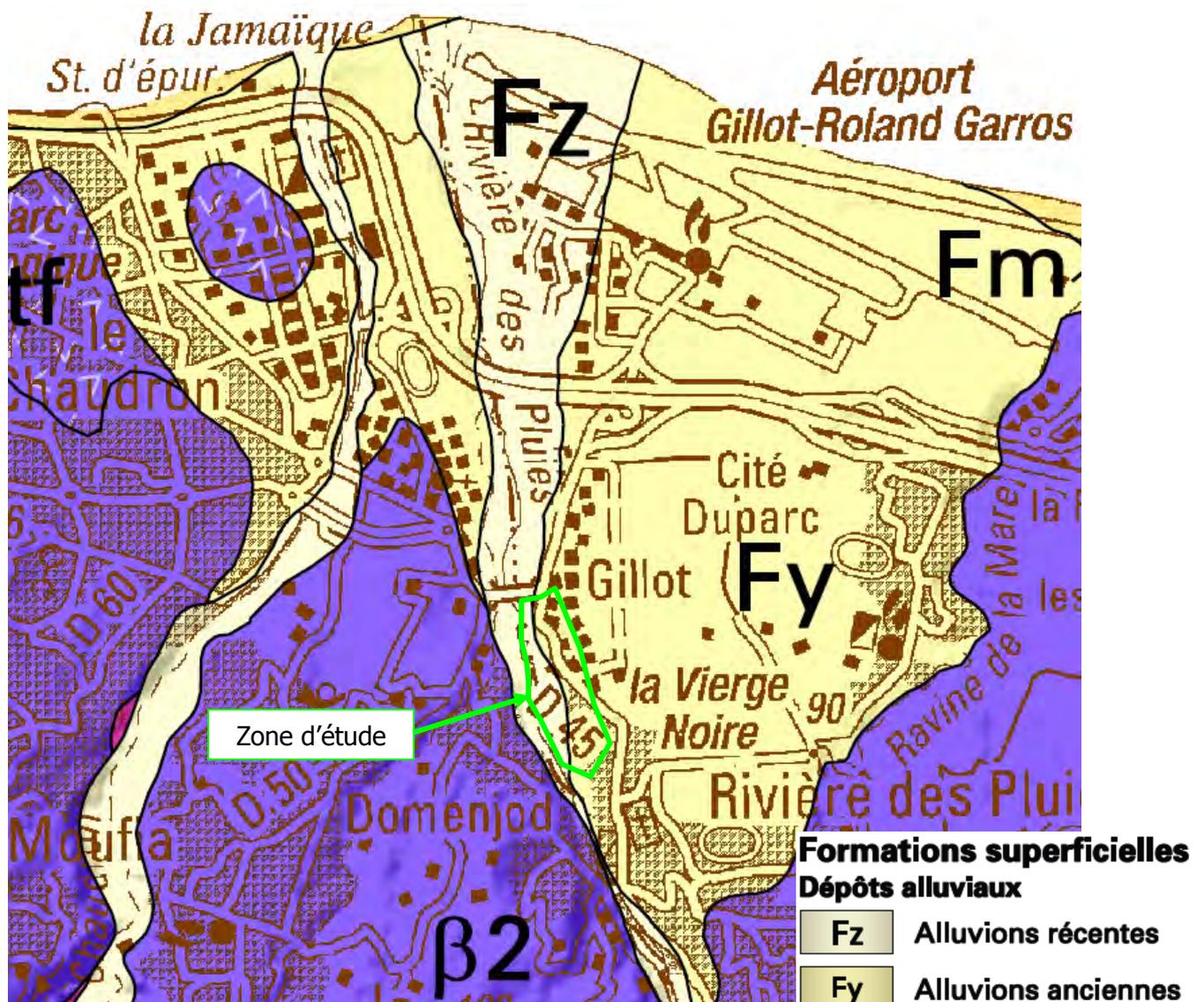


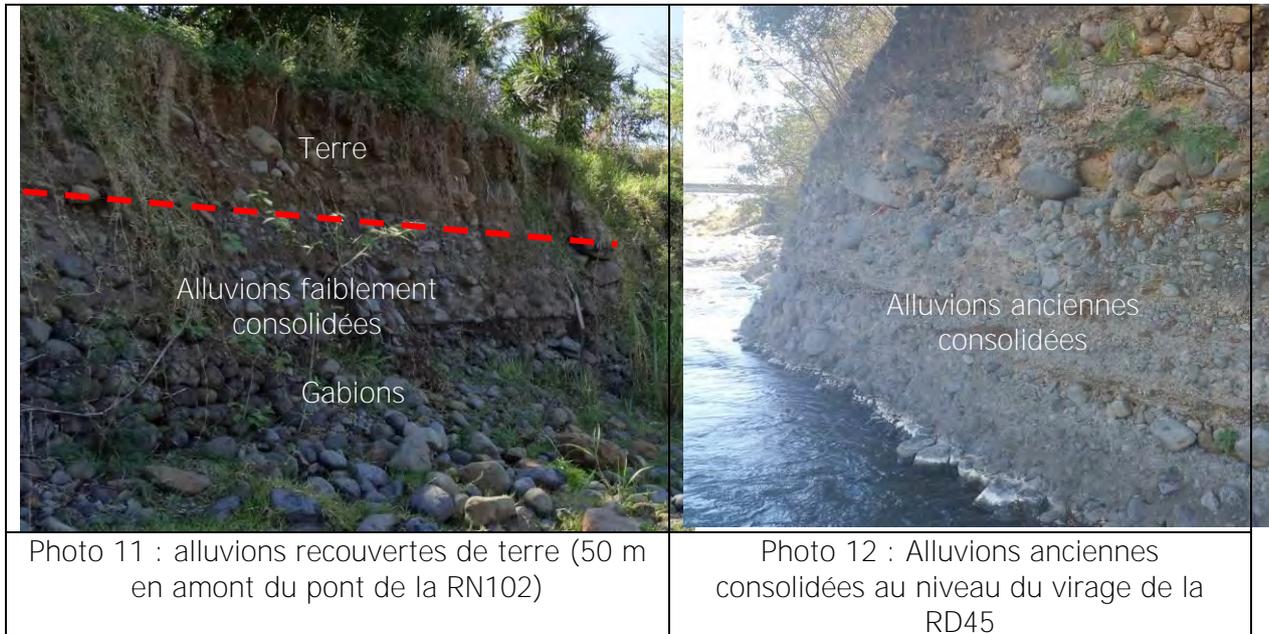
Figure 7 : Carte géologique de la Rivière des Pluies (source BRGM 2006)

<sup>1</sup> Première étape de l'étude géotechnique préalable (G1) selon la Norme NFP-94-500 de novembre 2013.

## 11. GEOLOGIE DU SITE

Les reconnaissances de terrain confirment les données de la carte géologique : la berge de rive droite est constituée principalement de matériaux alluvionnaires, caractérisés par une forte proportion de galets et de blocs enchâssés dans une matrice sablo-limoneuse.

Ces matériaux sont consolidés par endroits. On trouve des remblais terreux en recouvrement sur certains secteurs.



### Ces matériaux sont sensibles à l'érosion.

En rive gauche, en amont de la zone d'étude, on recense la présence d'un éperon basaltique sur lequel se trouve l'impasse des Pailles-en-Queue. Le lit vif de la Rivière des Pluies vient buter sur cet obstacle qui le renvoie vers la rive droite au niveau de la zone d'étude.



## 12. SYNTHÈSE DES RECONNAISSANCES ET ÉTABLISSEMENT DE COUPES GÉOLOGIQUES

Les résultats des sondages géotechniques exploités dans le cadre de la présente étude sont extraits des documents 4 et 7. Ils sont présentés en annexe 3. La localisation des sondages est présentée en annexe 2.

Les sondages réalisés pour le document 7 sont localisés au droit du pont en pied de berge et sur le fond de la rivière. Ils font apparaître une lithologie relativement homogène avec la profondeur et sans variation latérale notable : le lit de la rivière des Pluies est constitué **d'alluvions sur une épaisseur d'au moins 30 m. La culée droite du pont de la RN102 apparaît fondée superficiellement dans des alluvions (galets et blocs dans matrice limoneuse) :**

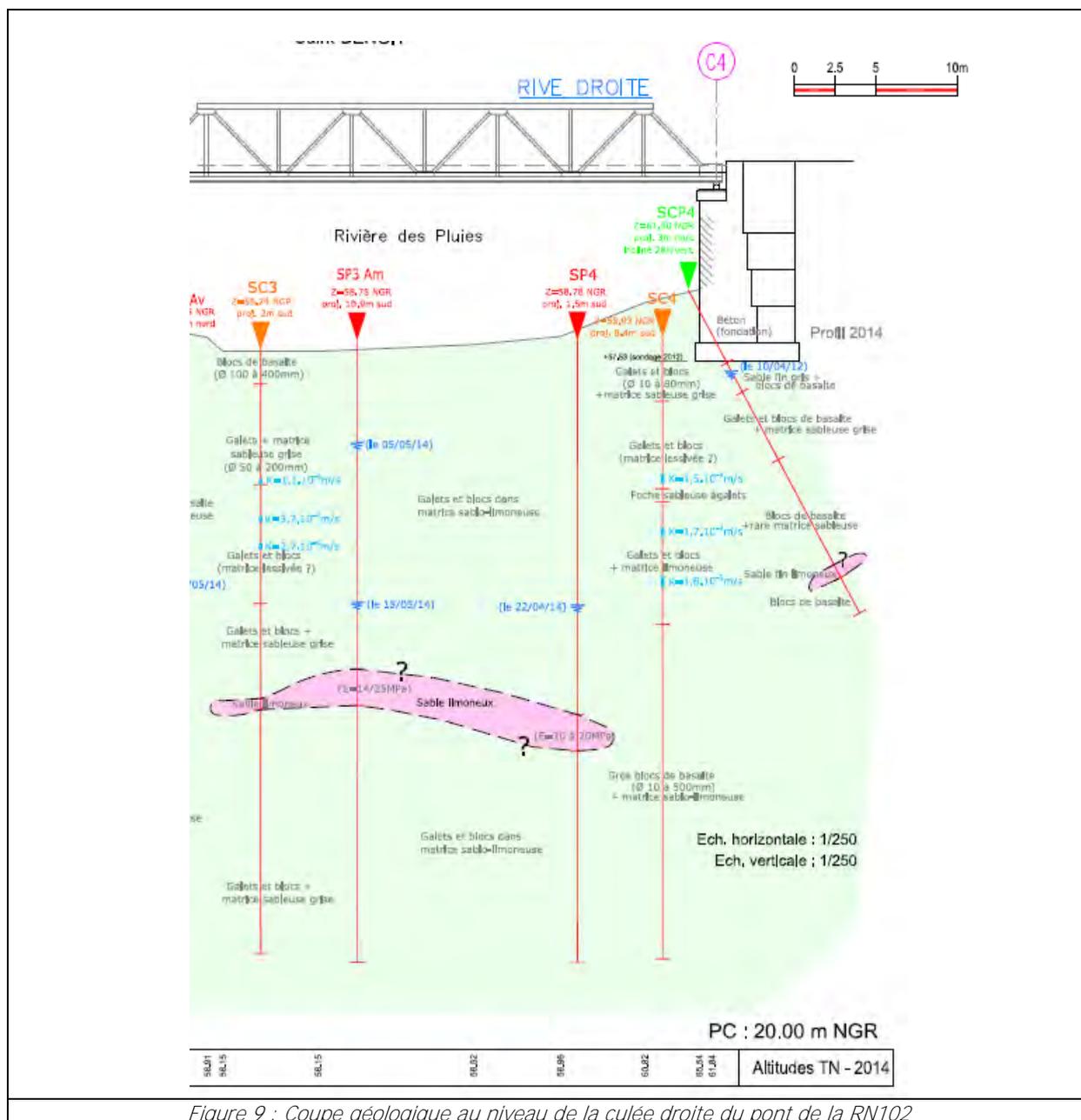


Figure 9 : Coupe géologique au niveau de la culée droite du pont de la RN102

Ces alluvions présentent les aspects suivants :

- Mélanges de cailloutis, galets et blocs localement grossiers avec des granulométries variables, la plus courante étant  $d = [20-200]$  mm,
- $D_{max} = 250$  à  $1000$  mm pour les plus gros blocs identifiés,
- Matrice généralement peu importante voire absente de type sableuse à sablo-limoneuse et localement limoneuse.

Les premiers essais pressiométriques ont été réalisés au-dessous de la cote 53 NGR, soit plus de 5 mètres au-dessous du fond de la rivière. Ils montrent que des alluvions peu ou pas consolidées – sur les 6 premiers mètres à partir de la surface – recouvrent des alluvions graveleuses plus compactes.

Les sondages réalisés pour le document 3 sont localisés plus de 200 mètres en amont de la **zone d'étude**. **Les plus proches sont les sondages SP16 et SP20, présentés en annexe.** Ils sont localisés quelques mètres sous le haut de berge.

Les matériaux rencontrés sont grossiers, de classe C1B3 ou D3, ils comprennent très peu **d'éléments fins et sont donc très peu argileux**.

Les essais pressiométriques révèlent globalement deux niveaux aux caractéristiques mécaniques différentes :

- **Un niveau supérieur d'épaisseur variable (2 à 5 m), moyennement résistant ( $E_m < 70$  MPa,  $PI^* < 2$  MPa), il correspond certainement à un niveau plus sableux (alluvions récentes sablo-limoneuses),**
- **Un niveau inférieur avec de bonnes caractéristiques mécaniques ( $E_m$  de l'ordre de 200 MPa,  $PI^* > 4$  MPa et  $E/PI^* > 20$ ), représentatives de terrains en place fortement consolidés à rocheux (présence de gros blocs avec des modules pressiométriques  $> 300$  MPa).**

La coupe lithologique type est la suivante (source document 4) :

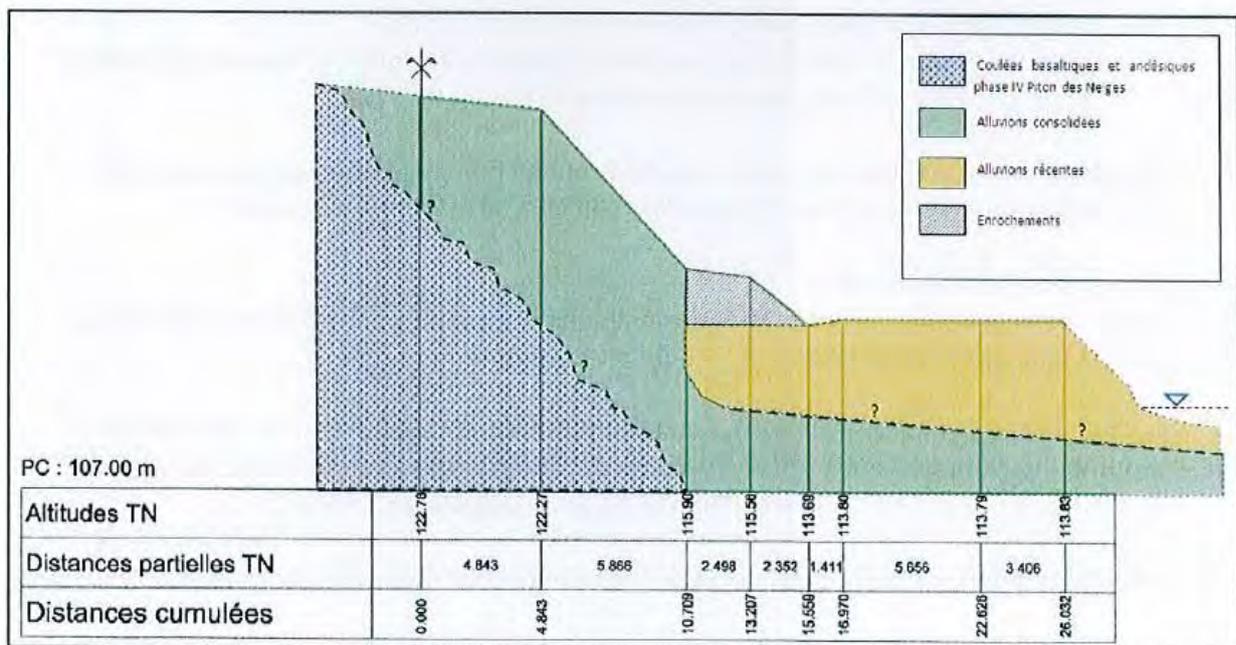


Figure 10 : Coupe lithologique type de la berge à l'amont de la zone d'étude

Les profondeurs auxquelles seront rencontrées les alluvions consolidées et les basaltes ne peuvent être déterminées précisément à partir des reconnaissances réalisées.

## 13. HYPOTHESES SUR LES CARACTERISTIQUES MECANIQUES DES SOLS EN PLACE

### 13.1. LIT DE LA RIVIERE

Conformément au document 7, on considère que le lit de la rivière des pluies est constitué d'un matériau relativement homogène d'alluvions dont les valeurs caractéristiques de propriétés mécaniques sont présentées dans le tableau ci-dessous :

	$\gamma_h$	$E_m$	$PI^*$	$C'$	$\phi'$
Lit de la rivière	$kN/m^3$	Mpa	Mpa	kPa	°
Alluvions de 0 à - 6 m	19	24	1.7	0	35
Alluvions au delà de - 6 m	20	70	4	0	38

Tableau 2 : propriétés physiques des alluvions du fond de la Rivière des pluies

avec :

$\gamma_h, \gamma_d$  = poids volumique des matériaux (humide et déjaugé)

$E_m$  = module pressiométrique

$PI^*$  = pression limite nette

$c', \phi'$  = paramètre effectif de cisaillement (cohésion et angle de frottement)

### 13.2. BERGES

Les caractéristiques des alluvions constituant les berges sur la zone d'étude n'ont pas été mesurées dans le cadre du présent dossier : elles devront être précisées dans la suite des études.

Les sondages réalisés dans le cadre du document 4 à l'amont de la zone d'étude mettent en évidence une couche de matériaux alluvionnaires moyennement résistants (Ep. 2 à 5 mètres) recouvrant des alluvions anciennes fortement consolidées.

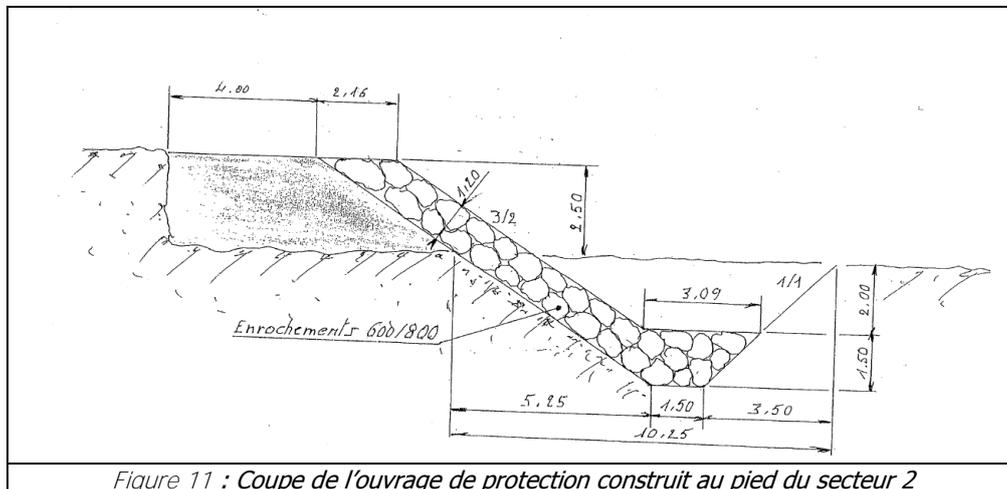
Au stade des études préliminaires et dans une approche prudente, on retiendra pour le matériau des berges les propriétés physiques définies dans le tableau 1.

	$\gamma_h$	$E_m$	$PI^*$	$C'$	$\phi'$
Berges	$kN/m^3$	Mpa	Mpa	kPa	°
Alluvions peu ou pas consolidées	19	24	17	0	35
Alluvions consolidées	20	180	4.7	5	38

Tableau 3 : propriétés physiques des alluvions des berges

### 13.3. OUVRAGES DE PROTECTION EXISTANTS

Le long d'une partie du secteur 2, un ouvrage de protection a été construit en 2006 suite aux crues de février et de mars, qui avaient endommagé la berge (cf. documents 1 et 2). L'ouvrage est constitué d'enrochements et présente un sabot enterré de 2 mètres. D'après les observations de terrain, cette protection est présente sur environ 200 mètres et les enrochements ont été bétonnés en partie basse.



## ANALYSE DES CONTRAINTES HYDRAULIQUES ET HYDROGÉOMORPHOLOGIQUES

### 14. MODELISATION MATHÉMATIQUE 2D DES ÉCOULEMENTS DE LA CRUE CENTENNALE DE LA RIVIÈRE DES PLUIES

#### 14.1. DESCRIPTION DU SCÉNARIO MODELISE

A partir du **Modèle Numérique de Terrain représentant l'état actuel de la zone d'étude** décrit ci-dessous, une modélisation du scénario suivant a été réalisée :

- Crue centennale de la Rivière des Pluies,
- Crue de la Ravine Cadet dont le débit injecté correspond à la réponse de son bassin versant propre à une **pluie d'intensité centennale sur le** bassin versant de la Rivière des Pluies,
- Topographie actuelle, représentée par le MNT illustré sur la figure ci-dessous et fruit **de l'assemblage des données topographiques les plus récentes,**
- **Configuration Pont Desbassyns en l'état actuel** (un scénario 2 correspondant à la même configuration mais avec le Pont Desbassyns après recalibrage sera également étudié).

Le Modèle Numérique de Terrain a été réalisé à partir de plusieurs levés topographiques et complété en lit majeur par la Litto 3D 1m (Cf. chapitre relatif aux données utilisées).



Figure 12 : Extrait 3D du MNT

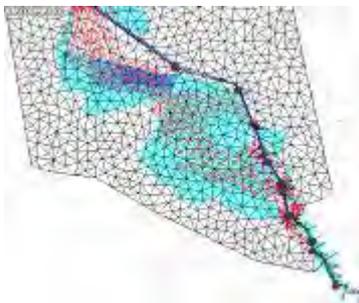
## 14.2. MISE EN ŒUVRE DU MODELE ET PRESENTATION DU LOGICIEL INFOWORKS ICM

### 14.2.1. Module 2D

InfoWorks 2D est un module intégré au sein du logiciel InfoWorks ICM pour la modélisation des cours d'eau.

### 14.2.2. Intérêt

**L'Analyse de l'extension des zones inondables potentielles et la définition des** caractéristiques hydrauliques comme la profondeur et la vitesse des écoulements est un problème complexe, en particulier dans les zones urbaines et /ou endiguées où les infrastructures peuvent réduire les inondations dans certaines zones, tout en les augmentant dans d'autres.



Les simulations en 1D peuvent très bien fournir des informations concernant les débits et les profondeurs **d'écoulement sur les plaines d'inondation. C'est une méthode** rapide et efficace pour déterminer l'extension maximale du **champ d'expansion des crues, mais elle se fonde** sur des hypothèses relatives sur le sens des écoulements. Les simulations 1D sont également limitées lorsque des informations détaillées sur les vitesses de ces écoulements sont nécessaires dans des configurations particulières, fortement influencés par les obstructions causées par les infrastructures telles que les routes et les bâtiments.

Dans ce cadre, les simulations en 2D sont mieux adaptées à la modélisation des écoulements pour des géométries complexes telles que les zones urbaines, des digues, des intersections de routes et autres infrastructures de transport et les terrains où les directions des écoulements sont difficiles à prévoir. Les modélisations en 2D nécessitent des données topographiques nombreuses et sont coûteuses en temps de calcul.

La modélisation des événements complexes avec précision et efficacité exige un modèle à la fois 1D et 2D. Le logiciel Infoworks ICM combine à la fois un moteur 1D et 2D. Le modèle combine des éléments unidimensionnels et bidimensionnels.

**L'utilisation de la simulation 1D permet d'identifier les zones où les inondations se produisent. Une fois que les zones d'intérêt, touchées par les débordements sont identifiées,** il est possible de construire le modèle 2D et en utilisant le calcul combinant le 1D et 2D, de déterminer la direction et les hauteurs des écoulements sur le lit majeur.

