Document public

Etude hydrogéomorphologique de la Rivière du Mât et propositions de solutions de gestion

Volume 1/5 : Inventaire bibliographique

Rapport final

BRGM/RP-56364-FR
Juin 2008

Ressources, territoires et habitats
Énergie et climat
Développement durable
Prévention des risques
Infrastructures, transports et mer

Présent pour l'avenir

Liberté • Égalité • Fraternité
RÉPUBLIQUE FRANÇAISE

Géosciences pour une Terre durable
brgm

Document public

Etude hydrogéomorphologique de la Rivière du Mât et propositions de solutions de gestion

Volume 1/5 : Inventaire bibliographique

Rapport final

BRGM/RP-56364-FR
Février 2008

Étude réalisée dans le cadre des projets
de Service public du BRGM 2007 07RISY032

Y. DE LA TORRE

Vérificateur :	**Approbateur :**
Nom : M. GARCIN	Nom : JL NEDELLEC
Date :	Date :
Signature :	Signature :

En l'absence de signature, notamment pour les rapports diffusés en version numérique, l'original signé est disponible aux Archives du BRGM.

Le système de management de la qualité du BRGM est certifié AFAQ ISO 9001:2000.

Présent pour l'avenir

Liberté • Égalité • Fraternité
RÉPUBLIQUE FRANÇAISE

Géosciences pour une Terre durable
brgm

Mots clés : bibliographie, photographies aériennes, Rivière du Mât, topographie.

En bibliographie, ce rapport sera cité de la façon suivante :
De la Torre Y. (2008) – Etude hydrogéomorphologique de la Rivière du Mât et propositions de solutions de gestion – Volume 1/5 : Inventaire bibliographique. Rapport BRGM RP-56364-FR ; 27 p.

© BRGM, 2007, ce document ne peut être reproduit en totalité ou en partie sans l'autorisation expresse du BRGM.

Synthèse

Dans le cadre de la directive européenne relative à la gestion des inondations du 26 novembre 2007 et suite à la mission d'expertise de l'Inspection Générale de l'Environnement de juillet 2006 relative à la prévention des inondations à La Réunion, la DDE de la Réunion met en place un Plan de Gestion des Risques d'Inondation (PGRI) et souhaite disposer des éléments de **compréhension du fonctionnement hydrogéomorphologique des principales rivières à enjeux de La Réunion afin de pouvoir mettre en œuvre des solutions de gestion**.

Cette première étude, cofinancée par la DDE Réunion et la dotation de Service Public du BRGM, s'attache à la **Rivière du Mât** et ses principaux affluents (Fleurs Jaunes, Bras des Cavernes et Bras des Lianes). Basée sur les références méthodologiques connues ainsi que sur les spécificités de l'île et du bassin versant concerné, cette première étude du PGRI revêt un caractère expérimental dont le but est de d'asseoir l'approche méthodologique pour les autres rivières à enjeux.

D'un linéaire de 36 km et drainant un bassin versant de 146 km², la Rivière du Mât est l'un des cours d'eau majeur de La Réunion. Elle recueille notamment les eaux du cirque de Salazie et présente des risques d'inondation et d'érosion de berges importants, en particulier sur les 10 derniers kilomètres à l'aval.

L'étude est développée dans les 5 volumes suivants :

- **Volume 1/5 : Inventaire bibliographique** ;
- Volume 2/5 : Evolution géomorphologique ;
- Volume 3/5 : Analyse hydrologique et pluviométrique ;
- Volume 4/5 : Estimation du transport solide ;
- Volume 5/5 : Analyse de risque.

Le présent rapport fait le recueil puis l'analyse des informations existantes et nécessaires aux différentes thématiques de l'étude.

Il est basé sur deux sources bibliographiques principales (BD BRGM et SOGREAH) et une collecte propre au projet. Les études et données antérieures qui concernent le bassin versant de la Rivière du Mât sont riches (90 références) et variées (rapports, orthophotographies, données topographiques, etc.) de 1966 et 2008.

Les informations utilisées pour cette étude sont également nombreuses (56 références) et intéressent les différentes thématiques abordées :

- « l'évolution géomorphologique » s'appuie sur la bibliographie existante (notamment les programmes DYNTOR et MVTERRE) mais surtout sur l'exploitation et l'interprétation des photographies aériennes de l'IGN et de AIGL ;

- « l'analyse pluviométrique et hydrologique » utilise essentiellement sur les données de précipitations de Météo-France et les données de débits et hauteurs d'eau instantanés de l'Office de l'eau ;

- « l'estimation du transport solide » utilise tout particulièrement les données topographiques de AIGL et Talibart (profils en long ; MNS, pentes) ainsi que les données granulométriques relevées par le BRGM sur le terrain ;

- « l'analyse de risque » synthétise les informations précédentes et plus spécifiquement les données des Plans de Prévention des Risques d'inondation de la DDE et les Plan Locaux d'Urbanisme des communes concernées (projets d'aménagement).

Ce rapport dresse l'inventaire le plus exhaustif possible des études et données existantes et utiles au projet. En revanche, les volumes suivants peuvent contenir des références supplémentaires dès lors qu'il s'agit d'ouvrages théoriques ou de données d'ordre général n'ayant pas directement leur place dans cet inventaire. Par conséquent, chaque volume présentera sa propre liste bibliographique en fin d'ouvrage afin de faciliter sa lecture de manière individualisée.

Sommaire

1. Introduction **7**

2. Inventaire des données **11**

2.1. INVENTAIRE DES ETUDES ANTERIEURES 11

2.2. INVENTAIRE DES ETUDES ANTERIEURES DIVERSES 13

2.3. INVENTAIRE DES DONNEES DIVERSES 16

2.4. INVENTAIRE DES DONNEES TOPOGRAPHIQUES 17

2.5. VISITE DE TERRAIN 18

3. Revue thématique des données **19**

3.1. DONNEES UTILISEES POUR CARACTERISER L'EVOLUTION GEOMORPHOLOGIQUE 19

3.1.1. Les formations alluviales 19

3.1.2. L'évolution « en plan » du lit 20

3.1.3. La granulométrie 20

3.1.4. Les mouvements de terrain 20

3.2. DONNEES UTILISEES POUR L'ANALYSE PLUVIOMETRIQUE ET HYDROLOGIQUE 21

3.2.1. Les données pluviométriques 21

3.2.2. Les donnés hydrométriques 22

3.3. DONNEES UTILISEES POUR L'ESTIMATION DU TRANSPORT SOLIDE 23

3.3.1. Les données pour les calculs théoriques de transport 23

3.3.2. Les données pour l'analyse topographique 23

3.4. DONNEES UTILISEES POUR L'ANALYSE DE RISQUE 23

3.4.1. Les Plans de Prévention des Risques 23

3.4.2. Les projets d'aménagement 24

3.4.3. Le « profil de sécurité » 24

4. Conclusion **25**

Liste des illustrations

Illustration 1 – Localisation de la Rivière du Mât et de ses principaux affluents (fond de carte : IGN – 2003) 9
Illustration 2 – Inventaire des études antérieures relatives à la Rivière du Mât 13
Illustration 3 – Inventaire des études antérieures diverses 15
Illustration 4 – Inventaire des données diverses 16
Illustration 5 – Inventaire des données topographique existantes 17
Illustration 6- Utilisation des références par thématique de l'étude 19
Illustration 7 - Données pluviométriques et périodes d'observations collectées (Source : Météo France) 22
Illustration 8 - Principales données hydrométriques collectées 22

1. Introduction

Dans le cadre de la directive européenne relative à la gestion des inondations du 26 novembre 2007 et suite à la mission d'expertise de l'Inspection Générale de l'Environnement de juillet 2006 relative à la prévention des inondations à La Réunion, la DDE de la Réunion met en place un Plan de Gestion des Risques d'Inondation (PGRI) et souhaite disposer des éléments de **compréhension du fonctionnement hydrogéomorphologique des principales rivières à enjeux de La Réunion afin de pouvoir mettre en œuvre des solutions de gestion**.

Cette première étude, cofinancée par la DDE Réunion et la dotation de Service Public du BRGM, s'attache à la **Rivière du Mât** et ses principaux affluents (Fleurs Jaunes, Bras des Cavernes et Bras des Lianes). Basée sur les références méthodologiques connues[1] ainsi que sur les spécificités de l'île et du bassin versant concerné, cette première étude du PGRI revêt un caractère expérimental dont le but est de d'asseoir l'approche méthodologique pour les autres rivières à enjeux.

D'un linéaire de 36 km et drainant un bassin versant de 146 km², la Rivière du Mât est l'un des cours d'eau majeur de La Réunion (Illustration 1). Elle recueille notamment les eaux du cirque de Salazie et présente des risques d'inondation et d'érosion de berges importants, en particulier sur les 10 derniers kilomètres à l'aval.

L'étude est développée dans les 5 volumes suivants :

- **Volume 1/5 : Inventaire bibliographique** ;
- Volume 2/5 : Evolution géomorphologique ;
- Volume 3/5 : Analyse hydrologique et pluviométrique ;
- Volume 4/5 : Estimation du transport solide ;
- Volume 5/5 : Analyse de risque.

Le présent rapport fait le recueil puis l'analyse des données existantes et nécessaires aux différentes thématiques de l'étude.

---

[1] Approche hydrogéomorphologique pour la cartographie des zones inondables, méthodologie pour l'élaboration des PPRI, Directive Européenne pour la gestion des inondations,...

L'inventaire se veut le plus exhaustif possible. En revanche, les volumes suivants peuvent contenir des références supplémentaires dès lors qu'il s'agit d'ouvrages théoriques ou de données d'ordre général n'ayant pas directement leur place dans cet inventaire. Par conséquent, chaque volume présentera sa propre liste bibliographique en fin d'ouvrage afin de faciliter sa lecture de manière individualisée.

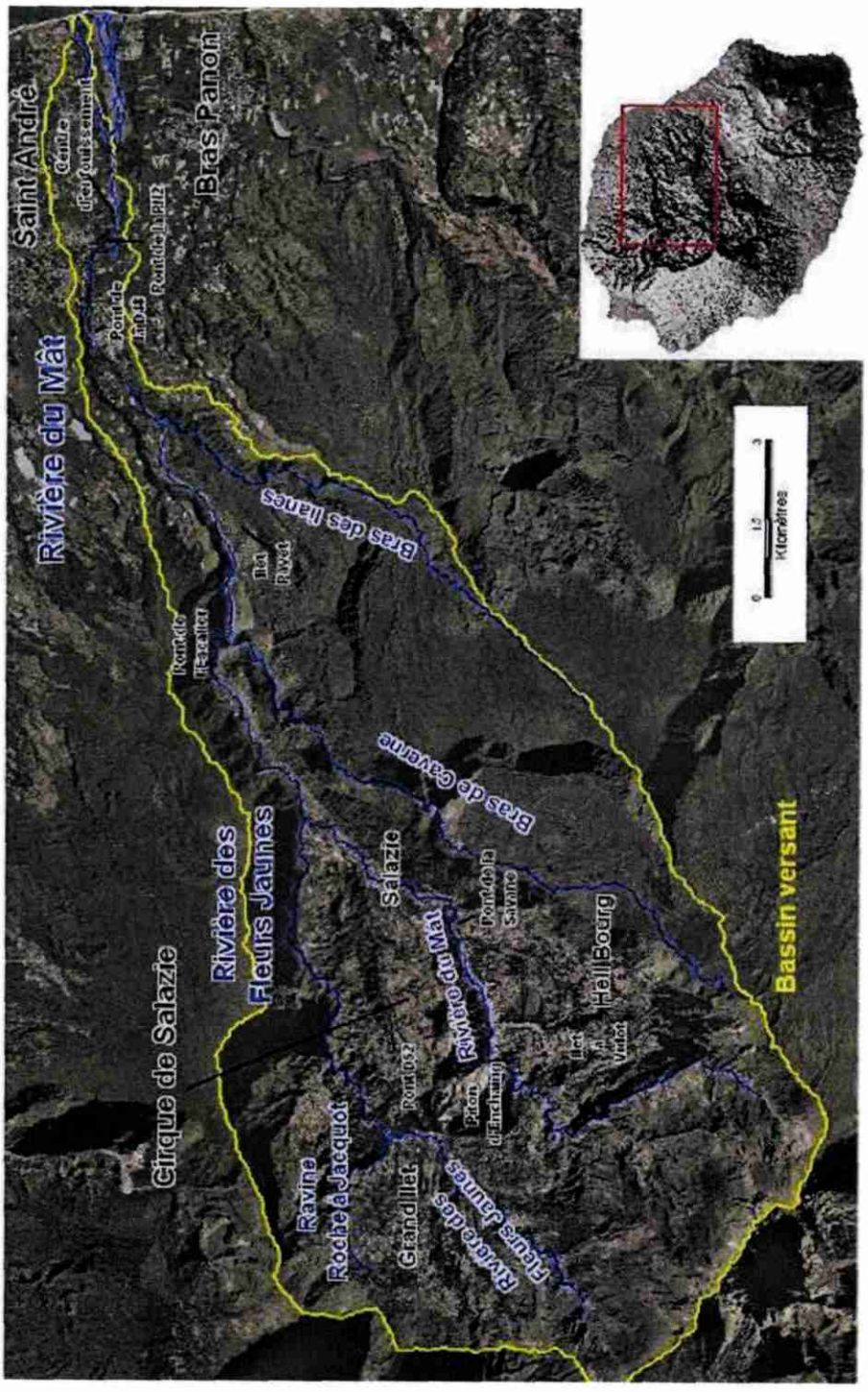


Illustration 1 – Localisation de la Rivière du Mât, de ses principaux affluents et de la toponymie citée dans le texte (fond de carte : IGN – 2003)

2. Inventaire des données

L'inventaire des informations existantes provient quasi-exclusivement des bases de données bibliographiques du BRGM et de SOGREAH.

Il se base notamment sur une synthèse bibliographique antérieure (2004) réalisée dans le cadre du programme « DYNTOR » à partir de la BD « SALAZIE MAT – JAUNES » de SOGREAH (cf. référence n°35 ci-dessous). La base de données du catalogue de la bibliothèque universitaire de La Réunion a également été consultée (3 références obtenues sur divers mots-clés).

Sa mise à jour début 2008 permet de présenter les références détaillées ci-dessous. Les numéros de couleur rouge distinguent les références ayant un intérêt fort et ayant été utilisées pour l'étude.

2.1. INVENTAIRE DES ETUDES ANTERIEURES

Sont réunis dans ce sous-chapitre les rapports existants portant sur le bassin versant de la Rivière du Mât et intéressant directement la problématique de l'étude (Illustration 2) :

Réf.	Intitulé	Auteurs	Maître d'ouvrage	Date
1	PPRi de Saint-André	SOGREAH	DDE	En cours
2	Etude de pertinence des travaux sur le secteur de Pelvoisin en rive gauche de la Rivière du Mât	SOGREAH	DDE	Janvier 2008
3	Rivière du Mât – Travaux d'urgence suite aux crues de février et mars 2006 – Propositions de principes généraux et de recommandations – Rapport complémentaire	SOGREAH	DDE	Mars 2007
4	Rivière du Mât – Travaux d'urgence suite aux crues de février et mars 2006 – Propositions de principes généraux et de recommandations -Rapport	SOGREAH	DDE	Septembre 2006
5	Projet DYNTOR - Caractéristiques géomorphologiques du lit de a Rivière du Mât entre le pont de l'Escalier et le littoral	BRGM	Conseil Général et Région Réunion	Mars 2006

6	Projet DYNTOR - Modélisation hydrologique globale pluie-débit des crues des ravines de La Réunion	BRGM	Conseil Général et Région Réunion	Mars 2006
7	Partie aval de la Rivière du Mât (de la côte au pont de la RN) – Visite suite aux crues du 17 au 19 février et du 3 au 6 mars 2006 – Compte rendu de la visite du 12 avril 2006	BRGM	DDE et DAF DE LA REUNION	2006
8	Programme de recherche sur l'érosion, les transports solides et la dynamique torrentielle des rivières de la Réunion – Bassin versant de la Rivière du Mât – Estimation des volumes fréquentiels de crue	SOGREAH	BRGM / Région Réunion / Département de la Réunion	2004
9	Programme de recherche sur l'érosion, les transports solides et la dynamique torrentielle des rivières de la Réunion – Etat d'équilibre, évolution du lit des cours d'eau	BRGM et ETRM	BRGM / Région Réunion / Département de la Réunion	2004
10	Evolution du trait de côte de la plaine de la rivière du Mât de 1950 à 1997	BRGM	Région Réunion	2001
11	Etude en vue des travaux de correction torrentielle à Grand Ilet	SOGREAH/SAGE	APSGI	2000
12	Création d'une carrière à ciel ouvert de matériaux alluvionnaires – Dossier de demande d'autorisation – Etude d'impact	SEGC – ACCORE CESER	SGCR	1999
13	Déviation de Bras-Panon – Doublement du pont sur la Rivière du Mât – Protection des murs d'entonnement contre les affouillements – Projet et spécifications techniques	SOGREAH	DDE / CDOA	1998
14	Protection de la rivière du Mât à Bras Panon	SOGREAH	Région Réunion	1998
15	Schéma d'extraction de la Rivière du Mât	LCHF / SOGREAH	DDE de la Réunion	1988
16	Originalités pluviométriques des gorges de la Rivière du Mât	Freddy Macé	Université de La Réunion	1998
17	Déviation de Bras Panon doublement du pont sur la rivière du Mât	SOGREAH	DDE	1997

	Analyse des ressources potentiellement renouvelables dans le lit des principales ravines	BRGM		1997
19	L'hydrologie à Salazie	Ange-Marie Rivière	Université de La Réunion	1996
20	Le problème des extractions de granulats dans le lit des cours d'eau à la Réunion : exemple de la Rivière du Mât	Héléna Pascal	Université de La Réunion	1996
21	Prolongement de l'ouvrage d'art sur la rivière Fleurs jaunes - Etudes hydrauliques	SOGREAH	SOGERLEG	1995
	Doublement du Pont de la RN2 sur la Rivière du Mât – Etude hydraulique	SOGREAH	Région Réunion	1994
	APD DCE Protection du pont du CD 52 sur la rivière Fleurs Jaunes	SOGREAH	Conseil Général	1994
	Monographie de la Rivière du Mât – Eléments d'hydrologie, d'érosion et de transports sédimentaires	LCHF	DDE DE LA REUNION	1984
25	Rivière du Mât -Protection des berges – Avant-Projet-Sommaire	SET-OI	COMMUNE DE SAINT-ANDRE	1981
26	Rivière du Mât - Mise hors d'eau - Zone INCb	SET-OI	BRAS PANON	1981
27	Etude hydraulique du franchissement de la Rivière du Mât	SOGREAH	DDE de la Réunion	1976

Illustration 2 – Inventaire des études antérieures relatives à la Rivière du Mât

2.2. INVENTAIRE DES ETUDES ANTERIEURES DIVERSES

Sont réunies dans ce sous-chapitre les études existantes diverses concernant le bassin versant de la Rivière du Mât mais n'ayant qu'un lien indirect avec l'étude (Illustration 3) :

Réf.	Intitulé	Auteurs	Maître d'ouvrage	Date
28	Travaux d'urgence destinés à prévenir un danger grave – Réalisation d'un merlon en rive droite de la Rivière du Mât	HOLCIM	ETAT	06 décembre 2007

29	Compte rendu à l'issue des travaux d'urgence réalisés dans la Rivière du Mât conformément au code de l'environnement	EMC2 Environnement	COMMUNE DE SAINT-ANDRE	23 novembre 2007
30	Affouillement des appuis des ponts de la RN1 sur la Rivière des Galets et la Rivière Saint-Etienne – Crues du cyclone Gamède fin février 2007 – Rapport du comité d'experts	CETE / CNR / SOGREAH / BRGM	DDE	27 juillet 2007
31	Cyclone Gamède – Février 2007 – Synthèse des crues de la saison cyclonique 2006 / 2007 (document en cours 06 mars 2007)	Office de l'Eau		39142
32	Schéma directeur des eaux pluviales – Phase 2	SAFEGE	COMMUNE DE SAINT-ANDRE	Avril 2006
33	Descriptif des crues de février et mars 2006	Office de l'Eau		2006
34	Programme de recherche sur l'érosion, les transports solides et la dynamique torrentielle des rivières de la Réunion – Phase 2 – Synthèse	BRGM	BRGM / Région Réunion / Département de la Réunion	2006
35	Programme de recherche sur l'érosion, les transports solides et la dynamique torrentielle des rivières de la Réunion – Phase 2 – Années 2005 – 2006 – Rapports volet 1	SOGREAH	BRGM / Région Réunion / Département de la Réunion	2006
36	Projet DYNTOR - Relevés topographiques et photogrammétriques sur la ravine de Patates à Durand : limites d'utilisation de la méthodologie d'exploitation des données	BRGM	BRGM / Région Réunion / Département de la Réunion	2006
37	Projet de recherche sur l'érosion, le transport solide, et la dynamique torrentielle des rivières de la Réunion - Synthèse de l'avancement	BRGM	BRGM / Région Réunion / Département de la Réunion	2004
38	Projet de recherche sur l'érosion, le transport solide, et la dynamique torrentielle des rivières de la Réunion Extractions de matériaux dans le lit des cours d'eau – Rapport BRGM/RP-53236-FR	BRGM	Département de la Réunion – Région Réunion - BRGM	2004
39	Programme de recherche sur l'érosion, les transports solides et la dynamique torrentielle des rivières de la Réunion – Synthèse bibliographique des connaissances disponibles	SOGREAH	BRGM / Région Réunion / Département de la Réunion	2004
40	Etude du schéma directeur des eaux pluviales de la commune de Saint-André – phase 1 – Identification et diagnostic	SAFEGE	COMMUNE SAINT-ANDRE / DAF	Août 2004
41	Projet MVTERRE - Inventaire des mouvements de terrain historiques à La Réunion	BRGM	Europe, DIREN, Conseil Général, Conseil Régional	Décembre 2003

42	Projet MVTERRE - Cartographie géologique du cirque de Salazie à l'échelle du 1/10 000	BRGM	Europe, DIREN, Conseil Général, Conseil Régional	Octobre 2003
43	Plan de Prévention des Risques Inondation de la commune de Bras Panon	SOGREAH	DDE de la Réunion	
44	Chemin de Mare à Martin - Réparation du ponceau sur la ravine Roche à Jacquot	SOGREAH	Commune de Salazie	1999
45	Rivière Fleurs Jaunes aménagements au niveau du pont du RD	SOGREAH	Conseil Général	1998
46	Revue de presse – Bras Panon dans la tourmente	DDE de la Réunion		1996 ?
47	Etude du cône alluvial de la Rivière du Mât - Reconnaissance géophysique par sondages électriques et gravimétrie	Horizons	Conseil Général	1994
48	Captage Mathurin - conception de la nouvelle prise d'eau	SOGREAH	Commune de Salazie	1992
49	Programme de recherche en eau 1986 - Etude de la nappe alluviale de la rivière du Mat		Commune de Saint André	1990
50	Programme de recherche en eau 1986 - Etude de la nappe alluviale de la rivière du Mat		Commune de Saint André	1989
51	Nappe alluviale de la rivière du Mat		Commune de Saint André	1989
52	Rivière du Mât - chemin départemental N°48 - Travaux confortatifs entre les PK 3.250 et 6.000	SOGREAH	DDE	1989
53	Rivière Fleurs Jaunes - Pont du CD 52	SOGREAH	Conseil Général	1988
54	Nouveau franchissement de la Rivière des Pluies par la RN2 – Etude sur modèle réduit au 1/85	SOGREAH	DDE de la Réunion	1983
55	Les risques géologiques dans les cirques de salazie et de Cilaos	BRGM	FIDOM et Département de La Réunion	1981
56	Etude de stabilité des berges de la Rivière du Mât bordant l'ilet des Bananiers (Commune de Salazie)	BRGM	Commune de Salazie et Directiion Départementale de l'Agriculture	1981
57	Déviation de Bras Panon doublement du pont sur la rivière du Mât	SOGREAH	Direction du Génie Rural de la Réunion	1966

