Direction Départementale de l'Equipement
2 rue Juliette DODU
97 706 SAINT DENIS

Etude Hydraulique de la Ravine Blanche à Saint Pierre de la cote 25 m NGR à son exutoire en mer

Rapport définitif

Réf : RE10-002
Décembre 2010

Résidence les Kréolies – 8-10 rue Axel Dorseuil – 97 410 Saint Pierre
Tél. : 02.62.96.82.45 - Fax : 02.62.32.69.05
E-mail : contact.reunion@hydretudes.com

SOMMAIRE

I. Préambule 5

I.1. Introduction 5

I.2. Données et moyens utilisés 6

II. Contexte hydrologique et morphologique 7

II.1. Contexte général du secteur d'étude 7

II.2. Analyse in situ 9

II.2.1. Ouvrages 9

II.2.2. Lit mineur 10

III. Hydrologie 11

III.1. Méthodologie générale 11

III.2. Bassins versants 11

III.2.1. Caractéristiques morphométriques 11

III.2.2. Cartographie des bassins versants et point de calcul 12

III.3. Pluviométrie 13

III.3.1. Choix des stations météorologiques représentatives 13

III.3.2. Pluviométries centennales 13

III.4. Modèle pluie / débit 14

III.4.1. Méthodologie utilisée 14

III.4.2. Production 14

III.4.3. Transfert 15

III.4.4. Propagation 16

Construction d'un profil en travers 16

III.4.5. Schéma du modèle Pluie - Débit 17

IV. Hydraulique 18

IV.1. Modélisation mathématique des écoulements 18

IV.1.1. Mise en œuvre du modèle et présentation du logiciel 18

IV.1.2. Architecture du modèle 20

IV.1.3. Conditions aux limites 21

IV.1.4. Paramètres de modélisation du lit majeur 23

IV.1.5. Calage du modèle 23

IV.1.6. Scénarii modélisés 25

IV.2. Analyse des écoulements 25

IV.2.1. Résultats du modèle – Scénario n°1 25

IV.2.2. Résultats du modèle – Scénario n°2 29

IV.3. Cartographie de la zone inondable 32

IV.3.1. Traduction cartographique des résultats du modèle 32

IV.3.2. Légendes des cartes 32

V. Conclusions 33

Annexes 34

Table des illustrations

Figure 1 : Localisation de la zone d'étude 5
Figure 3 : Morphologie du lit mineur 10
Figure 5 : Illustration de la production = transformation pluie brute / pluie nette 14
Figure 6 : Transfert = transformation pluie nette / débit (schéma d'illustration) 15
Figure 7 : Propagation des hydrogrammes 16
Figure 8 : Construction des profils en travers de propagation 16
Figure 9 : Schéma du modèle pluie / débit de la Ravine Blanche sur la zone d'étude 17
Figure 11 : Hydrogramme centennal injecté en amont du modèle 21
Figure 12 : Hauteur de mer imposée en aval du modèle 22
Figure 13 : Photo aérienne après passage de Firinga, février 1989 24
Figure 14 : Photo aérienne 2008 24
Figure 15 : Champ d'expansion de la crue centennale de la Ravine Blanche 27
Figure 16 : Champ d'expansion de la crue centennale de la Ravine Blanche – Scénario n°2 30

Tableau 1 : Photographies des ouvrages 9
Tableau 2 : Caractéristiques morphologiques des bassins versants 11
Tableau 3 : Stations météorologiques utilisées 13
Tableau 4 : Pluviométries centennales moyennes des stations utilisées (source : Météo France, 2010) 13
Tableau 5 : Paramètres J des sous-bassins et poids des pluviomètres 15
Tableau 6 : Coefficients de Manning utilisés 23

I. PREAMBULE

I.1. Introduction

La Ravine Blanche, dans sa traversée du quartier du même nom, sur la Commune de Saint Pierre, a causé par le passé d'importantes inondations. Ce secteur est assez fortement urbanisé, ce qui le rend vulnérable aux aléas causés par les écoulements de la Ravine Blanche.

Plusieurs études ont déjà été menées afin de quantifier le caractère inondable du site. Cependant, la vulnérabilité du secteur d'une part et la complexité du fonctionnement hydraulique du cours d'eau d'autre part, imposent qu'une étude hydraulique utilisant des moyens techniques avancés soit réalisée.

Ainsi, la DDE a décidé de lancer une expertise hydraulique couplant modèle hydrologique du bassin versant de la Ravine Blanche et modélisation 2D du lit majeur.

Le secteur objet de la présente étude est compris entre l'amont de l'ouvrage de la RN 1 et l'exutoire de ce cours d'eau dans l'océan.

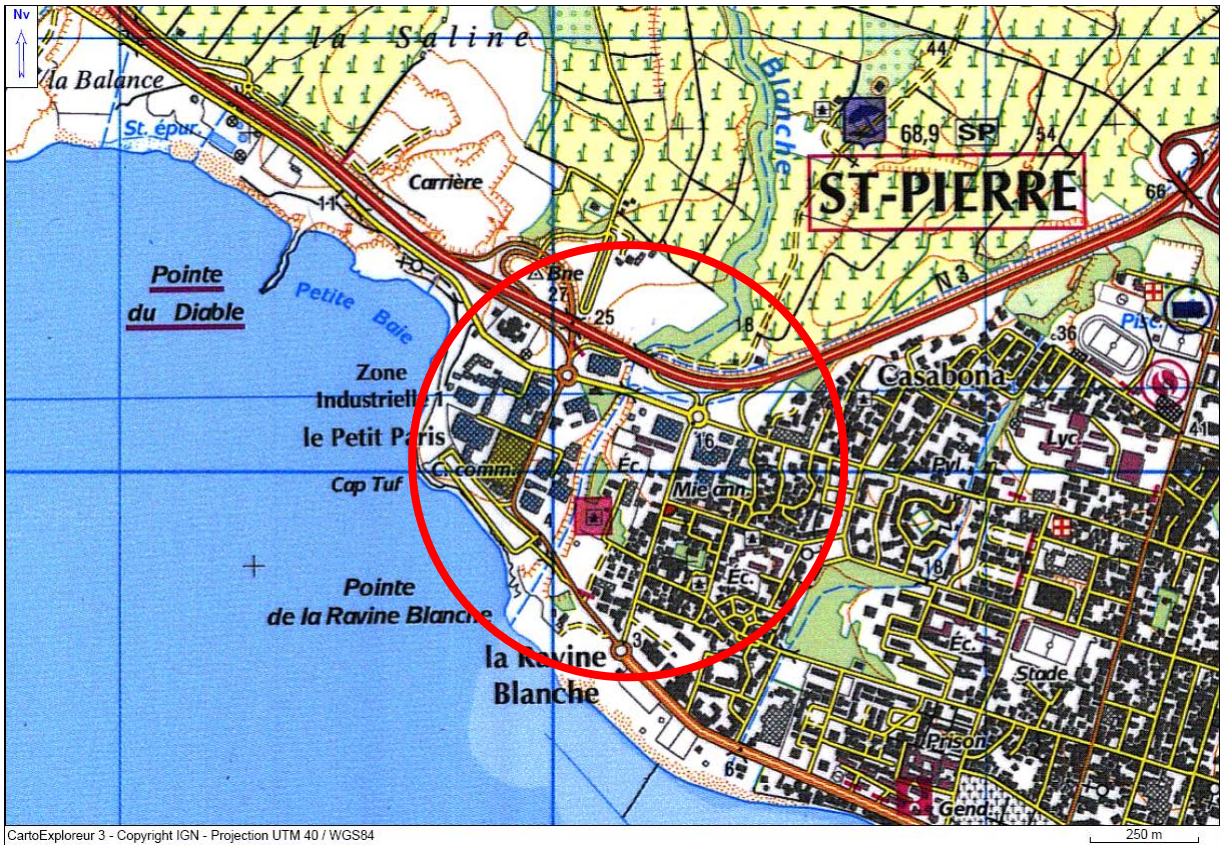


Figure 1 : Localisation de la zone d'étude

I.2. Données et moyens utilisés

Comme décrit ci-dessus, différentes études hydrauliques ont été menées sur le secteur :

- Schéma Technique de Protection contre les Crues (STPC) en 1989, BCEOM,
- Etude hydraulique (modèle filaire) de la Ravine Blanche en 2003, HYDRETUDES,
- Plan de Prévention des Risques Inondation en cours, HYDRETUDES.

Les objectifs de cette nouvelle expertise sont de qualifier les aléas inondation sur le lit majeur de la Ravine Blanche entre la RN1 et l'océan.

Afin de mener à bien cette analyse les outils suivants ont été utilisés :

- Données topographiques : Modèle Numérique de terrain réalisé à partir du semis de points issu de la Litto 3D (385 918 points dans l'emprise du MNT d'une surface de 91 200 m², soit 4 points/ m², précision en Z de 20 cm),

- Photographies aériennes après Firinga 1989,

- Orthophotographies 2008,

- Création d'un modèle hydrologique du bassin versant de la Ravine Blanche, pour une crue centennale,

- Modélisation mathématique des écoulements avec le logiciel Infoworks RS 2D©.

II. CONTEXTE HYDROLOGIQUE ET MORPHOLOGIQUE

Le bassin versant de la Ravine Blanche se situe dans le sud-ouest du département de La Réunion, à cheval sur les territoires communaux du Tampon et de Saint Pierre.

Le bassin versant peut être découpé en trois zones :

- Zone amont : le bassin versant est bordé à l'Est par les monts du Nez-de-Bœuf sur les Hautes Plaines,
- Zone médiane correspondant à la planèze Le Tampon / Saint-Pierre,
- Zone avale correspondant au cône de déjection de la Ravine Blanche où elle reçoit les eaux de deux affluents, le Bras de Douane et la ravine Concession.

Le secteur d'étude se situe plus particulièrement à l'aval de son bassin versant, de la confluence avec la Ravine Concession jusqu'à l'exutoire en mer. Le lit majeur de la ravine est ici fortement urbanisé, et offre plusieurs particularités décrites dans les pages suivantes.

II.1. Contexte général du secteur d'étude

Le secteur d'étude est compris entre l'amont de l'ouvrage de la RN 1 et l'exutoire en mer. Ce linéaire offre plusieurs particularités :

- Confluences avec le Bras de Douane à l'altitude 50 m NGR et avec la Ravine Concession à l'altitude 20 m NGR ;

- Présence de 4 ouvrages hydrauliques :
  - Ouvrage double portique de la RN 1 ;
  - Ouvrage cadre de la rue Marius et Ary LEBLOND ;
  - Radier du Boulevard Hubert Delisle ;
  - Ouvrage dit de l'ancien Pont CFR à l'aval.

- Secteur en partie endigué (confortement des berges en enrochements liés) entre les ouvrages OH1 et OH3.

- Exutoire en mer, analyse nécessaire de l'influence des conditions aval (hauteur de mer) sur les écoulements de la Ravine Blanche.

Ces caractéristiques sont détaillées dans le plan page suivante.

Dans l'optique de la modélisation mathématique des écoulements sur le linéaire d'étude, chaque ouvrage hydraulique a fait l'objet d'une analyse in situ, synthétisées sous la forme de fiches signalétiques détaillant les caractéristiques générales, géométriques et structurelles des ouvrages concernés.