### 14.2.3. Moteur hydraulique 2D

Infoworks 2D utilise des algorithmes performants basés sur une méthode type volumes finis **pour résoudre l'équation complète de St-Venant** utilisant le solveur de Riemann particulièrement adapté aux régimes hydrauliques rapidement variés tels que ceux à travers les rues escarpées, les carrefours et ceux qui sont associés aux submersions de digues. Les moteurs 1D et 2D tournent en même temps permettant l'échange d'eau entre les modèles à chaque pas de temps. Les échanges se font au niveau des déversements (spills).

#### 14.2.4. Maillage 2D



L'espace est discrétisé sous forme d'un maillage non structuré. Le module 2D d'InfoWorks est basé sur un maillage de surface, donnant un maximum de flexibilité pour le modéleur et en veillant à ce que le système soit inspiré de la topographie du site d'étude de façon aussi précise que possible.

Cette souplesse dans le maillage augmente le nombre de types d'écoulement que l'on peut modéliser.

Un certain nombre de types de maillage peuvent être utilisés et combinés dans un modèle :



Maillage triangulaire non structuré qui est la meilleure solution pour l'analyse des écoulements complexes ;



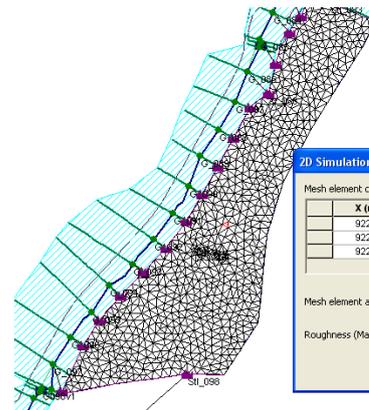
Maillage dans les zones présentant un intérêt particulier; maillage quadrangulaire non structuré qui est apte à modéliser les écoulements canalisés;



Maillage rectangulaire en vue de simplifier les modes d'écoulement.

Les spécifications de la maille peuvent varier selon les secteurs du modèle, permettant une **excellente résolution autour des zones d'intérêt** tout en utilisant une résolution plus faible pour les régions moins importantes. Le générateur de maillage peut également inclure des vides (bâtiments), des murs, de préciser la rugosité des zones individuelles. Ce point est crucial pour **simuler avec précision les circulations d'eau** autour des bâtiments, sur les routes et dans les zones de terrain ouvert, comme les champs.

Les données nécessaires pour générer le modèle de maillage peuvent être importées à partir des couches de fond, de modèle numérique ou **des caractéristiques d'un réseau 1D**.



Mesh element coordinates		
X (m)	Y (m)	Z (m AD)
922292.38	129811.63	474.98
922282.46	129806.27	474.91
922291.80	129801.56	474.93

Mesh element area (m<sup>2</sup>)

Roughness (Manning's n)

### 14.3. CONSTRUCTION ET ARCHITECTURE DU MODELE 2D

Pour les besoins spécifiques du projet, nous avons choisi de réaliser un modèle hydraulique totalement en 2D **et ce sur une vaste zone allant de l'amont du Pont Desbassyns (analyse des débordements amonts potentiels par mise en charge de l'ouvrage) à l'exutoire en mer afin de pouvoir analyser le fonctionnement global du système hydrographique de la Rivière des pluies, et d'en déterminer les champs d'expansion des crues ainsi que de caractériser les hauteurs et vitesses maximales atteintes et les orientations des écoulements (vecteurs vitesses : valeur, direction).**

Ci-dessous est représentée l'architecture du modèle :

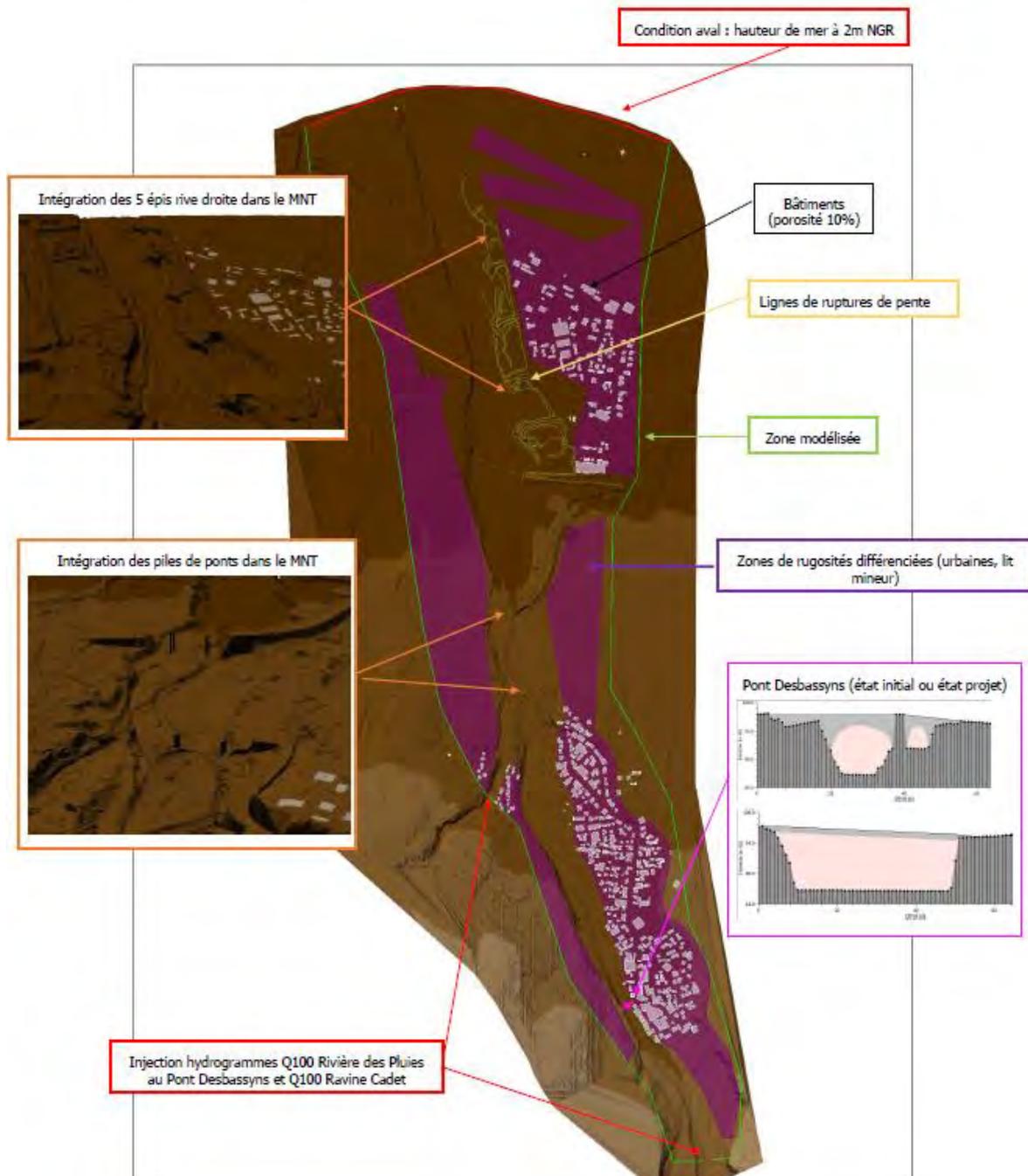


Figure 13 : Architecture du modèle hydraulique 2D

#### 14.4. CONDITIONS AUX LIMITES

- Débit :

- Rivière des Pluies

L'hydrogramme de la crue centennale de la Rivière des Pluies est issu de l'expertise hydrologique menée par HYDRETUDES par modélisation spatialisée, en Juillet 2015. L'hydrogramme résultant, au niveau du Pont Desbassyns a été intégré comme condition limite amont du modèle pour le scénario 1.

L'évènement hydrologique suivant a été retenu:

- Crue centennale d'un débit de  $1\,076\text{m}^3/\text{s}$ ,
- Pluie de durée 3 heures;
- Hydrogramme **résultant d'une analyse spatialisée pluie-débit**

L'hydrogramme unitaire obtenu et injecté au modèle est présenté sur la figure ci-dessous:

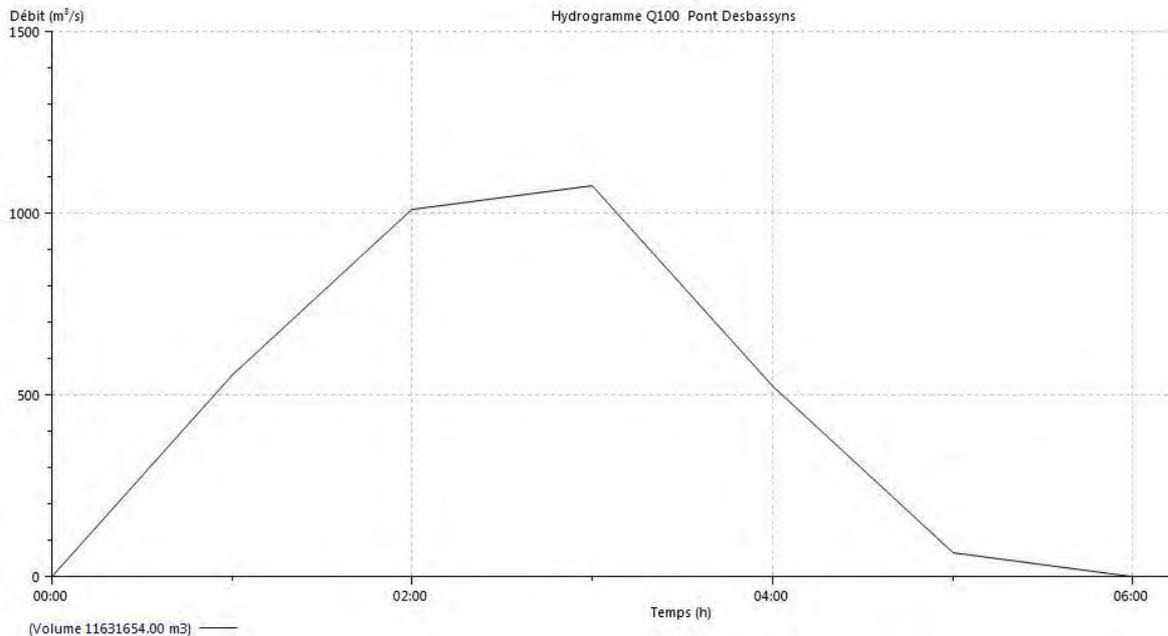


Figure 14: Hydrogramme unitaire d'une crue centennale de la Rivière des Pluies au Pont Desbassyns

### Ravine Cadet

L'**hydrogramme de la crue** correspondant à la réponse du bassin versant à une pluie **d'intensité centennale sur la Rivière des Pluies** a été intégré comme condition limite amont du modèle, **en amont direct de la confluence entre les 2 axes d'écoulement**.

L'évènement hydrologique suivant a été retenu:

- Crue centennale d'un débit de 57 m<sup>3</sup>/s,
- Pluie de durée 3heures;
- Hydrogramme **résultant d'une analyse** spatialisée pluie-débit

L'hydrogramme unitaire conçu est présenté sur la figure ci-dessous:

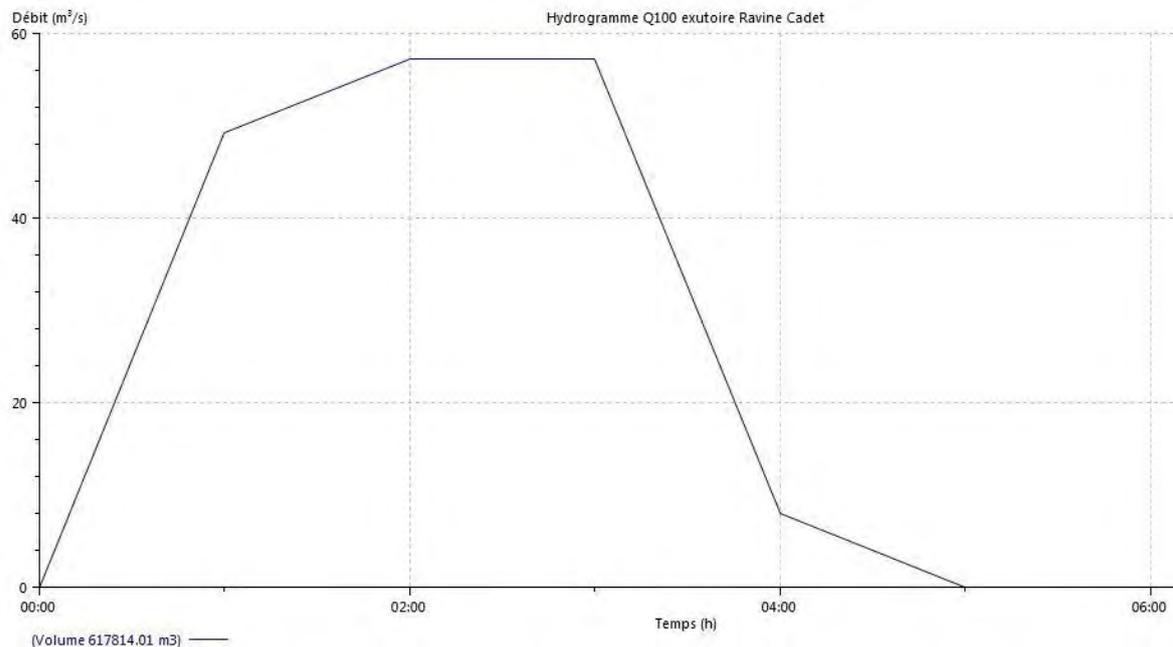


Figure 15 : Hydrogramme unitaire de la Ravine Cadet concomitant avec une crue centennale de la Rivière des Pluies à la confluence des 2 axes

- Conditions aux limites:

**Une hauteur de mer de 2m NGR a été appliquée à l'aval du modèle, comme utilisée dans les modélisations mathématiques des écoulements fréquemment à la Réunion.**

Une condition de type hauteur normale a été appliquée aux autres extrémités du modèle, **permettant les transferts d'eau en sortie du modèle.**

## 14.5. TOPOGRAPHIE

Plusieurs plans topographiques ont été transmis et utilisés pour construire le MNT :

- Levé topographique des épis de protection et du lit mineur sur le tronçon RN2 – mer (TOPEX, Septembre 2014) ;
- Levé topographique de la Rivière des Pluies sur le secteur du Pont Desbassyns (Mechy-Broyon, Mai 2014) ;
- Levé topographique de la Rivière des Pluies sur le secteur compris entre le **Pont Desbassyns et l'ouvrage de la RN102** (SCP Joël DECLERCK, Septembre 2015) ;
- Ouvrages et piles en Rivière, RN102 ; RN6 et RN2 : données topographiques fournies par la Région Réunion en 2015.

Les données de la Litto 3D (1m sur la grande majorité et 5m sur les zones où la donnée **1m n'existe pas**) a permis de compléter ces levés topo afin de couvrir toute la zone **d'étude**.

La figure page suivante illustre les données utilisées et leur couverture géographique:

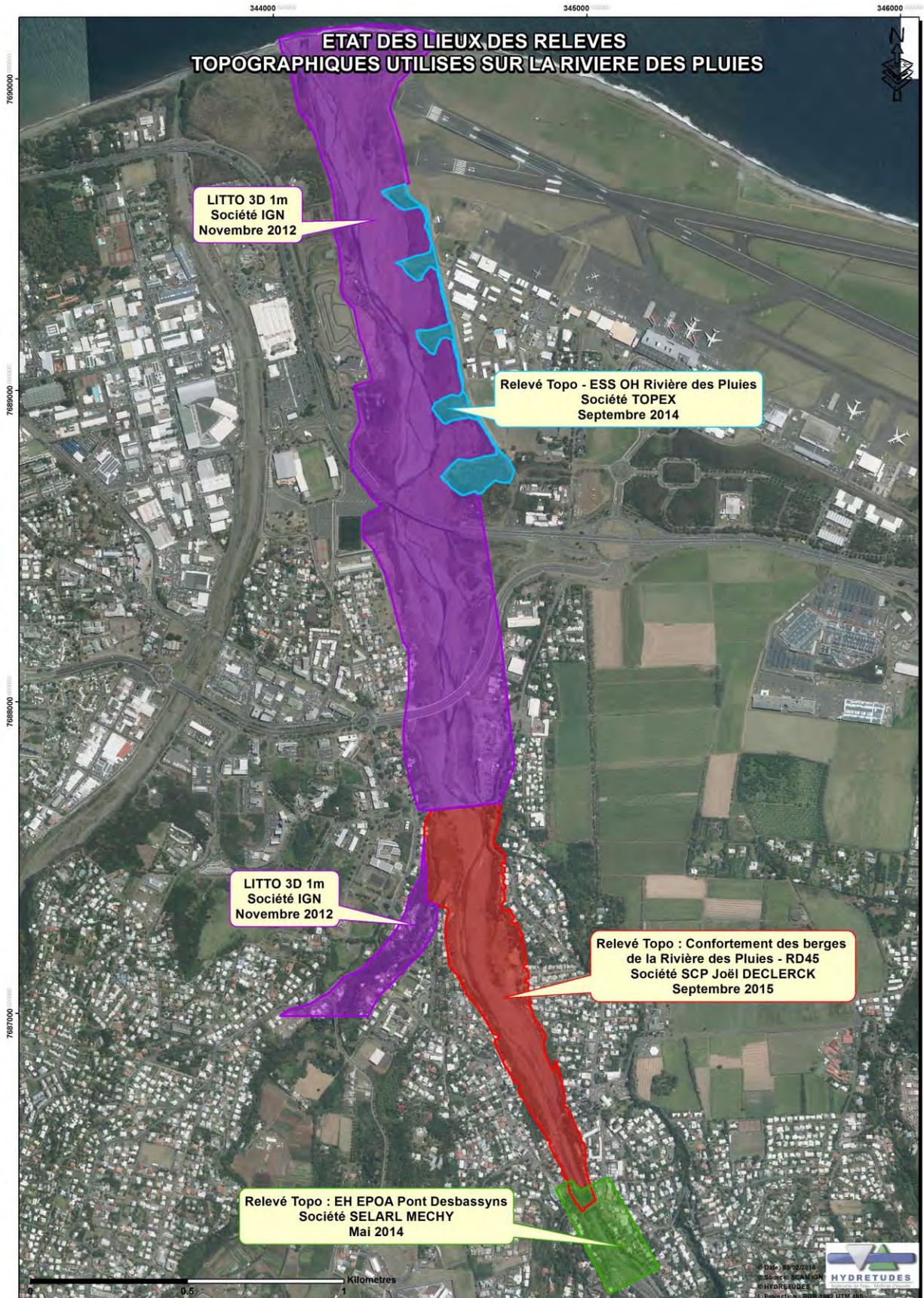
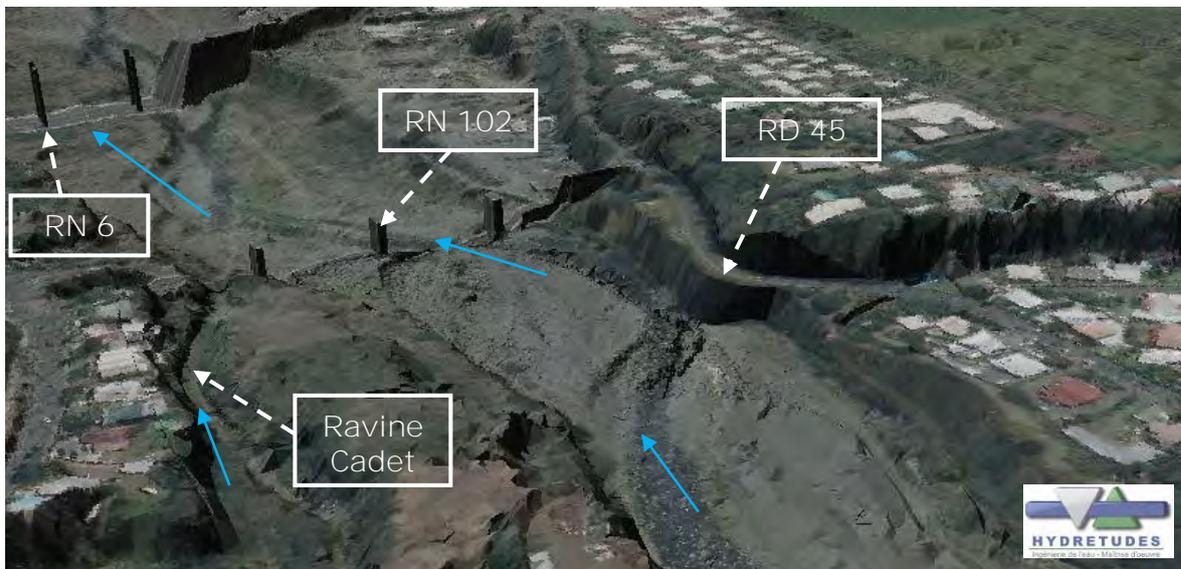
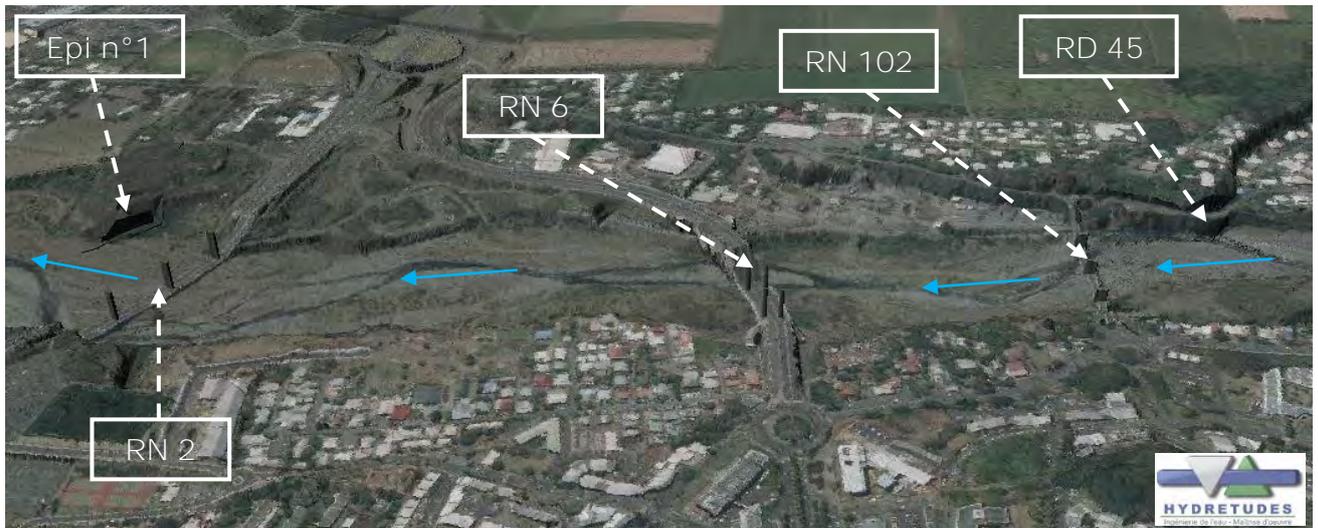


Figure 16 : Données topographiques utilisées et couvertures géographiques associées

Les ouvrages de franchissements non submersibles en crue centennale (RN102, RN6, RN2) ont été intégrés (piles) directement dans le MNT :



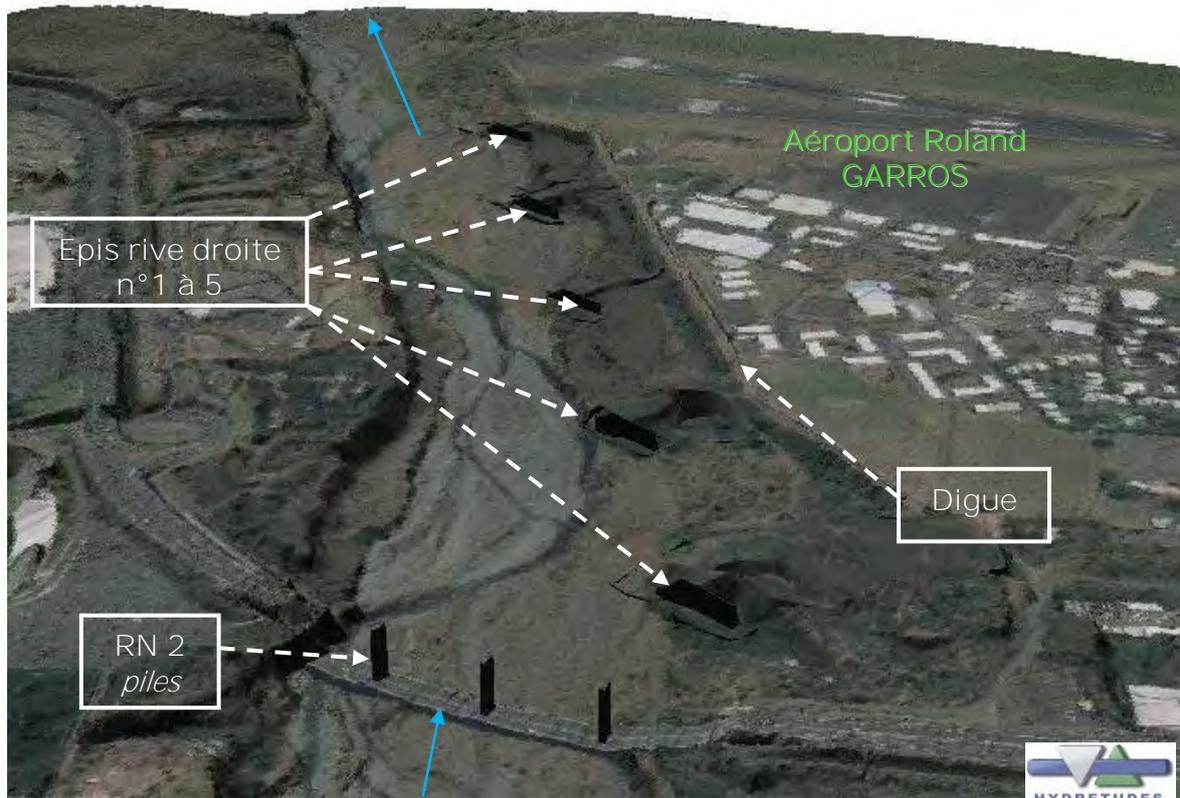


Figure 17 : Epis de protection et piles des ouvrages RN2, RN6 et RN102 intégrés au rivage

L'ouvrage Desbassyns a été intégré comme ouvrage hydraulique et modélisé comme tel sous ICM, sa mise en charge en crue centennale ayant déjà été démontrée (EPOA Desbassyns, HYDRETTUDES Océan Indien, 2014).