Illustration 3 – Inventaire des études antérieures diverses

2.3. INVENTAIRE DES DONNEES DIVERSES

Sont réunies dans ce sous-chapitre les données diverses relatives au bassin versant de la Rivière du Mât et/ou utiles à l'étude (Illustration 4) :

Réf.	Intitulé	Auteurs	Maître d'ouvrage	Date
58	Plan Local d'Urbanisme de la commune de Bras Panon			
59	Plan Local d'Urbanisme de la commune de Salazie			
60	Plan Local d'Urbanisme de la commune de St André			
61	Cartographie des zones inondables, données issues des STPC	DDE/SEECL	DDE/SEECL	
62	Précipitations quotidiennes et horaires des stations de Bélouve, Bras-Panon, Hell Bourg et Mare à Vieille Place	Météo-France	Météo-France	2007
63	Données de débits et hauteurs d'eau instantanés des stations de "Rivière du Mât Barrage" ; "Rivière du Mât Escalier" ; "Bras des Lianes"	OLE	OLE	2007
64	Photographies aériennes obliques de la partie aval de la Rivière du Mât	BRGM		19 octobre 2007
65	Photographies aériennes obliques de la partie aval de la Rivière du Mât	COMMUNE DE SAINT-ANDRE		27 février 2007
66	Photographies aériennes obliques de la partie aval de la Rivière du Mât	SOGREAH		14 mars 2006
67	Photographies aériennes obliques de la partie aval de la Rivière du Mât	SOGREAH		22 février 2006
68	BD TOPO et orthophotographies	IGN	IGN	2003
69	BD TOPO, orthophotographies et Modèle numérique de terrain	IGN	IGN	1997
70	Photographies aériennes anciennes de La Réunion (tirages papiers)	IGN	IGN	1984
71	Levé photogrammétrique au 1/5000 à partir des photographies aériennes de 1978, mis à jour en 1984 et 1987	IGN Cabinets AUDRY et DEZAUBRIS (mise à jour)	DDE de la Réunion	1978 pour le lit de la Rivière du Mât
72	Carte géologique structurale du département de la Réunion au 1/50000 – feuilles n°1 (Saint-Denis) et n°2 (Saint-Benoît)	BRGM	BRGM	1974
73	Photographies aériennes anciennes de La Réunion (tirages papiers)	IGN	IGN	1966
74	Rivière du Mat - Reconnaissances mécaniques - Phase 2		Conseil Général	

Illustration 4 – Inventaire des données diverses

2.4. INVENTAIRE DES DONNEES TOPOGRAPHIQUES

Sont réunies dans ce sous-chapitre les données topographiques relatives au bassin versant de la Rivière du Mât et/ou utiles à l'étude (Illustration 45) :

Réf.	Intitulé	Auteurs	Maître d'ouvrage	Date
75	HOLCIM – Commune de Bras Panon – Rivière du Mât – Projet d'endiguement – Plan topographique au 1/500 (cotes locales)	Cabinet MECHY-BROYON	HOLCIM	07 Novembre 2007
76	HOLCIM – Commune de Bras Panon – Rivière du Mât – Relevé de la digue – Plan topographique au 1/500 (cotes locales)	Cabinet MECHY-BROYON	HOLCIM	Octobre 2007
77	Rivière du Mât – Restitution photogrammétrique en aval du pont de la RN2 – 1/2500	Cabinet AIGL	DDE / SEECL	Août 2007
78	Rivière du Mât – Orthophotographie – 1/2500	Cabinet AIGL	DDE / SEECL	Août 2007
79	Rivière du Mât – 50 profils en travers en aval de la RN2 établi par restitution photogrammétrique 2007 – 1/500 et 1/200	Cabinet AIGL	DDE/SEECL	Août 2007
80	HOLCIM – Commune de Bras Panon – Rivière du Mât – Plan de bornage et piquetage au 1/1000	Cabinet MECHY-BROYON	HOLCIM	26 mars 2007
81	Rivière du Mât – 50 Profils en travers 2006 en comparaison de la topographie de 2002	Cabinet AIGL	DDE - SEECL	Novembre 2006
82	Rivière du Mât – Restitution photogrammétrique – complément au sol partiel (dans le lit de la rivière) – 1/2000	Cabinet AIGL	DDE - SEECL	Octobre 2006
83	Rivière du Mât – Orthophotographie – 1/2000	Cabinet AIGL	DDE - SEECL	(prises de vue septembre 2006)
84	Rivière du Mât – Levé de 10 profils en travers	Cabinet AIGL	DDE - SEECL	2006
85	Rivière du Mât – Plan topographique au 1/2000 – Dossier 99190 – Plans 6468 – 6469 -6470	Cabinet TALIBART	DDE - SEECL	2003 (prises de vue septembre 2002)
86	Rivière du Mât – Plan topographique au 1/2000 – Dossier 99190 – Plans 3736-3737-3738	Cabinet TALIBART	DDE - SEECL	1999
87	Rivière du Mât – Levé de 5 profils en travers – Dossier 99190 – Plan 3739	Cabinet TALIBART	DDE - SEECL	1999
88	Déviation de Bras-Panon – Doublement du pont sur la Rivière du Mât – Plan topographique			1994
89	Rivière du Mât – Plan d'implantation et profils en travers (4) – Dossier n°DRE 479 01 93	Cabinet OIT	?	Septembre 1993
90	Franchissement de la Rivière du Mât – Profil en long (rive droite) et profils en travers	DDE de la Réunion	DDE de la Réunion	1976

Ilustration 5 – Inventaire des données topographique existantes

2.5. VISITE DE TERRAIN

Cette étude a fait l'objet d'une reconnaissance de terrain spécifique réalisée par l'équipe du BRGM sur 3 jours en **octobre 2007** afin :

- d'appréhender l'ensemble du bassin versant de la rivière grâce à une visite héliportée (photographies obliques – réf. 54)

- de reconnaître les ouvrages hydrauliques présents sur la rivière ;

- de faire des relevés lithologiques (cartographie) et sédimentologiques (blocométrie) dans la rivière.

3. Revue thématique des données

L'inventaire ci-dessus présente 90 références s'étalant sur la période de 1966 à 2008, ce qui indique la relative richesse de la documentation et des données sur la problématique.

Plus de la moitié (56 références) présente un intérêt et a été utilisée pour l'étude.

Le tableau suivant présente l'utilisation qui en est faite en regroupant les références en fonction des grandes thématiques abordées dans l'étude (Illustration 6) :

Volumes	Thématiques	Références
2/5	Evolution géomorphologique	2 ; 3 ; 4 ; 5 ; 15 ; 24 ; 34 ; 41 ; 42; 55 ; 64 ; 65 ; 68 ; 69 ; 73 ; 78 ; 83
3/5	Analyse pluviométrique et hydrologique	4 ; 6 ; 8 ; 11 ; 23 ; 24 ; 30 ; 31 ; 33 ; 34 ; 62 ; 63 ; 65
4/5	Estimation du transport solide	2 ; 3 ; 4 ; 5 ; 15 ; 18 ; 24 ; 34 ; 36 ; 38 ; 77 ; 79 ; 81 ; 82 ; 84 ; 85
5/5	Analyse de risque	1 ; 3 ; 4 ; 43 ; 46 ; 55 ; 58 ; 59 ; 60 ; 61

Illustration 6- Utilisation des références par thématique de l'étude

3.1. DONNEES UTILISEES POUR CARACTERISER L'EVOLUTION GEOMORPHOLOGIQUE

3.1.1. Les formations alluviales

Concernant la nature des formations superficielles présentes dans la rivière, la bibliographie comporte, tout d'abord, une carte géologique générale de La Réunion (Réf. 62) dont l'échelle n'est pas suffisamment précise pour nos besoins.

Il existe cependant dans les études antérieures (Programme DYNTOR) une carte des formations alluviales de la partie aval du Pont de l'Escalier au littoral (Réf. 6) qui doit être mise à jour puis complétée pour la partie amont.

La cartographie géologique du cirque de la Salazie réalisée dans le cadre du programme MVTERRE (Réf. 39) apporte une base intéressante sur la partie amont.

Ce travail cartographique, qui constitue un délivrable de l'étude, s'appuie en outre sur les photographies aériennes disponibles (Réf. 59 ; 60 ; 67) et les relevés de terrain.

3.1.2. L'évolution « en plan » du lit

L'évolution morphodynamique du lit (érosion des berges, divagation de l'écoulement,...) est traitée à partir des photographies aériennes. L'inventaire présente deux types de données :

- les tirages papiers des photographies anciennes de l'IGN (réf. 61 ; 62 ; 64) ;
- les orthophotographies numériques (réf. 59 ; 60 ; 74).

Les tirages papiers de 1966 à 1984 apportent des informations sur les états anciens de la rivière mais restent difficiles à cartographier sans orthorectification. Leur traitement se limite à une analyse par stéréoscopie (utilisation de couple stéréoscopique permettant d'appréhender le relief des photographies).

Les orthophotographies constituent un support plus aisé pour la cartographie en plan de l'évolution du lit car elles sont géoréférencées et utilisables sous SIG.

L'utilisation des photographies aériennes possède toutefois certaines limites liée à la présence d'ombres portées (zones d'ombres « bouchées ») ou d'effets de parallaxe (déformations de l'image liées au relief).

3.1.3. La granulométrie

Les quelques informations granulométriques existantes proviennent du programme DYNTOR (Réf. 6 et 10) mais elles sont largement insuffisantes pour nos besoins.

Ces informations ont donc été complétées par des mesures sur le terrain. Elles servent en particulier à faire le lien avec la thématique sur le « transport solide ».

3.1.4. Les mouvements de terrain

La bibliographie donne une base de départ du recensement des mouvements de terrains fournissant les apports sédimentaires en amont de la rivière, notamment à partir du programme MVTERRE qui fait l'inventaire des mouvements de terrain historique sur l'ensemble de La Réunion (Réf. 38).

Ces informations sont complétées à partir des photographies aériennes.

3.2. DONNEES UTILISEES POUR L'ANALYSE PLUVIOMETRIQUE ET HYDROLOGIQUE

3.2.1. Les données pluviométriques

Les données pluviométriques collectées ont été fournies par Météo France (Réf. 59). Le tableau suivant précise les postes, les périodes d'observations et le type de données collectées (Illustration 7). Il indique également la date de mise en service, les coordonnées (RGR92) et l'altitude de ces différentes stations.

Les données recueillies auprès de la Météo France comportent :

- les données journalières des cinq postes situés sur le bassin versant, ou à proximité immédiate, sur leurs périodes maximales d'observations. La durée disponible varie entre 55 ans (Hell-Bourg) et 11 ans (Salazie village). Ces données s'arrêtent au 28/02/2007.

- les données horaires du poste de Mare Vieille Place lors des épisodes pluvieux significatifs sur la période d'observation allant du 01/11/1997 au 28/02/2007.

Stations **Numéro**	**Période d'observation**	**Coordonnées X**	**Coordonnées Y**	**Altitude Z (m)**	**Pas de temps des données**	**Mois et/ou année incomplets ou manquants**
Belouve 974 21 260	09/1955 – 06/2007	55327	-21029	1 500	Journalier	Période antérieure à 1984, et 01/87, 10/93, 02/94, 07/01
Bras Panon 974 02 240	01/1993– 06/2007	55376	-20597	510	Journalier	-
Hell-Bourg 974 21 270	01/1952 – 06/2007	55317	-21032	970	Journalier	Antérieure à 1959, de 70 à 76 et 03/62, 02/67, 11/85, 11/93
Mare à Vieille Place 974 21 210	08/1989 – 06/2007	55310	-21010	880	Horaire, Journalier	-

Stations Numéro	Période d'observation	Coordonnées X	Coordonnées Y	Altitude Z (m)	Pas de temps des données	Mois et/ou année incomplets ou manquants
Salazie 974 21 240	01/1996 – 06/2007	55327	-21012	476	Horaire, journalier	1996 et 1997

Illustration 7 - Données pluviométriques et périodes d'observations collectées (Source : Météo France)

3.2.2. Les donnés hydrométriques

Les données hydrométriques collectées sont principalement les données figurant dans les annuaires réalisés par l'Office de l'Eau (Réf. 60) pour les années 1999 à 2006 (débit journalier, coordonnées des stations,...) ainsi que des données spécifiquement demandées dans le cadre de cette étude (débits et/ou hauteurs instantanés) concernant les stations du bassin versant de la rivière du Mât.

Ces stations, le type de données et leurs périodes d'observations sont indiquées dans le tableau suivant (Illustration 8).

Station N°	Type de données fournies	Période d'observation	Superficie B.V. (km²)	x	y	z
Rivière du Mât Barrage 22056	Hauteurs et débits instantanés en crue Débits moyens journaliers	07/1999-02/2007	145	171760	66690	110
Rivière du Mât Escalier 22078	Hauteur et débits instantanés, Débits moyens journaliers	1999- 2006	91	165412	64411	260
Bras des lianes 26008	Débits moyens journaliers Débits maxima instantanés	1999-2006 1989-2007	7.2	168735	61412	666

Illustration 8 - Principales données hydrométriques collectées .

Les données collectées, après contrôle et validation, sont utilisées afin de définir le maximum de paramètres hydrologiques au droit de ces bassins versants.

3.3. DONNEES UTILISEES POUR L'ESTIMATION DU TRANSPORT SOLIDE

3.3.1. Les données pour les calculs théoriques de transport

L'utilisation des formules théoriques (Meunier; Meyer Peter, Sogreah Lefort, Rickenman, ...) pour le calcul de la capacité maximale de transport par sections nécessite de connaître les paramètres suivants :

- le régime de transport : transport total (charriage et suspension) ou charriage seul ;
- la granulométrie des sédiments : des levés de terrain sont réalisés (cf. § 3.1.3.) ;
- la pente de l'écoulement : elle est calculée par sections en fonction du profil en long de la rivière. Le profil en long (Rivière du Mât et Fleurs Jaunes) est fourni pour tout le linéaire par AIGL à partir de traitements photogrammétriques (prise de vue en août 2007- Réf 68).

3.3.2. Les données pour l'analyse topographique

L'analyse de l'évolution de la topographie renseigne sur les variations de hauteur (en 2D sur les profils en long) et en volume (en 3D sur les modèles numériques de surface).

Les profils en long des fonds moyens et extrêmes de 2002 (Talibart) ; 2006 et 2007 (AIGL) sont utilisés à partir des valeurs des profils en travers (Réf. 70 ; 72) disponibles sur la partie aval de la rivière.

Les grilles 3D de 2002 ; 2006 et 2007 fournies par AIGL sont générées par photogrammétrie sur la partie aval de la rivière. Elles correspondent à des modèles numériques de surface (MNS) à différencier des modèles numérique de terrain (MNT) car ils représentent l'altitude de la surface de l'image (par exemple la canopée d'une formation végétale) et non systématiquement l'altitude du sol (Réf. 68 ; 73 ; 76).

3.4. DONNEES UTILISEES POUR L'ANALYSE DE RISQUE

3.4.1. Les Plans de Prévention des Risques

Les Plans de Prévention des Risques (PPR) sont mis en œuvre par la DDE. Ils fournissent la cartographie de l'aléa inondation ainsi que sur les enjeux qui y sont liés.

La DDE met à disposition les données suivantes :

- PPR de Bras-Panon (approuvé) : carte des zones inondables et règlement (Ref. 40) ;

- Etude préalable au PPR de St André : carte des zones inondables (Réf. 1) ;
- Etude STPC : carte des zones inondables pour Salazie (Réf. 58).

3.4.2. Les projets d'aménagement

Les projets d'aménagements peuvent être connus grâces au Plan Local d'Urbanisme (PLU) des communes concernées (Réf. 55 ; 56 ; 57). Ces plans sont mis à disposition par la DIREN.

3.4.3. Le « profil de sécurité »

On peut définir comme « profil de sécurité » le profil type du cours d'eau permettant d'empêcher les débordements en cas de crue. L'estimation du « profil de sécurité » est réalisée à partir de la synthèse des données précédentes, en particulier le résultat de l'analyse de l'évolution de la topographie mais aussi la morphodynamique à l'amont de la rivière, les évolutions en plan du lit et des berges et la confrontation de l'aléa inondation et des enjeux.

4. Conclusion

Basé sur deux sources bibliographiques principales (BD BRGM et SOGREAH) et une collecte propre au projet, l'inventaire montre que les études antérieures et les données existantes sur le bassin versant de la Rivière du Mât sont riches (90 références) et variées (rapports, orthophotographies, données topographiques, etc.) de 1966 et 2008.

Les informations utiles directement à l'étude sont également nombreuses (56 références) et intéressent les différentes thématiques abordées :

- « l'évolution géomorphologique » est basée sur la bibliographie existante (notamment les programmes DYNTOR et MVTERRE) mais surtout sur l'exploitation des photographies aériennes de l'IGN et de AIGL ;

- « l'analyse pluviométrique et hydrologique » s'appuie essentiellement sur les données de précipitations de Météo-France et les données de débits et hauteurs d'eau instantanés de l'Office de l'eau ;

- « l'estimation du transport solide » utilise tout particulièrement les données topographiques de AIGL et Talibart (profils en long ; MNS, pentes) ainsi que les données granulométriques relevées par le BRGM sur le terrain ;

- « l'analyse de risque » nécessite enfin, la synthèse des informations précédentes et plus spécifiquement les données des Plans de Prévention des Risques d'inondation de la DDE et les Plan Locaux d'Urbanisme des communes concernées (projets d'aménagement).

Ce rapport dresse l'inventaire le plus exhaustif possible des études et données existantes et utiles au projet. En revanche, les volumes suivants peuvent contenir des références supplémentaires dès lors qu'il s'agit d'ouvrages théoriques ou de données d'ordre général n'ayant pas directement leur place dans cet inventaire. Par conséquent, chaque volume présentera sa propre liste bibliographique en fin d'ouvrage afin de faciliter sa lecture de manière individualisée.

Centre scientifique et technique
3, avenue Claude-Guillemin
BP 36009
45060 – Orléans Cedex 2 – France
Tél. : 02 38 64 34 34

Service géologique régional Réunion
5, rue Ste Anne BP 906
97478 – St Denis Cedex
France
Tél. : 02 62 21 22 14

Document public

Etude hydrogéomorphologique de la Rivière du Mât et propositions de solutions de gestion

Volume 2/5 : Evolution géomorphologique

Rapport final

BRGM/RP-56364-FR
Mars 2008

Ressources, territoires et habitats
Énergie et climat
Développement durable
Prévention des risques
Infrastructures, transports et mer

Présent pour l'avenir

Liberté • Égalité • Fraternité
RÉPUBLIQUE FRANÇAISE

Géosciences pour une Terre durable
brgm

Document public

Etude hydrogémorphologique de la Rivière du Mât et propositions de gestion

Volume 2/5 : Evolution géomorphologique

Rapport final

BRGM/RP-56364-FR
Mars 2008

Étude réalisée dans le cadre des projets
de Service public du BRGM 2008 07RIS032

G. DELPONT et Y. DE LA TORRE ;
Avec la collaboration de
E. LUCAS et B. AUNAY

Vérificateur :	**Approbateur :**
Nom : M. GARCIN	Nom : JL NEDELLEC
Date :	Date :
Signature :	Signature :

En l'absence de signature, notamment pour les rapports diffusés en version numérique, l'original signé est disponible aux Archives du BRGM.

Le système de management de la qualité du BRGM est certifié AFAQ ISO 9001:2000.

Présent pour l'avenir

Liberté • Égalité • Fraternité
RÉPUBLIQUE FRANÇAISE

Géosciences pour une Terre durable
brgm

Mots clés : Rivière du Mât, Réunion, évolution morphologique, érosion, photo-interprétation, granulométrie.

En bibliographie, ce rapport sera cité de la façon suivante :

Delpont G. et De la Torre Y. (2008) - Evolution géomorphologique de la Rivière du Mât. Rapport final – Rapport BRGM n° 56364 – pp. 71 ; Illustration 28 ; ann. 3.

© BRGM, 2008, ce document ne peut être reproduit en totalité ou en partie sans l'autorisation expresse du BRGM.

Synthèse

Dans le cadre de la directive européenne relative à la gestion des inondations du 26 novembre 2007 et suite à la mission d'expertise de l'Inspection Générale de l'Environnement de juillet 2006 relative à la prévention des inondations à La Réunion, la DDE de la Réunion met en place un Plan de Gestion des Risques d'Inondation (PGRI) et souhaite disposer des éléments de **compréhension du fonctionnement hydrogéomorphologique des principales rivières à enjeux de La Réunion afin de pouvoir mettre en œuvre des solutions de gestion**.

Cette première étude, cofinancée par la DDE Réunion et la dotation de Service Public du BRGM, s'attache à la **Rivière du Mât** et ses principaux affluents (Fleurs Jaunes, Bras des Cavernes et Bras des Lianes). Basée sur les références méthodologiques connues ainsi que sur les spécificités de l'île et du bassin versant concerné, cette première étude du PGRI revêt un caractère expérimental dont le but est de d'asseoir l'approche méthodologique pour les autres rivières à enjeux.

D'un linéaire de 36 km et drainant un bassin versant de 146 km², la Rivière du Mât est l'un des cours d'eau majeur de La Réunion. Elle recueille notamment les eaux du cirque de Salazie et présente des risques d'inondation et d'érosion de berges importants, en particulier sur les 10 derniers kilomètres à l'aval.

L'étude est développée dans les 5 volumes suivants :

- Volume 1/5 : Synthèse bibliographique ;
- **Volume 2/5 : Evolution géomorphologique ;**
- Volume 3/5 : Analyse hydrologique et pluviométrique ;
- Volume 4/5 : Estimation du transport solide ;
- Volume 5/5 : Analyse de risque.

Le présent rapport présente les résultats du second volume de l'étude. Elle vise à analyser l'évolution géomorphologique du cours d'eau sur la base de l'interprétation multi-date de missions photographiques aériennes de l'IGN.

L'étude de ces photographies, prises entre 1966 et 2007, validée par des travaux de terrain, a permis d'approcher les principaux thèmes suivants :

- *l'évolution des différents tronçons morphologiques de la rivière* : tant au niveau du cirque que dans les gorges où la rivière est encaissée dans le substratum, l'évolution est relativement minime. Cette évolution est en revanche très forte au niveau du cône, soumis à de l'érosion intense et de fortes divagations,

- *le transport des matériaux* : ce transport semble se faire de façon relativement directe, du cirque vers le cône. Aucun site important d'accumulation intermédiaire n'a pu être localisé (seulement des zones stockages intermédiaires de faible épaisseur sédimentaire),

- *la zonéographie de la sensibilité à l'érosion du cirque de Salazie* : cette approche, d'une précision régionale, permet de localiser les sites qui paraissent les plus affectés par ce phénomène, à savoir, autour de Grand-Ilet et d'Hell-Bourg (mouvements de terrain de grande ampleur),

- *l'estimation du recul moyen, sur une trentaine d'années, des limites des plateaux sur lesquels sont installées ces localités* : un tel recul peut être évalué à environ 3 m/an,

- *le calcul du volume des matériaux produits par l'érosion des berges dans le cirque :* sur le seul site d'Hell-Bourg, le volume équivaut à 1 125 000 m3 entre 2003 et 2007.