Ces fiches sont présentées en Annexe 2.

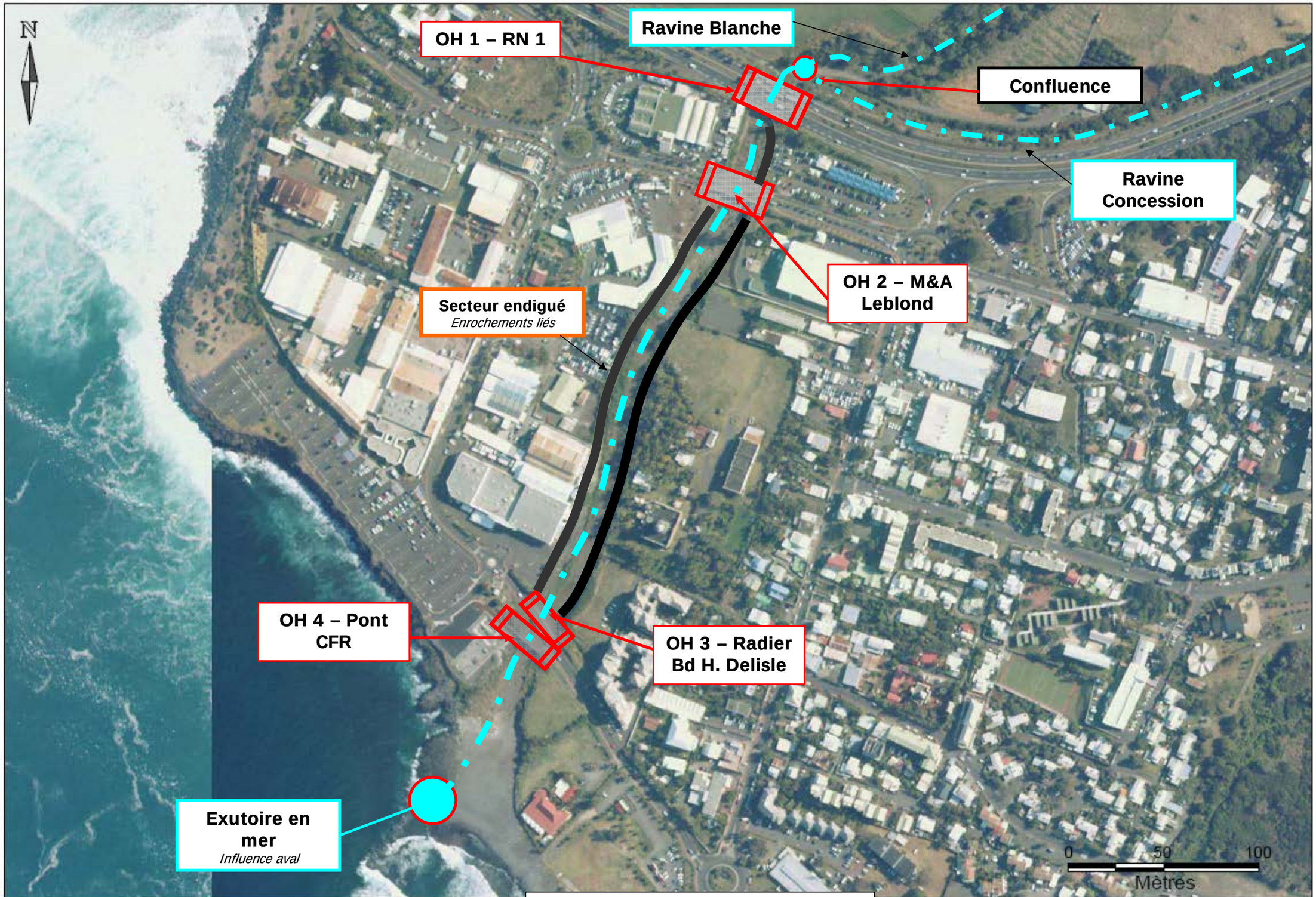


Figure 2 : Caractéristiques du secteur d'étude

II.2. Analyse in situ

Plusieurs visites de terrain ont été menées afin de vérifier :

- les caractéristiques des ouvrages hydrauliques présents ;
- la morphologie de l'axe d'écoulement (lit mineur et lit majeur) ;
- les matériaux constitutifs du lit de la Ravine Blanche (calage des coefficients de Strickler) ;
- les particularités du lit majeur (lignes caractéristiques définissant le MNT).

II.2.1. Ouvrages

Les caractéristiques de ces ouvrages sont détaillées en Annexe (fiches signalétiques) mais sont illustrés par les photographies ci-dessous :

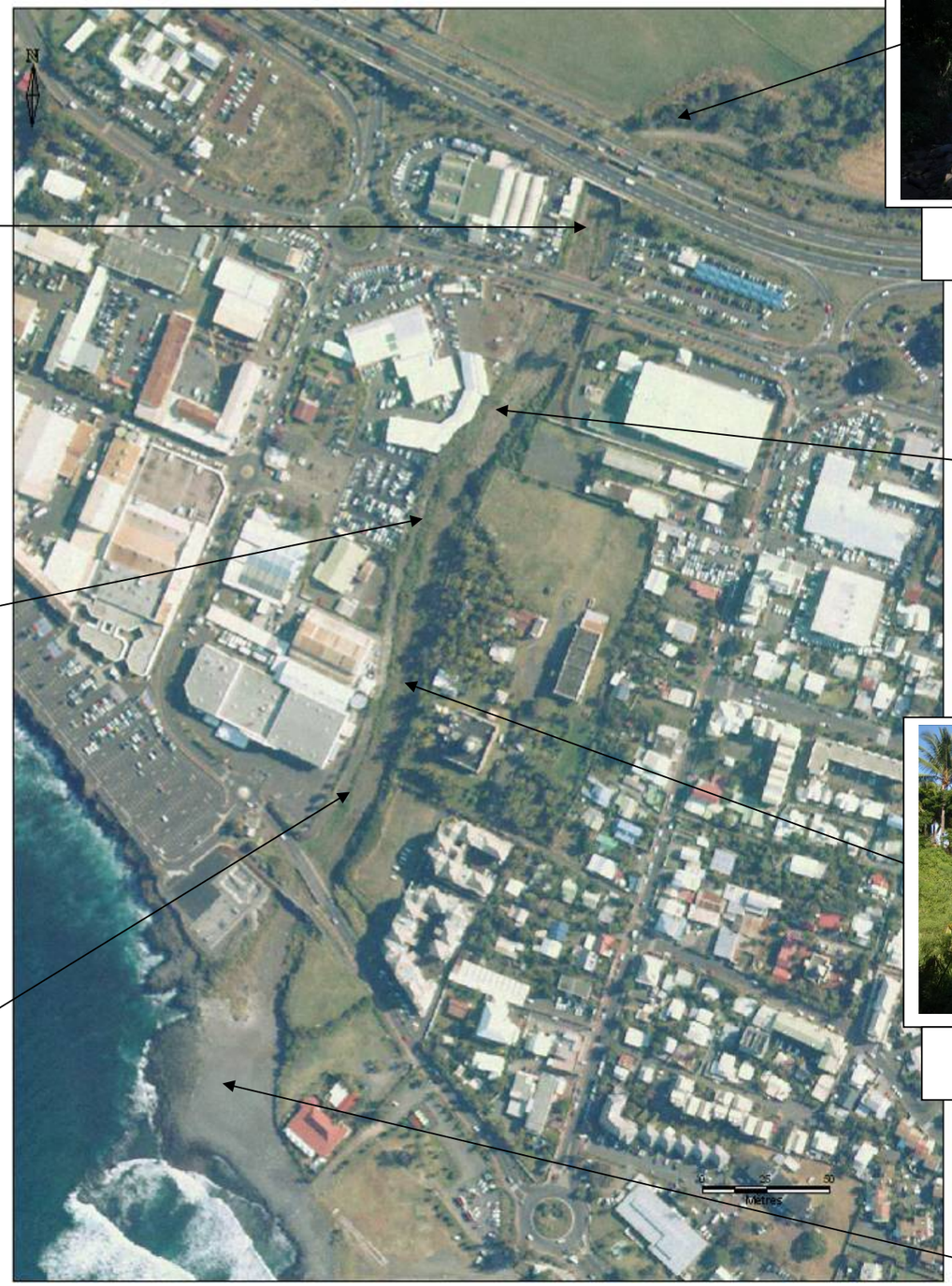
OH1 – RN1 *Vue amont*	*OH2 – Rue Marius & Ary LEBLOND* *Vue amont*
OH3 – Radier Bd Hubert Delisle *Vue de dessus*	*OH4 – Pont de l'ancien CFR* *Vue amont*

Tableau 1 : Photographies des ouvrages

II.2.2. Lit mineur

Le lit mineur a été parcouru d'amont en aval, sa morphologie est illustrée par le plan et les photographies ci-dessous :

2/ Tronçon OH1- OH2 – Roche mère affleurante et blocs



1/ Amont OH1 – Blocs, limon et végétation dense en lit mineur

3/ Aval OH2 – Tronçon I : Roche mère affleurante à cavités, blocs et végétation éparse

4/ Aval OH2 – Tronçon II : Blocs, galets, limon et végétation éparse

5/ Aval OH2 – Tronçon III : Galets, limon et végétation dense

6/ Aval OH2 – Tronçon IV : Blocs, galets et limon

Exutoire en mer : Blocs et galets

Figure 3 : Morphologie du lit mineur

III. HYDROLOGIE

III.1. Méthodologie générale

L'étude hydrologique de la Ravine Blanche peut être décomposée selon les 3 phases suivantes :

- Cartographie des bassins versants
- Acquisition des données récentes de pluviométrie sur 3 postes météorologiques représentatifs des bassins versants.
- Construction du modèle pluie/débit

III.2. Bassins versants

Les bassins versants de la Ravine Blanche et de ses affluents ont été cartographiés et sont présentés page suivante.

III.2.1. Caractéristiques morphométriques

Les bassins versants unitaires suivants ont été identifiés :

- Ravine Blanche :

Bassin versants d'amont en aval : RB1 ; RB2 et RB3. Le bassin versant RB correspondant au bassin versant total de la ravine Blanche en amont direct de la zone d'étude (amont OH1).

- Bras de Douane :

Bassin versants d'amont en aval : D1 et D2.

- Ravine Concession :

Bassin versants d'amont en aval : C1 et C2.