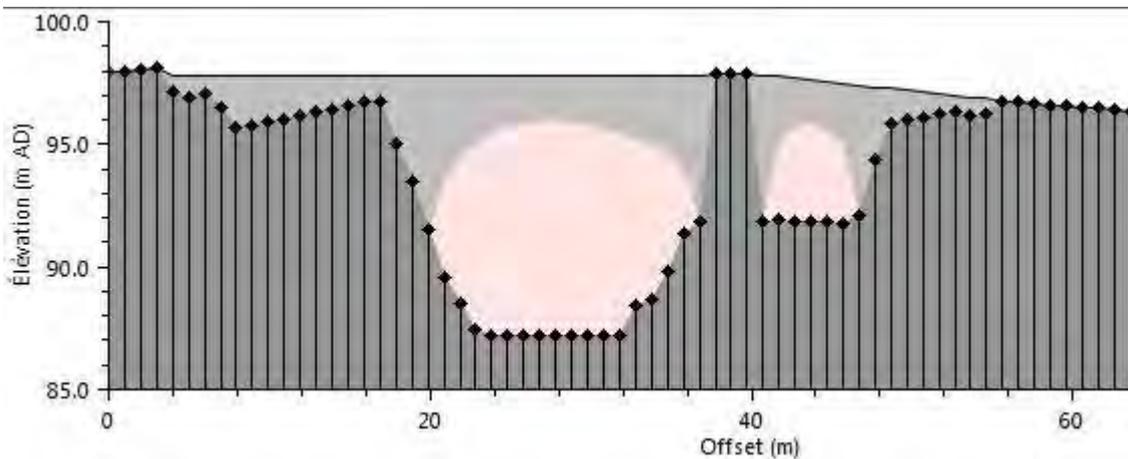


Figure 18 : Ouvrage Desbassyns actuel intégré au Modèle 2D Scénario 1

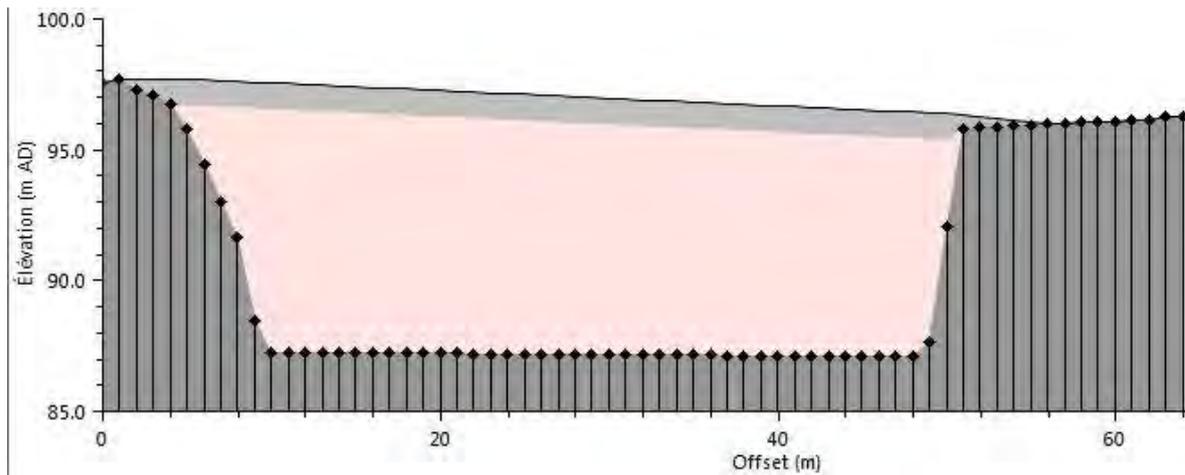


Figure 19 : Ouvrage Desbassyns et Rivière recalibrés intégrés au Modèle 2D Scénario 2

#### 14.6. CALAGE DU MODELE

Les coefficients de Manning utilisés dans le modèle, ont été déterminés à la suite d'observations de terrain et avec l'expérience de notre bureau d'étude dans la modélisation mathématique d'écoulements.

Les résultats du modèle (H, V) ont été analysés en recoupant les valeurs avec la topographie existante (MNT, visite in situ, ...) afin de vérifier leur validité avant d'éventuelle nouvelle itération de calcul.

## 15. ANALYSE DES ECOULEMENTS

### 15.1. SCENARIO 1 : PONT DESBASSYNS ACTUEL

#### 15.1.1. Introduction

La simulation de la crue centennale de la Rivière des Pluies et de la Ravine Cadet **à l'état initial** (Pont Desbassyns actuel), a permis de mettre en évidence les paramètres caractéristiques des écoulements induits.

#### 15.1.2. Résultats

Les figures ci-après illustrent l'étendue de la zone d'expansion de la crue centennale des cours d'eau à l'état initial résultant de la modélisation mathématique 2D:

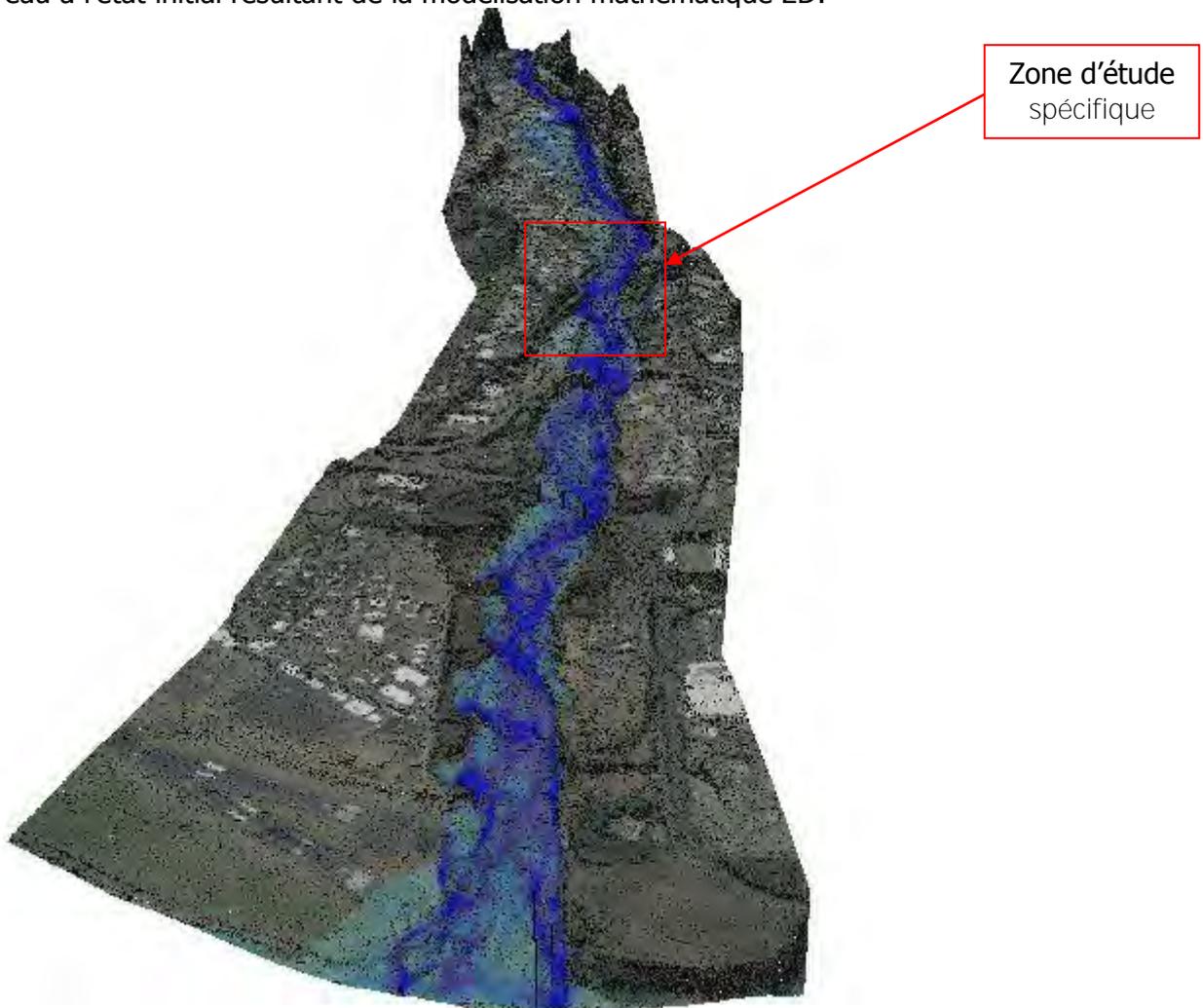


Figure 20 : Vue 3D des résultats - hauteurs d'eau Q100 état initial

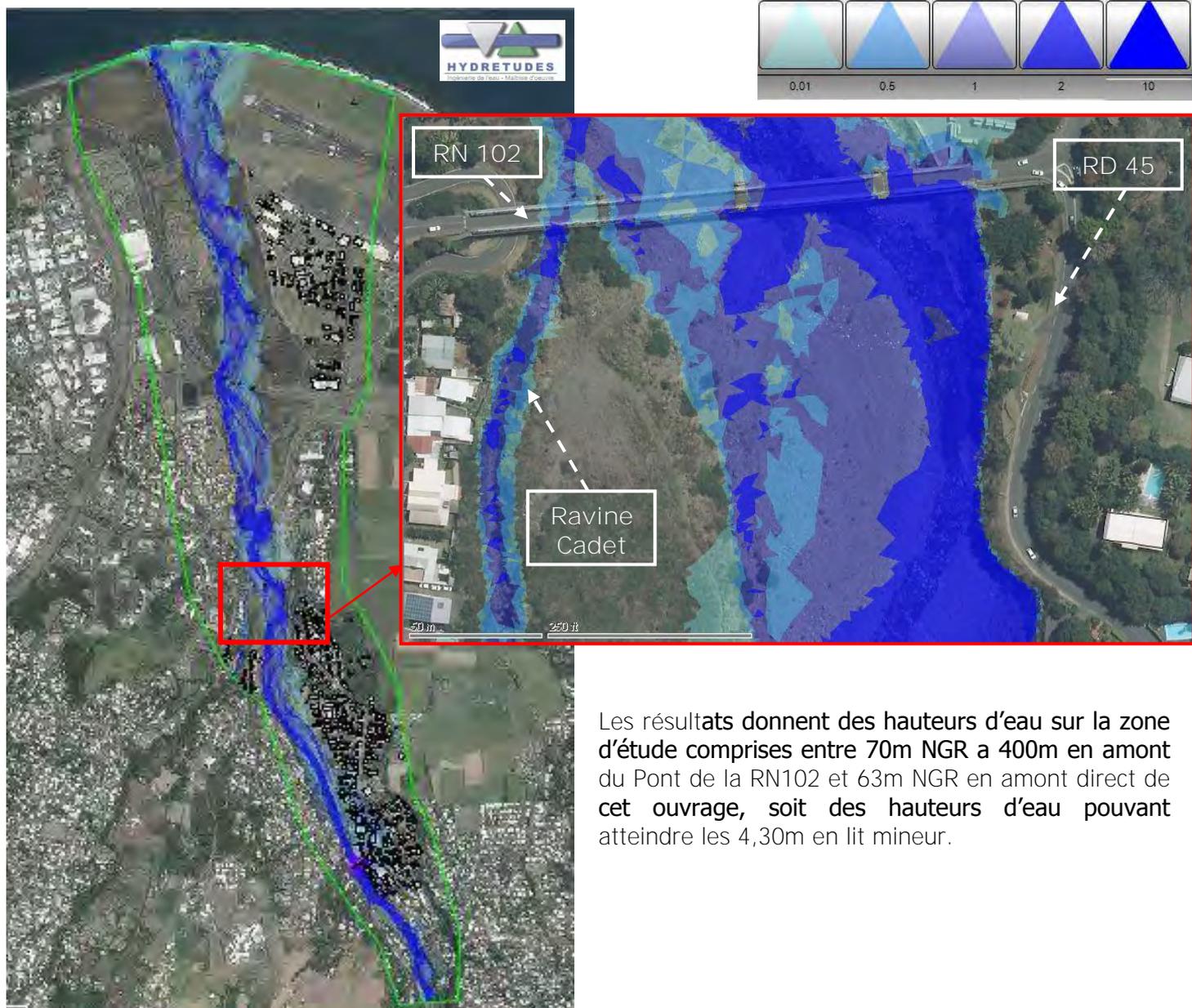


Figure 21 : Hauteurs d'eau maximales atteintes en m – Crue centennale à l'état initial

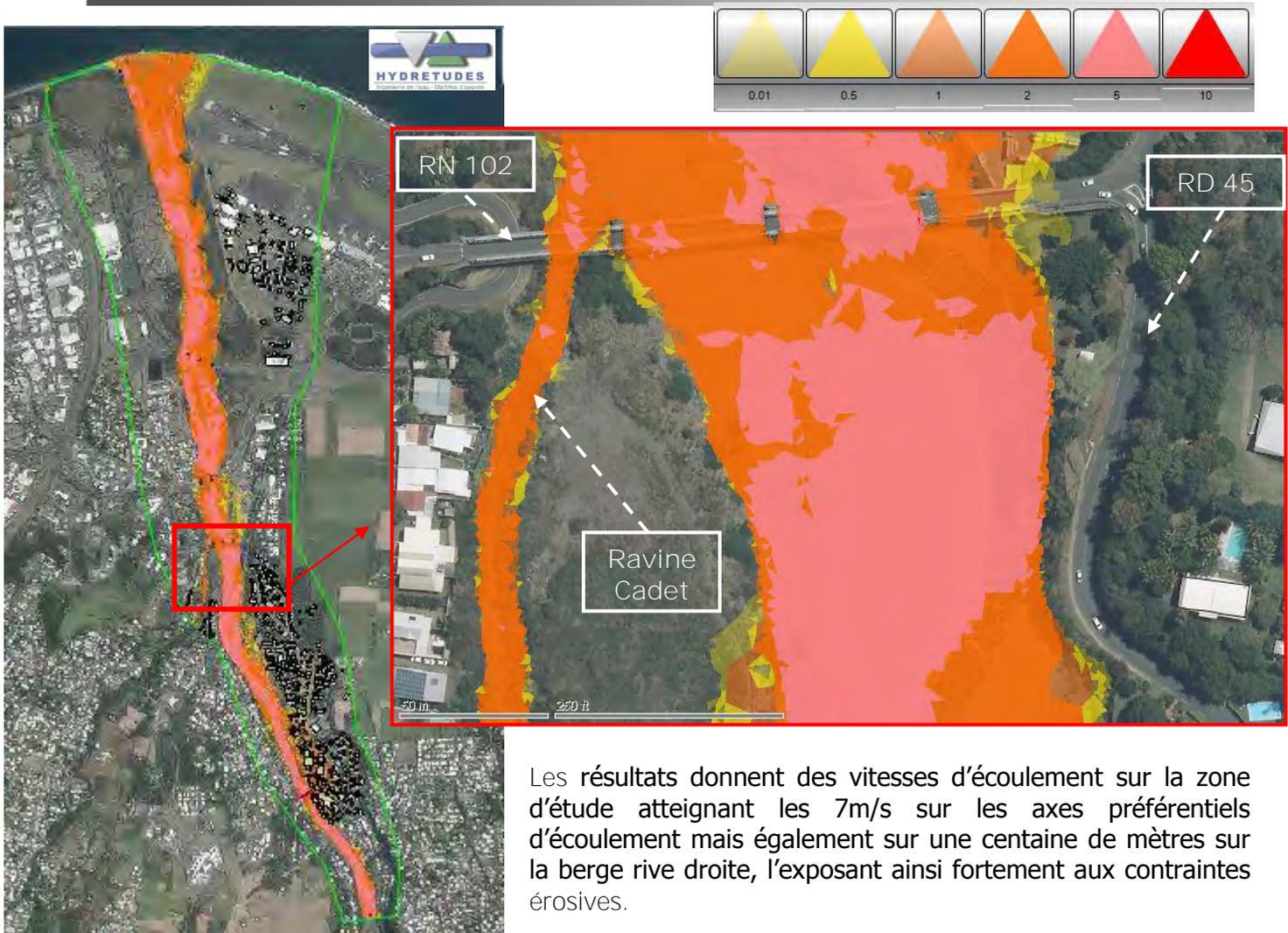


Figure 22 : Vitesses d'eau maximales atteintes en m/s – Crue centennale à l'état initial

Une analyse de la **direction des écoulements a été faite sur la base de l'orientation des vecteurs vitesses**. La figure ci-dessous montre à quel point la berge à conforter est sollicitée mais aussi son influence sur le « renvoi » des écoulements vers la rive gauche. La pile **de l'ouvrage de la RN102** située côté rive droite est fortement sollicitée :

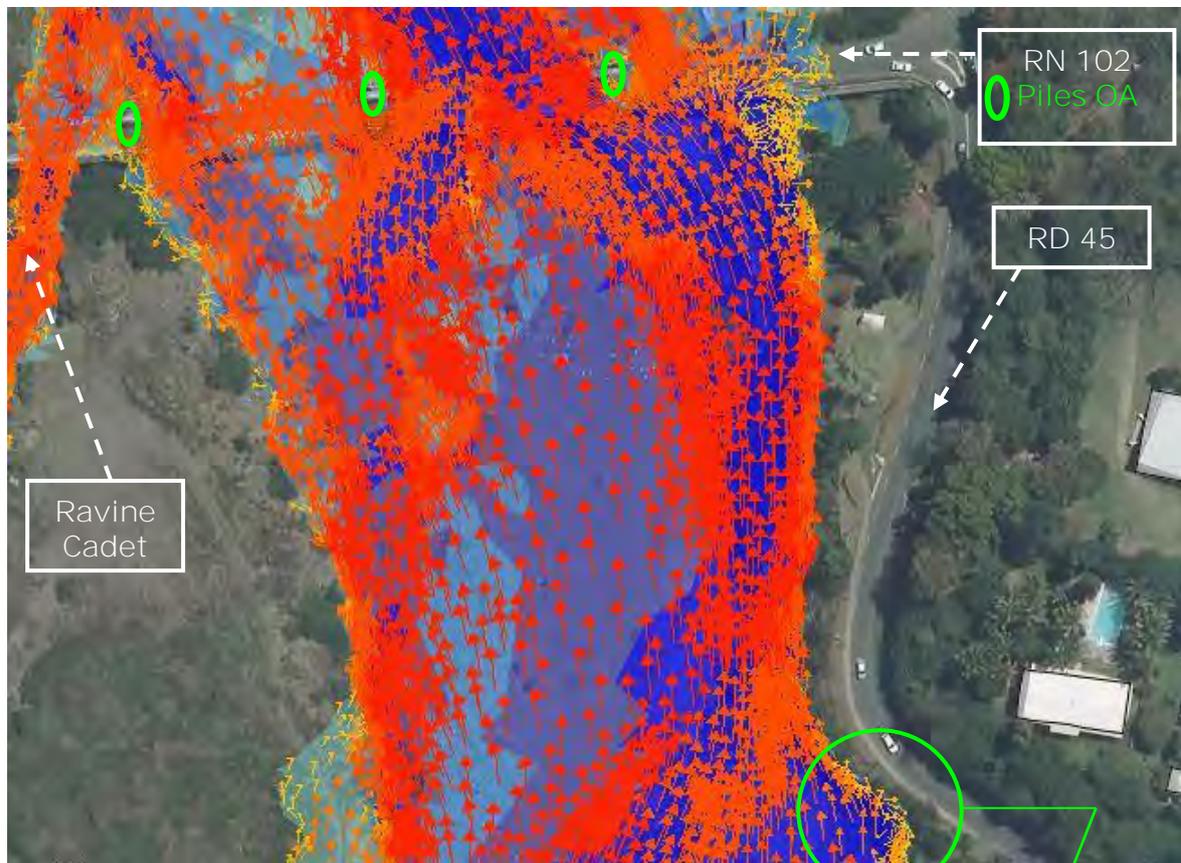
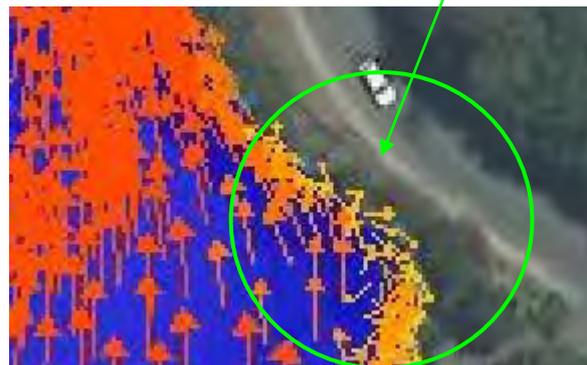


Figure 23 : Orientations des vecteurs vitesses – Crue centennale à l'état initial

Cette figure correspond au zoom des vecteurs vitesses sur une zone très sollicitée par les écoulements et montrant une zone de contre courant favorisant les phénomènes érosifs.



## 15.2. SCENARIO 2 : PONT DESBASSYNS REDIMENSIONNE

### 15.2.1. Introduction

La simulation de la crue centennale de la Rivière des Pluies et de la Ravine Cadet à l'état futur (hypothèse du Pont Desbassyns **redimensionné selon résultats de l'EPOA** correspondante : HYDRETTUDES Océan Indien pour le compte de la CINOR, 2016), a permis de mettre en évidence les paramètres caractéristiques des écoulements induits dans cette configuration.