Sommaire

1. Introduction 9

2. Contexte géomorphologique 11

2.1. GENERALITES 11

2.2. DEFINITION DES TRONÇONS ETUDIES 12

3. Evolution morphologique récente 15

3.1. GENERALITES SUR L'ANALYSE DES PHOTOGRAPHIES AERIENNES 15
3.1.1. Formations géologiques décrites 15
3.1.2. Mission photographies étudiées 16
3.1.3. Emprise de l'interprétation réalisée 16
3.1.4. Problèmes liés à l'utilisation des documents photographiques 17

3.2. RELATION ENTRE L'ETAT DU LIT DES RIVIERES ET LES CRUES 17

3.3. PARTIE AMONT 18
3.3.1. Tronçon 1 : Rivière des Fleurs Jaunes (illustration 3) 18
3.3.2. Tronçon 2 : Rivière du Mât amont 21

3.4. PARTIE INTERMEDIAIRE : TRONÇON 3 22

3.5. PARTIE AVAL 24
3.5.1. Tronçon 4 : du pont de la D48-1 au cône alluvial 24
3.5.2. Tronçon 5 : le cône alluvial actuel 25

4. Eléments d'analyse morphosédimentaire 36

4.1. GRANULOMETRIE 36
4.1.1. Principe de base 36
4.1.2. Echantillonnage réalisé 37

4.2. L'APPROVISIONNEMENT EN MATERIAUX SEDIMENTAIRES 40
4.2.1. Rappel sur la problématique de l'érosion 40
4.2.2. Cartographie de la sensibilité potentielle à l'érosion 44
4.2.3. Les sites majeurs d'érosion 47
4.2.4. Mesures ponctuelles d'érosion 50
4.2.5. Evaluation du volume annuel érodé 56

4.3. LES PERTES DE SEDIMENTS 58

5. Conclusion 59

6. Bibliographie 61

Liste des illustrations

Illustration 1 – Localisation de la Rivière du Mât, de ses principaux affluents et de la toponymie citée dans le texte (fond de carte : IGN – 2003) 10

Illustration 2 – Cône ancien (Fy^2) et cône actuel (Fz) de Rivière du Mât (Billard, 1974) 12

Illustration 3 – Profil en long (allure générale) de la Rivière du Mât et tronçons correspondants (source IGN 1997) 13

Illustration 4 – Segmentation de la rivière en 5 tronçons (en rouge) 14

Illustration 5 - Définition des corps alluviaux interprétés 16

Illustration 6 - Cartographie des formations alluviales de la Rivière du Mât 17

Illustration 7 - Evolution du tronçon 1, au niveau du site d'alluvionnement intermédiaire 20

Illustration 8 - Erosion régressive en limite nord de l'Ilet à Vidot 22

Illustration 9 – Exemple de stabilité morphologique d'ensemble du tronçon 3 23

Illustration 10 – Zone d'érosion principale du tronçon 3 24

Illustration 11 – Evolution du tronçon 4 entre 1966 et 2007 25

Illustration 12 - Alluvions récentes dans le cône actuel de la Rivière du Mât 26

Illustration 13 - Séquence de dépôts alluviaux du cône alluvial ancien à tendance chenalisante 27

Illustration 14: Evolution de la végétation dans l'extrémité orientale du cône 30

Illustration 15 - Recul des berges en zones concaves au sud du centre d'enfouissement 31

Illustration 16 - Evolution du lit de la Rivière du Mât au sud du centre d'enfouissement 32

Illustration 17 - Evolution du lit vif de la rivière à l'est du point de rebond en limite nord du cône alluvial 33

Illustration 18 - Erosion de la rive gauche du cône entre 1966 et 2007 34

Illustration 19 - Mesure de l'érosion de la rive gauche du cône entre 1997 et 2003 et entre 2003 et 2007 35

Illustration 20 – Analyse granulométrique d'un sédiment 37

Illustration 21 - Localisation des profils granulométriques et des points d'observation 38

Illustration 22 - Tableau des points d'observation et de mesure 39

Illustration 23 : Inventaire des mouvements de grande ampleur par bassin versant 43

Illustration 24 - Carte de sensibilité potentielle à l'érosion (étude de photographies aériennes) 46
Illustration 25 – Localisation des sites d'érosion intense dans le cirque (à gauche) et dans le cône (à droite) 48
Illustration 26 – Tableau de localisation des sites d'érosion majeurs visibles sur les photographies aériennes 49
Illustration 27- Erosion régressive au nord de l'Ilet à Vidot 51
Illustration 28 – Exemple de recul, au nord de Hell-Bourg 52
Illustration 29 - Evolution de la rive droite de la ravine de la Roche à Jacquot (Nord de Grand-Ilet) 53
Illustration 30 - Avancée des ravines entre 1978 et 1984 54
Illustration 31 – Vitesses de recul sur les sites d'érosion régressive 55
Illustration 32 – Polygones pris en compte pour l'évaluation des volumes érodés 57
Illustration 33 - Exemple de flou lié à l'orthocorrection des photographies 67
Illustration 34 - Divagation du lit vif signalé par le déplacement de la granulométrie 75
Illustration 35 - Repérage de 3 niveaux de dépôts dans le défilé de la Rivière du Mât en aval du pont de Salazie (altitude croissante : jaune, marron) 76
Illustration 36 - Répartition de la taille des blocs au sein de la ravine de la Roche à Jacquot 79

Liste des annexes

Annexe 1 Cartographie des formations alluviales à l'échelle du 1/25 000 63
Annexe 2 Utilisation des photographies aériennes : limites de la méthode 65
Annexe 3 Description sommaire des sites de mesure et d'observation de la granulométrie 71

1. Introduction

Dans le cadre de la directive européenne relative à la gestion des inondations du 26 novembre 2007 et suite à la mission d'expertise de l'Inspection Générale de l'Environnement de juillet 2006 relative à la prévention des inondations à La Réunion, la DDE de la Réunion met en place un Plan de Gestion des Risques d'Inondation (PGRI) et souhaite disposer des éléments de **compréhension du fonctionnement hydrogéomorphologique des principales rivières à enjeux de La Réunion afin de pouvoir mettre en œuvre des solutions de gestion**.

Cette première étude, cofinancée par la DDE Réunion et la dotation de Service Public du BRGM, s'attache à la **Rivière du Mât** et ses principaux affluents (Fleurs Jaunes, Bras des Cavernes et Bras des Lianes). Basée sur les références méthodologiques connues[1] ainsi que sur les spécificités de l'île et du bassin versant concerné, cette première étude du PGRI revêt un caractère expérimental dont le but est de d'asseoir l'approche méthodologique pour les autres rivières à enjeux.

D'un linéaire de 36 km et drainant un bassin versant de 146 km², la Rivière du Mât est l'un des cours d'eau majeur de La Réunion (Illustration 1). Elle recueille notamment les eaux du cirque de Salazie et présente des risques d'inondation et d'érosion de berges importants, en particulier sur les 10 derniers kilomètres à l'aval.

L'étude est développée dans les 5 volumes suivants :

- Volume 1/5 : Synthèse bibliographique ;
- **Volume 2/5 : Evolution géomorphologique ;**
- Volume 3/5 : Analyse hydrologique et pluviométrique ;
- Volume 4/5 : Estimation du transport solide ;
- Volume 5/5 : Analyse de risque.

Le présent rapport présente les résultats du second volume de l'étude. Il développe une approche géomorphologique de l'évolution du cours d'eau basée sur l'utilisation des missions photographiques disponibles depuis 1966 jusqu'à 2007. Il vise à caractériser les modifications morphologiques sur toute la longueur du cours d'eau et à préciser les principaux sites de production de matériaux dans le cirque de Salazie.

[1] Approche hydrogéomorphologique pour la cartographie des zones inondables, méthodologie pour l'élaboration des PPRI, Directive Européenne pour la gestion des inondations,...

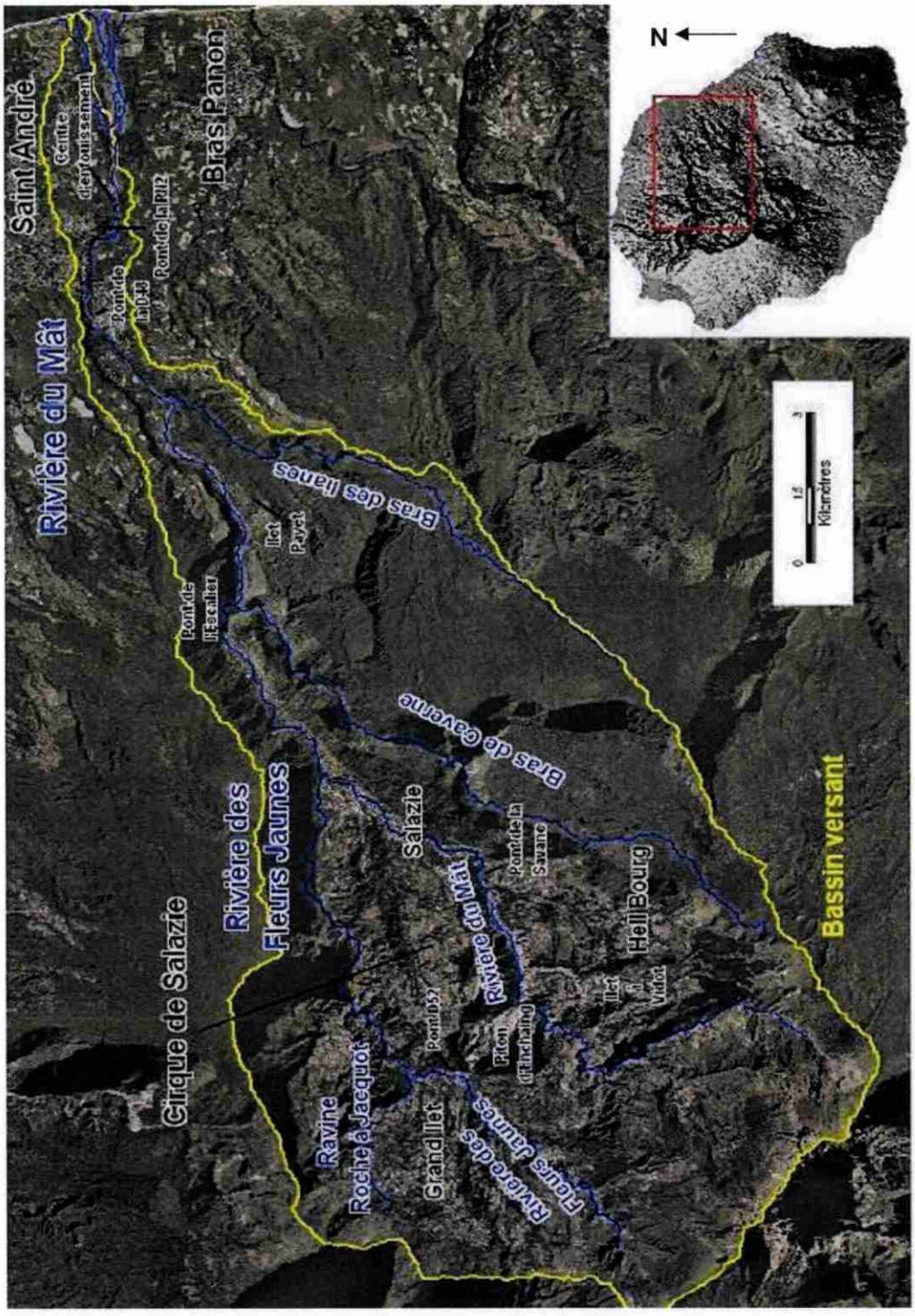


Illustration 1 – Localisation de la Rivière du Mât, de ses principaux affluents et de la toponymie citée dans le texte (fond de carte : IGN – 2003)

2. Contexte géomorphologique

2.1. GENERALITES

L'organisation générale de la Rivière du Mât se fait selon le schéma suivant :

- bassin de réception en amont (le cirque de Salazie) qui reçoit les précipitations et les concentre vers l'aval, avec les produits de l'érosion au sens large,

- gorges plus où moins encaissées où se réalise le transfert de l'eau et des sédiments,

- cône alluvial, où s'épandent les matériaux solides provenant de l'érosion.

La Rivière du Mât prend sa source dans les hauts du cirque de Salazie et présente une morphologie de torrent souvent encaissé, hormis dans certains sites privilégiés, comme en aval de Hell-Bourg et de Grand-Ilet, pour la Rivière des Fleurs Jaunes, où peuvent être observées des zones élargies d'alluvionnement intermédiaire. En aval de ces zones d'alluvionnement et surtout en aval de la confluence de la Rivière du Mât avec la Rivière des Fleurs Jaunes (qui sera appelée confluence dans la suite du rapport), la Rivière du Mât s'encaisse dans les formations basaltiques pour former une gorge qui ne présente que localement du matériel alluvionnaire. Entre sa confluence avec le Bras de Caverne et le Bras des Lianes, le lit s'élargit quelque peu et des dépôts intermédiaires se produisent le long du cours.

A débouché des gorges, c'est-à-dire en aval du pont de la route à « 4 voies », les matériaux s'étalent et s'organisent selon un cône qui fut très vaste à sa mise en place et qui sera appelé « cône alluvial ancien », entre Cambuston et Bras-Panon. Le cône actuel (ultérieurement « cône »), beaucoup plus réduit, évolue entre des limites naturelles, qui correspondent à des berges de 5 à 10 m de haut que la rivière a creusées dans ses propres sédiments (le cône alluvial ancien). La largeur du cône évolue de quelques 100 m, au sud du centre d'enfouissement à plus de 1 000 m en limite littorale.

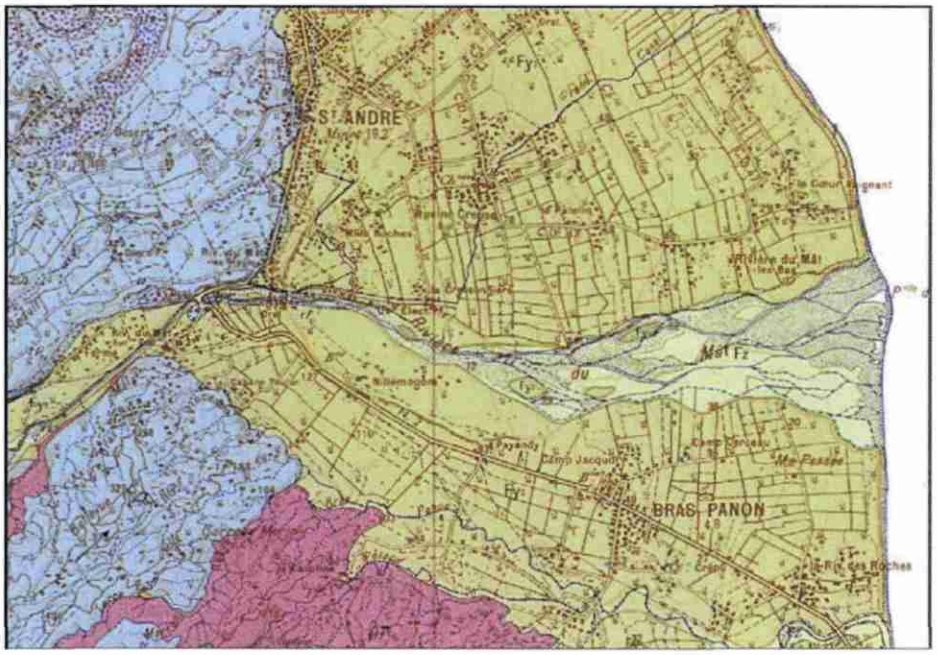


Illustration 2 – Cône ancien (Fy²) et cône actuel (Fz) de Rivière du Mât (Billard, 1974)

2.2. DEFINITION DES TRONÇONS ETUDIES

L'étude de cette rivière s'est attachée à décrire l'évolution du cours selon des tronçons qui ont été définis en fonction de limites morphologiques naturelles ou aménagées (seuils en particuliers - Illustration 3).

Ainsi ont été considérés les tronçons suivants (Illustration 4) :

- Le tronçon 1 qui correspond à la Rivière des Fleurs Jaunes en amont de la confluence ;

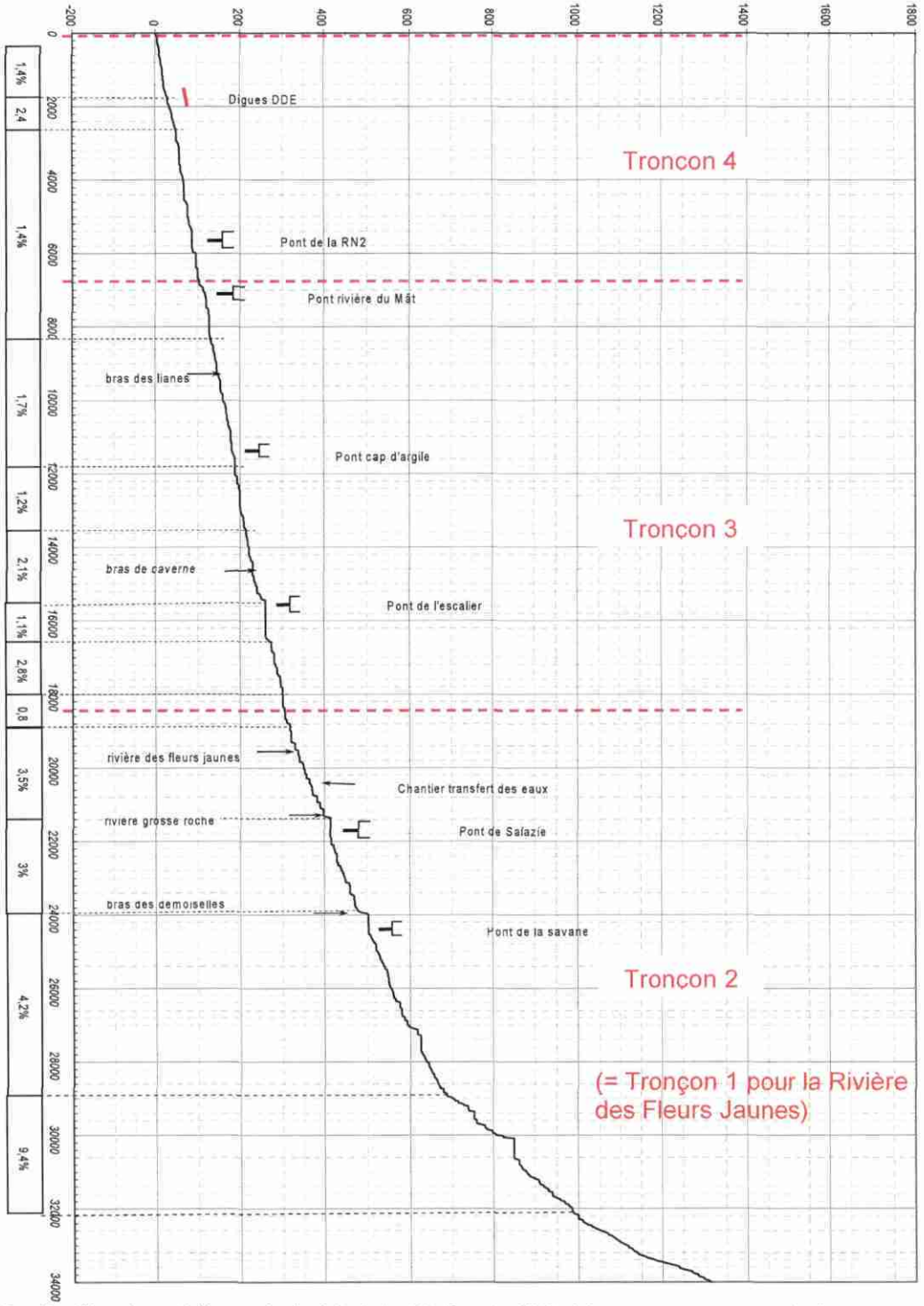


Illustration 3 – Profil en long (allure générale) de la Rivière du Mât et tronçons correspondants (source IGN 1997)

- Le tronçon 2 qui correspond à la Rivière du Mât en amont de cette même confluence ;

Ces deux premiers tronçons décrivent le comportement des rivières dans le cirque.

- Le tronçon 3 qui s'étend de la confluence au barrage localisé sous le pont de la D48-1, au niveau du village de Rivière-du-Mât. Ce tronçon correspond aux gorges ;

- Le tronçon 4 qui va du barrage de la D48-1 à la limite du cône. Il correspond à un parcours intermédiaire, forcé par le barrage-seuil, entre les gorges et le cône ;

- Le tronçon 5, qui correspond au cône, limité, à l'ouest, par le double méandre situé au sud du centre d'enfouissement, en aval du pont de la « 4 voies », et, à l'est, par la ligne littorale.

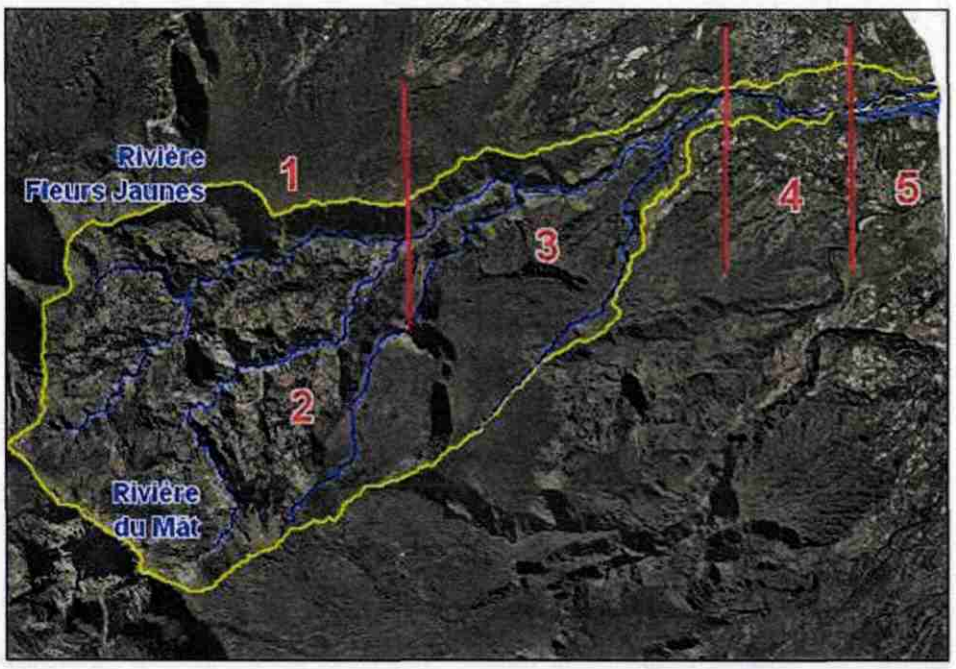


Illustration 4 – Segmentation de la rivière en 5 tronçons (en rouge)

Les affluents Bras des Lianes et Bras de Caverne n'ont pas fait l'objet d'analyse spécifique dans ce volume du fait de leur faible rôle dans l'évolution morphologique du lit de la Rivière du Mât (peu de matériel alluvionnaire dans leur lit). Ils ont toutefois été pris en compte dans le volume 2 de l'étude, leur rôle étant important dans le calcul des débits liquides.