BV unitaires	Surface (km²)	Longueur du BV (km)	Alt max (m)	Alt min (m)	Pente moyenne (%)	Allongement	Dénivelé
Bras de Douane (BV unitaires)							
D1	3.664	7.2	850	290	7.83	3.74	560
D2	3.691	4.8	290	50	5.05	2.47	240
Ravine Concession							
C1	3.991	5.8	700	220	8.29	2.90	480
C2	3.966	4.2	220	20	4.75	2.11	200
Ravine Blanche							
RB1	12.090	8.2	2080	1210	10.65	2.35	870
RB2	6.073	6.96	1210	510	10.06	2.82	700
RB3	2.923	7.47	510	50	6.16	4.37	460
RB	37.410	23.9	2080	20	8.62	3.91	2060

Tableau 2 : Caractéristiques morphologiques des bassins versants

III.2.2. ***Cartographie des bassins versants et point de calcul***

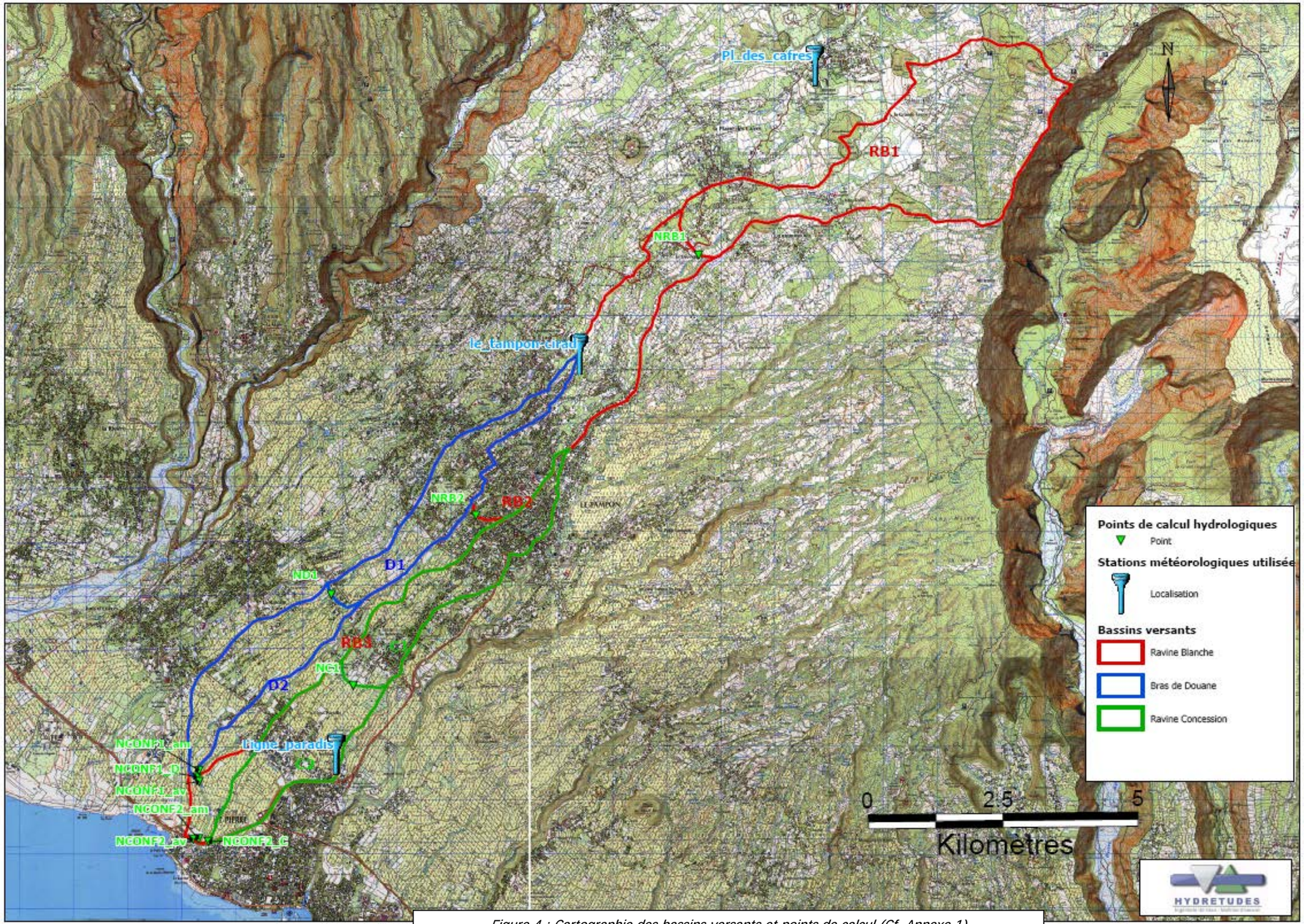


Figure 4 : Cartographie des bassins versants et points de calcul (Cf. Annexe 1)

III.3. Pluviométrie

III.3.1. Choix des stations météorologiques représentatives

Afin de tenir compte au maximum de la configuration des bassins versants d'étude (dénivelés importants, formes allongées, pentes fortes, ...) et de la forte dépendance altitudinale des intensités pluviométriques, nous avons choisi d'étudier les données acquises auprès de Météo France concernant les pluviométries centennales (pour différentes durées de précipitation : de 1h à 3 heures afin de représenter au mieux les bassins versants) des 3 postes suivants :

Commune	Nom du poste	Date d'ouverture	Paramètres mesurés	Altitude (en m)	Latitude Sud	Longitude Est
LE TAMPON	**Le Tampon-PK13** (CIRAD)	01/01/1958	RR-T-(v)-Rg	860	-21°15'06"	55°31'49"
	Plaine des Cafres	01/01/1948	RR-T-V-Rg-U	1560	-21°12'33"	55°34'22"
ST-PIERRE	**Ligne-Paradis** (CIRAD)	01/01/1966	RR-T-(v)-Rg-U	156	-21°19'09"	55°29'07"

Tableau 3 : Stations météorologiques utilisées

Symboles des paramètres mesurés

RR : Précipitation
T : Température
(v) : Vent à 2 m
V : Vent à 10 m
Rg : Rayonnement global
U : Humidité relative
P : Pression

III.3.2. Pluviométries centennales

Le tableau représente, par station et pour différentes durées de cumul, les hauteurs de précipitations qui ont une probabilité de se reproduire une fois tous les 100 ans.

La méthode utilisée est la méthode du renouvellement qui ajuste pour une station toutes les précipitations supérieures à un seuil donné :
– Les hauteurs sont ajustées par une loi de Pareto généralisée,
– La loi utilisée pour ajuster les nombres annuels de dépassement elle la Loi de Poisson.

Poste pluviométrique	**Altitude** (m NGR)	**Période de mesure**	**T** (minutes)	**P100** (mm)	**Intensité** (mm/h)
Plaine des Cafres	**1560**	**1962 - 2008**	60	142.2	142.2
			120	230	115.0
			180	314.4	104.8
Tampon Pk13 (CIRAD)	**860**	**1969 - 2008**	60	91	91.0
			120	142.6	71.3
			180	181.4	60.5
Ligne Paradis (CIRAD)	**156**	**1998 - 2008**	60	57	57.0
			120	80.9	40.5
			180	112.2	37.4

Tableau 4 : Pluviométries centennales moyennes des stations utilisées (source : Météo France, 2010)

III.4. Modèle pluie / débit

A travers ce chapitre sont décrites les méthodes employées pour définir la relation pluie / débit sur le bassin versant de la Ravine Blanche au droit du secteur d'étude.

III.4.1. Méthodologie utilisée

La modélisation hydrologique d'une crue centennale de la Ravine Blanche s'est se fait en trois phases distinctes :

1. Production : c'est l'estimation pour chaque sous-bassin versant, de la *pluie nette* (pluie destinée à l'écoulement rapide) à partir de la *pluie brute* (précipitations)

2. Transfert : c'est l'estimation des débits à la sortie de chaque sous-bassin versant à partir de la pluie brute

3. Propagation : c'est l'estimation des débits en chaque point du réseau hydrographique à partir des résultats du transfert.

III.4.2. Production

- *Méthode utilisée :*

La méthode utilisée est celle du Soil Conservation Service U.S. (SCS). Elle suppose pour chaque sous-bassin versant un paramètre J, correspondant à une réserve d'eau dans le sol.

Ce paramètre est déterminé en fonction de l'occupation du sol par le *Curve Number*, donné par des abaques, et de l'état d'humidité du bassin.

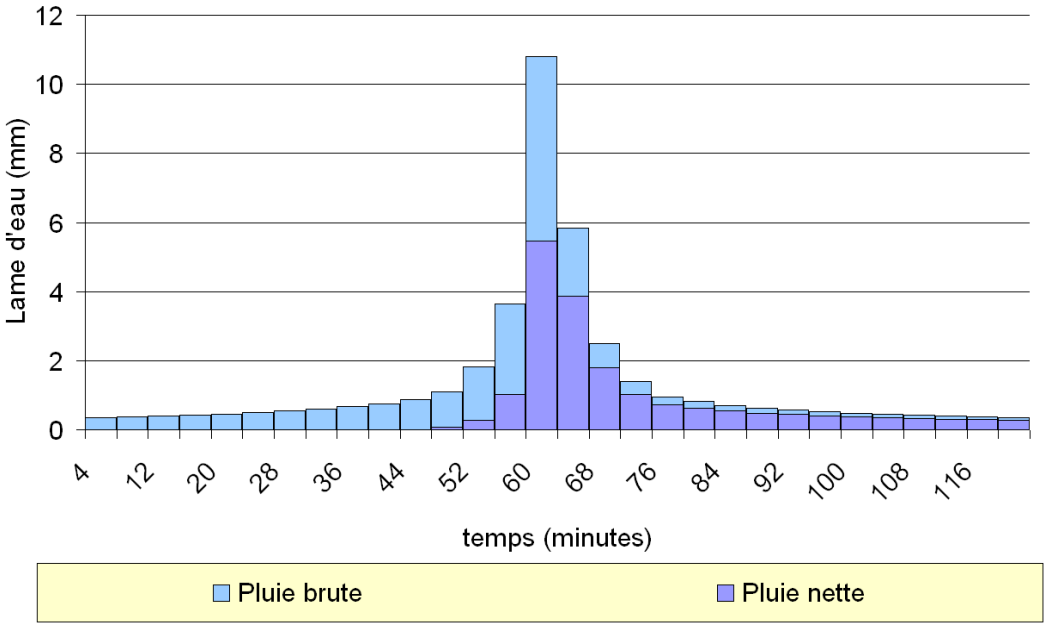


Figure 5 : Illustration de la production = transformation pluie brute / pluie nette

- *Influence de l'altitude*

Afin d'intégrer au mieux la dépendance altimétrique des pluies caractérisant le régime des précipitations sur la Planèze Saint Pierre – Le Tampon dans l'hydrologie de ses sous-bassins versants, un poids a été affecté pour chaque bassin versant aux différents postes pluviométriques utilisés.

Nous avons utilisé la méthode du barycentre en affectant un « pourcentage » de représentativité de chaque pluviomètre en fonction de l'altitude médiane de chaque sous-bassin.

Les résultats sont présentés dans le tableau ci-dessous :

Nom BV	S (km²)	J (mm)	X1	X2	X3
D1	3.664	20		58.8%	41.2%
D2	3.691	50		2.0%	98.0%
C1	3.991	30		43.2%	56.8%
C2	3.966	30		0.0%	100.0%
RB1	12.09	30	100.0%	0.0%	
RB2	6.073	50	0.0%	100.0%	
RB3	2.923	25		17.6%	82.4%

Tableau 5 : Paramètres J des sous-bassins et poids des pluviomètres

Nous avons simulé deux configurations de capacité à l'infiltration initiale des bassins versants (variation du paramètre J), celle présentée ci-dessus est selon nous la plus représentative de la réalité des bassins versants étudiés.