### 15.2.2. Résultats

Les figures ci-après illustrent l'étendue de la zone d'expansion de la crue centennale des cours d'eau à l'état futur résultant de la modélisation mathématique 2D correspondante :

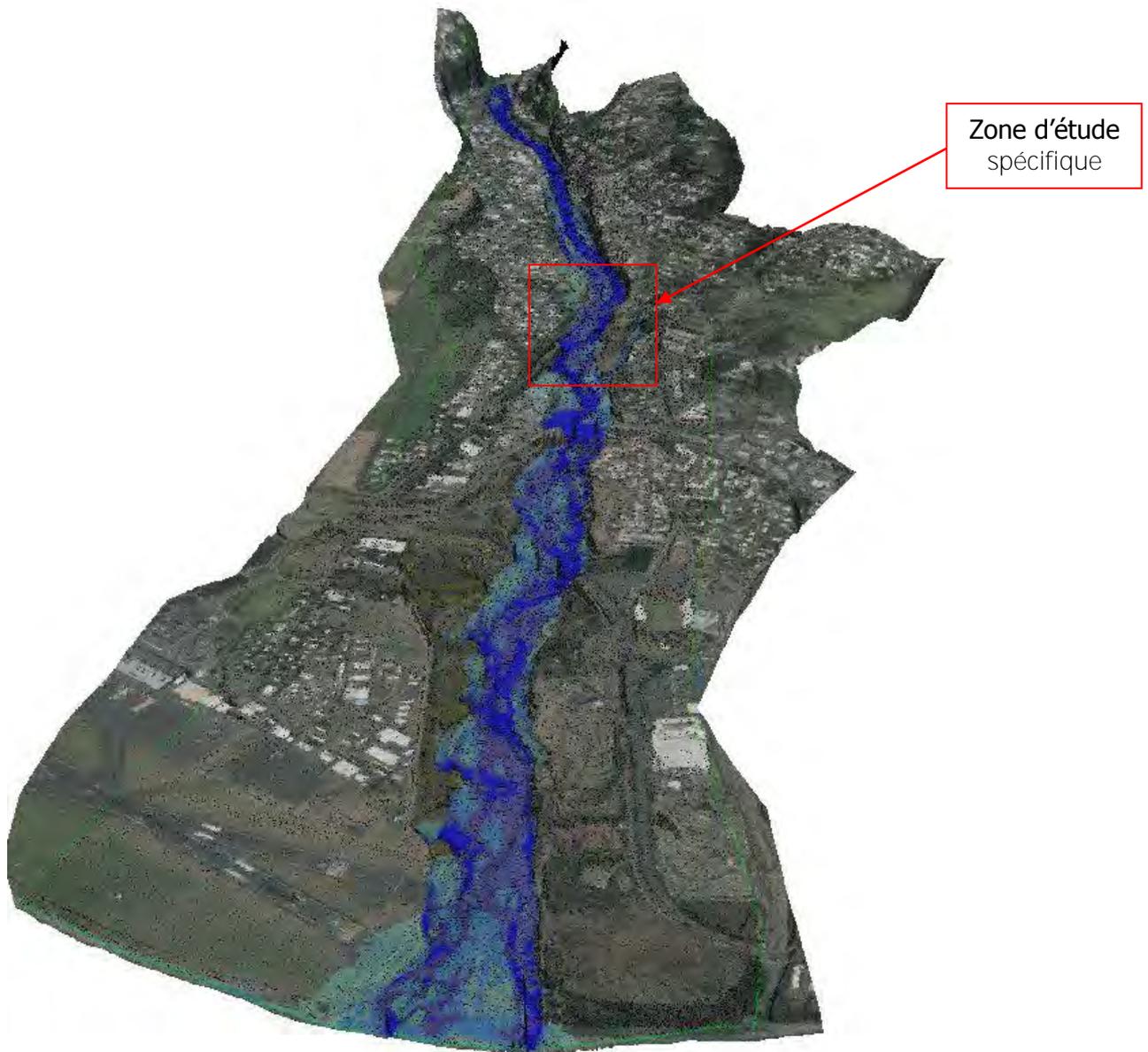


Figure 24 : Vue 3D des résultats - hauteurs d'eau Q100 état futur

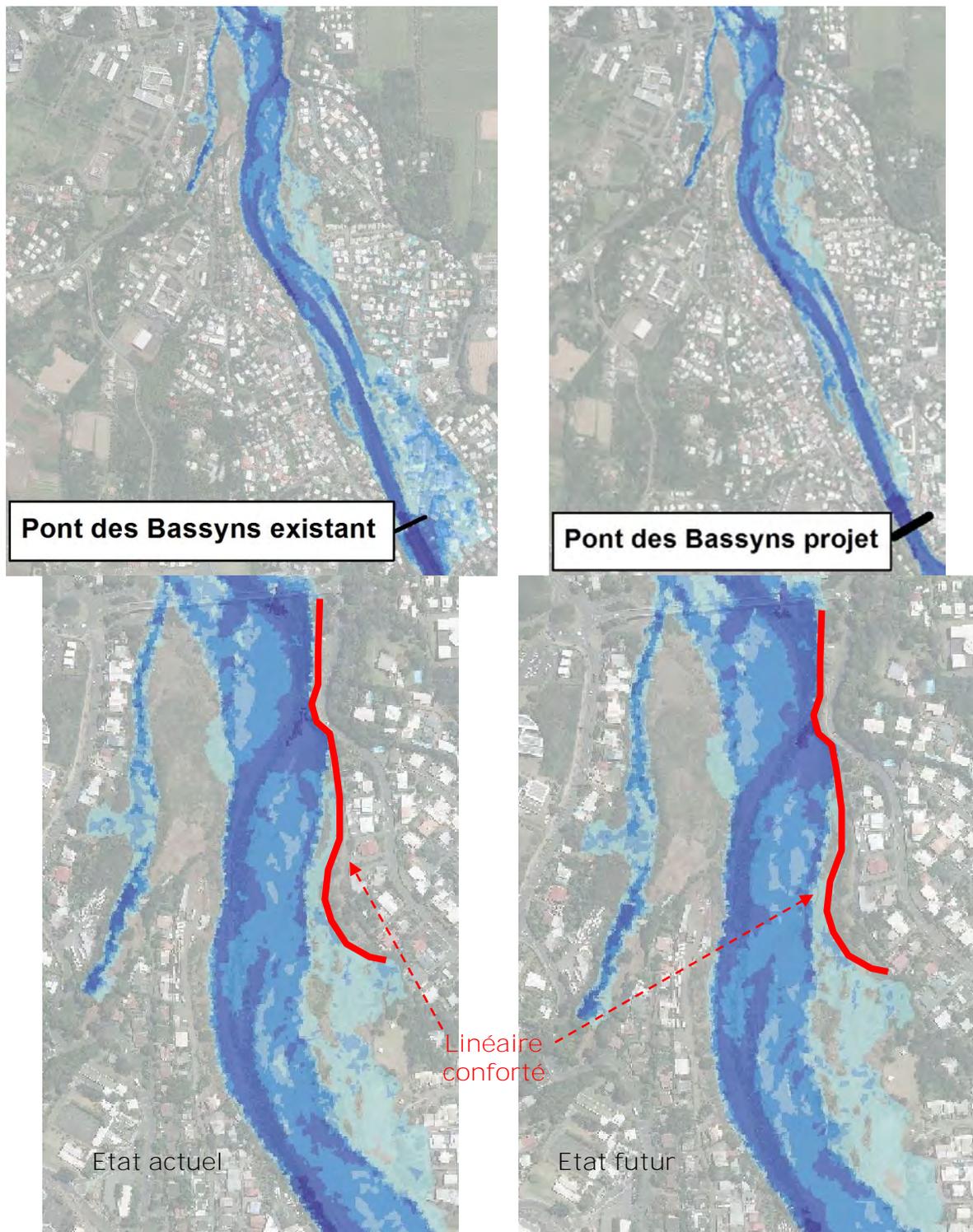


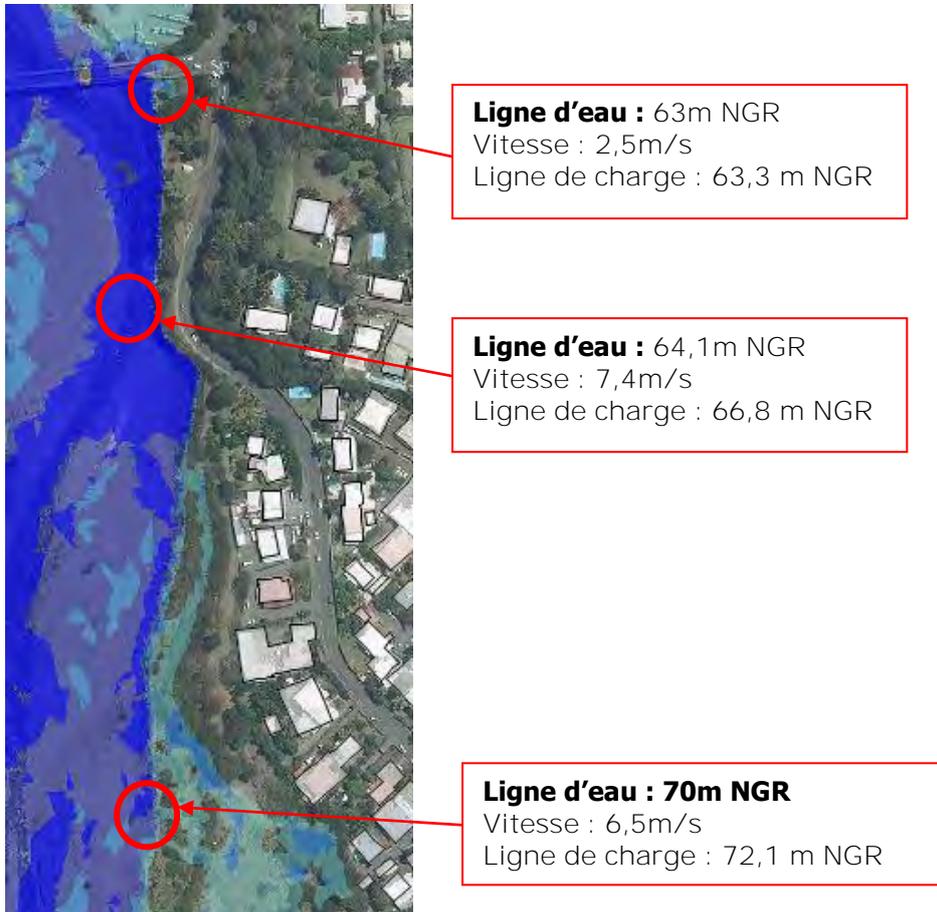
Figure 25 : Comparaison des hauteurs d'eau maximales d'une crue centennale – Etat actuel et Etat futur (pont Desbassyns recalibré)

Les résultats donnent des hauteurs d'eau et des vitesses sur la zone d'étude équivalentes à celles de l'état initial, le projet de redimensionnement du Pont ayant des effets importants sur le quartier de la Rivière des Pluies à Sainte Marie.

Les résultats en termes de cotes d'inondations et vitesses d'écoulement sont donc inchangés.

### 15.3. COTES D'INONDATION EN CRUE CENTENNALE

Le document 4 spécifie que la zone d'étude est hors d'eau pour la crue. Elle reste cependant soumise au risque d'érosion. Ceci se confirme par les résultats des simulations réalisées et décrites précédemment.



Le document 4 définit les niveaux de crête des ouvrages de protection qui permettent d'éviter toute submersion en crue centennale, compte tenu d'un exhaussement du fond de la rivière estimé à 1 mètre par rapport à son niveau de 2008.

Ces niveaux de la ligne d'eau et d'énergie aux limites de la zone d'étude sont les suivants :

- **63 NGR pour la ligne d'eau au niveau du pont de la RN102, et 63,3m NGR** pour la cote de charge,
- **70 NGR pour la ligne d'eau à une distance de 400 mètres en amont, et 72,1 m NGR** pour la cote de charge.

Ces niveaux sont comparables (mais supérieurs au droit de l'ouvrage RN102) à la cote de charge centennale calculée dans le document 6 :

- 62 NGR au niveau du pont de la RN102,
- 72 NGR à une distance de 400 mètres en amont.

On retiendra les dernières valeurs données par la présente modélisation, pour le calage des crêtes des protections dans le cadre du présent projet.

## 15.4. ANALYSE DES CRUES INTERMÉDIAIRES

Afin d'analyser les possibilités d'érosion de la berge rive droite de la Rivière des Pluies, au droit de la RD45, pour des crues d'occurrences moindres que la crue centennale et donc des fréquences plus importantes, une analyse du comportement du cours d'eau et des contraintes associées aux écoulements a été réalisée.

Une analyse des débits intermédiaires suivants a été menée :

T (années)	Q approx (m <sup>3</sup> /s)
1	130
2	160
5	270
10	470
20	650
30	750
50	890
100	1100

Tableau 4 : Débits intermédiaires étudiés de la Rivière des Pluies au droit de la RD45

Les résultats associés sont décrits dans le tableau ci-dessous et illustrés page suivante.

*Valeurs au droit du  
coude de la RD45*

T (années)	Q approx (m <sup>3</sup> /s)	V (m/s)	H eau (m)
1	130	4,7	2,8
2	160	5,5	3,1
5	270	6,1	3,5
10	470	6,5	4,0
20	650	6,8	4,3
30	750	6,9	4,4
50	890	7,1	4,6
100	1100	7,4	4,8

Tableau 5 : Débits intermédiaires étudiés de la Rivière des Pluies au droit de la RD45 et paramètres des écoulements associés

Il ressort de cette analyse que les vitesses sont rapidement importantes, induisant un fort pouvoir érosif des écoulements.



Figure 26 : Lignes d'eau et paramètres des écoulements des crues intermédiaires de la Rivière des Pluies au droit de la RD45

### LEGENDE :

- Q100 = 1100 m<sup>3</sup>/s / H eau = 4,8m (Z eau = 64,1m NGR) / V = 7,4 m/s
- Q50 = 890 m<sup>3</sup>/s / H eau = 4,6m (Z eau = 63,9m NGR) / V = 7,1 m/s
- Q30 = 750 m<sup>3</sup>/s / H eau = 4,4m (Z eau = 63,7m NGR) / V = 6,9 m/s
- Q20 = 650 m<sup>3</sup>/s / H eau = 4,3m (Z eau = 63,6m NGR) / V = 6,8 m/s
- Q10 = 470 m<sup>3</sup>/s / H eau = 4,0m (Z eau = 63,3m NGR) / V = 6,5 m/s
- Q5 = 270 m<sup>3</sup>/s / H eau = 3,5m (Z eau = 62,8m NGR) / V = 6,1 m/s
- Q2 = 160 m<sup>3</sup>/s / H eau = 3,1m (Z eau = 62,4m NGR) / V = 5,5 m/s
- Q1 = 130 m<sup>3</sup>/s / H eau = 2,8m (Z eau = 62,1m NGR) / V = 4,7 m/s

**LEGENDE :**

- Q100 = 1100 m<sup>3</sup>/s / H eau = 4,8m (Z eau = 64,1m NGR) / V = 7,4 m/s
- Q50 = 890 m<sup>3</sup>/s / H eau = 4,6m (Z eau = 63,9m NGR) / V = 7,1 m/s
- Q30 = 750 m<sup>3</sup>/s / H eau = 4,4m (Z eau = 63,7m NGR) / V = 6,9 m/s
- Q20 = 650 m<sup>3</sup>/s / H eau = 4,3m (Z eau = 63,6m NGR) / V = 6,8 m/s
- Q10 = 470 m<sup>3</sup>/s / H eau = 4,0m (Z eau = 63,3m NGR) / V = 6,5 m/s
- Q5 = 270 m<sup>3</sup>/s / H eau = 3,5m (Z eau = 62,8m NGR) / V = 6,1 m/s
- Q2 = 160 m<sup>3</sup>/s / H eau = 3,1m (Z eau = 62,4m NGR) / V = 5,5 m/s
- Q1 = 130 m<sup>3</sup>/s / H eau = 2,8m (Z eau = 62,1m NGR) / V = 4,7 m/s

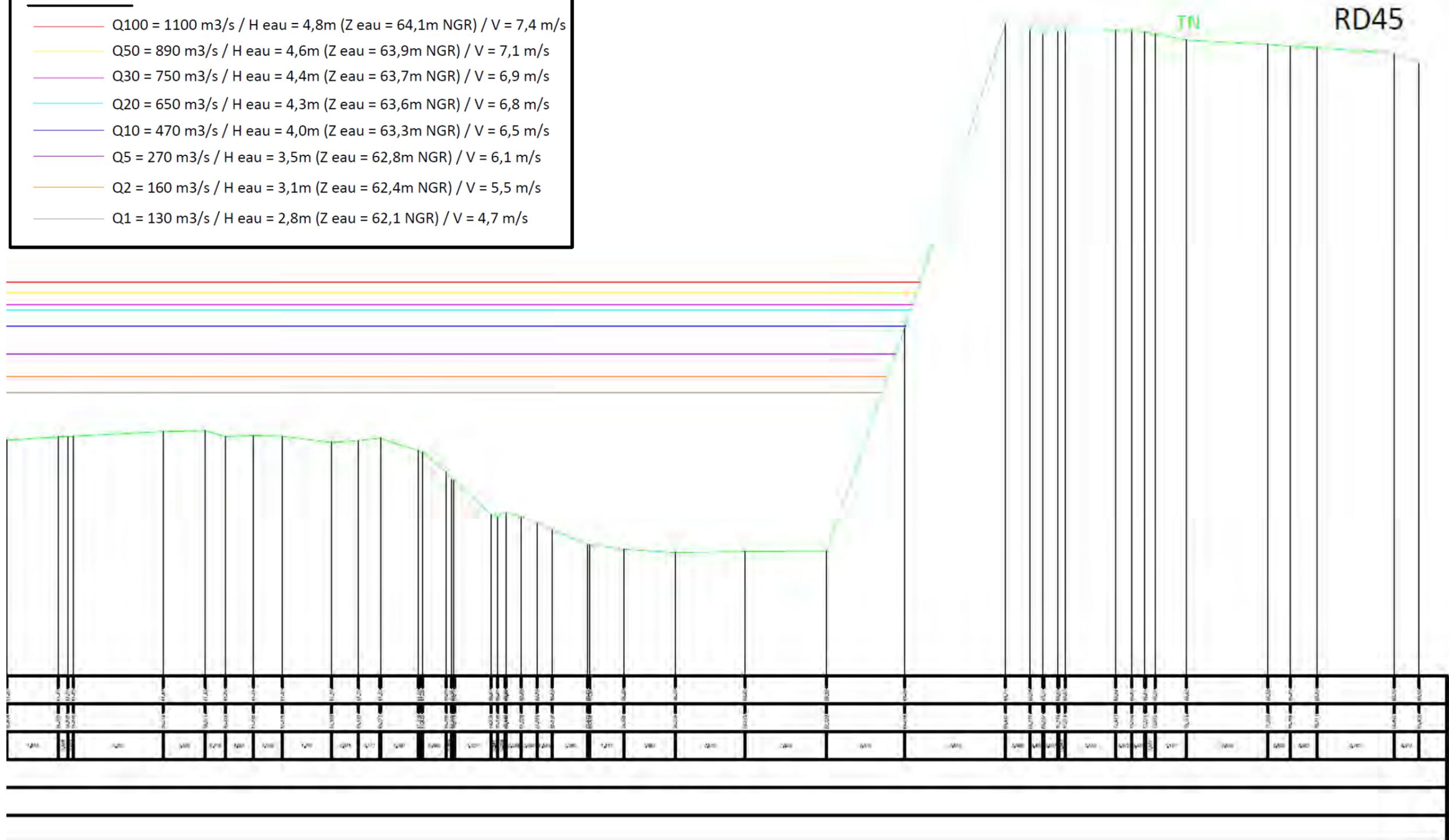


Figure 27 : Lignes d'eau et paramètres des écoulements des crues intermédiaires de la Rivière des Pluies au droit de la RD45 – Zoom sur Rive droite

## 16. EROSION EXTERNE DE LA BERGE

### 16.1. INTRODUCTION

La berge est soumise à des instabilités par érosion latérale menaçant la RD45.

Les calculs hydrauliques mettent en évidence :

- des vitesses d'écoulement très élevées contre la berge dès les petites crues ;
- un phénomène de remous important provoqué par **l'éperon** (juste en amont de la courbe de la RD45) recevant de plein fouet **l'écoulement** (cf. figure page 39).

Outre les vitesses importantes, la berge est sensible aux sollicitations prolongées dues à un transport intense de matériaux pendant les crues (phénomène **d'abrasion**).

**La puissance érosive est alors considérable. A titre indicatif, pour une hauteur d'eau de 4 m et une pente de 2%, le diamètre des matériaux charriés est estimé à 0,80 m.**

### 16.2. PROJECTION PROBABILISTE D'ÉROSION DE LA BERGE ET DE DESTABILISATION DE LA RD45

#### 16.2.1. Analyse des évolutions de la berge en lien avec les évènements hydrauliques depuis 2006

Une analyse comparative entre l'évolution de la morphologie de la Rivière des Pluies au droit de la RD45 (Ptrav n°45) et les évènements hydrologiques survenus depuis 2006 a été réalisée.

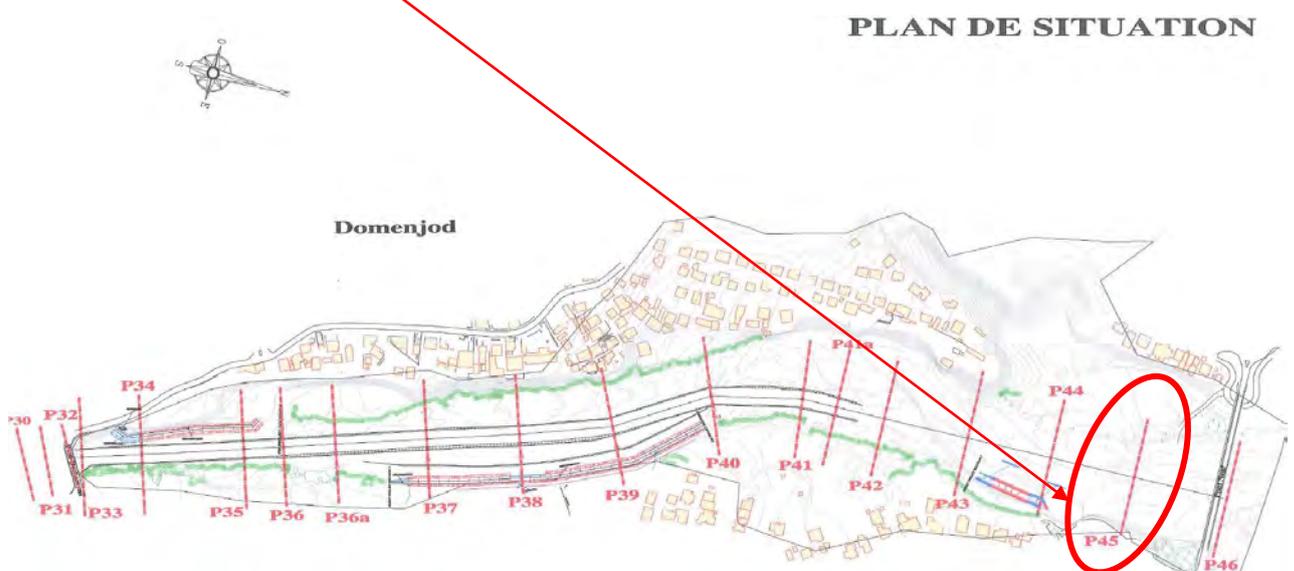


Figure 28 : localisation des profils en travers de suivi (TOPEX, 2015)

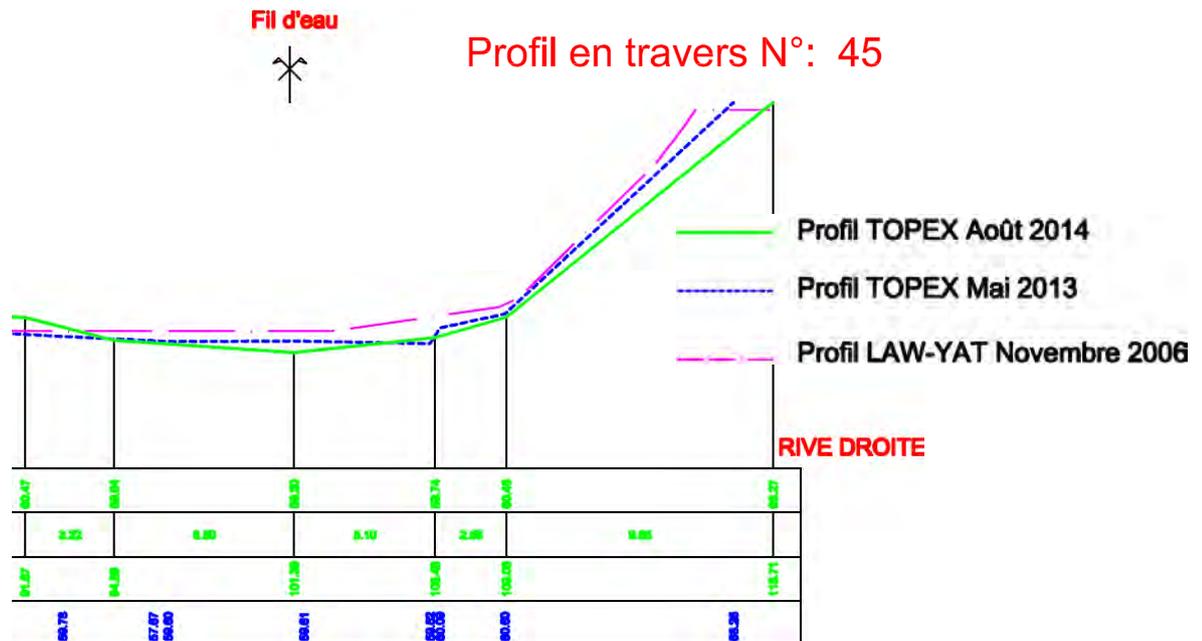


Figure 29 : Evolution topographique 2013-2014 (avec le niveau 2006 en rappel) de la Rivière des Pluies au droit du profil en travers de suivi n°45 (TOPEX, 2015)

L'on remarque sur ce profil en travers que la berge a régressé entre 2006 (réalisé en Octobre soit après le phénomène d'érosion important lié à la crue de DIWA) d'environ 1m entre 2006 et 2013 et d'autant entre 2013 et 2014, mais en haut de berge et non en pied.