3. Evolution morphologique récente

3.1. GENERALITES SUR L'ANALYSE DES PHOTOGRAPHIES AERIENNES

3.1.1. Formations géologiques décrites

L'étude des photographies permet de décrire les éléments suivants, schématisés sur l'

Illustration 5 :

- les alluvions actuelles : ces formations, qui présentent une forte variabilité spatiale, correspondent aux éléments les plus récents au moment de la prise de vue, c'est à dire déposés par la rivière lors du dernier épisode de crue. Elles sont composées principalement de sables, graviers, galets et blocs, le plus souvent roulés. Ces éléments ne présentent pas d'organisation notable,

- les alluvions subactuelles : ces formations ont la même composition que les précédentes mais ont été déposées lors d'une crue antérieure. Elles sont souvent couvertes de végétation et dominent les précédentes de 2 à 3 mètres. Leur variabilité spatiale est pratiquement aussi grande que celle des alluvions actuelles,

- les terrasses : ces formations semblent avoir une double signification :

  - dans les berges de la rivière, elles correspondent à un épisode ancien de dépôt, contemporain du cône alluvial ancien à l'issue duquel la rivière à commencé à s'enfoncer dans ses propres alluvions,

  - dans le cône, elles traduisent un premier épisode d'enfoncement dans le cône alluvial ancien. Les structures observées correspondent à des paléo-chenaux, topographiquement situés entre le niveau du cône alluvial ancien et les alluvions subactuelles. Plusieurs niveaux de terrasses peuvent être observés et seuls les plus récents (2 et 3) ont été pris en compte dans l'interprétation du fait de leur altitude moindre par rapport aux alluvions subactuelles et actuelles, du fait qu'il est parfois difficile de les distinguer entre elles et du fait qu'elles sont localement affectées par des reprises d'érosion.

  Leur propriété commune est de présenter une relative stabilité pendant l'intervalle de temps permis par les documents disponibles (1966-2007).

- le substratum : cette formation est constituée soit de basalte en place, le plus souvent, soit, plus rarement, de coulées boueuses indurées de type lahars. Les photographies ne permettent pas d'assurer une différenciation entre ces deux types de formation.

Illustration 5 - Définition des corps alluviaux interprétés

3.1.2. Mission photographies étudiées

La description cartographique de la Rivière du Mât dans son ensemble a été réalisée sur les orthophotographies de 1997 et 2003 de l'IGN et de 2007 de AIGL, pour l'ensemble du cours, du cône à la source, à l'exception, pour 2007, des villages de Hell-Bourg et Grand-Ilet. Ces documents ont été étudiés en mode monoscopique, la perception du relief étant basée sur les effets d'ombre.

Les autres missions photographiques disponibles (IGN), 1966, 1978 et 1984, ont été étudiées en mode stéréoscopique mais il n'en a pas été extrait de document cartographique. Elles ont été prises en compte en appui des précédentes, en particulier pour aider à la perception de l'évolution du cours d'eau à plus long terme. Dans le rapport, cette information est valorisée au niveau de séries d'images scannées décrivant le phénomène étudié.

3.1.3. Emprise de l'interprétation réalisée

L'interprétation du cours de la Rivière du Mât et de ses affluents a été réalisée sur toutes les portions qui étaient visibles, à savoir hors zone de défilé et d'ombre, et qui montraient une présence notable d'alluvions. L'ensemble de cette cartographie est

présentée sur l'Illustration 6 sur fond des orthophotographies de 2003 et sera détaillée et décrite dans les paragraphes suivants.

En annexe 1, hors texte, ce document est présenté à l'échelle du 1/15 000.

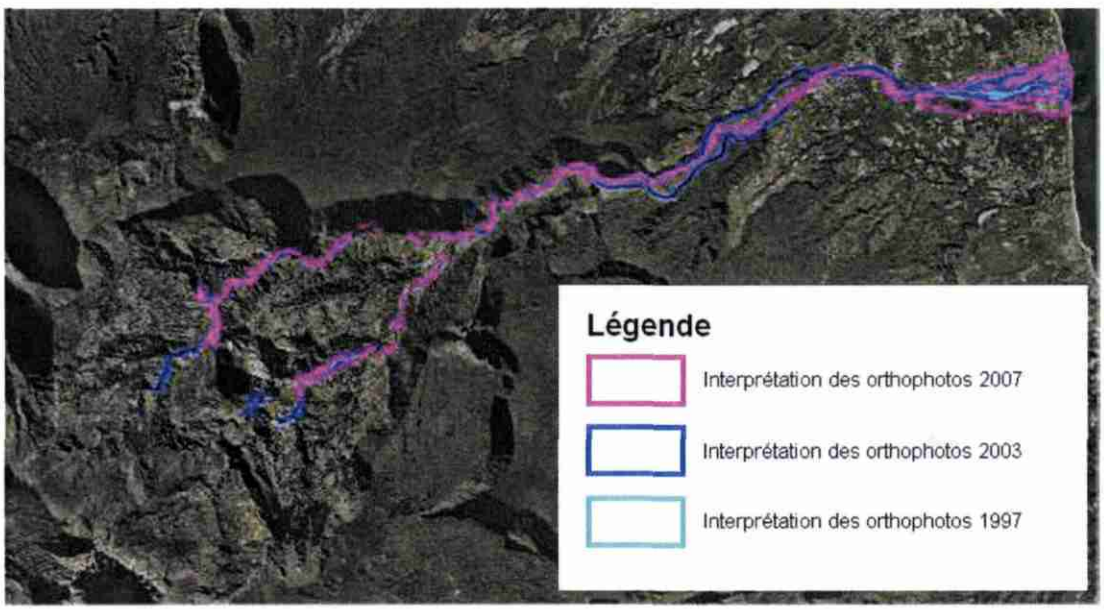


Illustration 6 - Cartographie des formations alluviales de la Rivière du Mât

3.1.4. Problèmes liés à l'utilisation des documents photographiques

Ces problèmes sont détaillés en annexe 2 pour ne pas surcharger le rapport mais il est souhaitable de les connaître pour pouvoir apprécier les limites de l'étude.

Pour résumer l'interprétation des documents et la précision des informations qui peuvent en être extraites est principalement dépendante de 3 principaux facteurs :

- le mode d'observation : stéréoscopique ou monoscopique,

- la géométrie et la résolution des documents (pour les orthophotographies),

- l'altitude et l'heure de prise de vue.

3.2. RELATION ENTRE L'ETAT DU LIT DES RIVIERES ET LES CRUES

La recherche d'une relation entre l'état du lit et les précipitations n'est pas simple dans la mesure où les photographies sont prises à intervalle irrégulier (4 ans pour les missions les plus resserrées dans le temps et jusqu'à 13 pour les plus lâches). Le

résultat observé intègre donc tous les évènements climatiques qui se sont produits dans l'intervalle considéré.

Les clichés de 1966 font suite au cyclone Denise (Fév. 1966) qui a connu des pluies diluviennes sur les hauteurs (1825 mm à Foc-Foc).

La première campagne disponible post-Hyacinthe date de 1984, ce qui laisse un intervalle suffisant pour altérer les cicatrices de l'évènement.

La campagne de 1997 témoigne d'une période antérieure relativement « calme ». Cette année là a été précédée par 4 années au cours desquelles les débits de pointe ont été inférieurs à 750 m^3/s. Les crues faibles à moyennes ont ainsi pu déplacer les sédiments les plus fins, sans détruire les dépôts alluviaux déjà en place et laissant ainsi croître la végétation. Un tel phénomène est observé sur la totalité du cours des rivières, jusque dans le cirque.

Les photographies de 2003 ont été prise à la suite du cyclone Dina (2002) qui a produit un débit de pointe de 1060 m^3/s. Un tel débit a sans doute été suffisant pour balayer les unités alluviales végétalisées, relativement clairsemées sur ces documents.

Les photographies de 2007 (août) ont, à leur tour, été enregistrées à la suite des cyclones Diwa (mars 2006) et Gamède (février 2007) ayant provoqué un débit de pointe de, respectivement, 1464 et 1020 m^3/s. Ces dernières photographies ne montrent que très peu d'unités végétalisées.

3.3. PARTIE AMONT

3.3.1. Tronçon 1 : Rivière des Fleurs Jaunes (illustration 3)

Le tronçon 1 correspond à la Rivière des Fleurs Jaunes en amont de la confluence.

En amont proche de la confluence, la partie très encaissée dans le substratum ne montre pas d'évolution notable entre 1966 et 2007. Les observations de terrain permettent de constater qu'il n'y a globalement que peu de matériel alluvial stocké dans le défilé, même s'il est peut être plus abondant que pour la Rivière du Mât et si l'augmentation des alluvions est plus progressive vers l'amont, jusqu'à la confluence avec la ravine de la Roche à Jacquot.

En amont de cette dernière confluence, un élargissement de la vallée laisse voir une zone d'alluvionnement d'une cinquantaine de mètres de large, en moyenne, et de quelques 1 000 m de long. Cette zone correspond à un site de stockage intermédiaire dont l'ampleur n'est peut être qu'apparente dans la mesure où, au niveau du pont, affleure le substratum basaltique, sous forme de sills injectés dans les formations volcaniques. Il est ainsi difficile d'augurer d'un quelconque surcreusement. La morphologie en grand de cet ensemble ne varie pas entre 1966 et 2007. Dans le détail, l'organisation des alluvions est assez perturbée, entre les deux dates, probablement à cause de l'activation de glissements en provenance du piton d'Enchaing, puis, actuellement, à rebours, à cause d'un déblaiement anthropique.

La comparaison des photographies de l'illustration 6 permet ainsi de constater l'évolution suivante :

- en 1966, le lit de la rivière est recouvert d'alluvions récentes uniformément répartis sur toute sa largeur et, au niveau du pont actuel, il semble que le substratum basaltique soit visible. Il est à noter que le cours d'eau tend à couler en rive droite en souscavant la berge, au pied du Piton d'Enchaing,

- en 1978, le lit de la rivière voit se produire plusieurs modifications. La première est liée à la présence d'alluvions subactuelles plus ou moins végétalisées. La seconde est que ces dernières sont situées en rive droite, où une accumulation d'alluvions remplace le souscavage. Cette modification nette pourrait être imputable aux travaux probables d'enrochement liés à la construction du pont qui paraît récent sur les photographies,

- en 1984, la rivière a le même aspect qu'en 1978, si ce n'est que l'on observe, en rive droite, 3 surfaces d'alluvionnement superposées au lieu de 2 et que les surfaces les plus hautes ne sont pas végétalisées. L'ensemble donne l'impression d'une augmentation récente de la charge alluviale. Ceci est en accord avec les observations faites ultérieurement quant à la présence, dans toute cette zone, de nombreuses griffes d'érosions régressives sur les photographies prises à cette date. Ces observations pourraient correspondre au passage du cyclone Hyacinthe en 1980,

- en 1997, le lit de la rivière tend à prendre son aspect actuel avec des alluvions subactuelles plus ou moins végétalisées en rive droite et le lit vif en rive gauche. Il paraît important de noter l'apparition d'un cône de déjection, au pied du Piton d'Enchaing, cône qui atteint l'axe du lit majeur de la rivière, pour une surface totale d'environ 7 000 m², et indique une instabilité de la zone du Piton,

- en 2003, le changement le plus important vient de la forte progression du cône de déjection, probablement due au passage de Dina en 2002, qui a presque comblé le lit de la rivière à l'aplomb du piton d'Enchaing. Il atteint plus de 115 m de large pour une surface de près de 25 000 m² et est lié à un important glissement de terrain qui a affecté le Piton,

- en 2007, le cône précédent a fortement reculé. Toutefois, l'extraction anthropique des matériaux empêche de faire la part de l'action du cours d'eau dans ce recul.

Le matériel visible dans ce site provient des zones d'érosion qui se développent aux alentours du village de Grand-Ilet où, tant au nord, qu'à l'est et au sud, elles présentent des traces d'activité indéniable, localement mesurable. Cette activité semble toutefois faiblir vers l'amont, à l'approche des remparts.

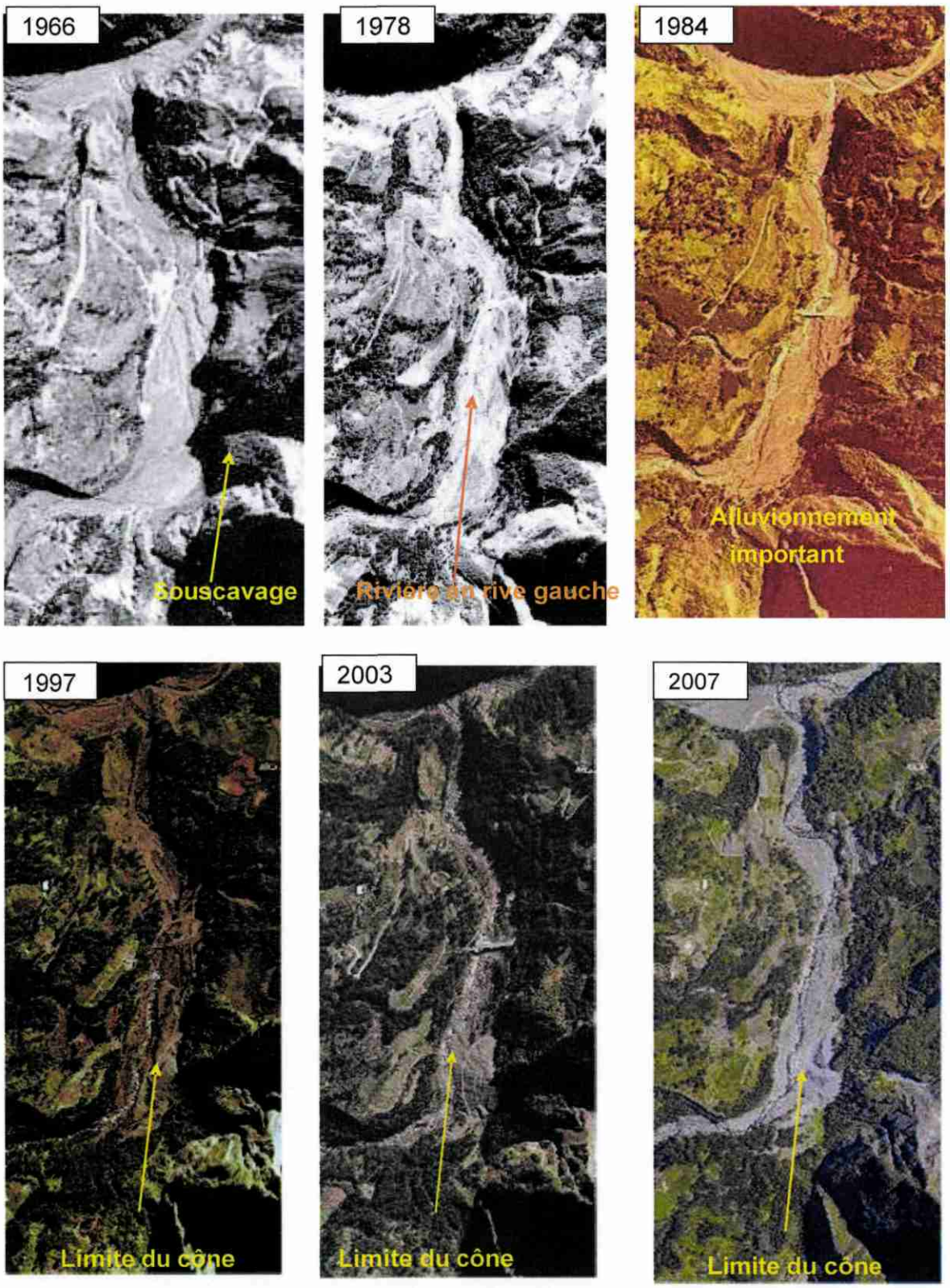


Illustration 7 - Evolution du tronçon 1, au niveau du site d'alluvionnement intermédiaire

3.3.2. Tronçon 2 : Rivière du Mât amont

Le tronçon 2 (illustration 3) correspond à la Rivière du Mât en amont de sa confluence avec la Rivière des Fleurs Jaunes.

La partie très encaissée dans le substratum, au niveau du village de Salazie, ne montre aucune évolution entre 1966 et 2007. Les observations de terrain montrent qu'il n'y a globalement que peu de matériel alluvial stocké dans le défilé qui caractérise ce secteur, même si, depuis le pont de Salazie, vers l'aval, peuvent être observés des témoins de 3 niveaux de dépôts successifs, chacun séparés de 2 à 3 mètres d'altitude.

Entre Salazie et le pont de la savane, seules les orthophotographies de 2003 et 2007 permettent de distinguer ça et là quelques unités d'alluvions et de substratum. Toutefois, compte tenu de l'incertitude liée aux effets d'ombre et à la faible extension de ces unités, il est impossible de risquer une quelconque comparaison temporelle.

A 350 m en amont du pont de la Savane, le défilé s'élargit et des dépôts alluviaux peuvent être observés sur 150 m de large et 1600 m de long. Cette zone semble correspondre à un site de stockage intermédiaire. Son ampleur n'est toutefois qu'apparente dans la mesure où le substratum basaltique est visible ponctuellement sous les alluvions. Il est ainsi difficile d'augurer d'un quelconque surcreusement.

Ce site de stockage ne présente pas de modification particulière de sa morphologie, hormis les divagations relatives des unités d'alluvions subactuelles et récentes. Elle pourra toutefois être momentanément modifiée au gré des activités cycloniques, de la dynamique des glissements et des processus d'érosion liés à ces mêmes glissements.

Les principales variations entre ces deux dates sont observées au niveau de ce site et en amont et sont en fait liées aux phénomènes d'érosion qui affectent les versants de la rivière et des torrents affluents. Ces phénomènes seront étudiés plus en détail ultérieurement mais il est possible de constater leur impact sur les cours d'eau. L'exemple le plus spectaculaire est localisé au nord de l'Ilet à Vidot (Illustration 8) où la surface d'érosion qui porte les aménagements, a été coupée en deux par une érosion régressive matérialisée par un talweg. Cette érosion a occasionné un recul de la bordure de la surface d'érosion de l'ordre de 150 m, soit environ 4 m/an. Cette action érosive a alimenté l'alluvionnement dans la rivière, sans toutefois en modifier de façon notable la morphologie des berges.

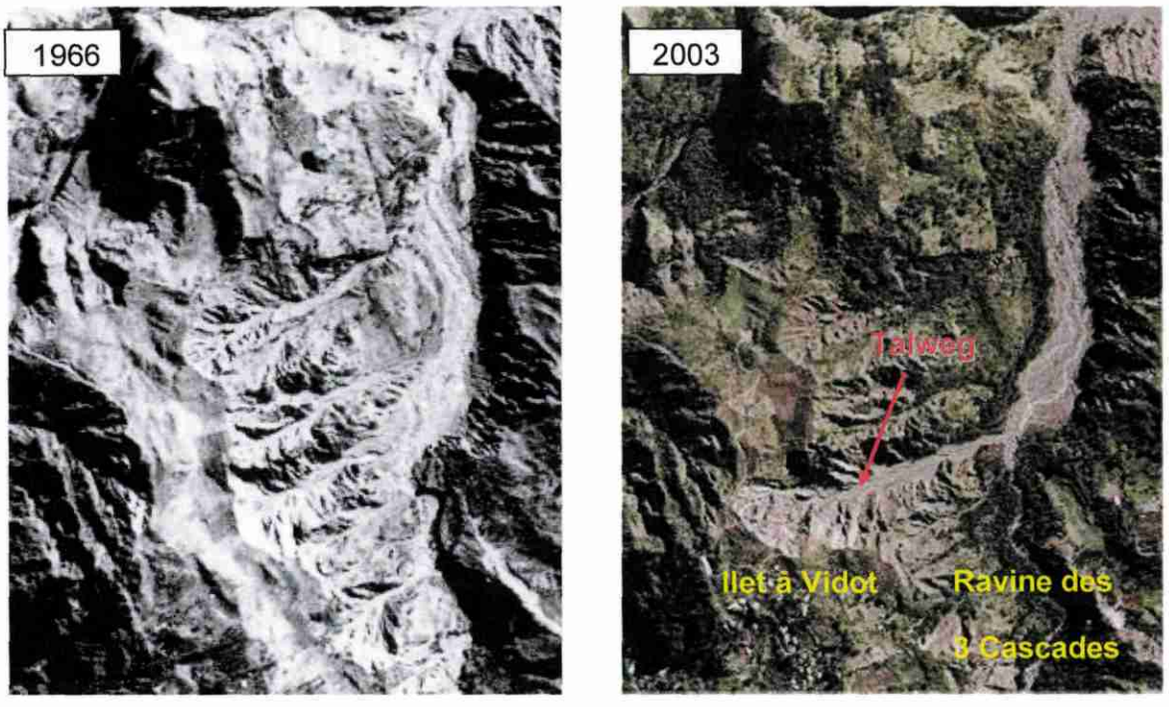


Illustration 8 - Erosion régressive en limite nord de l'Ilet à Vidot

L'examen des années 1978 et 1984 ne montre pas d'éléments nouveaux concernant l'évolution des cours d'eau et l'année 1997 montre une forte importance des alluvions subactuelles comme cela a été évoqué lors de l'étude du cône.

Enfin, il peut être noté une revégétalisation d'une grande partie de ce site, entre 1966 et 2003, comme en témoigne sur l'illustration précédente la ravine des 3 Cascades, angle SE de la photographie.

3.4. PARTIE INTERMEDIAIRE : TRONÇON 3

Ce tronçon de rivière (illustration 3) est limité en amont par la confluence entre la Rivière du Mât et la Rivière des Fleurs Jaunes et, en aval, par le barrage-seuil du pont de la D48-1.

La comparaison des photographies de 1966, en stéréoscopie, et des orthophotographies de 2007 montre que la morphologie générale s'y retrouve quasiment à l'identique.

Localement toutefois, en particulier entre le pont de la D48 en aval et la passerelle qui mène à l'Ilet Payet en amont (Illustration 8), un examen plus détaillée de la zone la plus large du chenal montre que les positions des alluvions actuelles et anciennes, au sein de ce lit mineur sont déplacées, même si la position des terrasses et du lit mineur sont les mêmes.

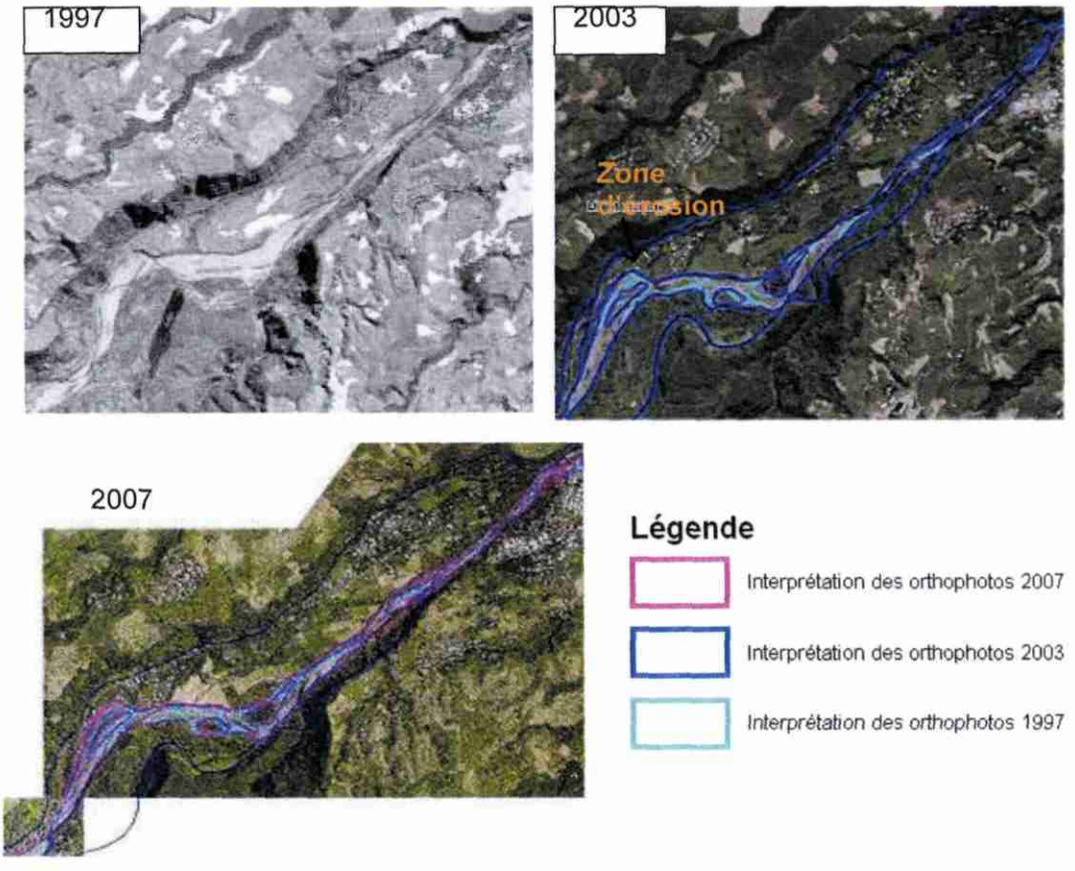


Illustration 9 – Exemple de stabilité morphologique d'ensemble du tronçon 3

Très localement enfin des modifications notables peuvent être signalées. L'exemple le plus significatif correspond à une zone de méandre concave, qui creuse les éléments d'une terrasse (Illustration 10). La limite de cette dernière a reculé de 16 m entre 1997 et 2003 et de 5 m entre 2003 et 2007. Ces mesures sont d'autant plus fiables que les images sont bien calées (point, proche de la limite de la terrasse, qui reste invariant sur les 3 années). La valeur moyenne du recul est de 2 m par an sur 10 ans avec toutefois une atténuation les 4 dernières années.