Remarque : notre modèle de pluie offre une sensibilité des valeurs de débits estimés de 13,6% à des variations du paramètre J de 100%.

III.4.3. Transfert

La méthode est celle de l'hydrogramme unitaire, qui suppose la linéarité de la réponse des bassins versants à une impulsion de pluie nette.

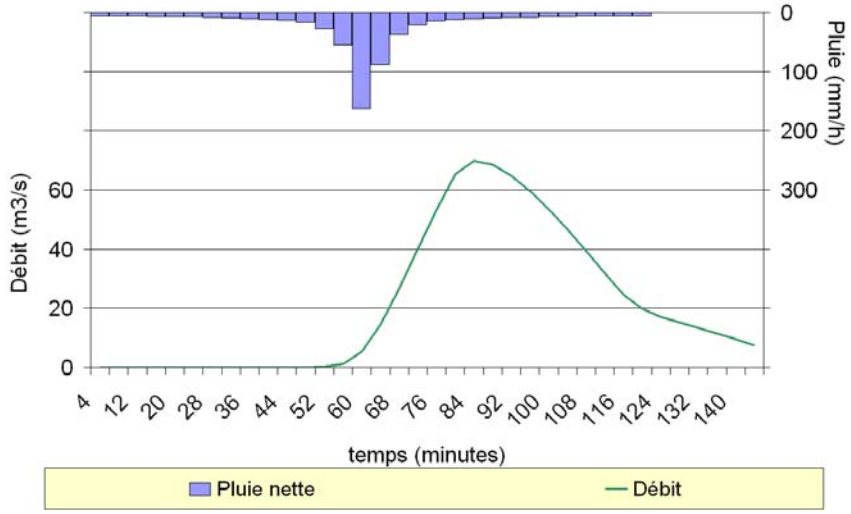


Figure 6 : Transfert = transformation pluie nette / débit (schéma d'illustration)

III.4.4. Propagation

La propagation de l'onde de crue est calculée par la méthode Muskingum (simplification des équations de Saint-Venant). A chaque tronçon de cours d'eau, nous avons affecté un profil-type.

Les paramètres utilisés pour le calcul de la propagation sont pour chaque tronçon : longueur, pente moyenne, profils en travers et coefficients de rugosité caractéristiques.

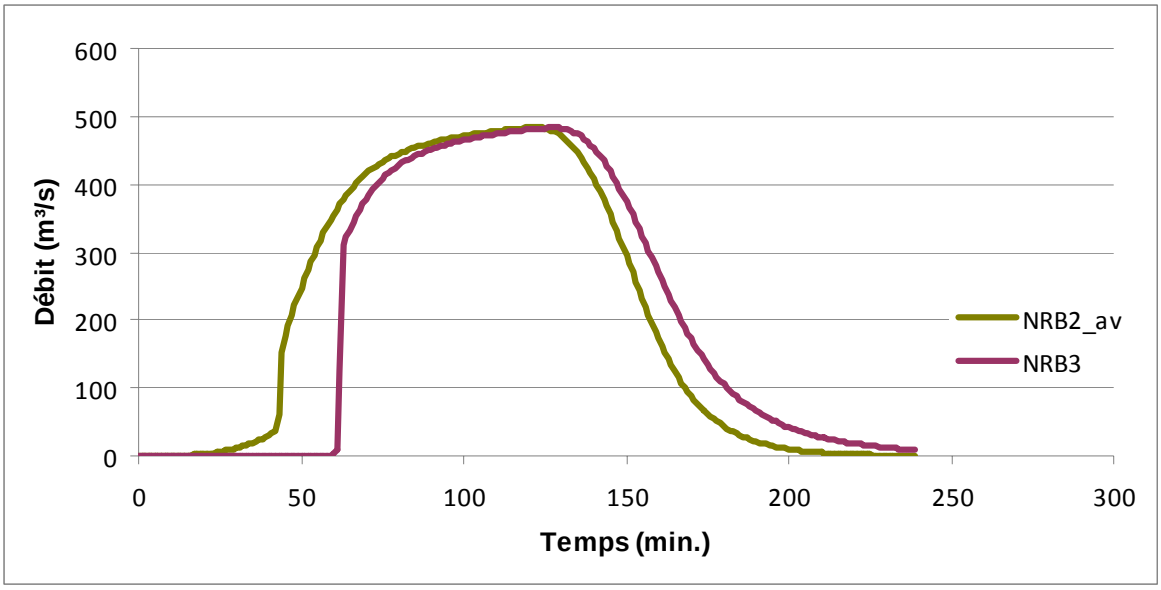


Figure 7 : Propagation des hydrogrammes

Construction d'un profil en travers

Le modèle Ravine Blanche prend en compte les couples hauteur d'eau / largeur au miroir estimés aux points de calculs suivants.

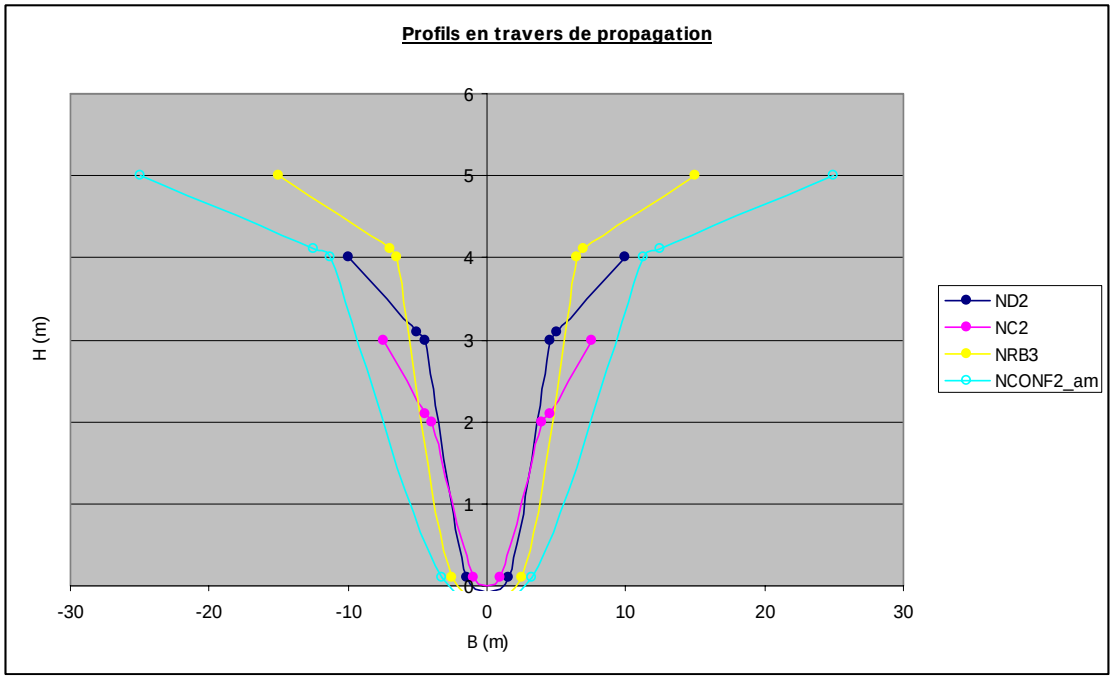


Figure 8 : Construction des profils en travers de propagation

III.4.5. Schéma du modèle Pluie - Débit

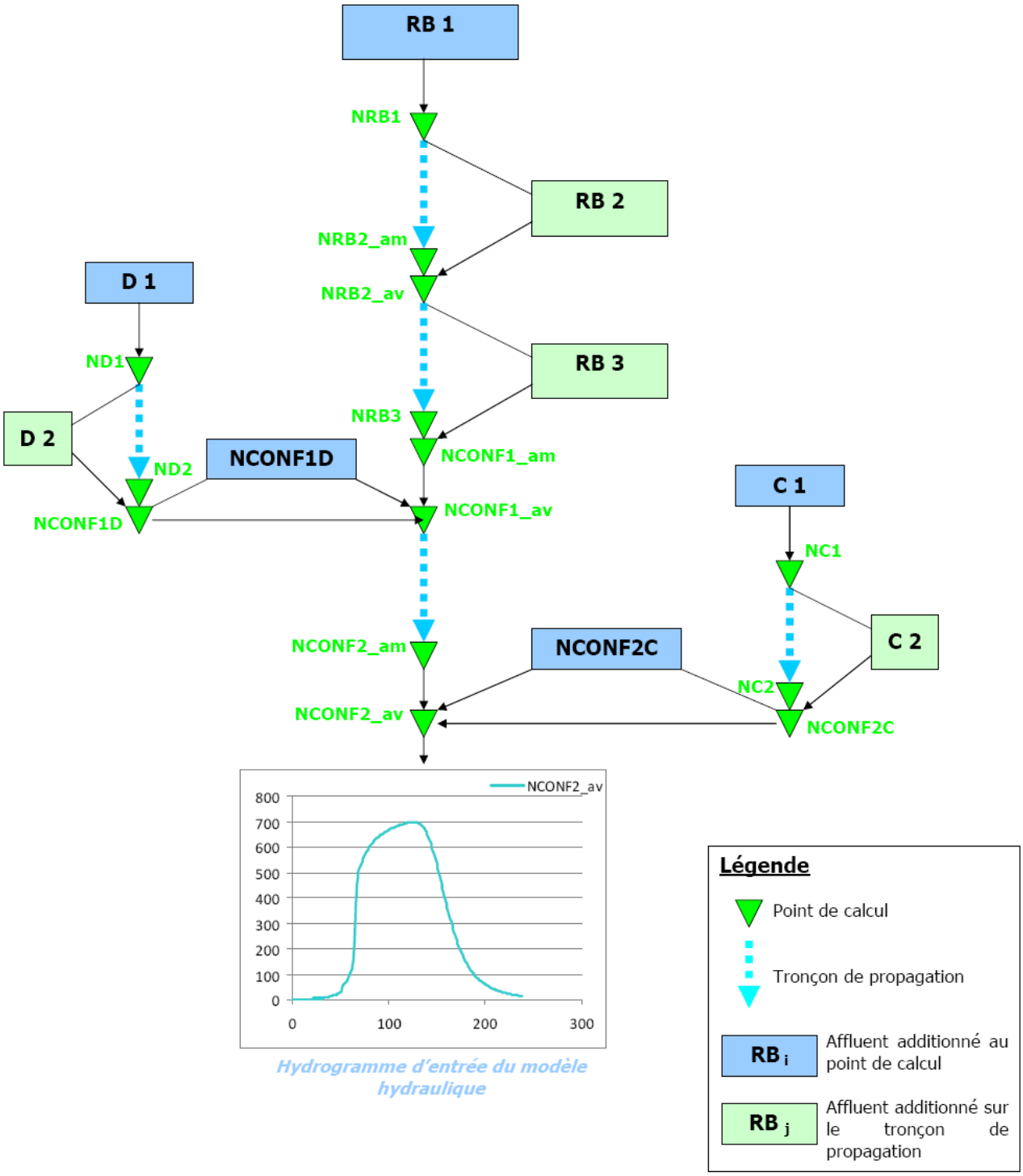


Figure 9 : Schéma du modèle pluie / débit de la Ravine Blanche sur la zone d'étude

IV. HYDRAULIQUE

IV.1. Modélisation mathématique des écoulements

Afin d'analyser les écoulements d'une crue centennale de la Ravine Blanche, une modélisation mathématique du lit mineur et du lit majeur a été réalisée avec le logiciel Infoworks RS 2D.