### 16.2.2. Analyse des crues de la Rivière des Pluies depuis 2006

Le tableau ci-dessous récapitule les débits de pointe observés lors des épisodes de crue mesurés au droit du Pont Desbassyns par la Cellule de Veille Hydrologique de la DEAL Réunion :

Evènement	Débit de pointe (m <sup>3</sup> /s)	Période de retour estimée (années)
DIWA 2006	Estimé à 800 (Sogreah)	30 < T < 50
GAMEDE Février 2007	420	5 < T < 10
2011	85	T < 1
DUMILE Janvier 2013	163	T ≈ 2
BEJISA Janvier 2014	210	2 < T < 3

Tableau 6 : Débits mesurés au Pont Desbassyns depuis 2006 et périodes de retour estimées (CVH Réunion)

**Il apparaît donc que la crue de 2006 qui a engendrée les plus forts phénomène d'érosion, semble correspondre à un épisode de période de retour comprise entre 30 et 50ans, soit ayant une probabilité de se produire chaque année comprise entre 0,033 et 0,02.**

La crue la plus forte observée depuis est celle liée à Gamède, et qui semble correspondre à une période de retour comprise entre 5 et 10ans. Même si cette crue n'a que peu déstabilisé la berge, une crue de même ampleur pourrait demain engendrer une érosion qui serait « fatale » à la pérennité de la RD45 dans sa portion la plus exposée (répétition de crues minimales engendrant une déstabilisation progressive de l'ensemble des matériaux de la berge dans sa partie exposée aux écoulement : fragilisation progressive).

**Il apparaît d'une analyse simpliste, ne reflétant pas le risque exact d'érosion du pied de berge lors d'une crue jugée « fréquente », qu'une crue de période de retour supérieure à 10ans mais inférieure à 30ans aurait toutes les chances d'éroder la berge et donc de déstabiliser la RD45.**

### 16.2.3. Etat des lieux de la vulnérabilité de la Route Départementale 45 vis-à-vis du **phénomène d'érosion de berges**

A ce jour, la RD45 se situe au point le plus critique, à seulement quelques mètres du haut de berge (2,7 m au point le plus proche).

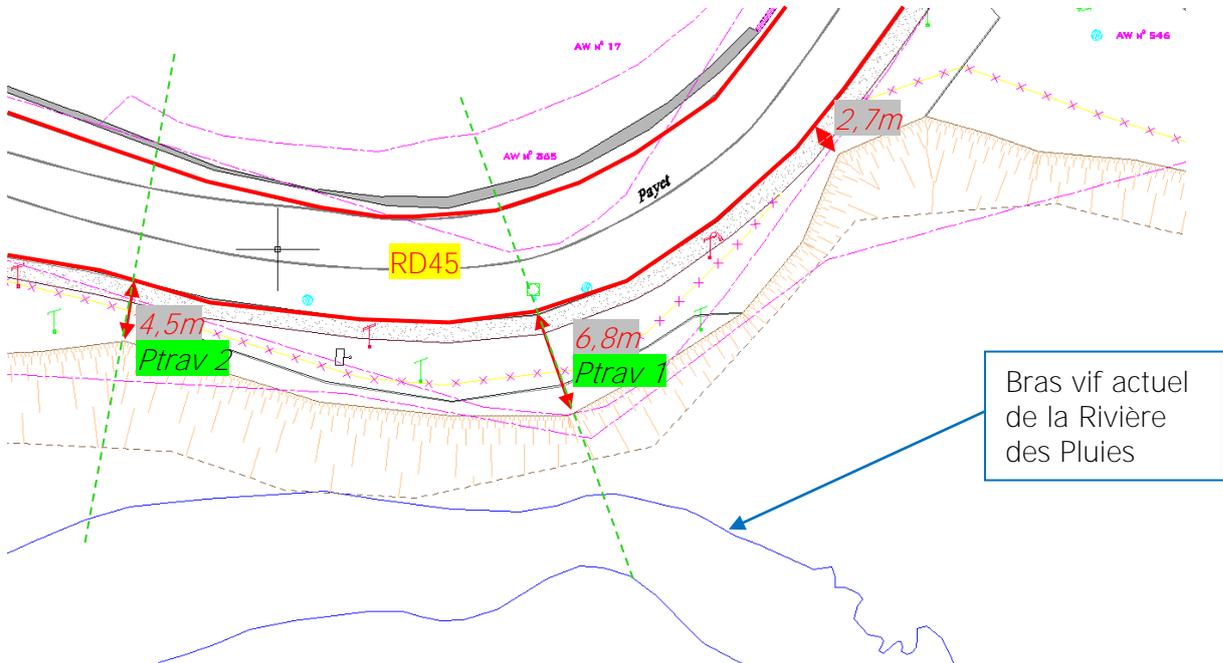


Figure 30 : Visualisation de la proximité de la RD45 vis-à-vis du haut de berge rive droite de la Rivière des Pluies (Source : levé topographique Septembre 2015, SCP Declerck)

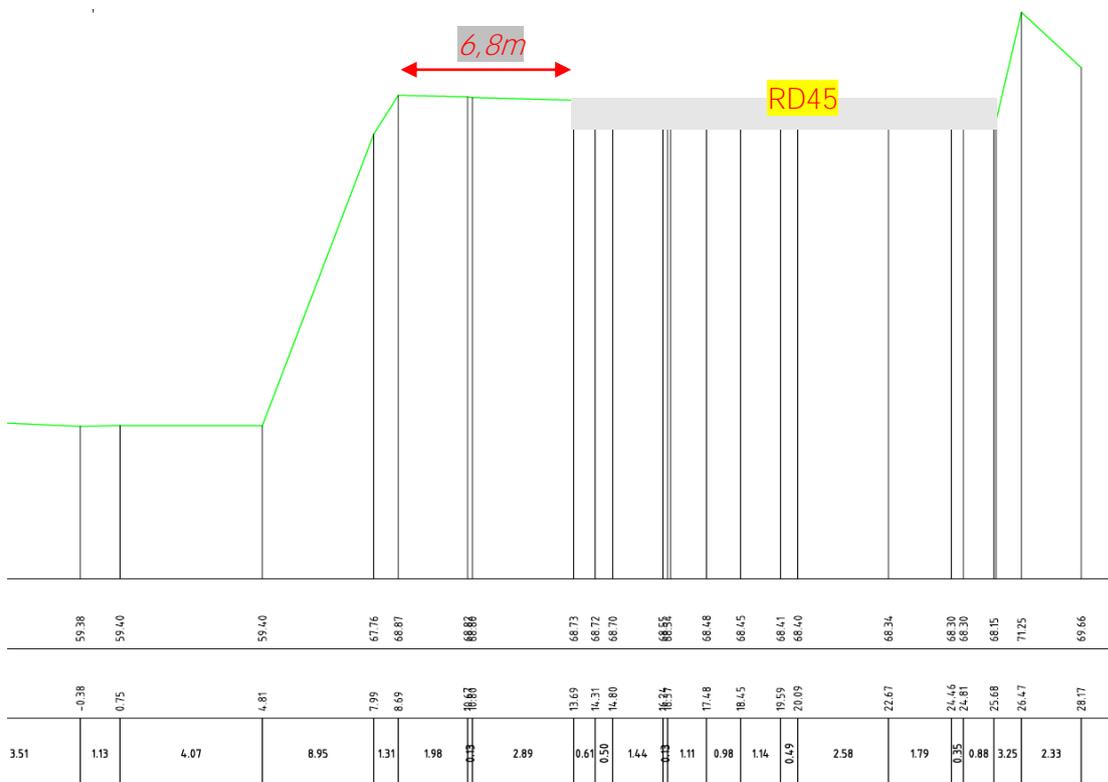


Figure 31 : Visualisation de la proximité de la RD45 vis-à-vis du haut de berge rive droite de la Rivière des Pluies – Ptrav 1 (Source : levé topographique Septembre 2015, SCP Declerck)

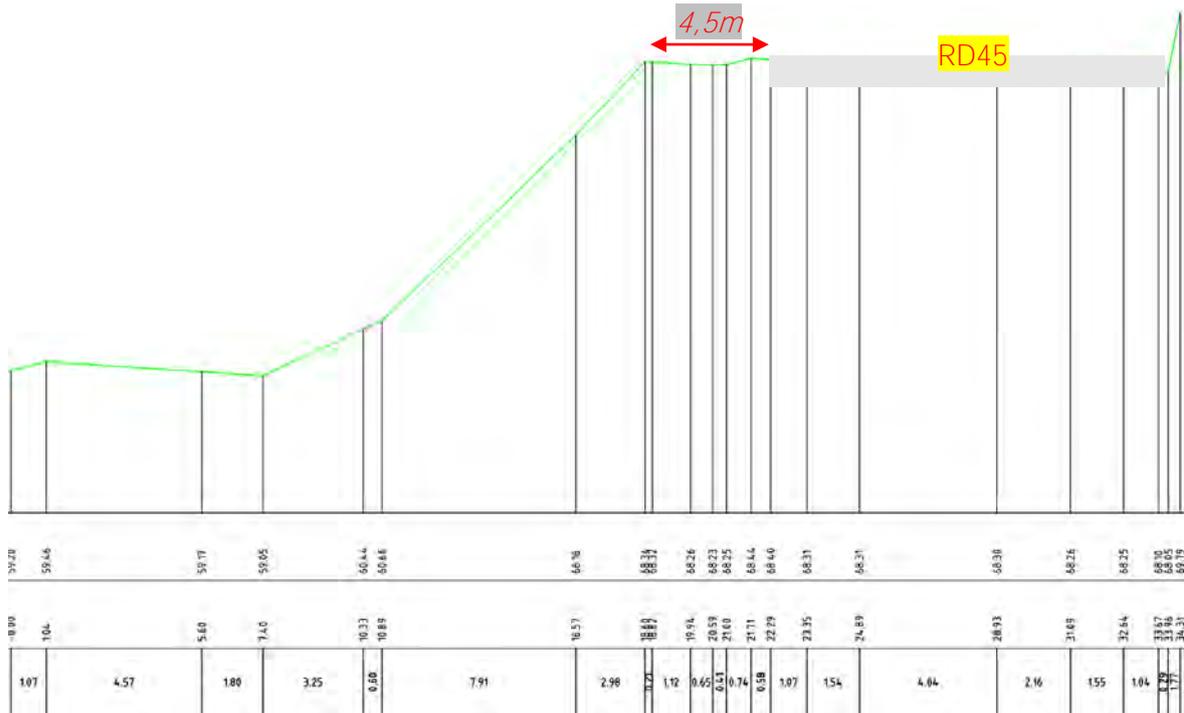


Figure 32 : Visualisation de la proximité de la RD45 vis-à-vis du haut de berge rive droite de la Rivière des Pluies – Ptrav 1 (Source : levé topographique Septembre 2015, SCP Declerck)

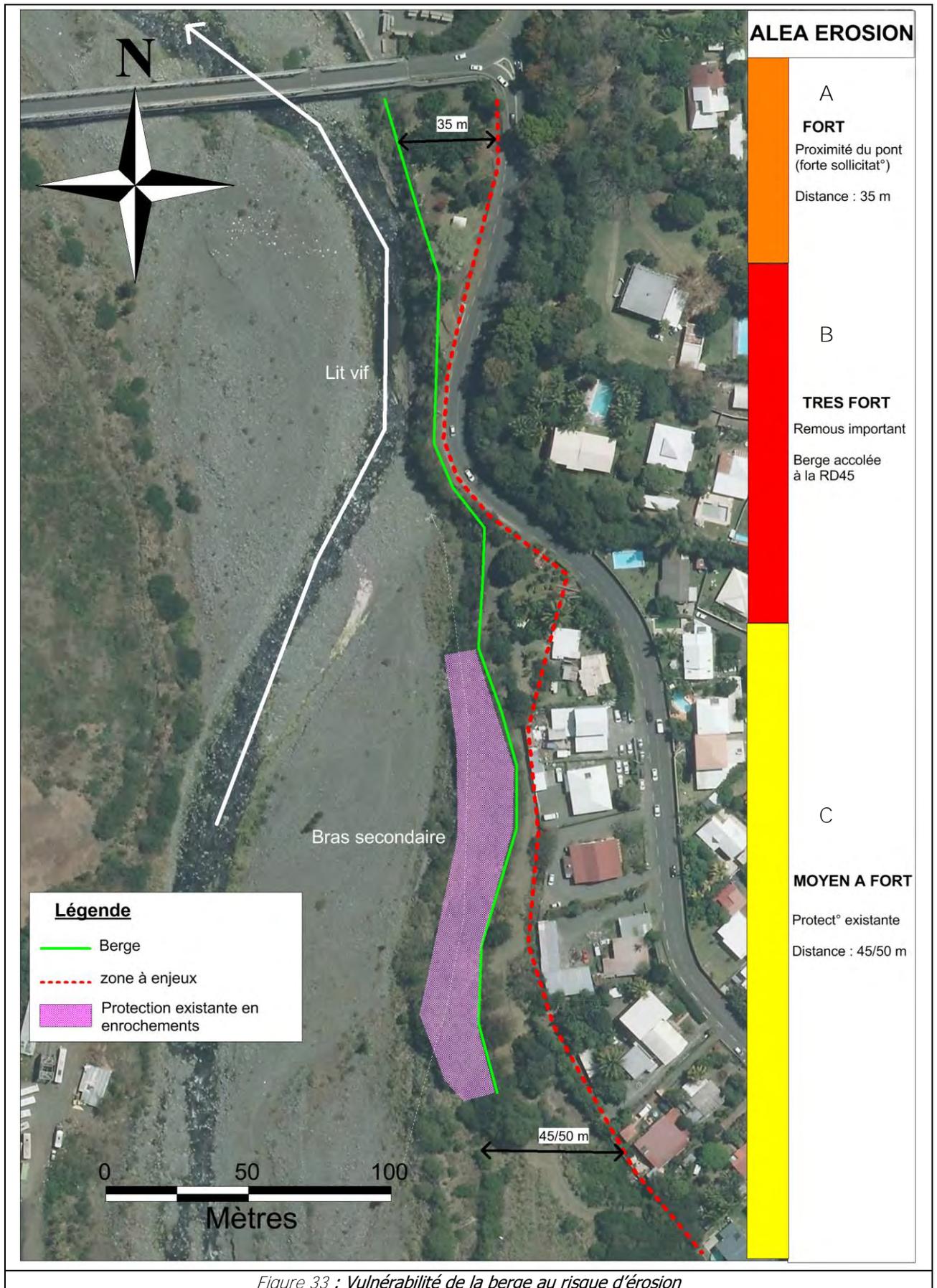


Figure 33 : Vulnérabilité de la berge au risque d'érosion

### 16.2.4. Conclusions en termes de probabilités de déstabilisation de la berge au droit de la RD45

Le tableau ci-dessous présente l'échelle utilisée pour estimer la probabilité d'occurrence d'un phénomène ou d'une défaillance par rapport à la route départementale.

La probabilité de défaillance est évaluée à dire d'expert et retour d'expérience sur des ouvrages similaires.

Classe de probabilité	4	3	2	1
Appréciation qualitative	Très fort	Fort	Moyen	Faible
Appréciation quantitative	0,5	0,3	0,1	0,03

La probabilité de défaillance pour les tronçons A à C est présentée dans le tableau ci-dessous :

Tronçons	Crue	Probabilité
Tronçon A	5 ans	0,2
	10 ans	0,3
	Q>30 ans	0,3
Tronçon B	5 ans	0,3
	10 ans	0,3
	Q>30 ans	0,5
Tronçon C	5 ans	0,03
	10 ans	0,1
	Q>30 ans	0,3

## 17. AFFOUILLEMENTS LOCAUX ET AFFOUILLEMENTS GENERALISES

Le document 4 définit le niveau d'arase des semelles de protection longitudinales à 4 **mètres sous le fil d'eau**, grâce à une approche théorique combinée à l'exploitation des résultats d'un modèle physique.

Le document 6 estime les affouillements locaux au droit des appuis du pont de la RN102 à une valeur comprise entre 5 et 8 mètres.

On retiendra la première valeur (**-4 mètres**) pour le calage des niveaux d'arase des semelles sur toute la zone d'étude.

## 18. INCISION DU LIT

Le document 4 et le document 6 estiment que le fond le plus bas a été atteint en 2008<sup>2</sup> :

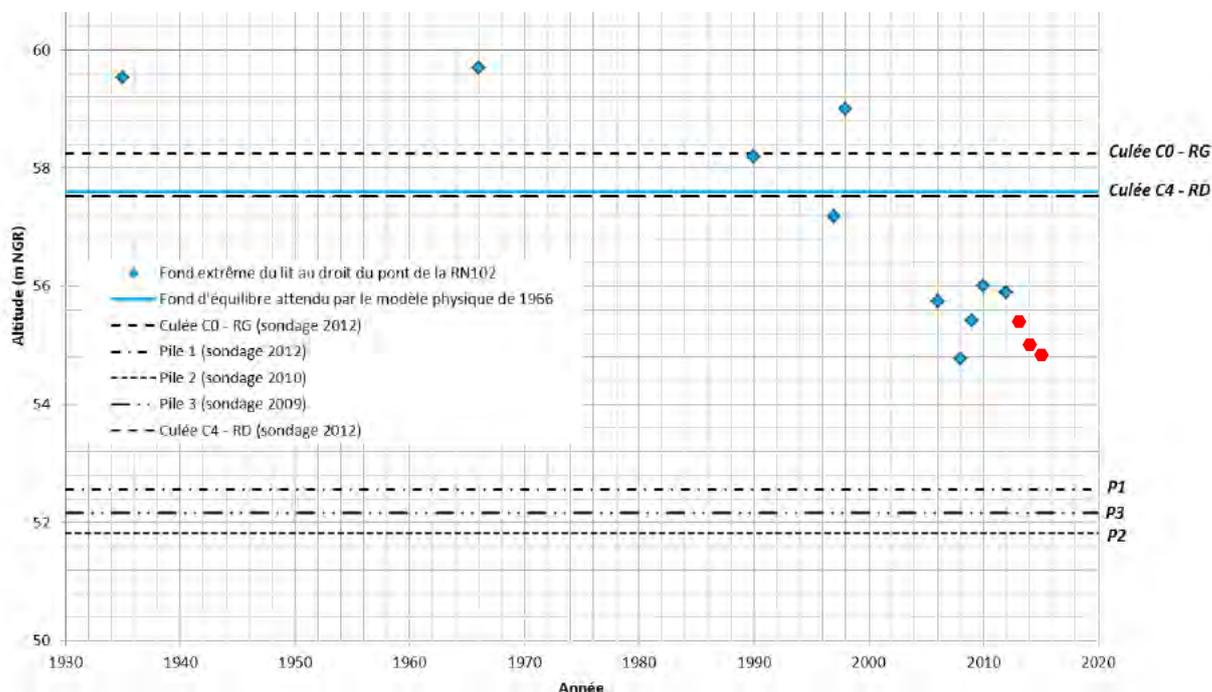


Figure 34 : Evolution de la cote de fil d'eau de la rivière au niveau du pont de la RN102

Les données 2013 et 2015 issues du suivi de la DEAL (cf. document 10) (en rouge ci-dessus) montrent toutefois **que depuis 2010, le lit de la rivière recommence à s'inciser et que l'on retrouve au niveau du pont de la RN102 des niveaux comparables à ceux de 2008, soit :**

- 54,80 NGR au niveau du pont,
- **65,40 NGR à une distance de 400 mètres à l'amont.**

Le document 6 préconise de prendre en compte une incision du lit de 2 mètres par rapport aux niveaux de 2008 pour le confortement des appuis du pont de la RN102.

Afin de ne pas renchérir outre-mesure le coût des protections, on retiendra une incision du lit de 1 mètre par rapport aux niveaux de 2008, qui correspond aux **niveaux de fil d'eau suivants :**

- 53,80 NGR au niveau du pont,
- **64,40 NGR à une distance de 400 mètres à l'amont.**

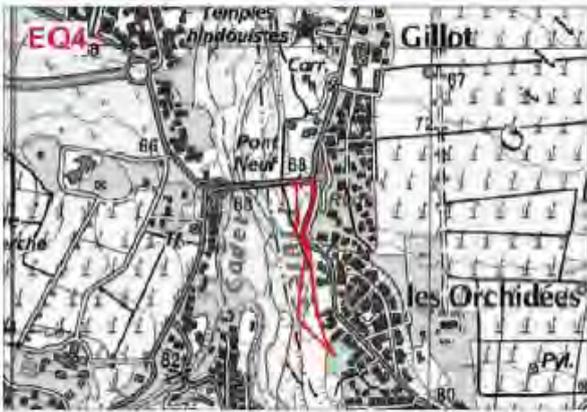
<sup>2</sup> Le document 4 montre que le niveau du fond du lit atteint en 2008 est le plus bas depuis 1930. **C'est pourquoi il est qualifié d'extrême.**

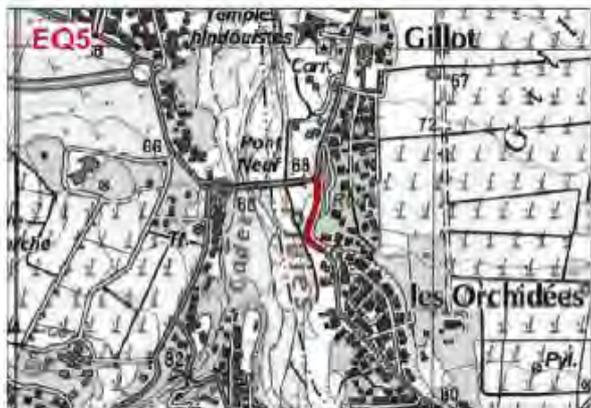
## SPECIFICATION ET DIMENSIONNEMENT DES OUVRAGES (PRINCIPES GENERAUX DE CONSTRUCTION)

Ce chapitre intègre les éléments de la deuxième phase de l'étude géotechnique préalable (principes généraux de construction), ainsi que des éléments complémentaires de dimensionnement hydraulique.