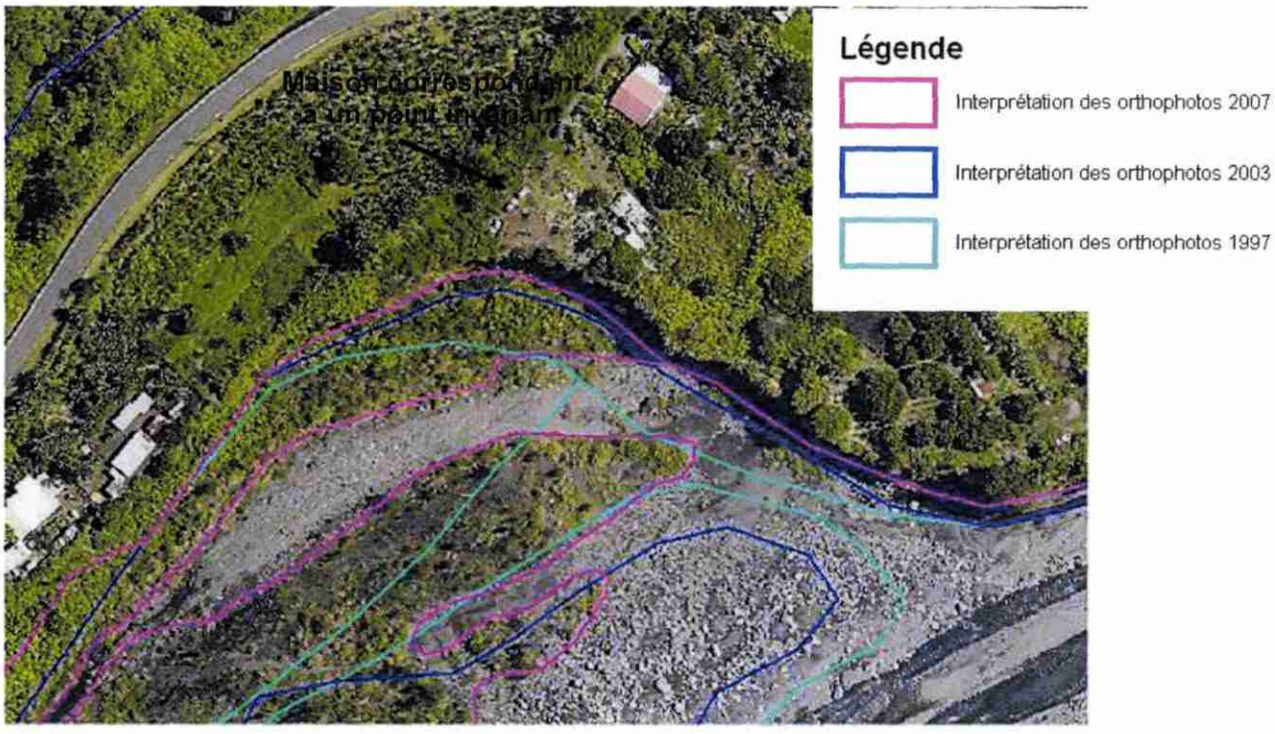


Illustration 10 – Zone d'érosion principale du tronçon 3

Dans l'ensemble donc la morphologie générale de ce tronçon peut être considéré comme stable, depuis que la rivière s'est enfoncée dans ses alluvions les plus anciens qui forment terrasse et qui pourraient être du même âge que le cône alluvial ancien.

3.5. PARTIE AVAL

3.5.1. Tronçon 4 : du pont de la D48-1 au cône alluvial

Ce tronçon de rivière, localisé entre le seuil du pont de la D48-1 et la limite du cône (illustration 3), évolue de façon prévisible, entre 1966 et 1978. Il correspond à une zone d'affleurement de substratum plus ou moins continue qui, sauf localement, n'est pas surmonté de dépôts alluviaux. L'évolution peut être résumée comme suit :

- 1966 : pas de seuil sous le pont de la RN2. Le chenal est continu et contient des alluvions,

- 1978 : à la suite de la construction du seuil, les sédiments situés en aval commencent à être évacués,

- 1984 : bien que les photographies soient difficilement utilisables au sens où le niveau de l'eau est assez haut, il semble que les alluvions continuent à s'évacuer,

- 1997 : quelques alluvions peuvent être supposées sur quelques 150 m en aval du seuil,

- 2003 : présence locale d'alluvions,

- 2007 : la situation est identique dans cette zone où une mesure de granulométrie a été réalisée au cours des travaux de terrain. Les alluvions reposent sur du substratum composé essentiellement de basaltes massifs et minoritairement de coulées indurées (de type lahar).

Un extrait des photographies de 1966 et de 2007 illustrent une telle évolution, relativement continue (Illustration 11).

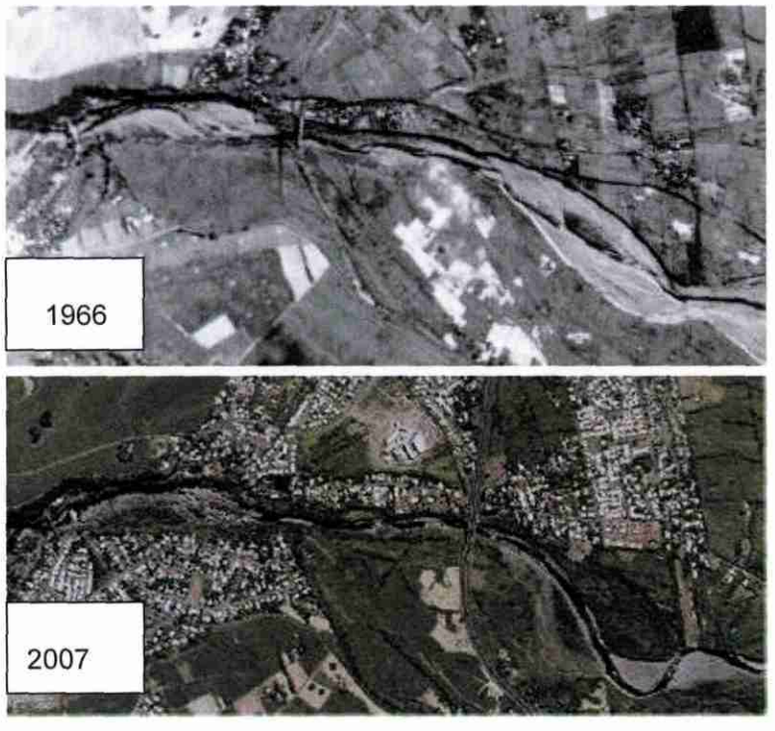


Illustration 11 – Evolution du tronçon 4 entre 1966 et 2007

3.5.2. Tronçon 5 : le cône alluvial actuel

Le cône dans sa configuration actuelle correspond à un triangle allongé, ouvert vers la mer, d'environ 4300 m de long et 1500 m de large. Limité par de hautes berges creusées par la rivière dans son propre cône alluvial ancien, il est composé de

matériaux fins à très grossiers, argiles dans les chenaux asséchés à blocs métriques à plurimétriques roulés très fréquents (Illustration 11)

Ces matériaux s'organisent en couches successives superposées qui correspondent aux différents épisodes de crues, ce qui est bien visible dans les falaises dégagées par l'érosion (Illustration 12), au niveau du double méandre d'entrée du cône.

Ce schéma relativement simple est perturbé, de façon plus ou moins importante selon les crues, par le fait que chacune d'elles ne se contente pas d'apporter des matériaux en les disposant en couches régulières. Elle a également une action érosive plus ou moins importante qui a tendance à évacuer les matériaux précédents selon l'axe d'écoulement, en creusant des chenaux, avant de déposer les nouveaux matériaux dans ces mêmes structures. L'importance relative des différents mécanismes et la divagation des courants au sein du cône conduit au dépôt d'alluvions récentes entre des « ilots » d'alluvions plus anciennes qui se reconnaissent le plus souvent par la présence de végétation.

Illustration 12 - Alluvions récentes dans le cône actuel de la Rivière du Mât

Illustration 13 - Séquence de dépôts alluviaux du cône alluvial ancien à tendance chenalisante

Les différentes terrasses sont le résultat de ces mêmes phénomènes, avant enfoncement rapide de la rivière dans ses propres alluvions subactuelles, à savoir le cône alluvial ancien.

Sur la paroi de la berge, prise à titre d'exemple, au niveau du double méandre d'entrée du cône, peut ainsi être observée une succession de couches d'alluvions alternativement grossières et fines. L'inclinaison des plans qui les limitent est l'indice d'un dépôt cônеïque, chenalisant et/ou progradant.

L'évolution du cône actuel dans sa partie orientale (Illustration 13) montre, depuis 1966, que la végétation tend à s'installer puis perdurer, dans sa partie nord, avec accroissement et densification des surfaces végétalisées. Le cours d'eau se déplace vers le sud qui montre en revanche des surfaces croissantes d'alluvions actuelles. La traversée du domaine de l'exploitation de granulats en 2007 par la rivière en est l'indice le plus démonstratif. Il semble donc que cette évolution s'inscrive sur un terme relativement long puisque l'observation des photographies aériennes de 1966 montre bien que la zone nord du cône actuel est exempte de végétation qui se développe alors sur le site actuel de la gravière.

Remarque : L'année 1997 pourrait correspondre à une exception dans cette évolution puisque à cette date la végétation est dense sur l'ensemble du cône, hormis dans la zone centrale, du fait d'une exploitation d'extraction. Cette caractéristique est générale puisque l'étude des photographies du lit de la rivière, sur toutes les portions de son

cours visible, y compris dans le cirque, montre une forte végétalisation des alluvions. De fait, les années précédant 1997 n'ont pas été le siège de pluies cycloniques très intenses. Les crues faibles à moyennes (750 m^3/s de débit de pointe maximum entre 1994 et 1997) qui ont eu lieu ont pu déplacer des sédiments qui se sont accumulés, sans que les unités déjà en place soient perturbées et permettant ainsi la croissance de la végétation.

Cette évolution pourrait, au moins pour partie, être imputée à une modification du cours de la rivière (Illustration 14), avant son tressage dans la partie terminale du cône :

- de 1966 à 1997, le coude très évasé qui affecte la rivière en aval de la 4 voies se déplace du nord vers le sud et ce mouvement est matérialisé par des cicatrices de ruptures de pente, visibles sur les photographies. Ce mouvement n'engendre de l'érosion qu'en rive droite de la rivière tout en rendant le coude plus aigu (1966-1984),

- à partir de 1997, se crée un double coude qui provoque une érosion tant en rive droite qu'en rive gauche. Ce double coude s'accentue en 2003 puis 2007 jusqu'à générer un recul de 150 m en 10 ans en rive droite et 55 m en rive gauche où les installations du centre d'enfouissement, signalées sur la carte topographique et surtout visibles sur les photographies de 1997, pourraient être menacées. Avec un tel rythme, le méandre rive droite atteindrait, en 20 ans, la 4 voies et le méandre rive gauche aurait érodé le tiers sud du centre d'enfouissement.

Une telle évolution pourrait être due à l'enfoncement progressif de la rivière dans son propre lit qui butte actuellement, en rive gauche, sur les formations dures du substratum. Ces dernières contiennent l'énergie de l'eau en la réfléchissant vers le sud où elle provoque un fort recul dans les formations hétérogènes plus friables du cône alluvial ancien (Illustration 15).

La modification progressive des limites du cours d'eau semble se propager dans le cône proprement dit : les photographies de l'illustration 16 montrent en effet qu'après avoir buté contre la rive gauche du cône, en provoquant une érosion qui sera détaillée ci-après, le cours d'eau tend à être dévié vers le sud-est, et la rive droite, jusqu'à affecter, en 2007, l'exploitation de graves. Les photographies de 2003 montrent bien ce schéma d'évolution et la direction du cours principal, prolongée par la ligne en tireté noir, laisse présager dès cette date, de l'envahissement de la gravière qui se produira finalement en 2007. En revanche, sur les photographies prises pendant l'été 2007, la perception de l'état réel du lit vif du fleuve est faussée par le fait que des travaux ont été entrepris pour dévier le cours d'eau de la gravière (comblement du lit et mise en place de digues de blocs). De tels obstacles ne paraissent d'ailleurs pas devoir mettre la gravière à l'abri de nouveaux débordements.

1966

1978

1984

Illustration 14: Evolution de la végétation dans l'extrémité orientale du cône

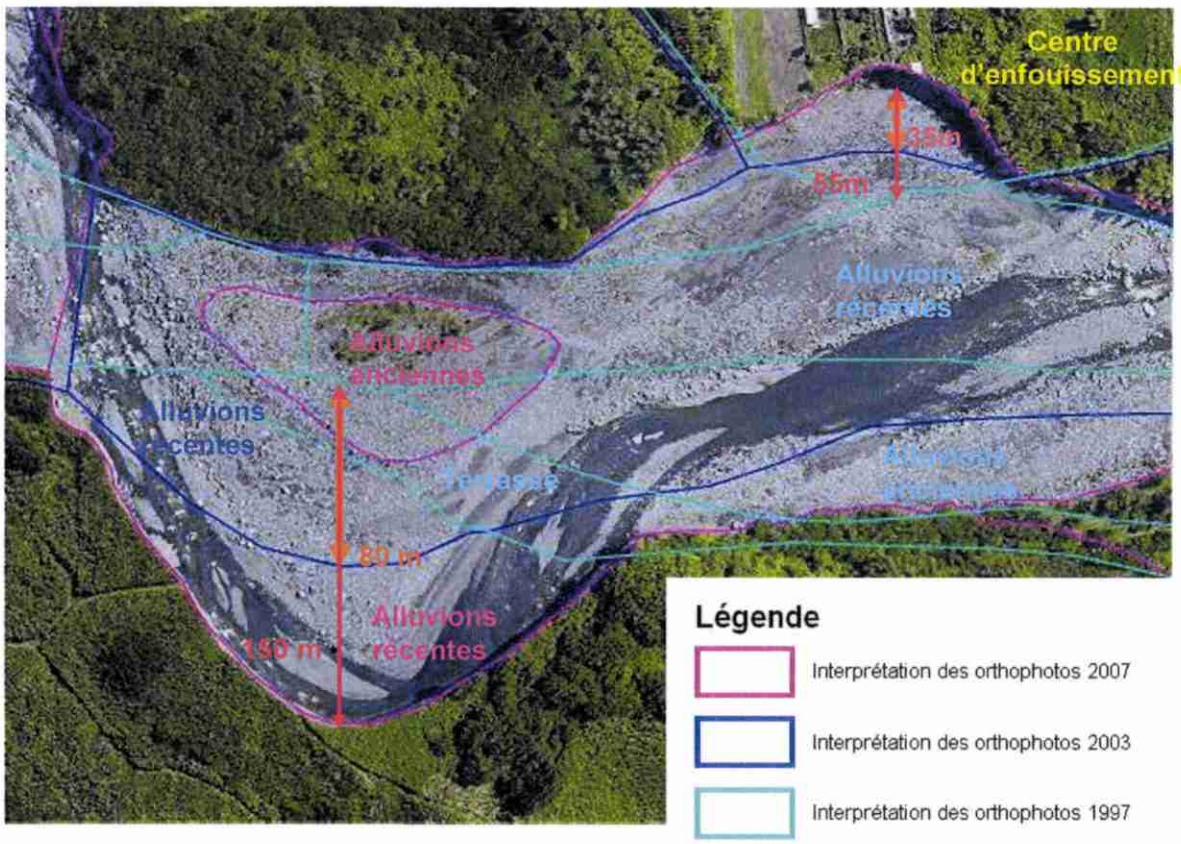


Illustration 15 - Recul des berges en zones concaves au sud du centre d'enfouissement

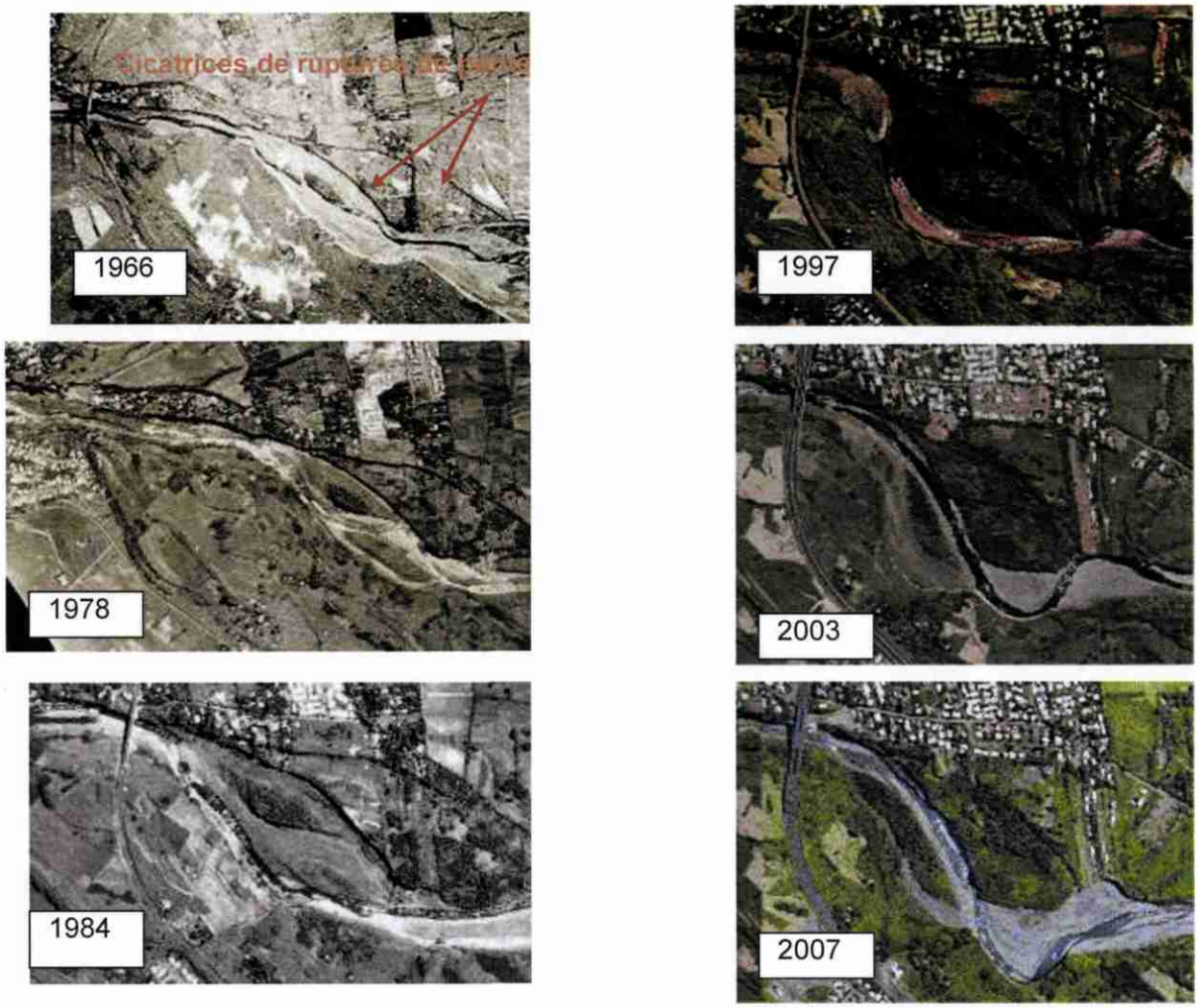


Illustration 16 - Evolution du lit de la Rivière du Mât au sud du centre d'enfouissement

Illustration 17 - Evolution du lit vif de la rivière à l'est du point de rebond en limite nord du cône alluvial

L'érosion de la rive gauche du cône, évoquée ci-dessus, se produit à 400-500 m à l'est du centre d'enfouissement et se manifeste par un recul qui se produit depuis 1966 au moins (Illustration 17) et semble donc bien correspondre à une tendance générale de ces dernières décennies. Les valeurs mesurées sur les orthophotographies depuis 1997 (illustration18) montrent un recul maximum de l'ordre de 50 m entre 1997 et 2003 (soit 8,3 m/an) et de l'ordre de 30 m entre 2003 et 2007 (soit 7,5 m/an). L'importance du recul annuel mesurable peut donc être considéré comme stable sur les 10 dernières années, même s'il faut noter un déplacement vers l'aval de la zone soumise à l'érosion, de l'ordre de 40 m par an.