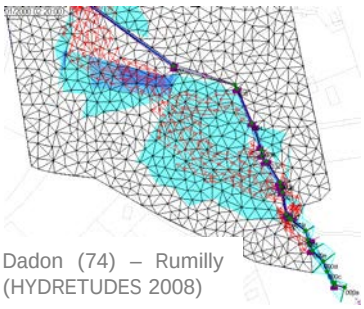
IV.1.1. Mise en œuvre du modèle et présentation du logiciel

Module 2 D

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

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.


Dadon (74) – Rumilly (HYDRETUDES 2008)

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 couteuses en temps de calcul.

La modélisation des évènements complexes avec précision et efficacité exige un modèle à la fois 1D et 2D. Le logiciel Infoworks RS-2D 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.

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).

Mailleur 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 modeleur et en veillant à ce que le système soit inspiré de la topographie du site d'étude de façon aussi précise que possible.

Dadon (74) – Rumilly (HYDRETUDES 2008)

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 :

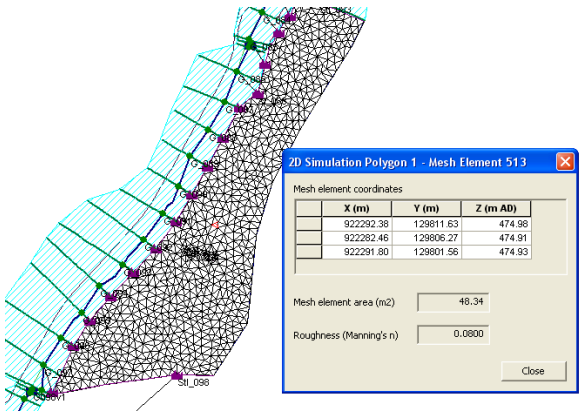
- maillage triangulaire non structuré qui est la meilleure solution pour l'analyse des écoulements complexes ;

- 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.



Giffre (74) – Marignier (HYDRETUDES 2008)

IV.1.2. Architecture du modèle

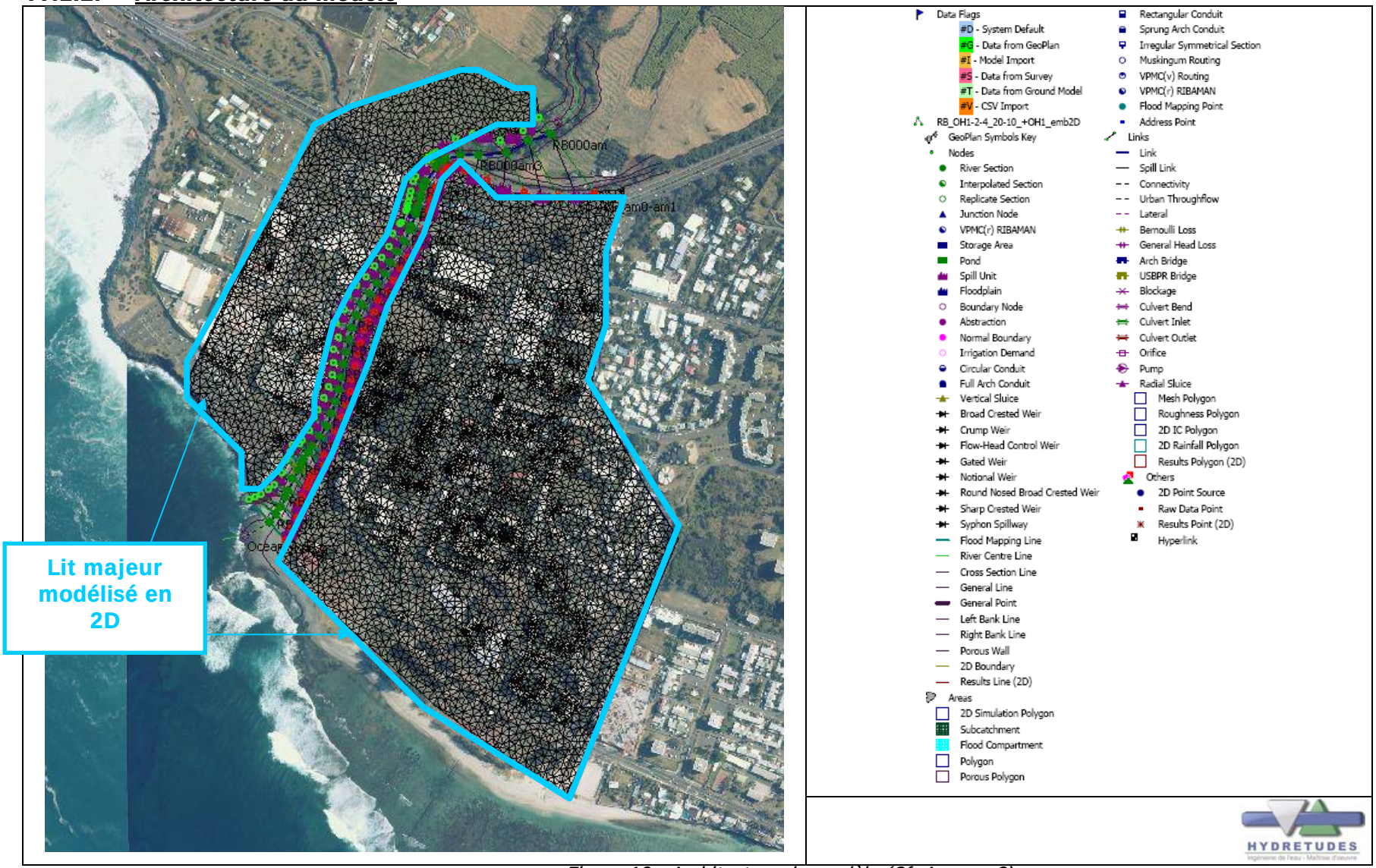


Figure 10 : Architecture du modèle (Cf. Annexe 3)

Le modèle se compose de la façon suivante :

- Lit mineur modélisé en 1D (modèle filaire), sur la base de 48 profils en travers et de 3 ouvrages (1 ouvrage type « Arch bridge » : OH 2 et 2 ouvrages type « USPBR bridge » : ouvrage double portée : OH 1 et 4) ;

- Lits mineur/majeur connectés en rive droite et rive gauche par des « spills units », ou fronts de débordement reliant le lit mineur D et le lit majeur modélisé en 2D ;

- Lit majeur modélisé en 2D, sur la base du MNT construit à partir de la Litto 3D (les bâtiments ont été intégrés comme éléments poreux : « porous polygon » intégrant donc ainsi leur influence sur les écoulements). Le lit majeur est constitué de 10 712 facettes représentant le MNT calculé et prenant en compte la rugosité représentative du sol en place (voirie, friche, végétation,...).

IV.1.3. Conditions aux limites

- Débit :

L'analyse hydrologique nous a permis d'estimer différents débits d'occurrences centennales pour des évènements pluvieux de durée 1h, 2h à 3 heures.

Nous avons choisi d'utiliser un événement pluvieux générateur d'un débit centennal pour le bassin versant de la Ravine Blanche, d'une durée de 2 heures, proche du temps de concentration de ce bassin versant.

Ainsi, l'hydrogramme résultant est présenté ci-après. Le débit centennal est estimé en pointe à 698,7 m³/s. L'hydrogramme de crue est joint en Annexe 3.

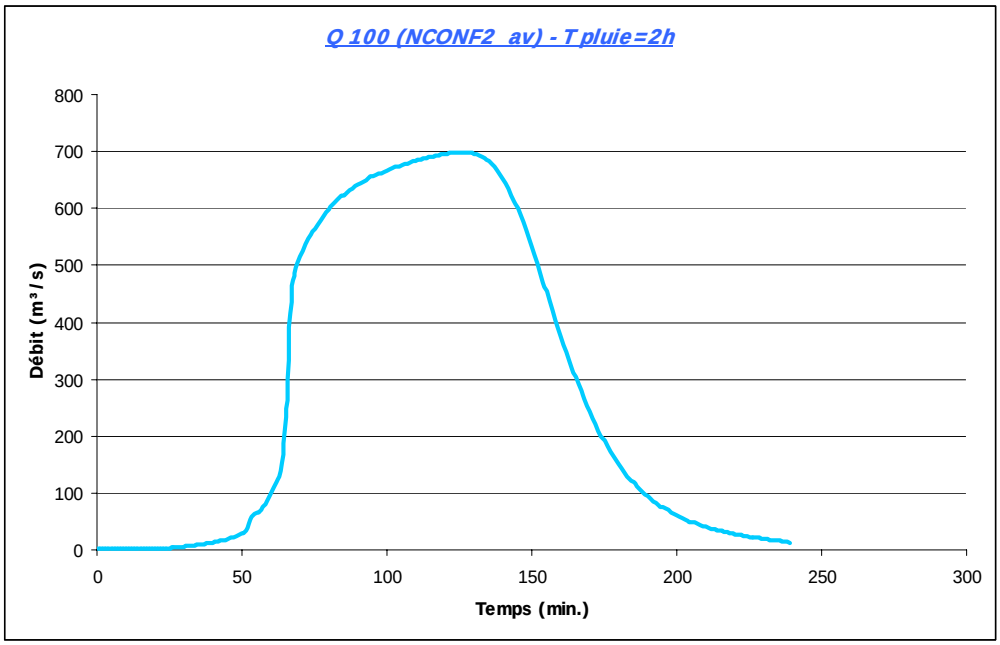


Figure 11 : Hydrogramme centennal injecté en amont du modèle

Nous avons tout d'abord lancé une simulation en régime permanent (débit constant de valeur faible, correspondant à un début de crue). Ensuite, les résultats obtenus ont été injectés comme condition limite de la modélisation en régime transitoire.

- Conditions aux limites :

Etant donné le contexte du site d'étude : proximité de l'exutoire en mer et influence des surélévations du niveau marin lors d'épisodes cycloniques, nous avons imposé une hauteur de mer constante à l'aval du modèle (lit mineur et lit majeur).

L'élaboration du PPRI de la Commune de Saint Pierre et l'étude de l'influence des conditions de mer sur les écoulements ont donné lieu à différents débats quant à la détermination de la valeur à prendre en compte pour quantifier ce phénomène.

La détermination des hauteurs de mer à considérer se base en partie sur les annuaires de marée au Port de Saint Pierre, disponibles sur le site du Service Hydrographique et Océanique de la Marine et les données fournies sur les cartes marines du SHOM. De cette analyse, il ressort que sur le cycle de 18 ans (1988-2005) la pleine mer de vive-eau exceptionnelle atteint 0.42 m NGR. Cette valeur est prise ici pour estimer le niveau de la mer lié à la marée astronomique.

La surcote d'occurrence centennale liée aux phénomènes météorologiques (du fait de la dépression, surélévation du niveau marin de 1cm par HPa, par rapport à la pression atmosphérique moyenne de 1013hPa, influence du vent pouvant générer une surcote d'une dizaine de centimètres) est estimée à 0.85mNGR. Une marge de sécurité de 0.25mNGR est prise afin de pallier les éventuelles sous-estimations.