### 19. SOLUTIONS INITIALES ENVISAGEES

Sogreah, dans son étude datant de Février 2009, proposait les solutions de gestion et **d'aménagement** suivantes :

 <b>FICHE DE GESTION DES RISQUES INONDATION ET EROSION N° EQ4</b> 		
		
<b>Cours d'eau</b> <b>Rive</b> <b>Commune de</b> <b>Secteur</b> <b>Enjeux concernés</b> <b>Maître d'ouvrage</b> <b>Gestionnaire</b> <b>Aléa</b> <b>Risque</b>	Rivière des Pluies Droite Sainte-Marie <u>Secteur virage RD45 ( parking )</u> Pas d'autre accès possible Commune de Sainte-Marie Commune de Sainte-Marie Berges érodables à court terme avec distance à la berge < 50 m FORT	
GESTION	Description	Coût estimatif (€ HT)
<b>INFORMATION</b>	- Information et sensibilisation des collectivités et des gestionnaires des ouvrages	
<b>PREVISION</b>	Fermeture/isolement du parking dans le cadre du plan de sauvegarde des personnes et des biens selon niveau d'alerte	
<b>PREVENTION</b>	Délocalisation du parking	
<b>PROTECTIONS</b>	<p><b>Protection existante :</b>                      OUI partielle (enrochements libres)                      →                      - pas sur tout le linéaire                      - nature de la protection insuffisante (enrochements libres)                      - protection contre les affouillements insuffisante                      - Incision en pied</p> <p><b>Nouvelle protection :</b>                      2 Epis type Moka de 50 ml chacun, renvoi vers terrasse rive gauche (12 m de hauteur, 50 ml, enrochements liés, 3H/2V, 1 m d'épaisseur, dm=50cm)                      Cette protection est la même que celle préconisée pour le secteur habité du virage de la RD45 (H8)</p>	Coût de la protection H8
<b>SCENARIO DE GESTION PRECONISE</b>	<p><b>A très court terme :</b>                      - Information des riverains sur les risques existants et les voies praticables                      - Plans de circulation en crue à mettre en place                      - Mise en place d'une surveillance annuelle des traits de berge et des niveaux du lit</p> <p><b>A moyen terme :</b>                      - Réalisation de la protection commune aux secteurs H8, EQ4 et EQ5</p> <p><b>Préconisations environnementales :</b>                      Voir les préconisations pour H8</p>	

 <b>FICHE DE GESTION DES RISQUES INONDATION ET EROSION N° EQ5</b> 		
		
<b>Cours d'eau</b> <b>Rive</b> <b>Commune de</b> <b>Secteur</b> <b>Enjeux concernés</b> <b>Maître d'ouvrage</b> <b>Gestionnaire</b> <b>Aléa</b> <b>Risque</b>	Rivière des Pluies Droite Sainte-Marie <a href="#">Secteur virage RD45 (route)</a> En cas de coupure de la RD45, autre voie d'accès possible aux habitations par Cité Duparc et RD61 Conseil Général 974 Conseil Général 974 (UTR) Berges érodables à court terme avec distance à la berge < 50 m sauf un point dur localisé au droit du virage FORT	
GESTION	Description	Coût estimatif (€ HT)
<b>INFORMATION</b>	- Information et sensibilisation des collectivités et des gestionnaires des ouvrages	
<b>PREVISION</b>	Fermeture localisée de la voirie dans le cadre du plan de sauvegarde des personnes et des biens selon niveau d'alerte	
<b>PREVENTION</b>	<i>Solutions par prévention non retenues car déjà réalisées (tracé plus éloigné de la berge)</i>	
<b>PROTECTIONS</b>	<p><b>Protection existante :</b>                      Oui partielle (enrochements libres)                      →                      - pas sur tout le linéaire                      - nature de la protection insuffisante (enrochements libres)                      - protection contre les affouillements insuffisante                      - Incision en pied</p> <p><b>Nouvelle protection :</b>                      2 Epis type Moka de 50 ml chacun, renvoi vers terrasse nive gauche (12 m de hauteur, 50 ml, enrochements liés, 3H/2V, 1 m d'épaisseur, dm=50cm)                      Cette protection est la même que celle préconisée pour le secteur habité du virage de la RD45 (H8)</p>	<i>Coût de la protection H8</i>
<b>SCENARIO DE GESTION PRECONISE</b>	<p><b>A très court terme :</b>                      - Information des riverains sur les risques existants et les voiries praticables                      - Plans de circulation en crue à mettre en place                      - Mise en place d'une surveillance annuelle des traits de berge et des niveaux du lit</p> <p><b>A moyen terme :</b>                      - Réalisation de la protection commune aux secteurs H8, EQ4 et EQ5</p> <p><b>Préconisations environnementales :</b>                      Voir les préconisations pour H8</p>	

 <b>FICHE DE GESTION DES RISQUES INONDATION ET EROSION N° H8</b> 		
		
<b>Cours d'eau</b> <b>Rive</b> <b>Commune de</b> <b>Secteur</b> <b>Enjeux concernés</b> <b>Aléa</b> <b>Risque</b>	Rivière des Pluies Droite Sainte-Marie Rivière des Pluies amont Pont RN102 à proximité du virage RD45 (PK 550 à 150) 5 habitations (maxi R+1) – voie d'accès impactée après les habitations si RD45 coupée (impactée potentiellement avant les habitations) Berges érodables à court terme avec distance à la berge < 50 m FORT	
GESTION	Description	Coût estimatif (€ HT)
<b>INFORMATION</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Réunions d'information régulières sur les risques et sur leur gestion (zonage des risques, lieux refuge, etc.)</li> <li>- Panneaux informatifs aux endroits stratégiques et dans les lieux publics (risques existants, historique des crues majeures, etc.)</li> <li>- Etc.</li> </ul>	
<b>PREVISION</b>	Plan de sauvegarde des personnes et des biens les plus proches de la berge rive droite selon niveau d'alerte (point-refuge à identifier en retrait des berges)	
<b>PREVENTION</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Modification du POS de Ste Marie (zone UD actuellement)</li> <li>- Acquisition à l'amiable des bâtis</li> </ul>	<b>1,75 M€</b> (5 x 350 k€)
<b>PROTECTIONS</b>	<p><b>Protection existante :</b>  OUI partielle (enrochements liés et libres) →</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- pas sur tout le linéaire</li> <li>- nature de la protection insuffisante (enrochements libres, liés sur faible hauteur)</li> <li>- protection insuffisante contre les affouillements</li> </ul> <p><b>Nouvelle protection :</b>  Première approche à valider par modèle physique : 2 épis type Moka de 50 ml chacun (12 m de hauteur, 50 ml, enrochements liés, 3H/2V, 1 m d'épaisseur, dm=50cm)  Cette protection est la même que celle préconisée pour le secteur du virage de la RD45 (parking + route ; EQ4 et EQ5)</p>	<b>1,45 M€</b> (+ Coût de maintenance : <b>14 450 €/an)</b>

<b>SCENARIO DE GESTION PRECONISE</b>	<p><b>A très court terme :</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Information des riverains sur les risques existants</li> <li>- Plans d'évacuation et de zones refuges à mettre en place</li> <li>- Mise en place d'une surveillance annuelle des traits de berge et des niveaux du lit</li> <li>- Inspection géotechnique annuelle de l'existant et de la berge</li> <li>- Limitation des nouvelles constructions</li> </ul> <p><b>A moyen terme :</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Réalisation des deux épis de protection <u>OU</u> acquisitions à l'amiable des 5 bâtis concernés</li> <li>- Modification du POS de Ste Marie</li> </ul>
	<p><b><u>Préconisations environnementales :</u></b></p> <p>Lors de la réalisation des 2 épis :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Dans les parties hautes et centrales des épis, plantations de lianes masquant l'ouvrage mais n'empêchant pas son inspection (fauche facile)</li> <li>- Enlèvement des déchets métalliques présents dans le lit de la rivière</li> <li>- Pêches de sauvetage en cas d'intervention dans le lit vif de la rivière</li> <li>- Mesures environnementales de chantier habituelles</li> <li>- Accompagnement des travaux par un référent environnemental extérieur</li> </ul> <p>D'une manière générale, en matière de paysage :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Privilégier les surfaces en pente douce et irrégulière en restituant la rugosité hétérogène du lit de galets ; éviter les surfaces lisses, verticales/horizontales</li> <li>- Adapter l'échelle des aménagements au site en maintenant la prédominance du lit de la rivière sur les zones de protections</li> </ul>

L'analyse de la solution initiale proposée, outre les dispositifs de gestion à très court terme qui semblent intéressants, la solution de protection de type mise en place **d'épi est** analysée dans le chapitre ci-dessous.

## 20. PRINCIPES D'AMENAGEMENTS PROPOSES

### 20.1. TYPES DE PROTECTION ENVISAGEABLES

#### 20.1.1. Solution épis (proposition initiale étude Sogreah)

La solution de type épi de protection est à proscrire (source Etude Sogreah : document 5):

- De tels ouvrages doivent être fondés, coté berge, sur un point dur, c'est-à-dire un point non érodable, pour éviter que le bras vif ne vienne contourner l'épi et le rende inefficace, voire le détruire. Or, le secteur situé en amont de la zone d'étude est constitué d'une terrasse érodable à court terme. L'épi amont devrait alors ainsi être ancré au niveau des habitations. Dans ces conditions, la longueur de l'épi dépasserait 100 mètres avec un terrain situé environ 5 à 6 m au-dessus du fond du lit extrême au niveau du point d'ancrage. Les dimensions de l'ouvrage à réaliser et les volumes de déblai/remblai seraient considérables, entraînant un coût de réalisation très élevé.
- La présence d'un tel ouvrage pourrait entraîner le renvoi du bras vif vers la rive opposée et amplifier ainsi le risque d'érosion de celle-ci.
- Un modèle physique serait nécessaire pour le dimensionnement et le positionnement de ces ouvrages.

**On s'orientera donc vers une solution de protection longitudinale de type perré en enrochements bétonnés.**

#### 20.1.2. Solution longitudinale

**La berge doit être consolidée par une protection lourde afin d'assurer sa pérennité.**

Un dispositif para fouille est indispensable. Le dimensionnement des confortements est alors basé sur les risques d'affouillement et des tendances d'évolution du lit soit un ancrage à 5 m de profondeur par rapport au fil d'eau actuel (cf. chapitres précédents).

Des protections résistantes aux érosions latérales **et à l'abrasion** sont à mettre en place.

Les différentes techniques envisageables sont résumées dans le tableau ci-après en dissociant la partie émergée de la partie immergée.

Type de protection		Avantages	Inconvénients	Coûts (ordre de grandeur)
Haut de berges (partie émergée)	Paroi clouée (verticale)	Ce type de confortement correspond parfaitement à des terrains meubles, des pentes raides et une emprise limitée. <b>Ce dispositif a peu d'influence sur le profil hydraulique de la rivière.</b> <b>Cette solution permet de phaser l'intervention (partie émergée et partie émergée) : berge auto-stable</b>	La paroi clouée nécessite une intégration paysagère. Le dimensionnement des clous est fonction de la qualité du sol. Son coût est élevé.	<b>1000 €/m<sup>2</sup></b> Pour une hauteur de protection au dessus du fil d'eau de 5 m, la protection s'élève à 5 K€/ml
	Perré béton avec couche d'usure haute adhérence ou maçonnerie de moellons appareillés (pente 1/1)	<b>L'aspect esthétique est amélioré lorsque cette protection est associée à une maçonnerie de moellons appareillés (intégration paysagère).</b> <b>Coffré directement sur la berge, cette solution permet de limiter l'emprise foncière.</b> Le coût est intéressant.	Le perré béton comporte une surface lisse. Cette solution <b>nécessite la mise en place d'un couche d'usure.</b> Un raccordement propre doit être réalisé entre la protection de berge et la partie immergée. Un dispositif de suivi est nécessaire.	<b>500 €/m<sup>2</sup></b> Pour une hauteur de protection au dessus du fil d'eau de 5 m, la protection s'élève à 3,5 K€/ml
	Enrochements bétonnés (pente 3/2 à pente 1/1)	Cette technique est très utilisée à La Réunion. Les matériaux peuvent être utilisés sur place. Le coût est compétitif.	<b>Cette solution peut conduire à un impact paysager (cf. digue de l'hôpital).</b> Un dispositif de suivi est nécessaire.	<b>150 €/m<sup>3</sup> à 200 €/m<sup>3</sup></b> Suivant quantité Pour une hauteur de protection au dessus du fil d'eau de 5 m, la protection s'élève environ à 3 K€/ml
Pied de berges (partie immergée)	Paroi moulée (verticale)	<b>La paroi moulée a peu d'influence sur le profil hydraulique dans la rivière.</b> Elle ne nécessite ni des terrassements ni de coffrage.	<b>Cette type de protection n'est pas envisageable</b> dans ce type de sol (blocs métriques à plurimétriques) conduisant à des coûts très importants.	<b>2000 €/m<sup>2</sup></b> Pour un ancrage à 5 m de profondeur, la protection s'élève à 10 K€/ ml
	Paroi clouée avec couche d'usure haute adhérence (béton projeté ou banché : coffrage perdu) (verticale)	<b>Ce dispositif a peu d'influence sur le profil hydraulique de la rivière.</b> <b>Il s'agit d'une technique courante.</b>	<b>Les retours d'expérience ont montré que le béton ne résiste pas longtemps à l'abrasion et aux chocs des galets.</b> <b>Les moyens de protéger efficacement les ouvrages contre l'abrasion et le choc des galets sont la mise en place d'un béton d'usure haute performance, d'enrochements bétonnés jouant le rôle de « sonnette d'alarme » ou d'un coffrage perdu tiranté. Cette solution n'est alors pas économique</b>	<b>1200 €/m<sup>2</sup></b> Pour un ancrage à 5 m de profondeur, la protection s'élève à 6,5 K€/ ml
	Enrochements bétonnés (pente 3/2 à pente 1/1)	Ce dispositif est le plus couramment employé pour son faible coût et sa facilité de mise en œuvre. <b>Retour d'expérience à La Réunion.</b>	Ces ouvrages sont dépendants et sensibles aux évolutions du lit de la rivière. L'entretien des ouvrages en enrochements est nécessaire si l'on veut en prolonger la durée de vie. Cette solution doit être limitée au secteur les plus sensibles. <b>La reprise en sous œuvre est délicate en cas d'évolution particulière du profil en long.</b>	<b>150 €/m<sup>3</sup> à 200 €/m<sup>3</sup></b> Suivant quantité Considérant les quantités importantes : <b>déblais à 15 €/m<sup>3</sup> et remblai entre 12 et 20 €/m<sup>3</sup></b> Pour un ancrage à 5 m de profondeur, la protection s'élève à 6 K€/ ml

Tableau 7 : Analyse des avantages, inconvénients et coûts respectifs des solutions techniques de protection contre l'érosion envisageables

Remarque : la granulométrie des alluvions et la présence de blocs ne permettent pas de faire appel à des techniques de battage (paplanches)

Propositions de variantes au stade d'esquisse

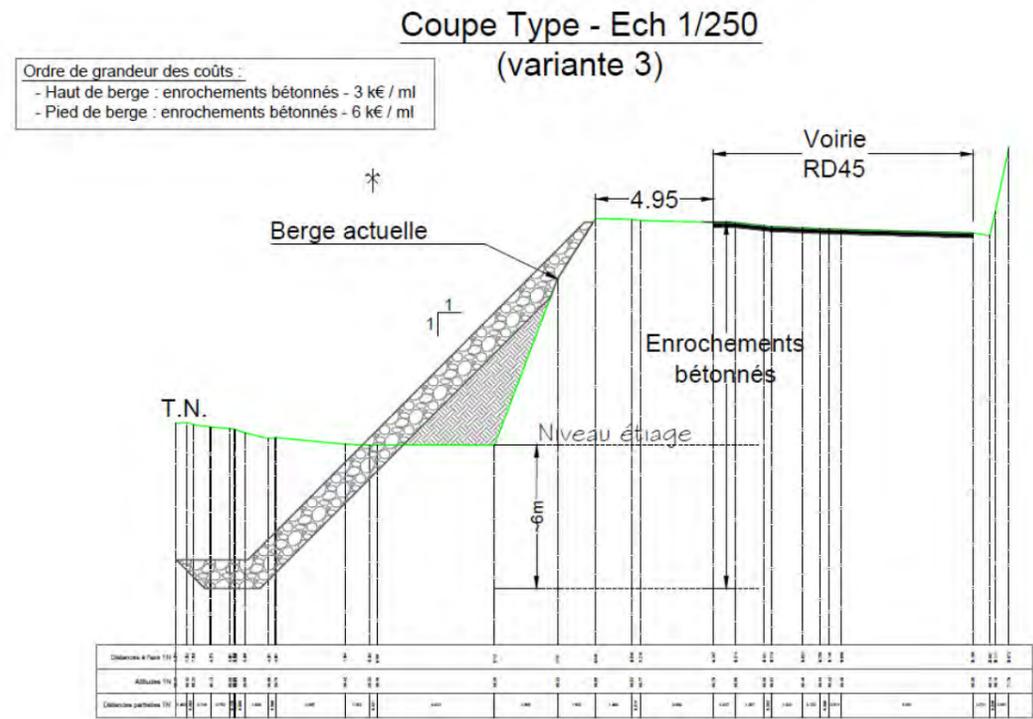
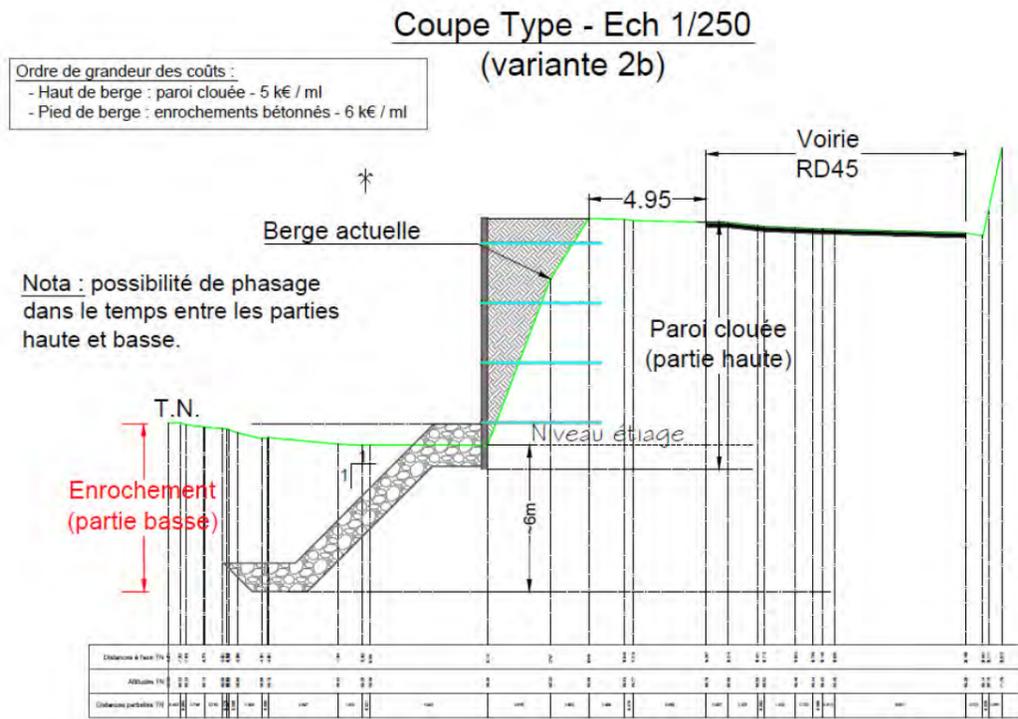
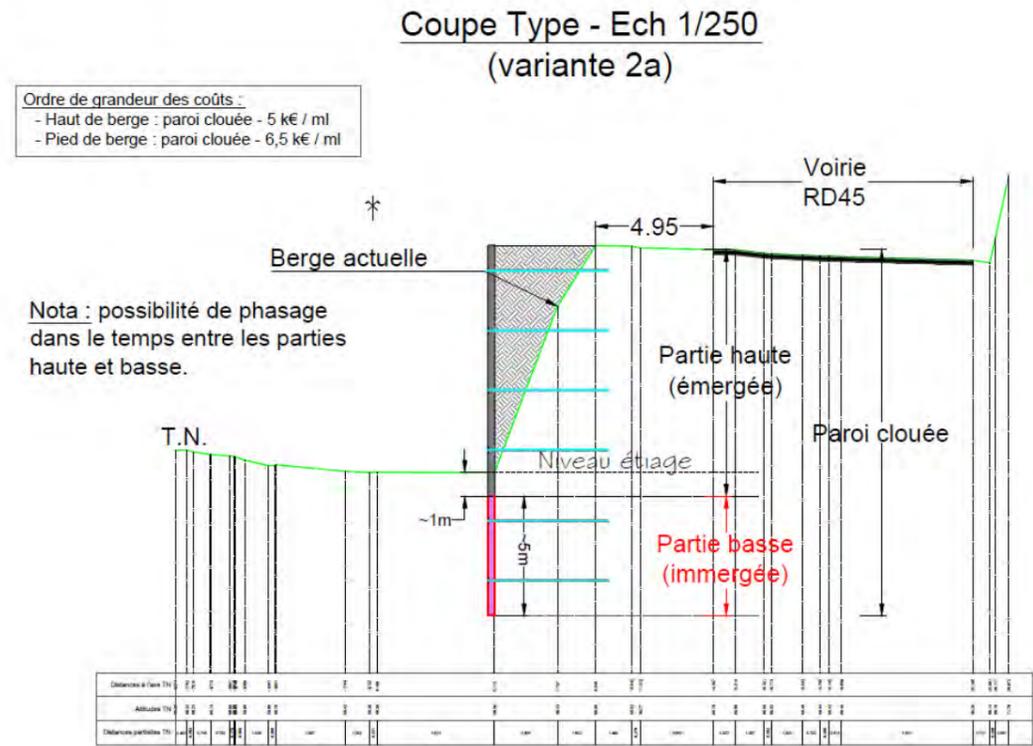
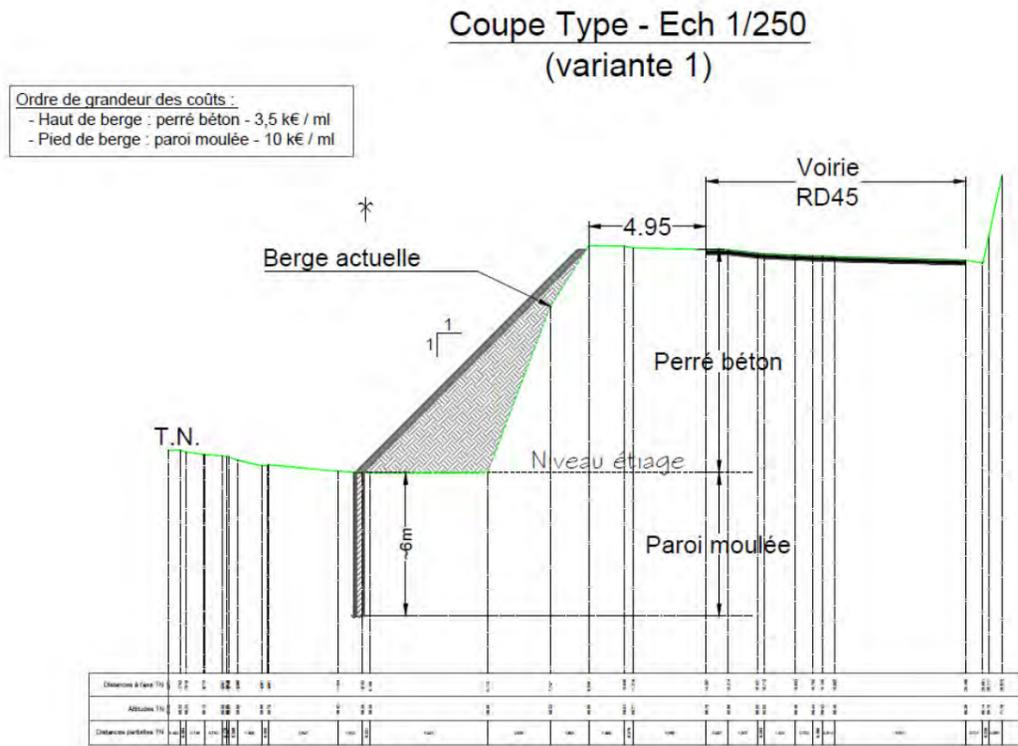


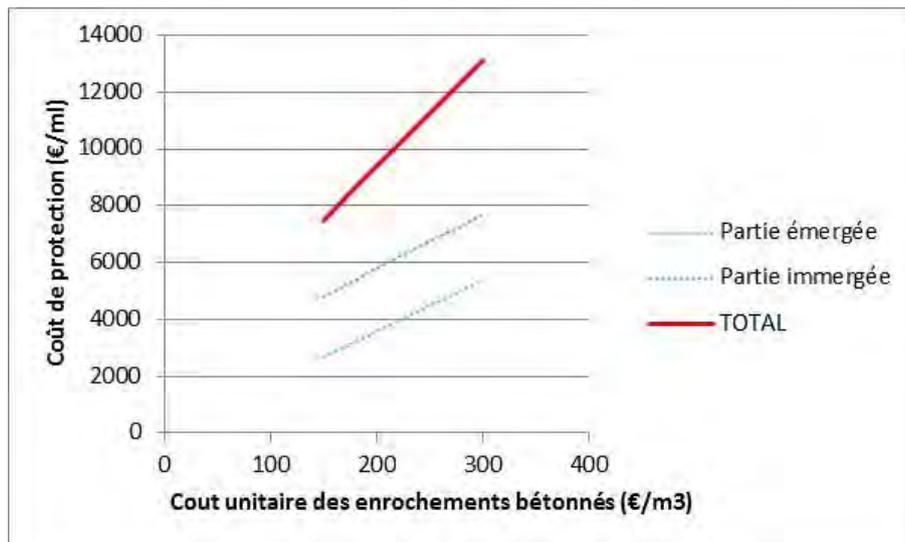
Figure 35 : Présentation des variantes techniques

L'analyse multicritère montre que la solution la plus avantageuse est l'enrochement bétonné.