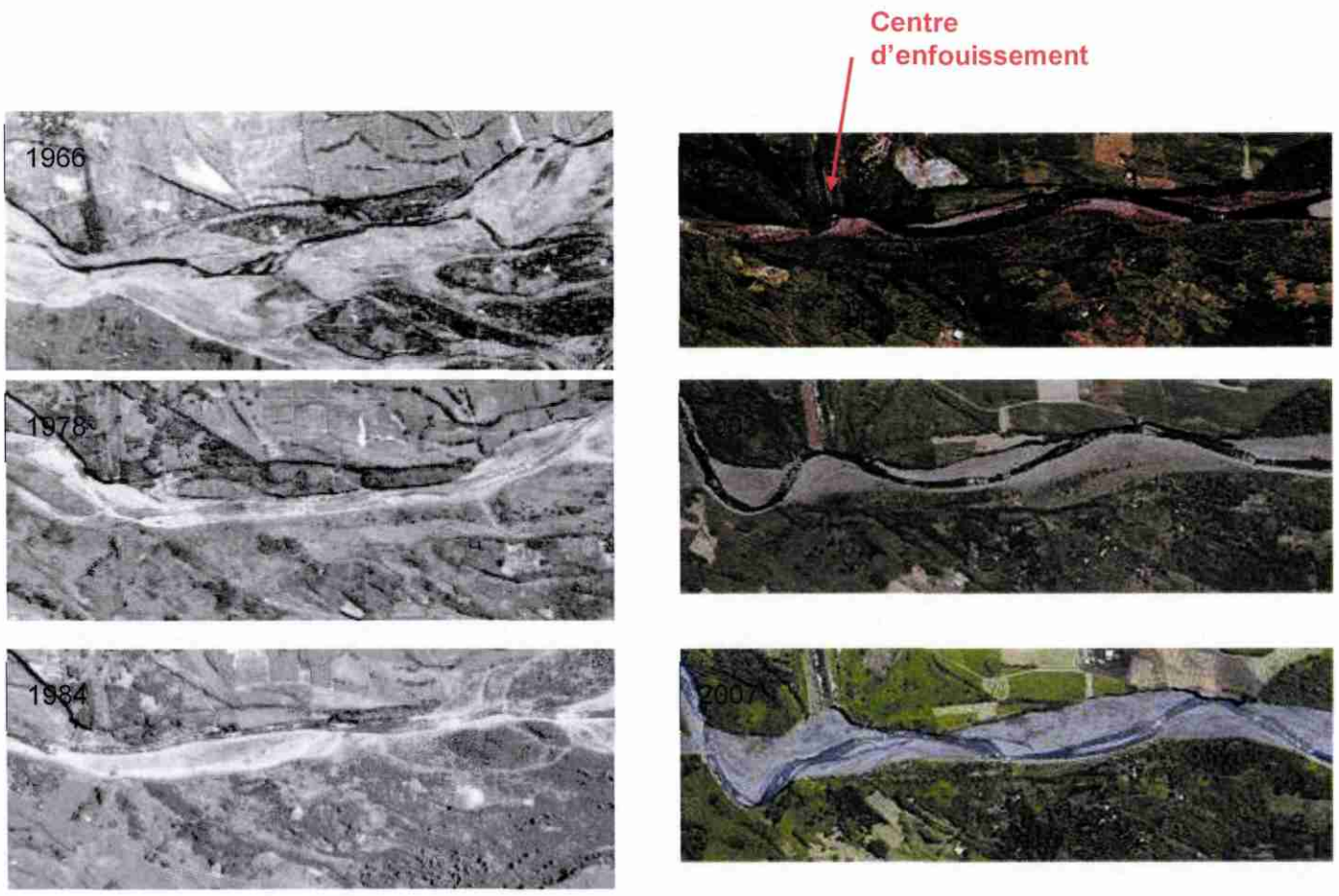


Illustration 18 - Erosion de la rive gauche du cône entre 1966 et 2007

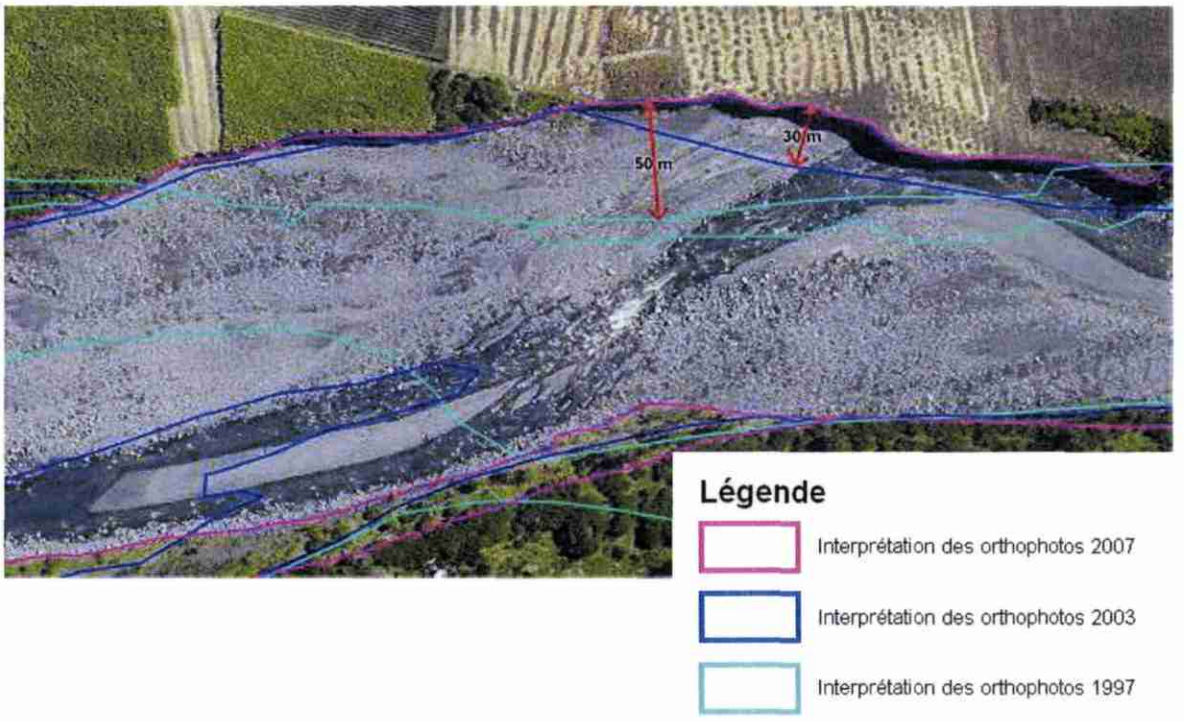


Illustration 19 - Mesure de l'érosion de la rive gauche du cône entre 1997 et 2003 et entre 2003 et 2007

En guise de synthèse, il est possible de dire que la morphologie actuelle du cône est fortement modifiée par la divagation de la rivière, en aval du pont de la 4-voies, phénomène lié à son enfoncement progressif dans son propre lit et à son contrôle par le substratum basaltique. Ce dernier force l'eau à se diriger vers le sud, ce qui génère, à l'entrée du cône, la formation de méandres dévastateurs du fait de la puissance du courant.

Il faut toutefois remarquer que la rivière fait partie intégrante du cône, qu'elle contribue à construire par dépôts successifs autant qu'elle le détruit par érosion parfois simultanée, selon un mouvement général de balayage.

Réduire l'action de la rivière au sein du cône paraît très difficile compte tenu de la violence des courants générés par les crues des cyclones et toute action anthropique pourrait se révéler bien pire que l'évolution naturelle actuelle. Transformer le cône en espace de liberté exempt d'aménagement et de construction serait sans doute le plus souhaitable

4. Eléments d'analyse morphosédimentaire

4.1. GRANULOMETRIE

Les formules utilisées pour modéliser le transport solide sont adaptées à des phénomènes et domaines d'application bien définis et prennent en compte de nombreux facteurs dont le type de cours d'eau et la taille des sédiments.

Dans ce contexte, la Rivière du Mât peut être classée comme rivière torrentielle ayant une granulométrie du lit relativement étendue. Il a donc été nécessaire d'évaluer cette granulométrie en différents points du lit, susceptible d'être représentatifs des différentes sections de la rivière.

4.1.1. Principe de base

La courbe granulométrique représente le pourcentage en poids des grains de dimension inférieure à ***d*** en fonction de la dimension d d'un grain. Au laboratoire, on l'obtient par tamisage pour les grains de dimension supérieure à 80 microns et par densimétrie pour les grains de dimension inférieure.

La dimension ***d*** est la maille du tamis. En densimétrie, d est le diamètre d'une sphère de même poids que le grain, mais en rivière il est peu fréquent de mesurer cette partie fine.

Soit ***dx*** la dimension de grain correspondant à x % en poids de tamisat (ce qui passe au travers du tamis). On appelle coefficient d'uniformité (ou de Hazen) le rapport d_{60}/d_{10}. Un sol tel que $d_{60}/d_{10} < 3$ est dit à granulométrie uniforme ; un sol tel que $d_{60}/d_{10} > 3$ est dit à granulométrie étalée.

Par exemple, sur la courbe de la figure ci-après : d_{60}= 5 mm et d_{10} = 0,2 mm. D'où d_{60}/d_{10}= 10. Le diamètre médian d_{50} vaut 3 mm. La partie fine qui devrait être étudiée par densimétrie n'est pas représentée, car elle ne présente pas un grand intérêt.

La figure 19 résume également la définition granulométrique habituelle des termes sable, graviers, cailloux.

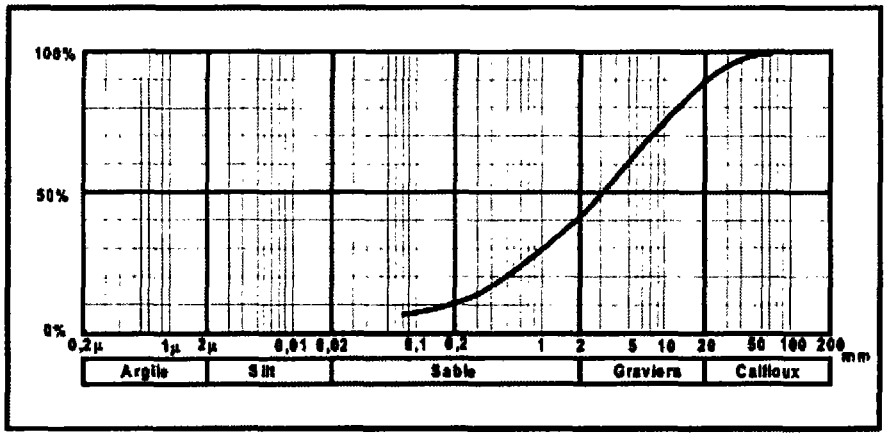


Illustration 20 – Analyse granulométrique d'un sédiment

Lorsque les dépôts sont grossiers, la mesure en laboratoire est très peu pratique et même infaisable. Nous résumons ici la méthode très simple basée sur les résultats de Léopold Wolman proposée par Vincent Koulinski, lors de son travail de thèse au Cemagref de Grenoble sur la formation des lits de torrent (Koulinski, 1994).

La méthode consiste à déplier un décamètre en ligne droite ou brisée sur un banc de galets ou de cailloux, puis à prélever chaque grain de surface dont le centre se trouve le plus près possible de la graduation pour un pas d'espace défini. On mesure alors le diamètre de tous les grains prélevés (sur le terrain pour les plus grossiers et éventuellement au laboratoire pour les plus fins, du moins si la partie fine de la courbe présente un intérêt). Pour les grains non sphériques, il s'agit du diamètre intermédiaire (on imagine les épaisseurs dans trois directions orthogonales, et on ne retient ni la plus grande épaisseur ni la plus petite).

La courbe est alors construite en fréquence d'apparition des diamètres. L'auteur conseille de choisir un pas d'espace supérieur au d_{90}, c'est à dire pratiquement supérieur ou égal au plus gros diamètre, et de réaliser au minimum 100 prélèvements. Par exemple, si le pas d'espace est de 20 cm, on opère sur une longueur de 20 m. Il est conseillé de répéter l'opération au moins deux fois pour chaque granulométrie souhaitée. Il est très important d'éviter toute subjectivité dans le choix du grain situé sous la graduation.

4.1.2. Echantillonnage réalisé

L'approche de la granulométrie de la Rivière du Mât a ainsi été réalisée au travers de mesure *in situ* dans le cône et les différents tronçons de la rivière. Ces travaux de terrain ont permis de réaliser 14 profils granulométriques, complétés par 5 points

d'observation lorsque les cours d'eau étaient inaccessibles ou ne présentaient pas de site d'alluvionnement mesurable. Ces mesures seront valorisées dans la partie dévolue à l'hydrologie et au transport sédimentaire. Toutefois quelques remarques générales sont présentées plus avant.

Les profils granulométriques

Ces profils ont pour vocation de mesurer la taille des éléments composant les alluvions dans les différents tronçons de la rivière, taille qui est fonction de la puissance du cours d'eau. Outre la perception de l'évolution de la composition des alluvions, ils participent à définir les débits minimaux nécessaires à la mobilisation des différents composants de ces formations récentes.

- répartition géographique des profils : les profils ont été répartis sur tous les tronçons (Illustration 20), mais leur localisation a été fonction de l'accessibilité du lit de la rivière, qui n'est que rarement facile, y compris dans le cône. Pour certain (Pont de Salazie, Pont de la Savane, etc.), il n'a pu être fait qu'une description depuis les points de vue que permettent les ouvrages d'art franchissant les rivières. Ils appartiennent au type « observation » dans le tableau ci-après (Illustration 21).

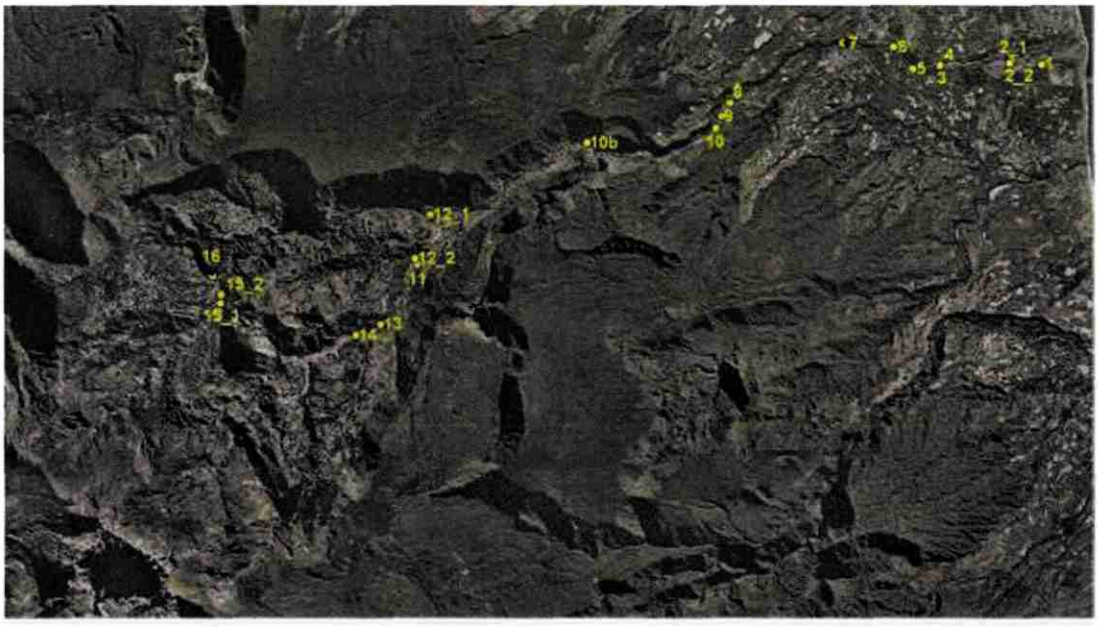


Illustration 21 - Localisation des profils granulométriques et des points d'observation

Numéro du point	Localisation	Coord X (WGS84)	Coord Y (WGS84)	Type
1	Cône	55.6901	-20.9828	Mesure
2_1	Cône	55.6831	-20.9817	Mesure
2_2	Cône	55.6826	-20.9822	Mesure
3	Cône	55.6659	-20.9831	Mesure
4	Cône	55.6662	-20.9828	Mesure
5	Cône	55.6595	-20.9836	Mesure
6	Pont 4 Voies	55.6548	-20.9786	Mesure
7	Pont riv. Du Mât	55.6426	-20.9775	Mesure
8	Méandre Cap Argile, concave	55.6156	-20.9908	Mesure
9	Méandre Cap Argile, convexe	55.6137	-20.9939	Mesure
10	Passerelle Cap Argile	55.6122	-20.9965	Observation
10b	Pont de l'Escalier	55,5817	-20,9994	Mesure
11	Pont Salazie	55.5406	-21.0266	Observation
12_1	Passerelle Riv. Fleurs Jaunes	55.5438	-21.0154	Observation
12_2	Ravine Grosse Roche	55.5401	-21.0252	Observation
13	Pont Savane	55.5319	-21.0399	Observation
14	Nord Mare à Poule d'eau	55.5259	-21.0422	Mesure
15_1	Pont Carozin	55.4935	-21.0347	Mesure
15_2	Pont Carozin	55.4937	-21.0328	Mesure
16	Le Mathurin	55.4917	-21.0286	Mesure

Illustration 22 - Tableau des points d'observation et de mesure

- réalisation des profils : les mesures ont été réalisées de manière à obtenir, dans la mesure du possible, une centaine de mesures pour chaque profil, en tenant compte de la taille des éléments les plus volumineux croisant le profil. C'est ainsi que pour des éléments les plus petits rencontrés, d'une taille maximum de 30 cm, les mesures ont été faites tous les 30 cm sur 30 m de long. Pour des éléments les plus gros, supérieurs ou égaux à 1 mètre, les mesures ont été faites tous les mètres sur une longueur de 100 m. Les tailles intermédiaires sont 40 et 50 cm, cette dernière étant la plus fréquente. Les profils les plus longs (100 m) n'ont jamais pu être réalisés d'un seul tenant et ont été constitués en deux ou trois longueurs parallèles.

Description sommaire des sites de mesure

L'environnement géomorphologique des sites de mesure est brièvement décrit selon 4 rubriques : la géologie, la morphologie, la granulométrie des alluvions et des commentaires. Pour ne pas alourdir le corps du rapport, cette description est présentée en annexe 3.

4.2. L'APPROVISIONNEMENT EN MATERIAUX SEDIMENTAIRES

Le matériel transporté par la Rivière du Mât est constitué d'éléments de démantèlement des formations géologiques du cirque de Salazie. L'étude des photographies aériennes autorise une vision synthétique du site, qui a permis, dans un premier temps, de réaliser une carte de sensibilité potentielle à l'érosion et de mettre en évidence les principaux sites d'émission de matériaux. Dans un deuxième temps une évaluation des vitesses linéaires d'érosion a été effectuée au travers de l'analyse chronologique de ces mêmes photographies.

4.2.1. Rappel sur la problématique de l'érosion

Ce rappel est basé sur des références bibliographiques et des connaissances qui ont fait l'objet d'un projet de recherche réalisé par le BRGM (projet DYNTOR), assisté principalement de la société SOGREAH (cf. références en volume 1 de l'étude).

Les systèmes érosifs des ravines et des rivières

- **Généralités**

Du fait de son climat tropical océanique, fortement influencé par l'anticyclone de l'Océan Indien, l'île de La Réunion a une pluviométrie très élevée, de 2 à 9 m/an sur le coté au vent, et des précipitations exceptionnelles, par leur intensité et le cumul de pluie par événement, qui sont à l'origine des crises érosives des ravines.

Toutes les têtes des ravines les plus actives se situent dans le bassin de réception (cf. § 2.1) à une tranche d'altitude où les précipitations sont les plus abondantes. Ces structures sont localisées logiquement au niveau des zones d'érosion active par glissement, ravinement, écroulement, tous phénomènes dus, entre autres, à la déstructuration et à l'imbibition des matériaux, jointes au pourcentage très élevé des pentes.

A l'aval, le débouché des principaux cours d'eau est généralement constitué par un cône de déjection plus ou moins développé (cf. § 2.1) et l'activité humaine constitue, en revanche, l'un des facteurs prépondérant de la transformation du paysage. En effet, le littoral, avec des zones relativement plates, est le lieu privilégié pour l'installation des principaux centres urbains de la Réunion (Saint-André et Rivière-du-Mât, dans le cadre de cette étude). Ceux-ci sont donc majoritairement implantés sur ces cônes, exposés ainsi à des conséquences très souvent fâcheuses.

- **Formation des ravines**

Il semble que la formation des grandes ravines du cirque de Salazie soit, de façon prépondérante, imputable au mécanisme décrit comme « érosion radiale ». Son action est bien connue puisque liée aux eaux de ruissellement empruntant les fissures dans le sens de la pente. Il y a ainsi formation d'un réseau hydrographique qui s'établit le long des génératrices du bassin et qui va s'enfoncer plus ou moins profondément.

Le creusement rapide et profond de certaines grandes ravines, telles que celles "au vent", est à rattacher, certes à la nature du substratum volcanique (alternance de coulées et de scories plus ou moins tendres) mais aussi et avant tout, à la structure de ce substratum. Les ravines sont généralement guidées par la fracturation tectonique des massifs volcaniques (anciennes zones de rift, d'injection, de cisaillement, de caldera...).

Ce creusement explique la hauteur et l'étroitesse des vallées et des gorges ; les pentes des versants sont de l'ordre de 60 à 70° pour les grandes ravines. L'absence d'affluent s'oppose au recul des versants et à l'évasement rapide des vallées.

En définitive il est certain que l'on ne peut expliquer le façonnement de ces ravines par la seule érosion torrentielle qui n'arrive qu'à effleurer la surface des coulées basaltiques. La capacité érosive de ces grandes ravines, mais aussi la stabilité éventuelle des versants et des berges, est à rattacher aux notions de fissurations et de fracturation radiales [BRGM 2004].

Par place toutefois, des fractures secondaires peuvent favoriser une érosion oblique, donnant aux rivières une forme « en baïonnettes ». Les cours de la Rivière du Mât et celle des Fleurs Jaunes sont affectées pour partie par ces changements de direction.

Apports de matériaux dans le réseau hydrographique par les versants

- **Erosion sur sols cultivés**

A La Réunion, les valeurs d'érosion sur terrains cultivés varient dans des proportions importantes (rapport de 1 à 100) suivant les facteurs de précipitation, de type de culture, de pente et de sol. L'ordre de grandeur qui concerne les parcelles mécanisées, en saison cyclonique, est de quelques 100 à 200 t/ha/an.

Les processus érosifs ne produisent pas des pertes en terre proportionnelles à la pluie tombée, mais les évènements importants occupent une part prépondérante. Ainsi, comme le suggère, l'ordre de grandeur des volumes fournis par des évènements exceptionnels est le même que celui de l'érosion moyenne annuelle. A la Martinique, Meunier a adopté l'ordre de grandeur suivant : 100 à 200 m^3/ha pour un cyclone.

L'estimation du débit de matériau solide fourni par les versants cultivés est accessible en mettant cette valeur en relation avec les concentrations volumiques moyennes annuelles de quelques centaines de gramme par litre observées dans certaines ravines. Il est, par ailleurs, couramment admis par les observateurs que les matériaux issus de l'érosion des terrains cultivés vont jusqu'à la mer, sans se déposer. Ainsi nous considérerons en première approximation que la quasi-totalité des pertes en terre ne participe pas aux relations entre le transport solide torrentiel et la morphologie du cours d'eau. Ce matériau est assez fin pour être considéré comme du matériau de lessivage.

- **Mouvements de terrain naturel**

Il n'en va pas de même pour les mouvements de terrain qui correspondent à des phénomènes naturels parfois très différents, avec des conséquences variées, s'exprimant par des mouvements en grande masse pouvant atteindre plusieurs millions de m^3.

La typologie des mouvements de terrain classiquement utilisée, car recensés à La Réunion, est la suivante :

- les éboulements de masses rocheuses principalement localisés dans les remparts délimitant les cirques et les principales ravines,
- les écroulements d'escarpement rocheux localisé dans les flancs du massif du Piton des Neiges et les grandes ravines,
- les avalanches de blocs,
- les glissements « lents » localisés principalement dans les cirques,
- les affaissements / tassements affectant les plateaux des cirques,
- les coulées de boue / déboulés.

La répartition des mouvements de terrain dans le temps est beaucoup plus aléatoire car très liée aux conditions climatiques. L'analyse des données disponibles a permis de formuler les remarques suivantes :

- la répartition interannuelle est très influencée par l'occurrence ou non d'épisodes pluvieux intenses. Pour le cirque de Salazie, le nombre de mouvements de terrains recensés en 1980 (année du passage du cyclone Hyacinthe) est environ 10 fois plus important que le nombre moyen annuel de mouvements de terrain. Cette remarque est généralisable à toutes les communes de l'île, néanmoins le rapport entre année normale et année cyclonique semble être amplifié dans les cirques ;
- au cours d'une même année, les mois pluvieux de janvier, février, et mars sont les plus propices à l'occurrence de mouvements de terrain.

Les grandes ravines affectés par des mouvements de terrain de grande ampleur sont au nombre de 8, dont la Rivière du Mât (Illustration 23). Les volumes de matériau mis en jeu sont inégaux, de 500 000 à plusieurs dizaines de millions de m^3.

La fréquence d'occurrence de ce type d'événement est mal-connue, on estime généralement que les grandes ravines sont touchées par deux mouvements de terrain de grande ampleur tous les cents ans. Pour ce qui concerne les cirques, le nombre d'évènements recensés et les dates de ces derniers suggèrent une occurrence plus élevée, à mettre en relation avec le contexte géologique particulier de ces dépressions.