Enfin, la surélévation locale liée au déferlement des vagues à la côte, appelée set-up, est estimée à 0.60mNGR.

Après discussion entre les différents protagonistes et analyse des hauteurs de mer usuellement admises dans les études hydrauliques réalisées sur l'île de la Réunion, il avait été proposé d'utiliser une hauteur de mer aval de 2 m NGR.

La même valeur de surcote marine avait été prise en compte notamment dans la modélisation mathématique d'une étude hydraulique réalisée par le bureau d'études SOGREAH pour un phénomène global d'occurrence avoisinant le centennal.

Après discussion entre la DDE et la Commune de Saint Pierre, la hauteur de mer utilisée dans la modélisation des écoulements d'une crue centennale de la Ravine Blanche a été arrêtée à 1,5 m NGR. C'est cette valeur qui a été reprise dans l'étude.

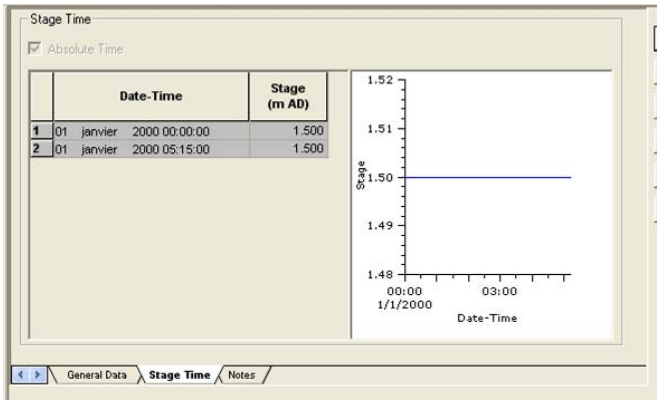


Figure 12 : Hauteur de mer imposée en aval du modèle

IV.1.4. Paramètres de modélisation du lit majeur

Les bâtiments ont été modélisés comme des éléments poreux (*«Porous polygon»*) afin de représenter leur capacité limitée à absorber une partie des volumes liquides incidents.

Les lignes caractéristiques (murs, ruptures de pentes marquées, ...) ont également été intégrées au maillage 2D en lit majeur.

Les rugosités ont été affinées grâce aux reconnaissances de terrain et à l'analyse des ortho-photographies de 2008.

IV.1.5. Calage du modèle

L'absence de mesures précises de hauteurs d'eau correspondantes à des crues de débits connus rend impossible le calage du modèle sur des données physiques (après vérification auprès des services de la DDE, la station de mesure récemment installée en aval de l'ouvrage N°2 de la rue Marius et Ary Leblond ne dispose pas de données exploitables).

Les coefficients de Manning injectés 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 valeurs retenues sont les suivantes :

n	Caractéristiques du lit / Matériaux
0.0125	Béton lisse, asphalte
0.02	Béton rugueux avec aspérités
0.025	Maçonnerie brute, moellons assemblés au ciment, enrochements liés
0.03	Limons, graviers, absence de végétation
0.04	Galets, limon, végétation
0.05	Blocs, végétation dense
0.065	Végétation haute et dense (champ de canne, friche) Gros blocs

Tableau 6 : Coefficients de Manning utilisés

Les résultats du modèle (H, V) ont été analysés en recoupant les valeurs avec la topographie existante (MNT issu du traitement des données de la Litto 3D, visites in situ, ...) afin de vérifier leur validité avant éventuelle nouvelle itération de calcul.

Comparaison avec les désordres liés à Firinga :

Les résultats obtenus ont également été recoupés avec les différents témoignages de la crue générée lors de Firinga (débit observé de l'ordre de 570 m³/s).

Certes la configuration était légèrement différente :

- La ravine Concession a été déviée vers la Ravine Blanche (adduction de débit) lors du passage de 2 à 5 voies de la RN1 après Firinga.

- Un endiguement partiel de la ravine sur le tronçon compris entre la RN et l'océan a été réalisé depuis,

- Construction de la concession automobile CADJEE en rive droite avec endiguement en aval de l'OH de la RN,

- Construction des immeubles collectifs d'habitations sociales de la SHLMR en rive gauche, en amont du radier,

- Construction de la route littorale bouclant le boulevard Hubert Delisle et la voie de desserte de la ZI n°1 depuis Jumbo Score en 1988-1989. Cette route fait une sorte de digue pour le secteur urbanisé littoral en rive gauche,

- Reconstruction du pont de l'ancienne RN et élargissement de la route entre rond point Cadjee et Foucque dans les années 2000,

- Passage de 2 à 4 voies de la RN1 en 1993-1995 avec **réalisation des voies descendantes en remblai par rapport aux voies montantes préexistantes** et **construction d'un merlon paysager côté amont le long de la dérivation de la ravine Concession**.

Cependant, cette crue, pour laquelle nous avons quelques témoignages, s'avère la plus proche, connue, en temps de retour de celle, centennale, simulée.

La comparaison effectuée et les valeurs ou ordres de grandeurs décrits (hauteurs d'eau ponctuelles, vitesses, emprise du champ d'expansion,...) atteste de la pertinence du modèle et de ses résultats.

Figure 13 : Photo aérienne après passage de Firinga, février 1989

Figure 14 : Photo aérienne 2008

IV.1.6. Scénarii modélisés

Deux scénarii ont été modélisés, représentant chacun le fonctionnement d'une crue centennale de la Ravine Blanche sur le tronçon aval compris entre la confluence avec la ravine Concession et son exutoire en mer/

- Scénario 1 : Crue centennale de la ravine sans prise en compte du transport solide et des possibilités d'embâcle (phénomène observé lors de Firinga sur l'ouvrage de la route Nationale) ;

- Scénario n°2 : Crue centennale de la ravine avec mise en charge de l'ouvrage n°1[1] (RN).

IV.2. Analyse des écoulements

IV.2.1. Résultats du modèle – Scénario n°1

Les simulations de la crue centennale de la Ravine Blanche, générée par un évènement pluvieux de période de retour centennale et de durée 2 heures, sur son lit mineur et son lit majeur ont permis de mettre en évidence les paramètres caractéristiques des écoulements induits.

IV.2.1.1 Lit mineur

Le lit mineur, modélisé en filaire, a été découpé en 48 profils en travers et intègre les caractéristiques des ouvrages présents sur le tronçon étudié.

Le régime des écoulements est de nature torrentielle sur la quasi-totalité du linéaire, avec des nombres de Froude compris entre 0.35 et 3.45.

L'aval du lit mineur offre une majorité de tronçons dont les écoulements sont de type fluvial (du profil 26 jusqu'à la mer).

L'ouvrage n°4 (ancien pont CFR) est mis en charge selon les résultats de la modélisation, favorisant les débordements vers le lit majeur en rives droite et gauche, en amont.

Les vitesses d'écoulement varient entre 1.65 et 10.2 m/s.

IV.2.1.2 Relations lit mineur – lit majeur

La relation lit mineur 1D – lit majeur 2D se fait à travers les « spills » (unités de débordement) reliant extrémités des profils en travers et maillage 2D du lit majeur.

Les échanges de débit entre la ravine et son champ d'expansion se font à travers ces unités. Il apparaît que les débordements ont lieu à partir d'une valeur de débit approximatif de 300 m³/s entre t = 1h05 et 1h06 dans l'hydrogramme utilisé.

[1] *Cette mise en charge apparaît très rapidement sitôt le fond du lit remanié (rehaussement de quelques cm), et l'arche à l'intrados avec un angle important vis-à-vis de l'axe d'écoulement a tendance à s'engraver rapidement. Ce scénario est le plus probable dans le cas d'une occurrence de crue centennale.*

- Rive gauche :

Les débordements ont lieu sur les deux rives mais sont plus importants en rive gauche. Ainsi, d'après les résultats du modèle :

- Un front de débordement majeur existe en rive gauche, entre les profils 15 et 21, où au maximum de la crue, près de 58.5 m³/s s'écoulent vers le lit majeur (le front le plus important étant plus précisément situé entre les profils 16 et 17 où débordent 31.5 m³/s lors du pic de crue) ;

- Un second front de débordement est compris entre les profils 22 et 26 (70.4 m³/s s'écoulent depuis ce front vers le lit majeur) ;

- Enfin, la mise en charge de l'ouvrage OH4 et l'insuffisance de capacité du lit mineur favorisent le débordement de près de 108 m³/s entre les profils 26 et 28.

- Rive droite :

Deux principaux fronts de débordements alimentent le lit majeur en rive droite :

- entre les profils 16 et 19, où 16.5 m³/s s'écoulent depuis le lit mineur ;
- entre les profils 27 et 29 !, où la mise en charge de l'ouvrage OH4 et l'insuffisance de capacité du lit mineur favorisent le débordement de près de 199.2 m³/s.

IV.2.1.3Lit majeur

La figure ci-dessous illustre l'étendue de la zone d'expansion de la crue centennale de la Ravine Blanche, résultant de la modélisation mathématique 2D :

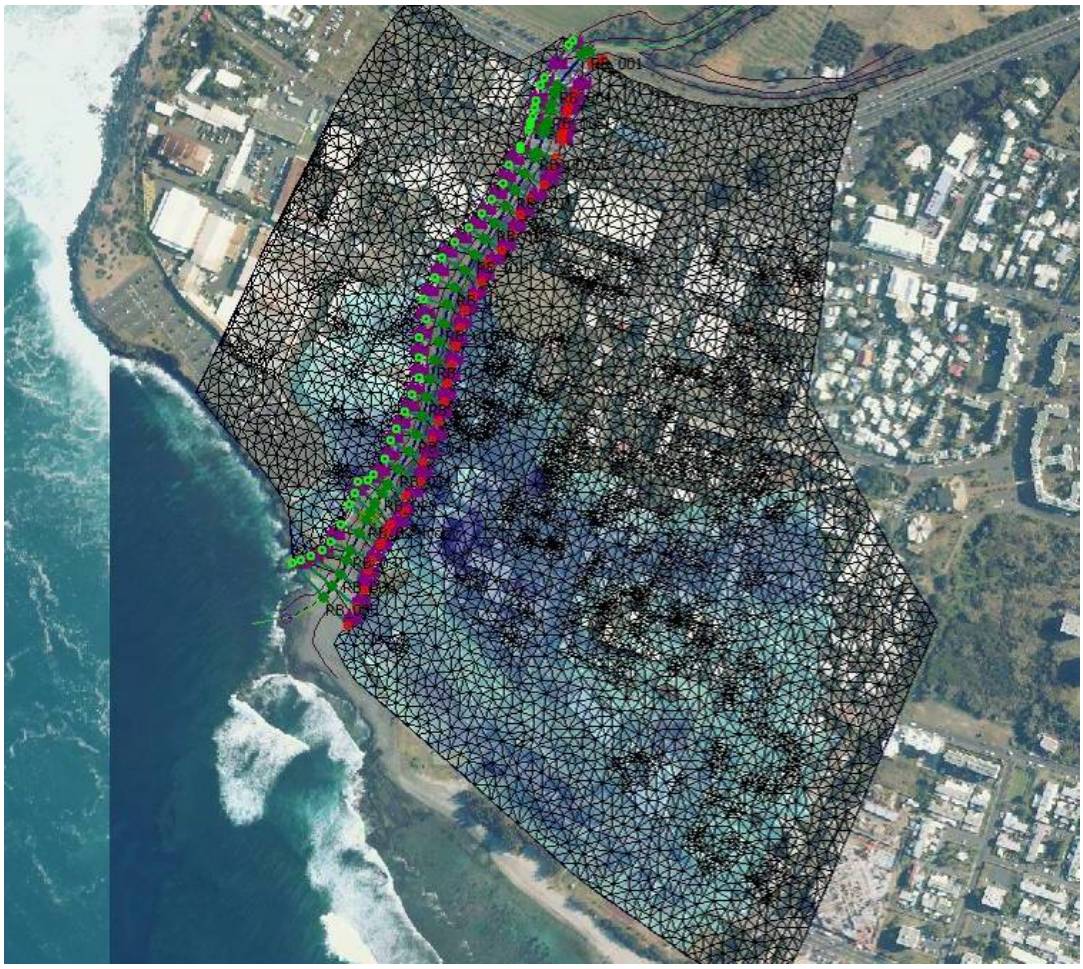


Figure 15 : Champ d'expansion de la crue centennale de la Ravine Blanche

Les cartes jointes en annexe 6 et présentant le champ d'expansion des crues par seuils paramètres hydrauliques (hauteurs d'eau, vitesses d'écoulement et aléas résultant), illustrent les résultats du modèle mathématique 2D sur le lit majeur.