En partie immergée, cette solution est la plus économique par rapport à la paroi moulée ou paroi clouée.

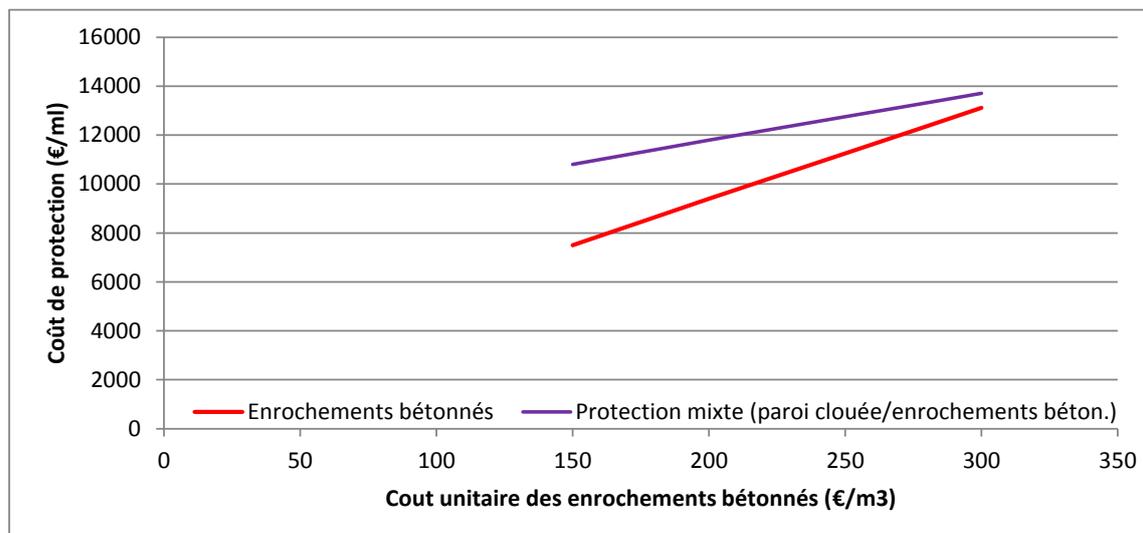
En partie émergée, la protection en enrochement bétonné reste rentable pour un coût unitaire de :

- 200 €/m<sup>3</sup> par rapport à la solution perré béton ;
- 280 €/m<sup>3</sup> par rapport à la solution paroi clouée.



Il est donc proposé de retenir un confortement de berge en enrochements bétonnés.

Une solution alternative serait la mise en place d'une paroi clouée en partie émergée et des enrochements bétonnés en partie immergée. Si cette solution est plus chère, elle présente l'avantage de phaser les travaux dans le temps (protection contre l'érosion latérale puis renforcement vis-à-vis du risque d'affouillement).



## 20.2. COUPES-TYPES D'AMENAGEMENT

Les coupes-types d'aménagement sont présentées en Annexe n°5.

**Le talus sera recouvert d'une carapace d'enrochements bétonnés 500/800 kg, de 1,5 mètres d'épaisseur, présentant une pente de 2V/3H.**

Le drainage du massif en remblai sera assuré par des barbacanes traversant la carapace. Ce dispositif empêchera le développement de sous pressions en arrière de la carapace. **Afin d'éviter le départ des fines et l'obstruction des barbacanes, les extrémités coté remblai seront recouvertes par un géotextile anti-contaminant.**

La carapace sera prolongée en pied par une semelle en enrochements bétonnés, **d'épaisseur 1 m et de largeur 2 m reposant sur une couche de béton de propreté.**

En pied de semelle, une butée en enrochements libres de 1-2 tonnes, de largeur 2 m et **d'épaisseur 2 m sera mise en place. Un géotextile anti-contaminant 800g/m<sup>2</sup>** viendra entourer les blocs.

## 20.3. NIVEAUX DE FONDATION ET DE CRETE

**En l'absence de niveaux rocheux permettant l'ancrage des semelles de fondation, le calage de ces dernières sera défini en fonction des profondeurs maximales d'affouillement et d'incision du lit. Les niveaux de fondation (arase supérieure de la semelle en enrochements libres) seront ainsi les suivants :**

- 49,80 NGR au niveau du pont,
- 60,40 NGR à **une distance de 400 mètres à l'amont.**

La crête des protections sera calée au niveau de la ligne de charge centennale. Le niveau du haut de berge étant supérieur au niveau de la crue centennale sur toute la zone **d'étude, aucun endiguement ne sera nécessaire.** Les niveaux de crête seront les suivants :

- 63 NGR au niveau du pont de la RN102,
- 72 NGR à une distance de 400 mètres en amont.

## 20.4. SECTORISATION DES OUVRAGES (VUES EN PLAN)

### 20.4.1.1. Protection du secteur 1 (secteur aval)

**La vue en plan d'aménagement est présentée en Annexe 6.**

- Le tracé du haut de berge est globalement préservé entre le pont et le virage de la RD45 sur environ 125 m,
- **A l'amont, la berge est remblayée sur environ 80 m de manière à effacer le coude** en saillie dans le lit de la rivière. Le parc de stationnement endommagé est reconstitué.

**L'ouvrage se raccorde :**

- **à l'amont au talus existant protégé par des enrochements bétonnés,**
- **à l'aval, aux enrochements de protection du pont de la RD45.**

#### 20.4.1.2. Protection du secteur 1 + secteur 2 (secteur amont)

La vue en plan d'**aménagement est présentée en Annexe 7.**

La protection du secteur 1 est identique à celle décrite ci-dessus.

Concernant le secteur 2 :

- Le haut de berge le long du parcours sportif est préservé, voire décalé de quelques mètres vers la rivière,
- La terrasse **intermédiaire est arasée. L'ouvrage de protection existant (perré d'enrochements bétonnés) est démonté car ses fondations sont trop superficielles** (environ 3,5 mètres trop hautes) par rapport au projet. Son volume linéaire représentant environ la moitié de celui de la protection à construire, une partie des blocs pourra être réutilisée pour le nouvel ouvrage,
- **A l'amont, l'ouvrage vient se refermer dans la berge au niveau de la dernière maison.** Pour limiter les terrassements, le sabot de la protection est progressivement rehaussé sur les 50 derniers mètres.

## 21. DISPOSITIONS CONSTRUCTIVES

### 21.1. RECOMMANDATIONS POUR LA STABILITE PROVISOIRE EN PHASE TRAVAUX

Le phasage des travaux sera le suivant :

- Purge des hauts de berge,
- Dérivation du bras vif,
- Rabattement de nappe si nécessaire,
- Terrassement du pied de berge avec des pentes de 2V/3H,
- Construction de la protection en enrochements bétonnés,
- Remblaiement.

Au droit du pont de la RN102, des précautions devront être prises pour ne pas déstabiliser les fondations du pont lors des terrassements : consolidation préalable des fondations, **phasage adapté des terrassements, suivi des déplacements de repères topographiques...**

Ces dispositions sont susceptibles de présenter une incidence non négligeable sur le coût des travaux : **afin de limiter les surcoûts, il sera préférable d'attendre que le projet de confortement du pont porté par le Conseil régional soit réalisé avant d'entamer la construction de la protection de berge.**

### 21.2. RECOMMANDATIONS VIS-A-VIS DES ENROCHEMENTS BETONNES

Les terrassements seront réalisés avec des pentes de 2V/3H afin de garantir la stabilité des alluvions.

Après avoir été jugés aptes (essais de laboratoire), les blocs dégagés pourront être réemployés.

**Les enrochements bétonnés devront être drainés à l'amont (écran drainant côté terre) et avec des barbicanes.**

Les niveaux de la nappe ainsi que ses fluctuations devront être pris en compte dans le phasage du projet.

### 21.3. INCERTITUDES GEOTECHNIQUES ET CONSEQUENCES SUR LES SOLUTIONS DU PROJET

Les principales incertitudes géotechniques qui subsistent concernent le modèle géologique du site, dont notamment :

- la géométrie des contacts géologiques entre les matériaux alluvionnaires du lit et ceux de la berge,
- les caractéristiques mécaniques précises des matériaux constituant la berge (granulométrie, résistance).

Ces incertitudes peuvent avoir une incidence sur le coût final des ouvrages : il conviendra **d'en tenir compte lors des phases ultérieures du projet.**

Nous conseillons entre autres :

- Une dizaine de sondages pressiométriques implantés alternativement en haut de berge (12 m de profondeur) et dans le lit de la rivière (8 m de profondeur) sur **toute la zone d'étude pour préciser les caractéristiques mécaniques des matériaux alluvionnaires,**
- quelques sondages à la pelle mécanique, notamment au niveau des enrochements de protection et de la banquette alluvionnaire situés devant les habitations pour identifier la granulométrie et la blocométrie des matériaux présents à ce niveau et les possibilités de réemploi,
- quelques essais de pompage pour appréhender les capacités de rabattement de la nappe et dimensionner les moyens de pompage nécessaires au chantier.

Les principales incertitudes géotechniques qui subsistent concernent le modèle géologique du site, dont notamment :

- la géométrie des contacts géologiques entre les matériaux alluvionnaires du lit et ceux de la berge,
- les caractéristiques mécaniques précises des matériaux constituant la berge (granulométrie, résistance).

Ces incertitudes peuvent avoir une incidence sur le coût final des ouvrages : il conviendra **d'en tenir compte lors des phases ultérieures du projet.**

## INSERTION DES OUVRAGES DANS LEUR ENVIRONNEMENT

### 22. INTRODUCTION

Afin de garantir une insertion harmonieuse de l'ouvrage technique de confortement dans son environnement, le projet propose un traitement paysager de l'ensemble du linéaire de la berge, en conjuguant deux approches.

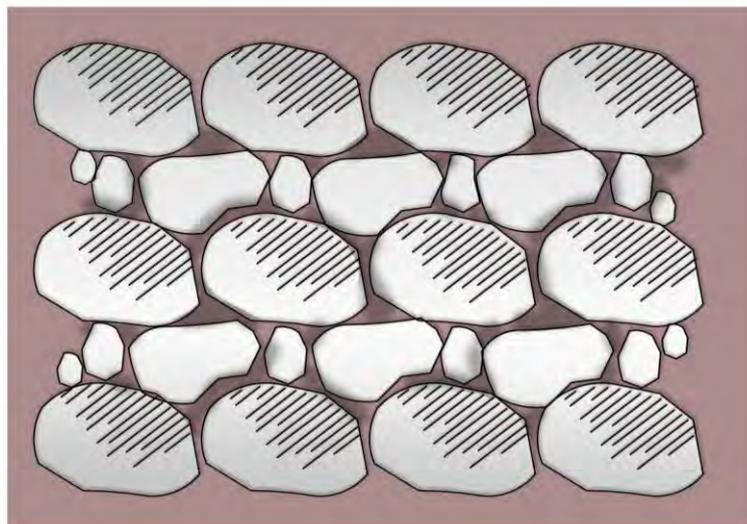
En effet, le projet comporte une partie basse en contact direct avec la rivière et **particulièrement exposées aux crues et aux effets d'abrasion**, qui doit exprimer la solidité, alors que la partie supérieure accueille un travail paysager plus fin et ornemental, plus adapté à une échelle de perception proche des riverains, et participant à l'embellissement de la Rue Roger Payet.

D'autre part une pluralité d'usages existe déjà sur le site et il apparaît primordial de **les maintenir et de les conforter**. La trame d'espace public proposée permet notamment de prolonger et de sécuriser les cheminements piétons existants. Un itinéraire piéton est ainsi aménagé en surplomb de la berge sur toute sa longueur, de la passerelle en encorbellement jusqu'au départ du sentier sportif.

### 23. INTEGRATION DE L'OUVRAGE DE GENIE CIVIL

Du fait de sa visibilité depuis les espaces environnant, la partie haute (hors sol et hors d'eau) de l'ouvrage en enrochement lié devra être réalisée avec soin. La ligne de crête de l'enrochement devra être arasée et calée en altimétrie afin de présenter une ligne régulière. De plus, sur la partie visible du parement, un soin devra être apporté afin de présenter un aspect qualitatif.

Un soin sera notamment apporté à la granulométrie des roches. Un motif de variation granulométrique pourra par exemple être défini, et une teinte appliquée au liant.



*Exemple de motif de variation granulométrique.*

La zone de rechargement en remblai, en amont de l'enrochement, sera abondamment plantée d'essences arbustives ou rampantes qui viendront déborder et habiller la zone d'enrochement.



*Exemple d'essence de lianes rampantes : Patate a durand*

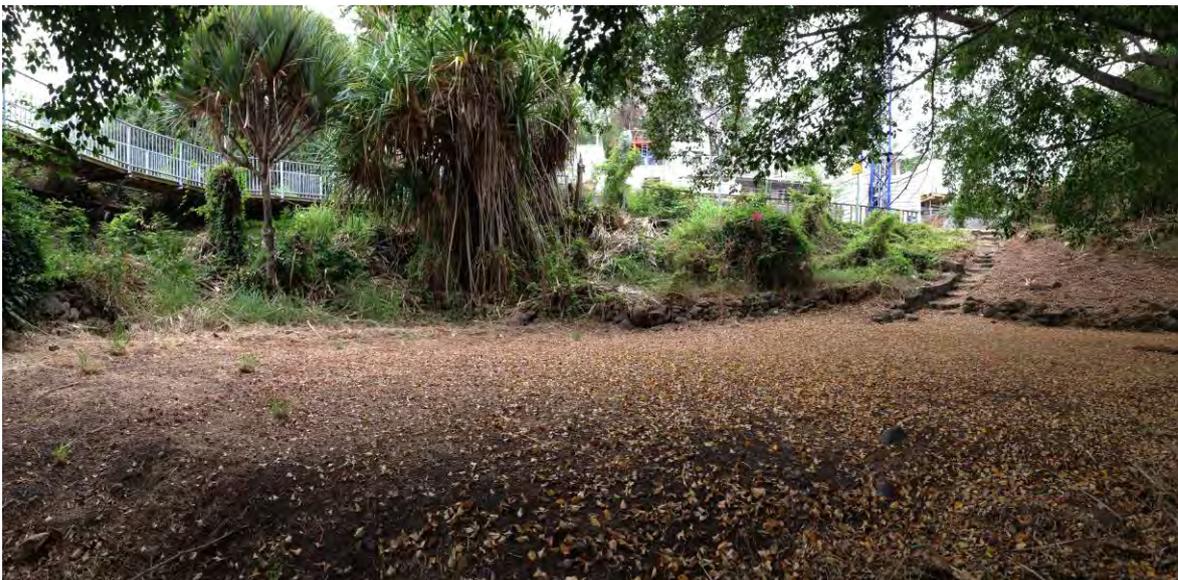


*Exemple d'essence de lianes rampantes : liane de cire et liane d'olive*

## 24. TRAITEMENT PAYSAGER DE LA PARTIE BASSE

La partie basse, à proximité immédiate de la berge, est traitée dans l'esprit d'un bord de rivière sauvage. Des plantations d'arbustes et de lianes couvre-sols viennent habiller et tenir le sol en tête d'ouvrage.

L'accessibilité de cette partie basse aux piétons est limitée au maximum, à l'exception de la placette existante. Celle-ci est réaménagée sobrement, en espace de détente et de loisirs. Le sol naturel en place et les arbres d'intérêt sont préservés afin de conserver l'atmosphère du lieu. Les limites de la placette sont traitées par des murets moellons afin de donner plus de lisibilité à cet espace. Une continuité piétonne vers le Nord, cheminant sous le pont pourrait être aménagée.

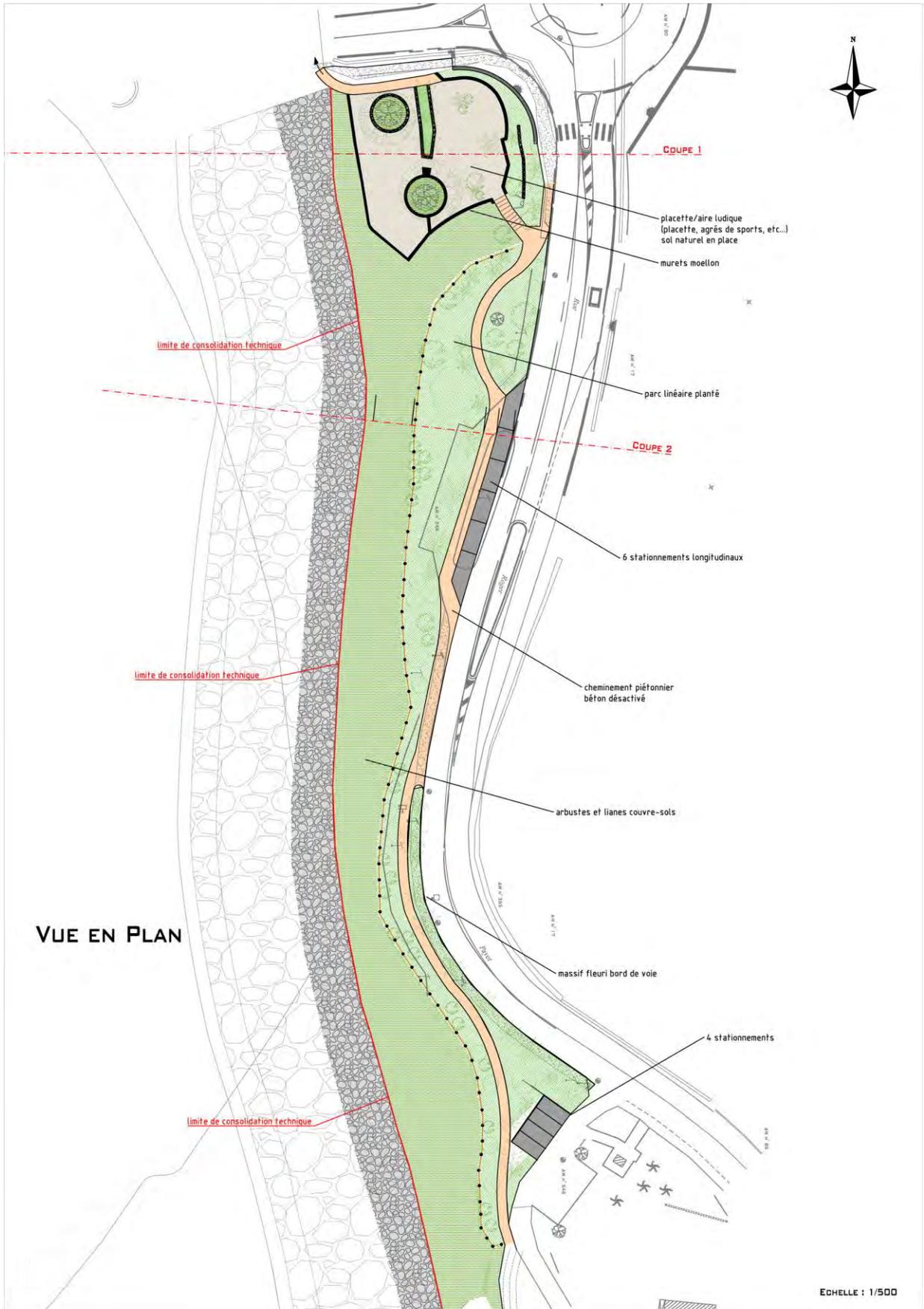


*Etat actuel de la placette*

## 25. TRAITEMENT PAYSAGER DE LA PARTIE HAUTE

Sur la partie haute, le traitement paysager est plus ornemental et perméable. Des arbres de hautes tiges viennent ombrager le cheminement piéton en béton désactivé qui est créé le long de la voie, protégé des circulations automobiles par une bande plantée.

Une clôture en bois vient quant à elle matérialiser la limite avec la partie basse. Dix places de stationnements, six longitudinales le long de la rue Roger Payet et quatre sur le parking existant en partie sud du projet.



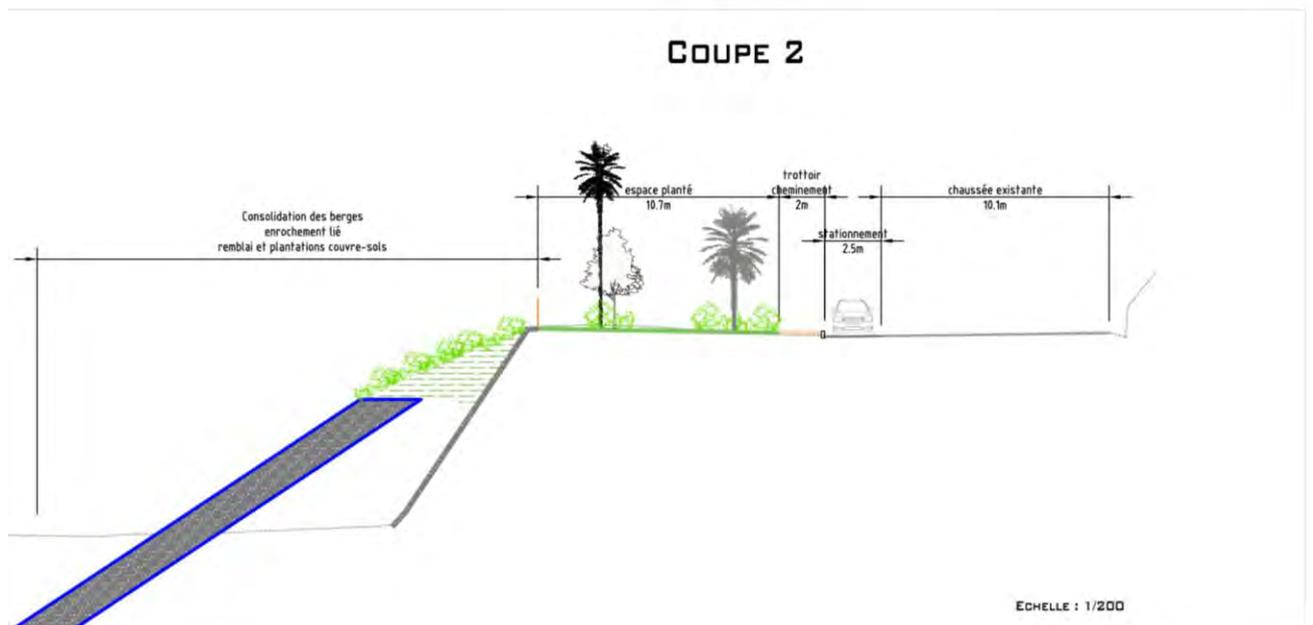
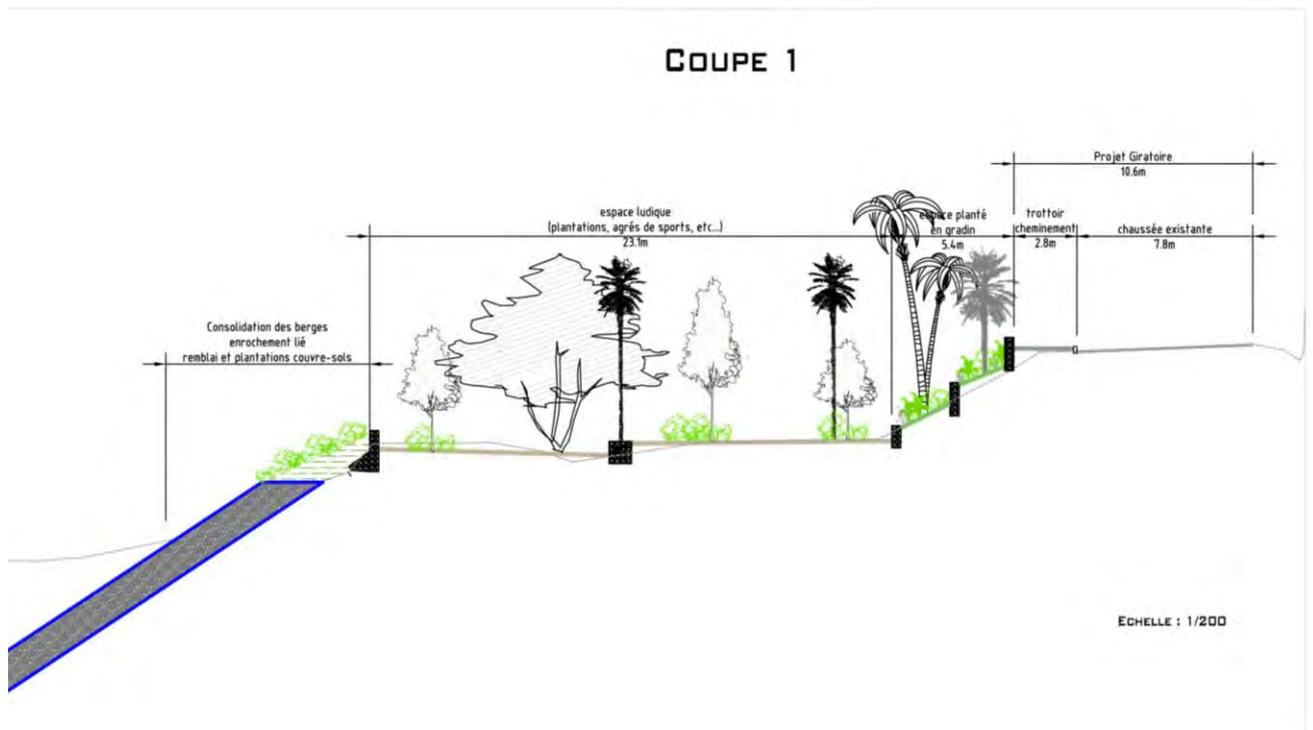


Figure 36 : Proposition d'insertion paysagère du projet, sujette à adaptation<sup>3</sup>

<sup>3</sup> L'insertion paysagère proposée ici ne reflète pas totalement les aménagements proposés et sera adaptée en phase définitive.