Bassin versant concerné	Nombre de mouvements historiques recensés	Pourcentage de mouvements de terrain historiques	Date des événements recensés	Volume total de matériaux (millions de m3)	Typologie des mouvements de terrain recensés			
					1	2	3	4
Rivière du Mât	13	33%	1875 - 1980 - 2000	31.17	7	2	1	
Rivière St-Etienne	13	33%	1849 - 1980 - 1984 - 1985	12	3	5	1	1
Rivière des Galets	3	8%	1927 - 1958 - 1980	?	1	2		
Rivière des Remparts	4	5%	1904 - 1965 - 1996 - 2001	> 56			2	
Rivière des Pluies	1	3%	2002	0.5		1		
Ravine Patates à Durand	1	3%	?	?	1			
Rivière de l'Est	1	3%	1874 - 1927 - 1961	?		1		
Rivière des Marsouins	1	3%	1983	?		2		

1	Glissement lent / Affaissement tassement
2	Chute de blocs / Éboulement
3	Coulée de boue / Débouié / Lave torrentielle
4	Ecroulement

Illustration 23 : Inventaire des mouvements de grande ampleur par bassin versant

La présence de ces mouvements de grande ampleur influence très fortement l'apport de matériaux dans les rivières. En effet ils provoquent des apports directs de matériaux au réseau hydrographique et constituent également des stocks de matériaux importants mis à disposition des rivières (les volumes de matériaux mis en jeu étant supérieurs à ce que peut transporter immédiatement la rivière). A la suite de ces évènements, les versants affectés sont sujets à une érosion beaucoup plus intense que les versants non déstabilisés.

Sur un plan dynamique, les descriptions des mouvements de grande ampleur réalisés dans le rapport BRGM/RP-52913-FR « Inventaire des mouvements de terrain historiques à la Réunion » ont permis d'identifier deux grands types de mouvements :

- les mouvements lents, qui réunissent :

- *les mouvements des fonds de cirque* : ils affectent les îlets et sont caractérisés par des vitesses de déplacement pouvant aller de quelques centimètres à quelques décimètres par an. Ces déplacements induisent des déformations au sein des terrains. On peut citer, parmi les quarante mouvements répertoriés :

  - le mouvement de Grand Ilet où les vitesses de déplacement varient entre 0 et 30 cm/an ;

  - le mouvement de Hell-Bourg – Mare à Poule d'Eau où les vitesses de déplacement sont comprises entre 0 et 70 cm/an ;

  - les mouvements de Mathurin, de Mare Virapa, du Bélier, et de Roche à Jacquot.

- *les mouvements des remparts* : caractérisés par des déplacements d'ordre millimétrique par an.

- les mouvements rapides, qui sont brutaux : c'est le cas des déboulés / coulées de boue dans les cirques (exemple de Grand Ilet) ou des éboulements dans les remparts (exemple de Ravine Casabois).

Certains mouvements de terrain peuvent être caractérisés à la fois de mouvement lent et de mouvements rapide. C'est le cas du glissement de grande ampleur de Grand Ilet. Le mouvement se produit à une certaine vitesse le long d'une paléo-surface mais peut, en même temps, lors de phases critiques (fortes pluies), être affecté d'accélérations qui entraînent des déboulés / coulées de boues en front de glissement.

4.2.2. Cartographie de la sensibilité potentielle à l'érosion

Dans le but de localiser les sources récentes d'alimentation en alluvions du cirque de Salazie, une carte de sensibilité potentielle à l'érosion a été réalisée en prenant comme base la mosaïque des orthophotographies de la mission IGN 2003, document orthorectifié le plus récent qui couvre entièrement le cirque.

Effectuée à partir de l'interprétation monoscopique de la mosaïque et de quelques contrôles terrain, cette carte a pour seule prétention de permettre l'évaluation de la superficie des terrains plus ou moins sensibles à l'érosion, contribuant à alimenter en alluvions la Rivière du Mât. Elle ne saurait être utilisée, seule et en l'état, pour d'autres applications, telle que, par exemple, la prise de décisions dans le cadre de l'aménagement.

Critère utilisé

Le critère utilisé prend en compte les états de surface que les photographies permettent d'observer assez précisément et qui ont été reconnus sur le terrain, au moins dans les zones accessibles, et pour les plus importantes. Il permet de proposer 3 classes de sensibilité :

- sensibilité forte : elle correspond à des surfaces en pente plutôt forte présentant une surface nue et ravinée qui laisse éventuellement voir ou soupçonner des affleurements de substratum. Elles suggèrent l'existence d'une érosion active, récente à actuelle,

- sensibilité moyenne : elle regroupe les surfaces en pente plus ou moins forte, qui sont ravinées mais couvertes d'une végétation discontinue à continue, qui peut être localement dense. Les unités correspondantes suggèrent l'existence d'une érosion actuelle peu active mais qui a pu être forte dans le passé. Ont été associé à ces surfaces les zones qui, tant au niveau des fortes pentes que des fonds de vallons proches ou intégrant des défilés, se trouvaient à l'ombre à cette date et qui sont, le plus souvent, couvertes d'une végétation dense,

- sensibilité faible : dans cette classe, les surfaces en pente faibles ne sont pas ravinées et sont couvertes d'une végétation plus ou moins dense mais continue. L'érosion y parait de faible intensité voire inexistante.

La quatrième classe qui a été ajoutée pour pouvoir disposer d'une carte de l'ensemble du cirque, correspond aux falaises (remparts) qui le ceinturent. Dans cet environnement, le phénomène le plus à attendre est la chute de blocs voire l'effondrement de masse.

Commentaires de la carte

La carte de sensibilité potentielle à l'érosion du cirque de Salazie (Illustration 23) montre que l'emprise des différentes classes définies ci-dessus se répartit de la manière suivante, pour une surface totale, hors unités de remparts, d'environ 70 km² :

- sensibilité faible : environ 22 km² ou 31 %,

- sensibilité moyenne : environ 39 km² ou 56 %,

- sensibilité forte : environ 9 km² ou 13 %.

La surface des remparts, plus susceptibles de générer des chutes de blocs, est de l'ordre de 17 km².

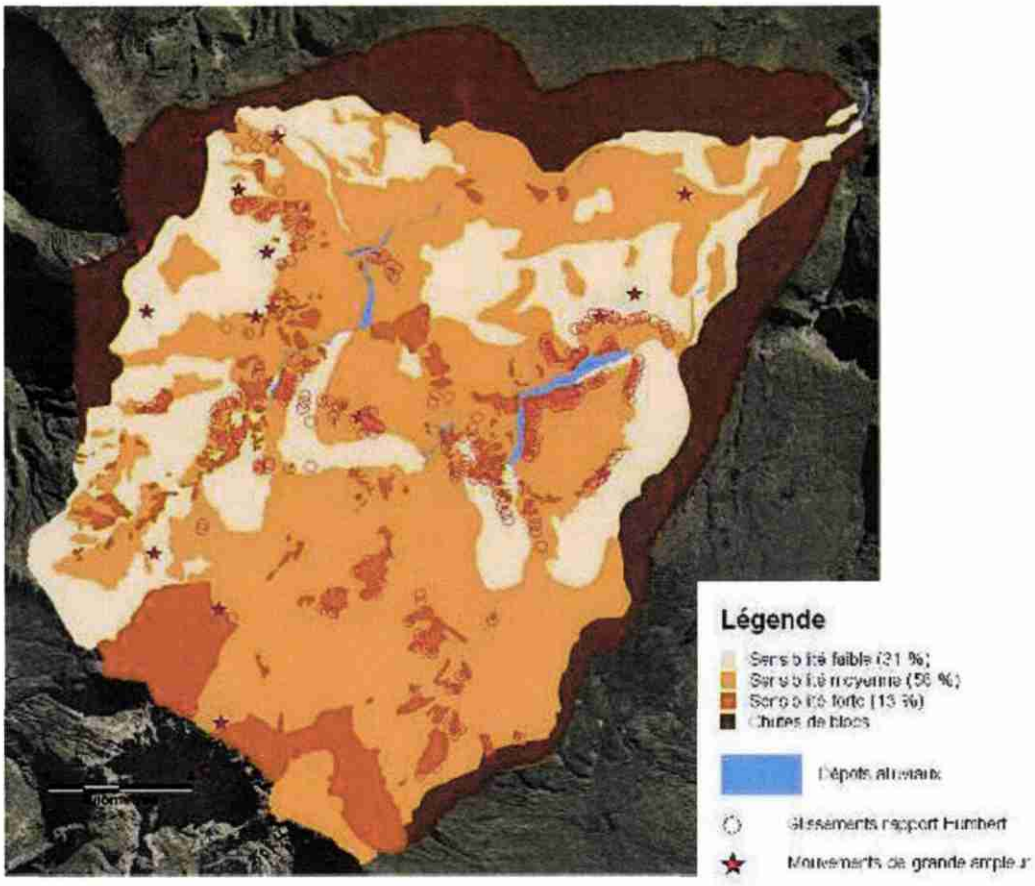


Illustration 24 - Carte de sensibilité potentielle à l'érosion (étude de photographies aériennes)

La comparaison de la carte avec les informations ponctuelles correspondant aux « glissements du rapport Humbert » et aux « mouvements de grande ampleur » montre une bonne relation avec les premiers et une relation moins précise avec les seconds :

- les « glissements du rapport Humbert » sont issus d'une étude (Humbert et al. - 1981) visant à localiser tous les phénomènes, d'amplitude variable, présents dans les cirques échancrant le massif du Piton des Neiges. Ils s'avèrent le plus souvent situés en limite d'ensemble morphologiques différents, ensembles que les photographies permettent justement de cartographier.

- les mouvements de grande ampleur sont décrits dans un rapport spécifique (Aubié et Cruchet - 2003) qui s'intéresse aux phénomènes les plus importants. Cette relation moins précise se traduite en particulier par le fait que 4 de ces mouvements sont localisés dans des polygones classés à faible sensibilité à l'érosion. Le glissement de la Mare à Citron, par exemple, affecte une rupture de pente d'ampleur relativement limitée, que l'interprétation des photographies aériennes n'invite pas à isoler d'un ensemble morphologique relativement plat.

Comme mentionné précédemment, il est vraisemblable que la « production » du cirque en matériaux d'érosion se concentre dans les 13 % de zones à sensibilité forte dont plus de 50 % se situent dans les hauts du cirque, en limite avec le cirque de Cilaos. L'alimentation des rivières (du Mât et des Fleurs Jaunes) doit se faire selon deux mécanismes complémentaires, le premier, rapide et direct, ayant lieu à partir des zones sensibles proches des villages de Hell-Bourg et Grand-Îlet, et le second, avec un temps de retard, à partir des zones hautes avec passage dans les sites d'alluvionnement intermédiaires (cf. description des tronçons de « rivière 3 et rivière 4 »). Une telle origine, jointe aux chutes de blocs en provenance des falaises, expliquerait la grande abondance des gros blocs très émoussés rencontrés dans les cours d'eau.

4.2.3. Les sites majeurs d'érosion

Comme exposé plus en détail antérieurement, l'érosion qui affecte le cirque est liée à deux phénomènes combinés, tous deux causés par les précipitations et leurs conséquences, infiltration de l'eau pour les premiers, ruissellement pour les seconds :

- les glissements de terrain, qui remobilisent des matériaux volcaniques en grande partie préalablement déstructurés par différents épisodes géologiques successifs anciens ou récents (tectoniques, volcaniques, etc..),

- le ruissellement, qui va entrainer un matériel ainsi fragilisé.

La consultation des cartes du rapport Humbert (1981) montre clairement cette relation, où par exemple, au nord de Hell-Bourg, la falaise limitant la zone d'alluvionnement intermédiaire porte de nombreux glissements alors que ce même site correspond actuellement à une zone d'érosion intense signalée par les points 15 et 16 (illustration 24). C'est également ce que suggère le rapport SOGREAH (2000) quant aux apports de matériaux qui proviennent de la ravine à Jacquot « *pour une grande part, non pas du fond de la ravine mais de zones externes : falaises et ravine Noury crée par le cyclone Hyacinthe* ».

Au cours de la réalisation de la carte de sensibilité à l'érosion, les zones présentant un fort aléa (griffures profondes, érosion régressive importante, etc.) ont été répertoriées comme des sites d'alimentation parmi les plus productifs en alluvions et représentées par des points sur la carte. Bien évidemment ces zones n'ont été sélectionnées, pour la plupart, qu'à partir de l'examen des photographies aériennes. Seules certaines d'entre elles ont été observées sur le terrain, comme aux alentours d'Hell-Bourg et de Grand-Ilet.

Ces zones sont représentées sur l'illustration 24, en superposition à la carte précédente pour la zone du cirque et leur localisation est détaillée sur l'illustration 25. Cette approche plus ponctuelle contribue à faire ressortir la région de Hell-Bourg et, dans une moindre mesure, celle de Grand-Ilet, comme très affectée par l'érosion (importants glissements + ruissellement) et donc comme contributeurs majeurs à l'alluvionnement.

L'illustration 25 permet également de constater que la plupart des sites d'érosion intense sont présents sur les photographies dès 1966 et vont en s'amplifiant avec le temps. Il s'agit donc d'une tendance géomorphologique durable.

Les points signalés dans le cône ne contribuent à l'alluvionnement que dans sa partie aval. Ces points toutefois ont été signalés pour mémoire dans la mesure où le mécanisme mis en œuvre est en grande partie différent de celui évoqué jusqu'ici. Il s'agit seulement d'érosions de berges issues de la dynamique propre du cours d'eau.

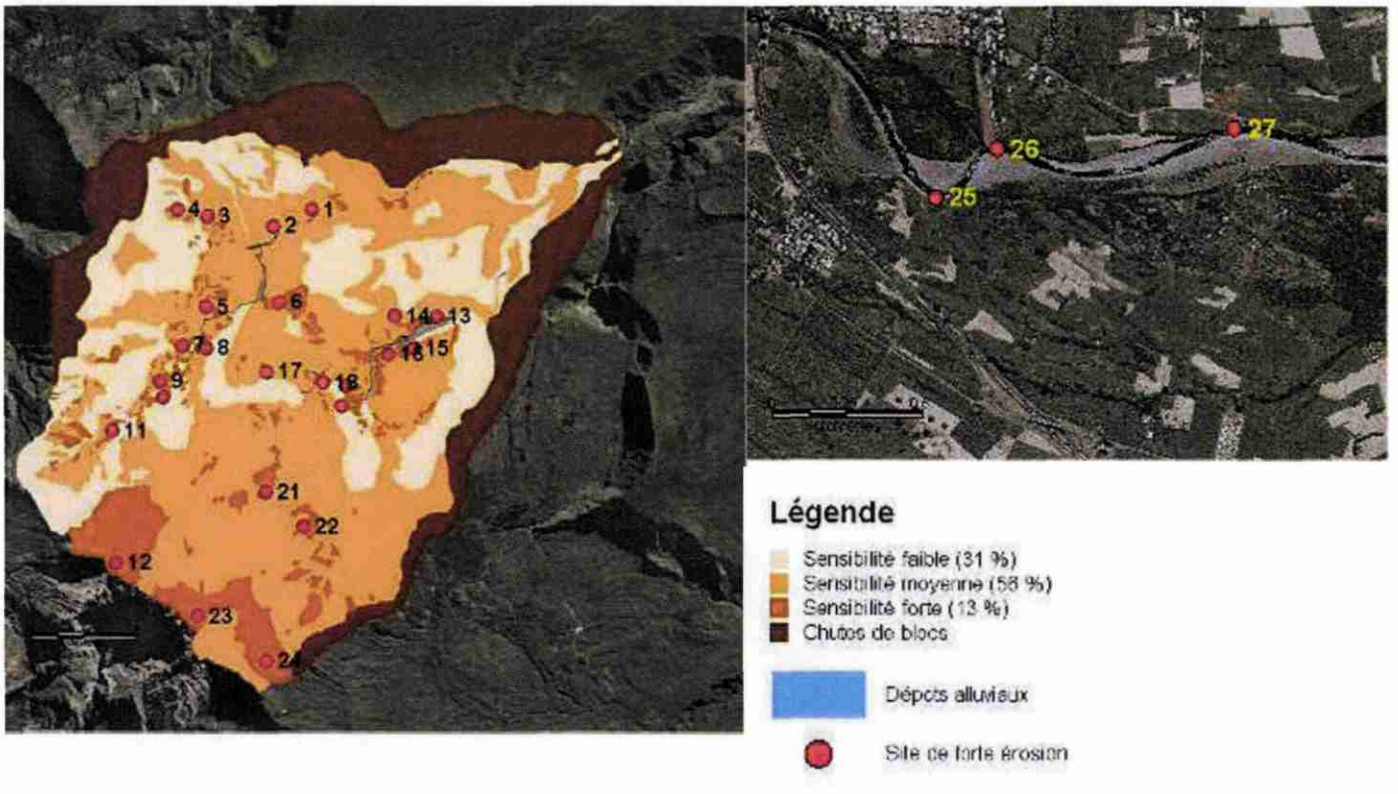


Illustration 25 – Localisation des sites d'érosion intense dans le cirque (à gauche) et dans le cône (à droite)

Numéro	Localisation approximative	Coordonnées X (WG384)	Coordonnées Y (WGS84)	Présence constatée
	Cirque de Salazie			
1	Rive gauche de rivière des Fleurs Jaunes ; SE de Mare-à-Martin	55.5027	-21.0223	1966
2	Rive gauche de rivière des Fleurs Jaunes ; S de Mare-à-Martin	55.4954	-21.0251	1966
3	Rive droite de ravine à Jacquot ; NE de Grand-Ilet	55.4834	-21.0226	1966
4	Rive droite de ravine à Jacquot ; N de Grand-Ilet	55.4776	-21.022	1966
5	Rive gauche de rivière des Fleurs Jaunes ; Piton de Papangue	55.4827	-21.039	1966
6	NNO du Piton d'Enchaing	55.4964	-21.0383	1997
7	Rive gauche de rivière des Fleurs Jaunes ; NE de Camp-Pierrot	55.4783	-21.0457	1966
8	Rive droite de rivière des Fleurs Jaunes ; NE de Camp-Pierrot	55.4828	-21.0462	1966
9	Rive gauche de rivière des Fleurs Jaunes ;E de Camp-Pierrot	55.4739	-21.0519	1966
10	Rive droite de rivière des Fleurs Jaunes ; SE de Camp-Pierrot	55.4746	-21.0547	1966
11	Rive droite de rivière des Fleurs Jaunes ; SO du Grand-Sable	55.4651	-21.0605	1966
12	NO de Gros-Morne et SE de Col-de-Fourche	55.4656	-21.0835	1966
13	Rive gauche de rivière du Mât ; O de Pont de la Savane	55.5256	-21.041	1966
14	Rive gauche de rivière du Mât ; O de Pont de la Savane	55.5177	-21.0409	1966
15	Rive droite de rivière du Mât ; ONO de Mare-à-Poule-d'Eau	55.5213	-21.0466	1966
16	Rive droite de rivière du Mât ; ONO de Mare-à-Poule-d'Eau	55.5165	-21.0476	1966
17	Ravine Olivette	55.494	-21.0504	1966
18	Rive droite de rivière du Mât ; N de Ilet-à-Vidot	55.5044	-21.0524	1966
19	Rive gauche de Bras-Sec ; N de Ilet-à-Vidot	55.5086	-21.053	1966
20	Rive gauche de Bras-Sec ; N de Ilet-à-Vidot	55.5093	-21.057	1966
21	Ravine Bachelier ; Source pétrifiante	55.4935	-21.0715	1966
22	Rive gauche de rivière du Mât ; SO de Ilet-à-Vidot	55.5005	-21.0775	1966
23	N du Piton des Neiges	55.4805	-21.0929	1966
24	Rivière du Mât ; E du Piton des Neiges	55.4933	-21.1008	1966
	Delta			
25	Rive droite de rivière du Mât ; NE de Paniandi	55.6595	-20.9838	2003
26	Rive gauche de rivière du Mât ; S du centre d'enfouissement	55.6615	-20.9823	2003
27	Rive gauche de rivière du Mât ; E du centre d'enfouissement	55.6691	-20.9818	1978

Illustration 26 – Tableau de localisation des sites d'érosion majeurs visibles sur les photographies aériennes

4.2.4. Mesures ponctuelles d'érosion

Ces mesures n'ont été faites que sur des zones dont les orthophotographies correspondantes présentent une bonne superposition (décalage de moins de 5 mètres), après plusieurs tests réalisés sur des points considérés comme invariants (carrefours, bâti, etc), la méthode suivante a été appliquée :

- dans un premier temps, est digitalisée la ligne de limite de falaise correspondant à 1997,

- dans un second temps, sont tracés des polygones qui s'appuient sur cette première limite et prennent en compte celle de 2003. Ne sont finalement retenus que ceux dont la largeur est, à un moment donné du tracé, au moins égale à 5 m, ceci pour tenir compte des imprécisions de superposition constatées entre les deux orthophotographies,

- dans un troisième temps, des mesures ont été faites entre 2003 et 2007, dans des zones où la donnée est disponible (essentiellement le nord de Hell-Bourg). Le calcul a permis de d'aboutir à des vitesses de recul comparables avec celles calculées sur les périodes précédentes,

- dans un quatrième temps l'évolution historique de la ligne d'érosion a été suivie en utilisant toutes les photographies aériennes disponibles dont l'échelle nominale est indiquée sur les photographies (1/50 000 pour 1966, et 1/25 000 pour 1978 et 1984). La seule mesure tentée avec ces documents non orthorectifiés a été faite entre les photographies de 1966, les plus anciennes et les orthophotographies de 2003, afin d'obtenir un pas de temps maximum. L'objet à mesurer est pris le plus près possible du nadir des photographies, seul point où les distorsions sont a priori nulles et l'échelle la plus proche de celle annoncée.

Ces mesures ont été conduites principalement dans les environs des villages de Hell Bourg et Grand Ilet qui correspondent à des zones sensibles, au vu de l'historique des glissements.

Elles sont localisées ci-après par les coordonnées géographiques extraites du Scan25 de l'IGN et par leur proximité des points de la figure 24 qui signalent les zones de forte érosion.

Zone nord de l'ilet à Vidot (Hell Bourg)

Localisation :

X : 55° 30' 27" ; Y : 21° 03' 27" ; point : 20

Comparaison 1997-2003

3 polygones répondent au critère de largeur puisqu'elle y est toujours supérieure à 10 m. Ils ont une surface cumulée de quelques 900 m², pour un linéaire de falaise de l'ordre 130 m.

Cette mesure entre 1997 et 2003 permet de conclure à un recul de l'ordre de 2 m/an

Comparaison 1966-2003

L'illustration 26 permet d'évaluer l'érosion régressive qui a affecté le nord de l'Ilet à Vidot : la ligne jaune synthétise la limite de la falaise en 1966 et la double flèche rouge mesure la distance maximale, de l'ordre de 120 m, qui sépare les deux situations.