- Rive gauche :

Le champ d'expansion en rive gauche est vaste (environ 17,8 ha) et s'étend en aval jusqu'à la résidence le Filaos, à quelques dizaines de mètres du canal SOREMA (sans toutefois le rejoindre).

Il existe quelques zones non impactées par les débordements de la Ravine Blanche, celles-ci correspondent à des « ilots » dont les cotes altimétriques sont plus élevées que les secteurs avoisinants.

Les vitesses sont comprises entre 0.01 et 4.92 m/s, avec une vitesse moyenne, calculée sur l'ensemble des facettes de calcul, de 0.84 m/s.

Les hauteurs de submersion sont comprises entre 0.1 et 3.6m avec une hauteur moyenne calculée sur l'ensemble des facettes de calcul de 0.84 m (les quelques hauteurs d'eau supérieures à 2 m correspondent à des « dépressions » topographiques naturelles ou à des terrains ayant été remaniés).

Les durées de submersion sont comprises entre quelques minutes pour les zones les moins exposées à près de 3h30 pour les plus touchées par les inondations.

- Rive droite :

Le champ d'expansion en rive droite est moins vaste qu'en rive gauche mais s'étend tout de même sur 2.58 Ha.

Les vitesses sont comprises entre 0.01 et 5.72 m/s, avec une vitesse moyenne, calculée sur l'ensemble des facettes de calcul de 1.57 m/s.

Les hauteurs de submersion sont comprises entre 0.1 et 3.35m avec une hauteur moyenne calculée sur l'ensemble des facettes de calcul de 0.93 m.

Les durées de submersion sont comprises entre quelques minutes pour les zones les moins exposées à près de 2h30 pour les plus touchées par les inondations.

IV.2.2. Résultats du modèle – Scénario n°2

Les résultats de la simulation de ce scénario sont assez proches de ceux du scénario n°1 sur les parties aval des lits mineurs et majeurs mais diffèrent en amont à proximité de l'ouvrage de la RN.

IV.2.2.1 Lit mineur

Le régime des écoulements est de nature torrentielle sur la quasi-totalité du linéaire, avec des nombres de Froude compris entre 0.35 et 3.8.

L'aval du lit mineur offre une majorité de tronçons dont les écoulements sont de type fluvial (du profil 26 jusqu'à la mer).

L'ouvrage n°1 rentre en charge à partir d'une valeur de débit de 593 m³/s dans la configuration modélisée.

L'ouvrage n°4 (ancien pont CFR) est mis en charge selon les résultats de la modélisation, favorisant les débordements vers le lit majeur en rives droite et gauche, en amont.

Les vitesses d'écoulement varient entre 1.7 et 10.6 m/s.

IV.2.2.2 Relations lit mineur – lit majeur

La relation lit mineur 1D – lit majeur 2D se fait à travers les « spills » (unités de débordement) reliant extrémités des profils en travers et maillage 2D du lit majeur.

Les échanges de débit entre la ravine et son champ d'expansion se font à travers ces unités.

Il apparaît que les débordements ont lieu à partir d'une valeur de débit approximatif de 300 m³/s entre t = 1h05 et 1h06 dans l'hydrogramme utilisé.

- Rive gauche :

Les débordements ont lieu sur les deux rives mais sont plus importants en rive gauche. Ainsi, d'après les résultats du modèle :

- La mise en charge de l'OH 1 créée une surverse en rive gauche relativement localisée (remblaiement de la RN), d'où près de 36.5 m³/s débordent, inondant le lit majeur en empruntant la rue Luc Donat,

- Un front de débordement majeur existe en rive gauche, entre les profils 15 et 21, où au maximum de la crue, près de 60 m³/s s'écoulent vers le lit majeur (le front le plus important étant plus précisément situé entre les profils 16 et 17 où débordent 34.4 m³/s lors du pic de crue) ;

- Un second front de débordement est compris entre les profils 22 et 26 (76 m³/s s'écoulent depuis ce front vers le lit majeur) ;

- Enfin, la mise en charge de l'ouvrage OH4 et l'insuffisance de capacité du lit mineur favorisent le débordement de près de 135 m³/s entre les profils 26 et 28.

- Rive droite :

Trois principaux fronts de débordements alimentent le lit majeur en rive droite :

- En amont de l'ouvrage de la RN, 59 m³/s débordent vers le champ adjacent ;
- entre les profils 16 et 19, où 12.8 m³/s s'écoulent depuis le lit mineur ;
- entre les profils 27 et 29 !, où la mise en charge de l'ouvrage OH4 et l'insuffisance de capacité du lit mineur favorisent le débordement de près de 189.5 m³/s.

IV.2.2.3Lit majeur

La figure ci-dessous illustre l'étendue de la zone d'expansion de la crue centennale de la Ravine Blanche, résultant de la modélisation mathématique 2D selon le scénario n°2 :

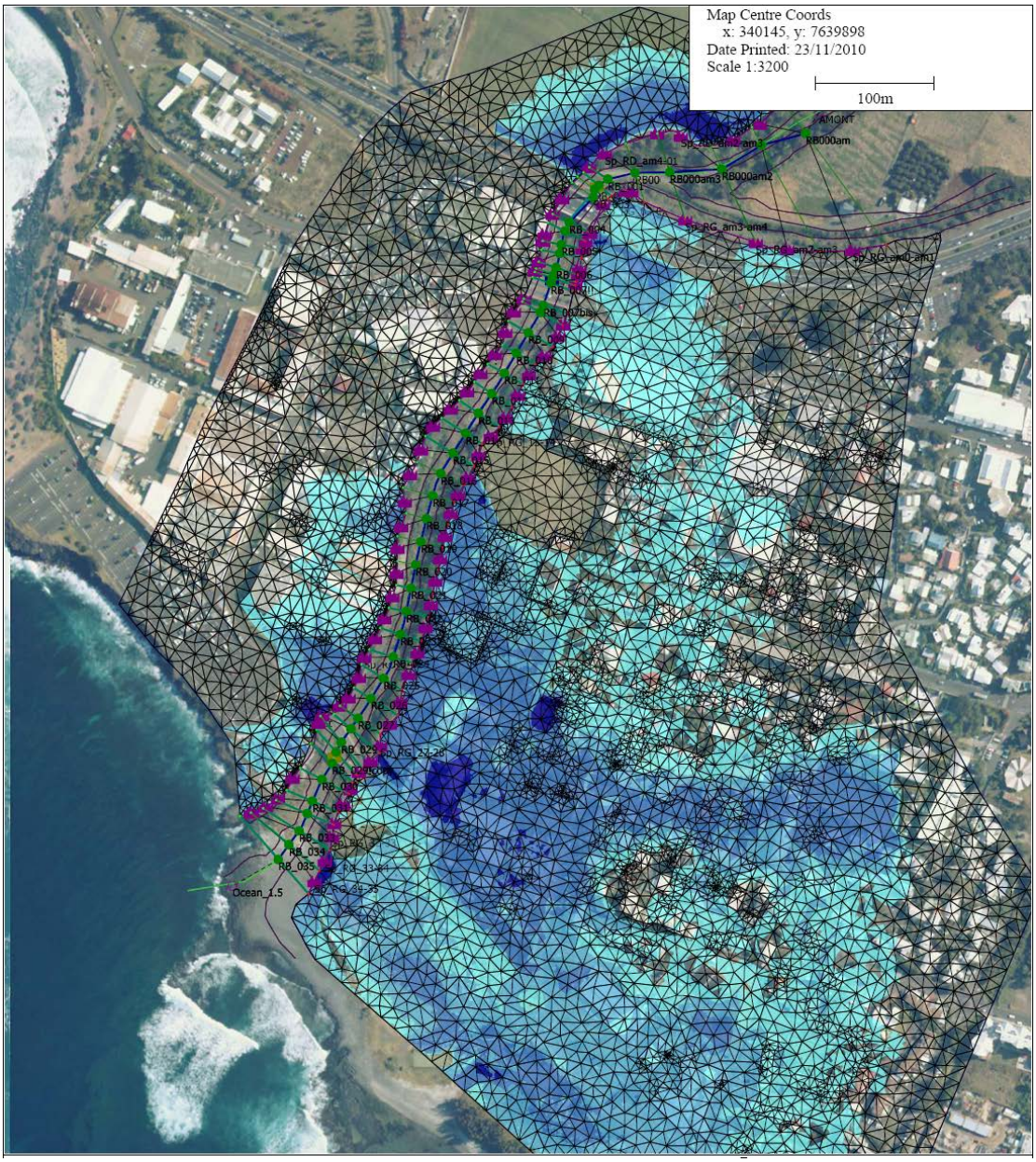


Figure 16 : Champ d'expansion de la crue centennale de la Ravine Blanche – Scénario n°2

Les cartes jointes en annexe 6 et présentant le champ d'expansion des crues par seuils paramètres hydrauliques (hauteurs d'eau, vitesses d'écoulement et aléas résultant), illustrent les résultats du modèle mathématique 2D sur le lit majeur.

- Rive gauche :

Le champ d'expansion en rive gauche est vaste (environ 22.32 ha) et s'étend en aval jusqu'à la résidence le Filaos, à quelques dizaines de mètres du canal SOREMA (sans toutefois le rejoindre).

Il existe quelques zones non impactées par les débordements de la Ravine Blanche, celles-ci correspondent à des « ilots » dont les cotes altimétriques sont plus élevées que les secteurs avoisinants.

Les vitesses sont comprises entre 0.01 et 4.45 m/s avec une vitesse moyenne, calculée sur l'ensemble des facettes, de 0.7m/s.

Les hauteurs de submersion sont comprises entre 0.1 et 3.85m avec une hauteur moyenne calculée sur l'ensemble des facettes de calcul de 0.65 m.