## ESTIMATION DU COUT DES DIFFERENTES SOLUTIONS

Les quantités des **travaux pour les deux variantes d'aménagement** sont les suivantes (hors aménagements paysagers) :

<u>Secteur 1</u>		
Libellé mécanographique	Unité	Quantité estimée
<b><u>PROTECTION DES BERGES</u></b>		
Déblais	m <sup>3</sup>	55 807
Remblais	m <sup>3</sup>	43 716
Remblais talutés pour pose enrochements	m <sup>3</sup>	14 802
Enrochements bétonnés 500/800kg	m <sup>3</sup>	9 883
Enrochements libres 1000/2000kg	m <sup>3</sup>	1 082

*Tableau 8 : Quantitatif secteur 1*

<u>Secteur 1 + secteur 2</u>		
Libellé mécanographique	Unité	Quantité estimée
<b><u>PROTECTION DES BERGES</u></b>		
Déblais	m <sup>3</sup>	96 974
Remblais	m <sup>3</sup>	70 750
Remblais talutés pour pose enrochements	m <sup>3</sup>	15 325
Régilage des déblais excédentaires	m <sup>3</sup>	10 899
Enrochements bétonnés 500/800kg	m <sup>3</sup>	15 283
Enrochements libres 1000/2000kg	m <sup>3</sup>	1 720

*Tableau 9 : Quantitatif Secteurs 1 et 2*

Le coût prévisionnel des travaux décomposés en éléments techniquement homogènes (découpage par poste : installation de chantier, terrassement et démolition, confortement, insertion paysagère, etc.) et par tronçon est fourni page suivantes et le récapitulatif ci-dessous :

N° Poste	Poste	Tronçon 1	Tronçon 2	Tronçon 1 + Tronçon 2
1	TRAVAUX PREPARATOIRES	460 000.00 €	350 000.00 €	810 000.00 €
2	OUVRAGES TRAVERSANTS et CONNEXES	70 000.00 €	200 000.00 €	270 000.00 €
3	TERRASSEMENTS	1 608 697.00 €	1 076 397.00 €	2 685 094.00 €
4	PROTECTIONS	1 579 830.00 €	867 420.00 €	2 447 250.00 €
5	ENVIRONNEMENT ET PAYSAGE	270 900.00 €	58 100.00 €	329 000.00 €
	Imprévus et divers 10%	398 942.70 €	255 191.70 €	654 134.40 €
	TOTAL HT	<b>4 388 369.70 €</b>	<b>2 807 108.70 €</b>	<b>7 195 478.40 €</b>
	TVA 8,50%	373 011.42 €	238 604.24 €	611 615.66 €
	TOTAL TTC	<b>4 761 381.12 €</b>	<b>3 045 712.94 €</b>	<b>7 807 094.06 €</b>
	Coût au m linéaire	<b>19 247 €</b>	<b>12 366 €</b>	<b>15 814 €</b>

*Tableau 10 : Récapitulatif du chiffrage des travaux*

Confortement de la berge rive droite de la rivière des Pluies au droit de la RD45					
Tronçon n°1					
N° de Prix	DESIGNATION	Unité	Q.	Prix Unitaire HT en €	Sous Total HT en €
<b>1 TRAVAUX PREPARATOIRES</b>					
1.1	Installation de chantier y compris travaux préparatoires (accès, pompage dans la fosse d'érosion, etc.)	F	1	300 000.00 €	300 000.00 €
1.2	Etudes d'exécution et dossier de recolement	F	1	25 000.00 €	25 000.00 €
1.3	Etudes géotechniques et de dimensionnement (mission G3)	F	1	30 000.00 €	30 000.00 €
1.4	Débroussaillage et abattage/dessouchage d'arbres	F	1	15 000.00 €	15 000.00 €
1.6	Protection du chantier batardeaux et entretien	F	1	40 000.00 €	40 000.00 €
1.7	Chenal de déviation du lit vif de la Rivière des Pluies	F	1	50 000.00 €	50 000.00 €
				1. Sous total HT	460 000.00 €
				=	
<b>2 OUVRAGES TRAVERSANTS et CONNEXES</b>					
2.1	Démolition ouvrage GC (raccordement de la protection de berge à celle existante, entre P3 et P4 (sur environ 20 m)	F	1	50 000.00 €	50 000.00 €
2.2	Traitement des ouvrages de rejet (fossé pluvial se rejetant entre P3 et P4)	F	1	20 000.00 €	20 000.00 €
				2. Sous total HT	70 000.00 €
				=	
<b>3 TERRASSEMENTS</b>					
3.1	Déblais	m3	55807	15.00 €	837 105.00 €
3.2	Remblais (fosse d'affouillement)	m3	32751	12.00 €	393 012.00 €
3.3	Remblais (talus)	m3	14802	20.00 €	296 040.00 €
3.4	Régalaie dans le lit de la rivière	m3	8254	10.00 €	82 540.00 €
				3. Sous total HT	1 608 697.00 €
				=	
<b>4 PROTECTIONS</b>					
4.1	Enrochements bétonnés	m3	9883	150.00 €	1 482 450.00 €
4.2	Enrochements libres	m3	1082	90.00 €	97 380.00 €
				4. Sous total HT	1 579 830.00 €
				=	
<b>5 ENVIRONNEMENT ET PAYSAGE</b>					
5.1	Préparation et dégagement des emprises	m²	4200	5.00 €	21 000.00 €
5.2	Cheminement piéton	m²	400	100.00 €	40 000.00 €
5.3	Garde corps bois	ml	200	180.00 €	36 000.00 €
5.4	Réaménagement de places de stationnements	m²	180	60.00 €	10 800.00 €
5.5	Reprise des bordures le long de la rue Roger Payet	ml	190	40.00 €	7 600.00 €
5.6	Espaces Plantés	m²	3200	40.00 €	128 000.00 €
5.7	Maconerie de moellon pour murets bancs	m3	50	200.00 €	10 000.00 €
5.8	Reprise de l'escalier	F	1	5 500.00 €	5 500.00 €
5.9	Mobilier	F	1	12 000.00 €	12 000.00 €
				5. Sous total HT	270 900.00 €
				=	
<b>RECAPITULATIF DU DOE</b>					
1	TRAVAUX PREPARATOIRES				460 000.00 €
2	OUVRAGES TRAVERSANTS et CONNEXES				70 000.00 €
3	TERRASSEMENTS				1 608 697.00 €
4	PROTECTIONS				1 579 830.00 €
5	ENVIRONNEMENT ET PAYSAGE				270 900.00 €
TOTAL H.T. DU PRIX =					<b>3 989 427.00 €</b>
10% divers et imprévus =					<b>398 942.70 €</b>
TOTAL H.T. DU PRIX =					<b>4 388 369.70 €</b>
T.V.A à 8,50 % =					<b>373 011.42 €</b>
TOTAL TTC DU PRIX =					<b>4 761 381.12 €</b>

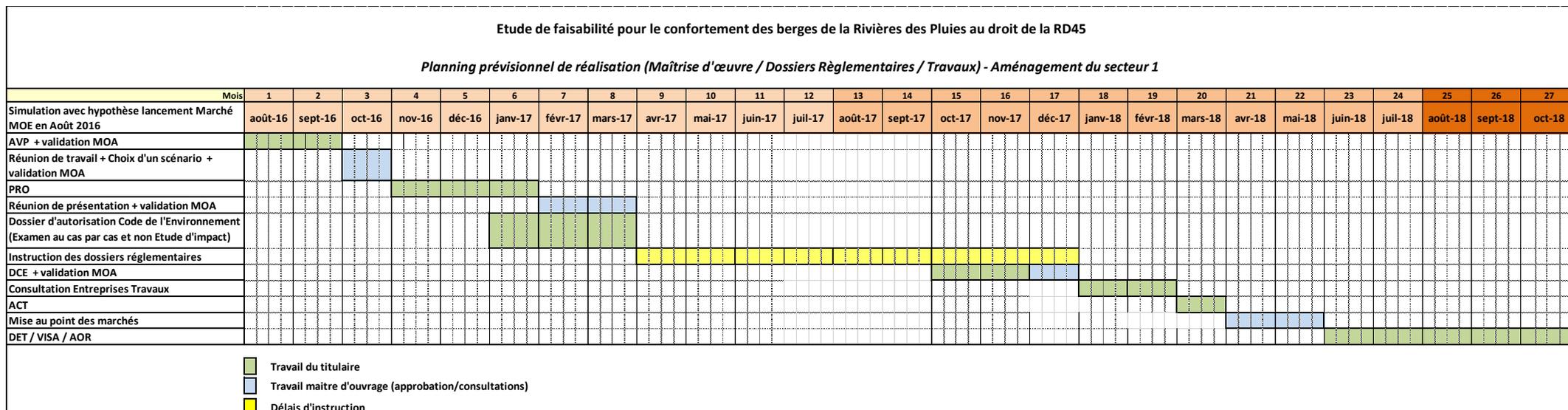
Tableau 11 : Chiffrage Tronçon n°1

Confortement de la berge rive droite de la rivière des Pluies au droit de la RD45					
Tronçon n°2					
N° de Prix	DESIGNATION	Unité	Q.	Prix Unitaire HT en €	Sous Total HT en €
<b>1 TRAVAUX PREPARATOIRES</b>					
1.1	Installation de chantier y compris travaux préparatoires (accès, pompage dans la fosse d'érosion, etc.)	F	1	200 000.00 €	200 000.00 €
1.2	Etudes d'exécution et dossier de recolement	F	1	20 000.00 €	20 000.00 €
1.3	Etudes géotechniques et de dimensionnement (mission G3)	F	1	20 000.00 €	20 000.00 €
1.4	Débroussaillage et abattage/dessouchage d'arbres	F	1	20 000.00 €	20 000.00 €
1.5	Protection du chantier batardeaux et entretien	F	1	40 000.00 €	40 000.00 €
1.6	Chenal de déviation du lit vif de la Rivière des Pluies	F	1	50 000.00 €	50 000.00 €
				<b>1. Sous total HT</b>	<b>350 000.00 €</b>
<b>2 OUVRAGES TRAVERSANTS et CONNEXES</b>					
2.1	Démolition de la protection de berge en enrochements bétonnés présente le long des maisons (36m3/ml sur environ 200 m	F	1	200 000.00 €	200 000.00 €
2.2	Traitement des ouvrages de rejet	F			- €
				<b>2. Sous total HT</b>	<b>200 000.00 €</b>
<b>3 TERRASSEMENTS</b>					
3.1	Déblais	m3	41167	15.00 €	617 505.00 €
3.2	Remblais (fosse d'affouillement)	m3	20996	12.00 €	251 952.00 €
3.3	Remblais (talus)	m3	523	20.00 €	10 460.00 €
3.4	Régalage dans le lit de la rivière	m3	19648	10.00 €	196 480.00 €
				<b>3. Sous total HT</b>	<b>1 076 397.00 €</b>
<b>4 PROTECTIONS</b>					
4.1	Enrochements bétonnés	m3	5400	150.00 €	810 000.00 €
4.2	Enrochements libres	m3	638	90.00 €	57 420.00 €
				<b>4. Sous total HT</b>	<b>867 420.00 €</b>
<b>5 ENVIRONNEMENT ET PAYSAGE</b>					
5.1	Préparation et dégagement des emprises	m²	1000	5.00 €	5 000.00 €
5.2	Reprise des bordures le long de la rue Roger Payet	ml	190	40.00 €	7 600.00 €
5.3	Espaces Plantés	m²	700	40.00 €	28 000.00 €
5.4	Maconerie de moellon pour murets bancs	m3	20	200.00 €	4 000.00 €
5.5	Reprise de l'esclalier	F	1	5 500.00 €	5 500.00 €
5.6	Mobilier	F	1	8 000.00 €	8 000.00 €
				<b>5. Sous total HT</b>	<b>58 100.00 €</b>
<b>RECAPITULATIF DU DOE</b>					
1	TRAVAUX PREPARATOIRES				<b>350 000.00 €</b>
2	OUVRAGES TRAVERSANTS et CONNEXES				<b>200 000.00 €</b>
3	TERRASSEMENTS				<b>1 076 397.00 €</b>
4	PROTECTIONS				<b>867 420.00 €</b>
5	ENVIRONNEMENT ET PAYSAGE				<b>58 100.00 €</b>
TOTAL H.T DU PRIX =					<b>2 551 917.00 €</b>
10% divers et imprévus =					<b>255 191.70 €</b>
TOTAL H.T DU PRIX =					<b>2 807 108.70 €</b>
T.V.A à 8,50 % =					<b>238 604.24 €</b>
TOTAL TTC DU PRIX =					<b>3 045 712.94 €</b>

Tableau 12 : Chiffrage Tronçon n°2

## CALENDRIER DE REALISATION

Les travaux sont à réaliser hors période cyclonique. **La durée des travaux serait de l'ordre de 4 mois pour le secteur 1 et de 8 mois pour les deux secteurs (hors période de préparation de chantier).**



*Figure 37 : Planning prévisionnel de l'opération*



## PROGRAMME DES ETUDES COMPLEMENTAIRES A REALISER

### 26. ETUDES GEOTECHNIQUES

Les études réalisées dans le cadre du présent dossier sont de niveau G1 au sens de la norme NF P 94-500 « **missions d'ingénierie géotechnique** – classification et spécifications » de novembre 2013 :

- étude de site,
- principes généraux de construction.

Elles seront précisées par des études G2 en phase AVP et PRO.

### 27. ETUDES ENVIRONNEMENTALES

Chaque aménagement doit être analysé au regard de la réglementation en vigueur et la procédure auquel il est soumis doit être renseignée.

**L'aménagement proposé s'inscrit dans une procédure au titre de la loi sur l'eau régit par le Code de l'Environnement, et notamment les articles suivants : L214-1 à L214-6.**

La nomenclature des installations, ouvrages, travaux et activités soumis à déclaration ou à autorisation en application des articles L214-1 à L214-6 **figure dans l'article R214-1** : « Nomenclature des opérations soumises à autorisation ou à déclaration en application des articles L. 214-1 à L. 214-3 du code de l'environnement ».

Le projet de protection de berge de la Rivière des Pluies tel que prévu dans la présente étude est concerné par la rubrique 3.1.4.0, rappelé ci-dessous :

3.1.4.0 - Consolidation ou protection des berges, à l'exclusion des canaux artificiels, par des techniques autres que végétales vivantes :	
1° Sur une longueur supérieure ou égale à 200 m	Autorisation
2° Sur une longueur supérieure ou égale à 20 m mais inférieure à 200 m	Déclaration

Tableau 13 : *Code de l'environnement* – Nomenclature 3.1.4.0 « Consolidation ou protection de berges »

La longueur de la protection de berge prévue dans la présente étude est de 240 m pour les secteurs 1 et 2.

Les travaux sont donc soumis à autorisation au titre du Code de **l'environnement.**

Cela implique la réalisation des dossiers suivants :

- Demande de cadrage préalable,
- **Dossier d'autorisation au titre du Code de l'Environnement** avec Etude d'impact, contenu détaillé dans l'article R.214-6 du Code de l'Environnement,
- **Dossier d'enquête publique**,
- Dossier de présentation au CODERST.

**De plus, une demande d'autorisation d'Occupation Temporaire (AOT) du Domaine Public Fluvial (DPF) devra également être réalisée.**

**Enfin, en cas de non maîtrise foncière sur une partie de l'emprise des travaux, une Déclaration d'Utilité Publique pourra éventuellement être réalisée.**

**Enfin, une demande d'autorisation d'Occupation Temporaire (AOT) du Domaine Public Fluvial (DPF) devra également être réalisée.**

## CONCLUSION

Le présent rapport permet d'apporter des précisions quant à :

- **L'état des contraintes hydrauliques du site et sa sensibilité quant aux inondations.**  
Le secteur est diagnostiqué comme menacé par les débordements directs de la Rivière des Pluies en crue centennale en amont du secteur amont mais avec des proportions faibles (hauteurs d'eau inférieures à 1mètre), mais sujet à des vitesses d'écoulement favorisant l'érosion de berges,
- La définition des aménagements à mettre en place afin de protéger la zone **d'étude contre le phénomène d'érosion (sapement de berge) lié aux écoulements** de la Rivière des Pluies, menaçant à terme la RD45,
- Les délais, quantité et coûts associés de matériaux à envisager pour la réalisation des travaux correspondants.

Pour rappel (Cf. chapitre dédié, page 73), le coût des aménagements de la solution de base est le suivant (**comprenant 10% d'imprévus ainsi que les travaux d'insertion paysagère et environnementale**) sont les montants (arrondis) suivants :

- Tronçon n°1 : 4 388 500 € HT,
- Tronçon n°2 : 2 807 000 € HT,
- Tronçons n°1 + n°2 : 7 195 500 € HT.

En phase d'Avant-Projet, la solution proposée pourra être optimisée.

Il pourrait être envisagé d'opter en effet pour une stratégie d'aménagement par étape :

- En confortant la partie aval (tronçon 1) qui présente **aujourd'hui** un risque important **vis à vis de l'aléa érosion et affouillement**.  
**Le linéaire est d'environ 230 mètres.**
- En mettant en place une surveillance accrue au niveau du tronçon n°2 ;  
**Ce suivi consiste à suivre l'évolution de l'érosion de surface et de fond par des relevés précis une fois par an et après chaque évènement (crue annuelle) :**

**En cas d'érosion jusqu'au niveau de la ligne magenta** (bande de 25/30 m), un confortement lourd de la berge sera nécessaire.

Des bornes servant de repère pourrait être mis en place.

Ce suivi consiste à :

- ➔ **Un reportage photographique et un rapport sur l'état de la berge et de la terrasse herbacée,**
- ➔ **une mesure à l'étiage de la distance** entre le repère et le bras vif,
- ➔ un suivi bathymétrique par la mise en place de deux sections de contrôle au **niveau du pont et au droit de l'ouvrage en enrochements existants.**

Un suivi particulier de la protection existante est également à réaliser par rapport au risque d'**affouillement**, ouvrages, en évaluant **les débuts d'affaissement de la protection**. **Il s'agit de** marquer en crête de protection un bloc et de relever régulièrement ses coordonnées topographiques



Remarque :

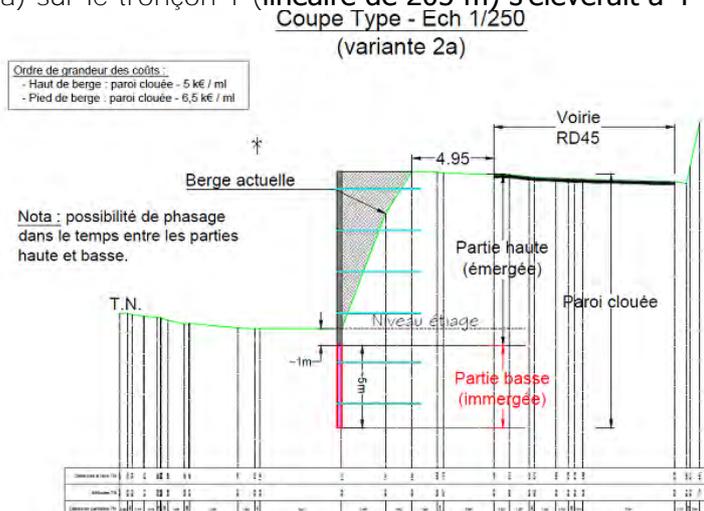
Compte-tenu de la forte dynamique, **il n'existe pas d'aménagements** provisoires qui puissent s'avérer économiquement pertinents pour freiner l'érosion des berges.

**En cas d'urgence** et de contraintes financières, il pourrait éventuellement être envisagé de réaliser la protection en deux temps.

**Dans ce cas, il s'agirait de** conforter la berge actuelle par une paroi clouée (partie émergée, berge auto-stable) ancrée à 1 m sous le fond du lit actuel.

La protection parafouille en enrochements liés ou paroi clouée/moulée serait réalisée dans un second temps.

Le coût global (parties émergée et immergée) de la solution alternative de type paroi clouée (solution 2a) sur le tronçon 1 (linéaire de 205 m) s'élèverait à 4 900 000 €.



La paroi moulée mise en place en partie immergée s'élèverait à 2 200 000 €.

Une solution mixte paroi clouée (partie émergée) /paroi moulée (partie immergée) sur le tronçon 1 (linéaire de 205 m) serait estimée à 4 500 000 €.

Cependant il faut retenir que le fait de ne pas réaliser tout de suite la partie immergée induit un risque de déchaussement de l'ouvrage en cas de crue morphogène dont la profondeur d'afouillement dépasserait le niveau d'ancrage de la partie émergée (1m ici).

Un suivi régulier de l'érosion serait alors à mettre en place en cas d'aménagement partiel (partie émergée seulement).

## ANNEXES

- Annexe n°1 Plan topographique
- Annexe n°2 Localisation des sondages géotechniques
- Annexe n°3 Résultats des sondages géotechniques
- Annexe n°4 Cartographie des écoulements en crue centennale de la Rivière des Pluies  
**sur la zone d'étude**
- Annexe n°5 Coupes-types **d'aménagement**
- Annexe n°6 **Plan d'aménagement du secteur aval (secteur 1)**
- Annexe n°7 **Plan d'aménagement global (secteur 1 + secteur 2)**
- Annexe n°8 Cartographie des aménagements et Impacts foncier en phase provisoire et définitive :

*Annexe 8.1 : Aménagement Secteur aval*

*Annexe 8.2 : Aménagement global*