Les durées de submersion sont comprises entre quelques minutes pour les zones les moins exposées à près de 3h30 pour les plus touchées par les inondations.

- Rive droite :

Le champ d'expansion en rive droite est moins vaste qu'en rive gauche mais s'étend tout de même sur 3.55 Ha.

Les vitesses sont comprises entre 0.01 et 5.45 m/s, avec une vitesse moyenne, calculée sur l'ensemble des facettes de calcul de 1.24 m/s.

Les hauteurs de submersion sont comprises entre 0.1 et 3.1 m avec une hauteur moyenne calculée sur l'ensemble des facettes de calcul de 0.81 m (les quelques hauteurs d'eau supérieures à 2 m correspondent à des « dépressions » topographiques naturelles ou à des terrains ayant été remaniés).

Les durées de submersion sont comprises entre quelques minutes pour les zones les moins exposées à près de 2h30 pour les plus touchées par les inondations.

IV.3. Cartographie de la zone inondable

IV.3.1. Traduction cartographique des résultats du modèle

Sur la base des résultats du modèle, les paramètres de hauteur et de vitesse des écoulements sur l'ensemble de la zone d'expansion de la crue centennale, en l'état actuel, ont été analysés.

Ainsi, 6 cartes présentant les analyses des paramètres d'écoulement sont présentées en **annexe 6 : résultats de la modélisation mathématique 2D** :

1. Annexe 6.1 : Carte des hauteurs d'eau (2 cartes : 1 pour chaque scénario)
2. Annexe 6.2 : Carte des vitesses d'écoulement (2 cartes : 1 pour chaque scénario)
3. Annexe 6.3 : Carte des aléas (croisement hauteur/vitesses) (2 cartes : 1 pour chaque scénario)

IV.3.2. Légendes des cartes

- Annexes 6.1 : Carte des hauteurs d'eau

Hauteurs d'eau	Trame des zones inondables
0 m < H < 0.5 m	
0.5 m < H < 1 m	
1 m < H < 2 m	
2 m < H	

- Annexe 6.2 : Carte des vitesses d'écoulement

Vitesses d'écoulement	Trame des zones inondables
0 m/s < V < 1 m/s	
1 m/s < V	

- Annexe 6.3 : Carte des aléas (croisement hauteurs – vitesses)

H \ V	0 m/s < V < 1 m/s	1 m/s < V
0 m < H < 0.5 m	Aléa faible	Aléa très fort
0.5 m < H < 1 m	Aléa moyen	Aléa très fort
1 m < H < 2 m	Aléa fort (hauteur)	Aléa très fort
2 m < H	Aléa très fort	Aléa très fort

V. CONCLUSIONS

L'analyse hydrologique du bassin versant de la Ravine Blanche et de ses affluents a permis d'obtenir un hydrogramme d'une crue centennale en amont direct de l'ouvrage de la route nationale. La valeur du débit de pointe calculée (Q100 = 698.7 m³/s) est du même ordre de grandeur que celle calculée lors de l'étude de 2003 (HYDRETUDES) (Q100 = 710 m³/s).

Le transport solide est existant (blocs basaltiques charriés et flottants) mais difficilement estimable avec les outils dont nous disposons. Son influence (avérée lors du passage de Firinga notamment)a été prise en compte dans la modélisation du scénario n°2 de façon ponctuelle (surélévation ponctuelle du lit mineur notamment en amont direct du radier, tests d'influence de la cote de fond sur la mise en charge éventuelle des OH 1 et 2, la mise en charge de l'OH 1 est selon nous à prévoir au vu de sa configuration).

Il convient donc de garder à l'esprit qu'un entretien régulier du lit de la ravine, ainsi qu'une évacuation des blocs charriés en aval après chaque crue significative est à réaliser afin de se prémunir partiellement contre les effets d'un fort transport solide en crue centennale, dont les effets sur les lignes d'eau et les débits débordants seraient préjudiciables.

En termes de caractérisation des aléas, la modélisation 2D permet d'affiner grandement les connaissances en définissant précisément les paramètres hauteurs et vitesses sur chaque facette du lit majeur.

Il en ressort des différences non négligeables entre les cartographies d'aléas initiale (au sens du PPRI en cours) et celle engendrée par la présente étude (Cf. annexe 6.3).

L'aléa du PPRI actuel (porté à connaissance en décembre 2009) se trouve donc modifié par la présente étude. La modélisation 2D apporte la connaissance précise des paramètres des écoulements (hauteur d'eau, vitesse, débit incident, durée de submersion) sur chaque élément du MNT modélisé (facettes de 5 à 100 m²). Cette connaissance pourra être utilisée afin d'affiner les procédures d'instruction, d'accompagnement ou de réalisation des projets d'urbanisation.

ANNEXES

- Annexe 1 : Cartographie des bassins versants
- Annexe 2 : Fiches signalétiques des ouvrages
- Annexe 3 : Hydrogramme de crue – Q100, 2 heures
- Annexe 4 : Architecture du modèle mathématique
- Annexe 5 : Profil en long du lit mineur
- Annexe 6 : Résultats du modèle mathématique 2D
  - Annexe 6.1.1 : Carte des hauteurs d'eau – Scénario 1
  - Annexe 6.1.2 : Carte des hauteurs d'eau – Scénario 2
  - Annexe 6.2.1 : Carte des vitesses d'écoulement– Scénario 1
  - Annexe 6.2.2 : Carte des vitesses d'écoulement– Scénario 1
  - Annexe 6.3.1 : Carte des aléas (croisement hauteur/vitesses) – Scénario 1
  - Annexe 6.3.2 : Carte des aléas (croisement hauteur/vitesses) – Scénario 2

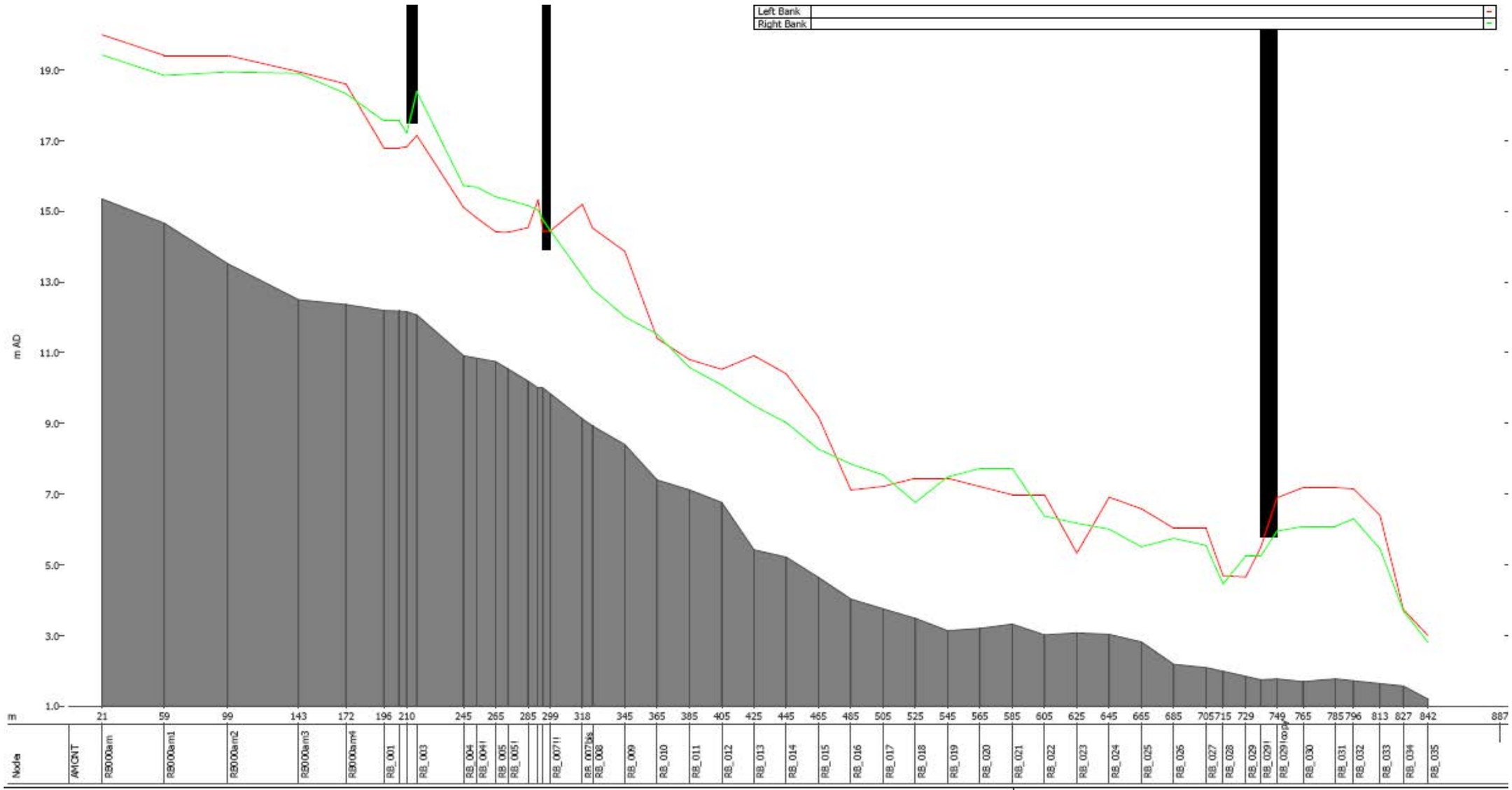
Annexe 1
-
Cartographie des bassins versants

Annexe 2
-
Fiches signalétiques des ouvrages

Annexe 3
-
Hydrogramme de crue – Q_{100}, 2 heures

Annexe 4
-
Architecture du modèle mathématique

Annexe 5
-
Profil en long du lit mineur



HYDRETUDES
Ingénierie de l'eau - Maîtrise d'oeuvre

Annexe 6
-
Résultats du modèle mathématique 2D

Pièce 6.1 : Carte des hauteurs d'eau

Hauteurs d'eau	Trame des zones inondables
0 m < H < 0.5 m	
0.5 m < H < 1 m	
1 m < H < 2 m	
2 m < H	

Annexe 6
-
Résultats du modèle mathématique 2D

Pièce 6.1 : Carte des hauteurs d'eau

Hauteurs d'eau	Trame des zones inondables
0 m < H < 0.5 m	
0.5 m < H < 1 m	
1 m < H < 2 m	
2 m < H	

Annexe 6
-
Résultats du modèle mathématique 2D

Pièce 6.2 : Carte des vitesses d'écoulement

Vitesses d'écoulement	Trame des zones inondables
0 m/s < V < 1 m/s	
1 m/s < V	

Annexe 6
-
Résultats du modèle mathématique 2D

Pièce 6.3 : Carte des aléas, croisement hauteurs / vitesses

H \ V	0 m/s < V < 1 m/s	1 m/s < V
0 m < H < 0.5 m	Aléa faible	Aléa très fort
0.5 m < H < 1 m	Aléa moyen	Aléa très fort
1 m < H < 2 m	Aléa fort (hauteur)	Aléa très fort
2 m < H	Aléa très fort	Aléa très fort