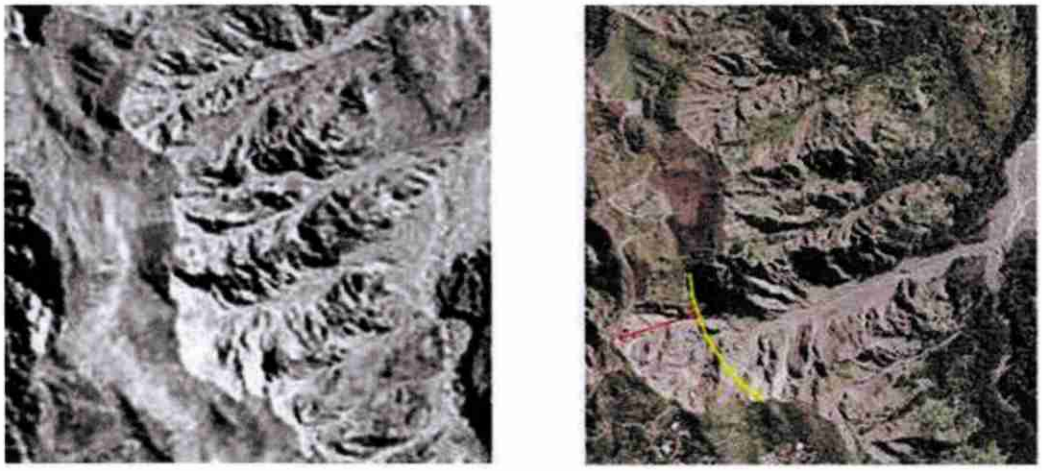


Illustration 27- Erosion régressive au nord de l'Ilet à Vidot

Rapportée à une durée de 37 années, cette mesure permet d'estimer le recul annuel à plus de 3 m/an. Peut être qu'une valeur intermédiaire, de l'ordre de 2,5 m/an serait un bon compromis entre ces deux mesures. Elle serait, en tous cas en accord avec les observations de terrain puisqu'en 2007 le virage en épingle qui mène à l'élevage porcin situé en amont a été emporté, ce qui implique un recul de plus de 10 m en 5-6 ans.

Zone nord Hell-Bourg

Localisation :

X : 55° 30' 57" ; Y : 21° 03' 36" ; points 15 et 16

Comparaison 1997-2003

Deux polygones répondent au critère de largeur. Ils ont une surface cumulée d'environ 3000m², pour un linéaire de falaise de l'ordre de 300 m. La largeur maximum est de

l'ordre de 18 m, distance qui correspond au recul maximum enregistré en 6 ans (soit 3 m/an).

Comparaison 2003-2007

4 polygones répondent au critère de largeur dont un exemple est donné sur l'illustration 27. Environ 30 m de recul sont mesurés en deux points correspondant à des encoches d'érosion régressive et entre 10 et 15 m pour des linéaires de falaise. Sur une période de 4 ans, le recul moyen retenu est de l'ordre de 15 m.

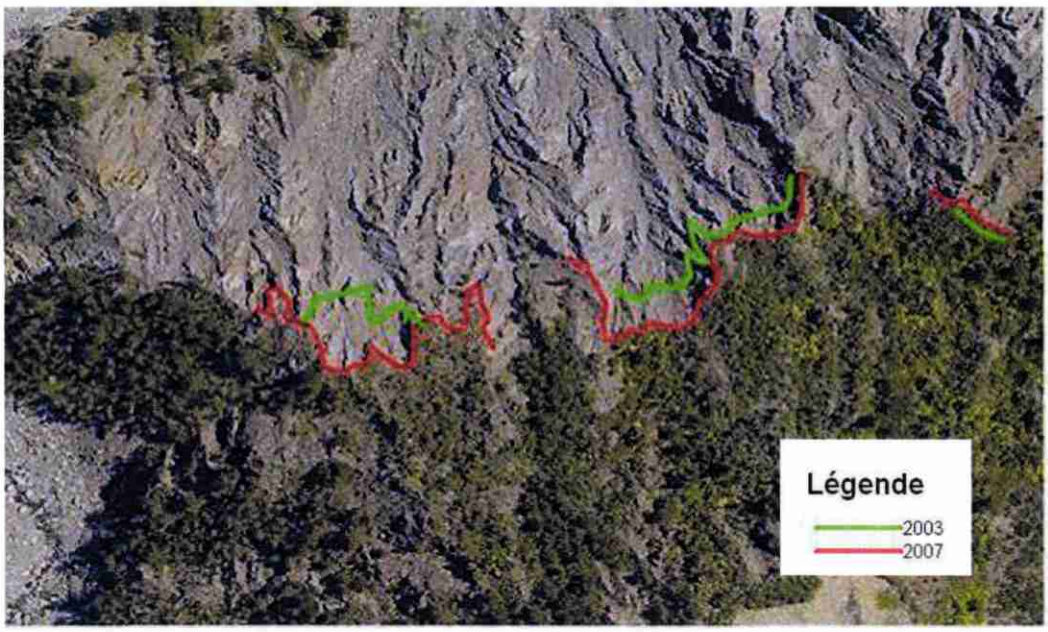


Illustration 28 – Exemple de recul, au nord de Hell-Bourg

Comparaison 1966-2003

L'absence de point de repère ne permet pas de réaliser une mesure, même estimée, du recul. Cette observation est la même pour les autres dates disponibles.

Zone nord de Grand Ilet

Localisation :

X : 55° 28' 32" ; Y : 21° 01' 20" ; point 4

Comparaison 1997-2003

Un polygone répond au critère de largeur. Il a une surface d'environ 300 m² , pour un linéaire de falaise de l'ordre 60 m. La largeur maximum est de l'ordre de 10 m, distance qui correspond au recul maximum enregistré en 6 ans (soit 1,6 m/an).

Comparaison 1966-1978-1984-2003

Les photographies correspondantes montrent une grande différence de morphologie entre ces dates (Illustration 28).

Illustration 29 - Evolution de la rive droite de la ravine de la Roche à Jacquot (Nord de Grand-Ilet)

La première, la plus évidente, concerne le « méandre », situé au centre des photographies, qui est contrôlé par une arête particulièrement visible en 1966 et en 1978, dates entre lesquelles la morphologie du site n'a que peu évolué. Le méandre est très visible, car fonctionnel, sur les photographies de ces deux dates. Entre 1978 et 1984, période durant laquelle l'arête rocheuse est détruite, le méandre s'estompe en revanche, pour disparaître définitivement en 2003. A cette date, une végétation dense a envahi le bras mort du méandre et masque l'ancienne morphologie.

La seconde correspond au recul vers le sud de la rive de la ravine, du fait d'une érosion régressive et de probables glissements. Ce recul se produit en deux temps :

- entre 1978 et 1984, se forme un petit talweg situé immédiatement à l'ouest de l'arête rocheuse et perpendiculairement à la ravine. Il se traduit par une digitation de quelques 250 m de long sur 60 m de large. Le recul sur ce talweg, certes très ponctuel, peut être estimé à quelques 40 m/an.

- entre 1984 et 2003, le recul affecte plutôt le linéaire de la rive de la ravine, de part et d'autre de l'arête, sur une distance de l'ordre de 60 à 80 m, soit environ 3,5m/an.

Zone nord-est de Grand Ilet

Localisation :

X : 55° 29' 02" ; Y : 21° 01' 29" ; point 3

Comparaison 1997-2003

Trois polygones répondent au critère de largeur. Ils ont une surface cumulée de quelques 3 000 m², pour un linéaire de falaise de l'ordre 170 m. La largeur maximum est de l'ordre de 25 m, distance qui correspond au recul maximum enregistré en 6 ans (soit 4 m/an).

Comparaison 1966-1978-1984-2003

A l'instar de la zone Nord, les reculs de profils sont faibles entre 1966 et 1978. En revanche, entre 1978 et 1984, se développent de nombreuses griffes d'érosion, en particulier en limite est des photographies (Illustration 29) ainsi qu'un nouveau talweg étroit et allongé entre la ravine de la Roche à Jacquot et la grande épingle à cheveux de la D52 à la hauteur de la station de compostage.

L'importance de cette action érosive ponctuelle est figurée par les traits jaunes superposés aux photographies. Le recul sur ce talweg, certes très ponctuel, peut être estimé à près de 500 m sur 6 ans, soit environ 80 m/an.

La formation aussi rapide de ravines dans le nord du massif de Grand-Ilet suppose d'intenses précipitations, peut-être concentrées par une imperméabilisation liée à l'aménagement, à la suite de la disparition de la végétation naturelle.

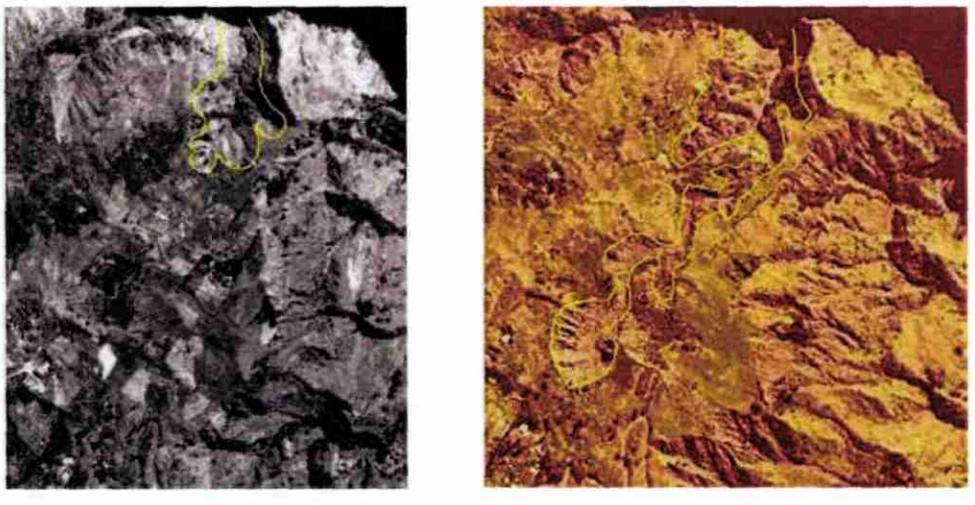


Illustration 30 - Avancée des ravines entre 1978 et 1984

Zone sud de Grand Ilet

Localisation :

X : 55° 28' 31" ; Y : 21° 02' 50" ; point : 7

Comparaison 1997-2003

Un polygone répond au critère de largeur. Il a une surface d'environ 270 m², pour un linéaire de falaise de l'ordre 45 m. La largeur maximum est de l'ordre de 9 m, distance qui correspond au recul maximum enregistré en 6 ans (soit 1,5 m/an).

Cette valeur relativement faible est en accord avec le fait que, hormis ce point, l'activité érosive ne semble pas très importante dans cette partie du cirque, comme le montre un examen rapide des missions photographiques successives.

Commentaires

Cette étude de différents cas particuliers permet d'évaluer le recul qui affecte les terrains, au niveau de sites sujets à des phénomènes d'érosion.

Les vitesses de recul qui ont été mesurées sur des linéaires de « falaises » varient entre 1,5 m/an et 4 m/an, comme l'indique l'illustration 30.

Localisation	Vitesse recul (m/an)	Période recul
Nord Ilet-à-Vidot	2	1997-2003
	3	1966-2003
Nord Hell-Bourg	3	1997-2007
Nord Grand-Ilet	1,6	1997-2003
	3,5	1997-2003
Nord-est Grand-Ilet	4	1997-2003
Sud Grand-Ilet	1,5	1997-2003

Illustration 31 – Vitesses de recul sur les sites d'érosion régressive

La moyenne des 6 valeurs mesurées, avec des photographies orthorectifiées ou non, sur la période de 6 ans entre 1997, 2003 et 2007 est de 2,6 m/an. Cette valeur est du même ordre de grandeur que celle mesurée sur une période de 37 ans au nord de l'Ilet-à-Vidot (ligne grisée) qui présente un caractère plus intégrateur. Il paraît donc raisonnable de considérer que cette dernière valeur est représentative de l'intensité de l'érosion active dans le cirque de Salazie.

Une telle valeur ne tient pas compte des vitesses de recul, respectivement 40 et 80 m/an entre 1978 et 1984, concernant les deux ravines situées au nord et au nord-est de Grand-Ilet. Elles semblent correspondre à des évènements ponctuels (cyclone Hyacinthe en 1980 ?) puisqu'elles n'apparaissent que sur les photographies de 1984

et ne semblent plus actives depuis si l'on en juge par la densité de la végétation qui les a envahies.

4.2.5. Evaluation du volume annuel érodé

Si l'on combine les résultats des §4.2.2 (Cartographie de la sensibilité potentielle à l'érosion) et 4.2.4 (Mesures ponctuelles d'érosion), il est possible d'estimer le volume de matériaux érodés annuellement, en ne considérant que les zones a priori les plus sensibles. Cette évaluation reste très imprécise puisqu'elle n'est réalisée qu'à partir de l'observation des photographies aériennes qui, bien qu'orthorectifiées, présentent des erreurs de localisation de 1 à 10 mètres, en particulier en zones morphologiquement contrastées. De la sorte, seules les différences les plus importantes peuvent être prises en compte. Aucun calage de terrain n'a été réalisé.

C'est ainsi que l'évaluation n'a été tentée que sur le seul site de Hell-Bourg, à partir des orthophotographies de 2003 et de 2007, qui montrent les reculs les plus importants et permettent donc d'effectuer des mesures a priori plus fiables.

L'évaluation proposée combine 3 informations différentes :

- le recul moyen ***(rm)*** qui a été évalué comme expliqué au § 4.2.4, zone nord Hell-Bourg (illustration 27), en comparant les photographies aériennes multidates : ***rm = 15 m*** environ,

- la pente moyenne (***pm***) des talus d'érosion qui constituent les berges de la rivière du Mât, évalué à partir des fond topographiques IGN : ***pm = 30°*** environ,

- la surface cumulée des polygones classés en forte sensibilité sur la carte de sensibilité à l'érosion (cf. §4.2.2).

L'épaisseur moyenne érodée (***éé***) a été calculée selon la formule trigonométrique suivante : ***éé = r x sin30***. La valeur obtenue est de 7,5 m.

Le volume brut ***(Vb)*** est obtenu en multipliant la surface des polygones classés en sensibilité forte entourant le site de Hell-Bourg (Illustration 31), soit environ 600 000 m², par l'épaisseur érodée : ***Vb = 4 500 000 m³***.

Un tel calcul suppose une couche érodée de forme grossièrement parallélépipédique. Il doit toutefois être modulé pour les deux raisons suivantes :

- la première considère que, si la limite haute de la berge recule de 15 m, celle du bas, au contact avec les alluvions, ne bouge pas. La coupe de la couche érodée, perpendiculaire à la berge, correspond donc plus à un triangle qu'à un rectangle, comme présupposé avec le calcul précédent. Le volume initial peut donc être divisé par 2,

- la seconde considère que, lors de l'érosion, les ravines sont, sans doute, accentuées mais sûrement pas rabotées et restent en place. En coupe parallèle à la berge, la

forme de la zone érodée a donc grossièrement une forme de zig-zag. Le volume initial peut donc être encore divisé par 2.

Illustration 32 – Polygones pris en compte pour l'évaluation des volumes érodés

Dans ces conditions, pour un recul de 15 m entre 2003 et 2007, le volume effectivement érodé est de l'ordre de **1 125 000 m^3**. Cette valeur, qui, compte tenu des hypothèses présentées ci-dessus, pourrait représenter une fourchette haute du volume érodé autour du site d'Hell-Bourg, semble compatible avec celle estimée, dans la même période de temps, à l'aide de l'analyse des débits enregistrés sur la rivière du Mât, de l'ordre de **900 000 m^3** (cf. volume 4/5 de l'étude).

Généralisé à toutes les surfaces du cirque de Salazie interprétées comme sensibles au §4.2.2 (8 640 000 m²), ce calcul porterait à environ 16 000 000 m3 le volume érodé entre 2003 et 2007. La précision d'une telle évaluation reste bien sûr très aléatoire.

Ce type de calcul, réalisé avec des documents photographiques, sur un intervalle de plusieurs années, ne rend pas compte de l'action de chaque cyclone. Pour mesurer plus précisément le volume érodé par un cyclone donné, il faudrait disposer de documents, enregistrés dans le cirque et orthorectifiés avec grande précision, à l'issue

de chaque évènement. Un calage terrain concomitant serait en outre indispensable pour apprécier la relation réelle entre recul horizontal et volume érodé.

4.3. LES PERTES DE SEDIMENTS

Outre l'apport de matériel alluvionnaire issu des berges, la dynamique morphosédimentaire de la rivière est liée aux pertes de sédiments. Ces « sorties » du système peuvent être soit naturelles (dispersion des sédiments en mer), soit anthropiques via les extractions de granulats réalisés en rive droite du cône.

Cet aspect est abordé en détail dans le volume 4/5 de l'étude.

5. Conclusion

La Rivière du Mât montre un bon exemple de rivière torrentielle provoquant, depuis le bassin de réception jusqu'au cône en passant par les gorges, des phénomènes de forte à très forte intensité, respectivement érosion initiale, alluvionnement final et transport intermédiaire.

Du fait d'un contexte géologique et climatique sensible, la présence abondante de roches peu consolidées, disloquées et remobilisées par différents épisodes volcaniques et climatiques favorise les glissements et phénomènes d'érosion qui sont fréquents et intenses notamment dans le cirque.

L'étude de photographies aériennes prises entre 1966 et 2007 a permis d'approcher une zonéographie de la sensibilité à l'érosion du cirque de Salazie et de localiser les sites qui paraissent les plus affectés par ce phénomène. Ils se concentrent sur les environs des villages de Grand-Ilet et de Hell-Bourg. La comparaison des photographies en quelques points permet d'estimer le recul moyen des limites des plateaux sur lesquels sont installées ces localités à environ 3 m/an, sur une trentaine d'années.

Les volumes apportés sur le seul site d'Hell-Bourg équivalent à 1 125 000 m3 entre 2003 et 2007. Cette évaluation reste toutefois très imprécise puisqu'elle n'est réalisée qu'à partir de l'observation des photographies aériennes qui, bien qu'orthorectifiées, présentent des erreurs de localisation de 1 à 10 mètres, en particulier en zones morphologiquement contrastées. Cette valeur coïncide toutefois avec les calculs de charge maximale (900 000 m3) calculés dans le Vol. 4 de l'étude.

Les matériaux sont ensuite transportés par la Rivière des Fleurs Jaunes pour le nord du cirque et la Rivière du Mât pour le sud. Il ne semble pas qu'il se produise, au niveau du cirque, de dépôts alluviaux intermédiaires dans ces rivières bien qu'une zone d'élargissement existe pour chacune d'entre elles : la présence de basalte subaffleurant dans les deux cas élimine la possibilité de constitution d'une importante réserve de sédiment par surcreusement local.

Cette absence de réserve alluvionnaire intermédiaire notable semble également à exclure tout au long des gorges, entre la confluence des deux précédentes rivières et l'entrée dans le cône. Peu d'élargissements du cours sont visibles et le substratum basaltique est souvent observé, ce qui paraît, là encore, exclure la présence de surcreusements.

Il semble donc que lors des épisodes pluvieux, la majeure partie des matériaux arrachés à la zone du cirque soit transportée jusqu'à la côte, pour former le cône alluvial voire être évacuée à la mer. Les dégâts infligés à la carrière d'extraction de granulats située dans la partie sud du cône montrent que la force du courant est encore notable à l'exutoire de la rivière et permet un tel transport.

6. Bibliographie

BILLARD G., en collab. avec VINCENT P-M (1974) – Carte géologique de La Réunion, feuille de St Benoit. Echelles 1/50 000. Carte et notice explicative (40 p.) Ed. BRGM

BRGM, kit pédagogique sciences de la terre Connaissance de la Réunion – livret de l'enseignant

BRGM (Juin 2004) – Projet de recherche sur l'érosion, le transport solide, et la dynamique torrentielle des rivières de La Réunion – Apport de matériaux dans les rivières de la Réunion - Rapport BRGM/RP- 53235-FR.

Aubié S. et Cruchet M. (2003) - Les mouvements de terrain de grande ampleur dans les cirques et les grandes ravines. Inventaire des mouvements de terrain historiques. Programme 2003. Rapport BRGM/RP-52913-FR, 3 tab., 3 fig, 1 ann., 17 p.

De la Torre Y. (2006) – Projet DYNTOR. Caractéristiques géomorphologiques du lit de la Rivière du Mât entre le pont de l'Escalier et le littoral – Rapport final BRGM n° BRGM/RP-54445-FR, pp. 41, Illustration 10, ann. 3 (dont 1 carte HT).

Humbert M., Pasquet R., Stieltjes L. (1981) – Les risques géologiques dans les cirques de Salazie et de Cilaos (ile de la Réunion) – Rapport BRGM n° 81 SGN 581 REU, pp. 101, Illustration 30, carte hors texte 2.

Koulinsky V. (1994) – Etude de la formation d'un lit torrentiel par confrontation d'essais sur modèle réduit et d'observations de terrain. Thèse de l'Université de Grenoble 1. Cemagref, 538 p.

LCHF (1984) - Monographie de la Rivière du Mât – Eléments d'hydrologie, d'érosion et de transports sédimentaires.

Petit V. (2006) – Projet DYNTOR. Synthèse – Rapport final BRGM n° BRGM/RP-54591-FR, pp. 49, Illustration 11.

SAGE Ingénièrie (2000) – Commune de Salazie, Mouvements de terrain à Grand-Ilet, étude géotechnique. Rapport n° RP.1571/PD.JD

SOGREAH (2000) – Ravine Roche à Jacquot – Travaux de correction torrentielle à Grand-Ilet. Rapport n°SRE/DPr/VDt/554512R1.

Annexe 1

Cartographie des formations alluviales à l'échelle du 1/25 000

Voir planches hors texte :

- Planche 1/3
Interprétation des orthophotographies IGN de 1997

- Planche 2/3
Interprétation des orthophotographies IGN de 2003

- Planche 3/3
Interprétation des orthophotographies AIGL de2007

Annexe 2

Utilisation des photographies aériennes : limites de la méthode

1. Mode d'observation des photographies :

L'observation de la morphologie a été menée en mode stéréoscopique pour les photographies aériennes des années antérieures à 1997. Ce mode d'observation autorise une excellente perception du relief, parfois impressionnante dans le cirque, mais ne permet pas de réaliser des mesures fiables visant à établir une quantification des variations morphologiques mises en évidence. Seules des estimations peuvent être tentées.

L'observation a été réalisée en monoscopie pour les orthophotographies mosaïquées qui sont disponibles pour les années 1997, 2003 et 2007 sur l'ensemble du bassin versant de la Rivière du Mât, à l'exception, pour la dernière date, des hauts du cirque. La restitution de la morphologie n'est alors possible que grâce aux effets d'ombre mais en revanche les mesures y sont plus fiables, même si une imprécision subsiste, en particulier pour les forts reliefs qui génèrent des distorsions très importantes. L'illustration 32 montre le type de flou qui peut se produire lors de l'orthocorrection des photographies qui implique un ré-échantillonnage des documents.

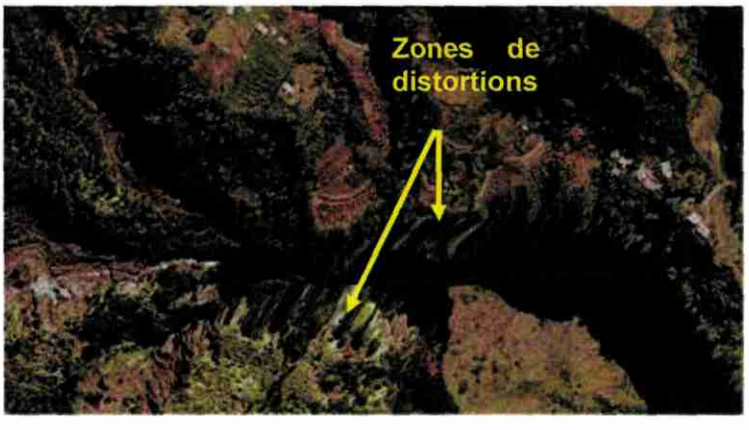


Illustration 33 - Exemple de flou lié à l'orthocorrection des photographies

2. Problèmes rencontrés lors de l'utilisation des orthophotographies.

Ces problèmes sont de plusieurs ordres qui sont résumés ci-après :

2.1. Problèmes de géométrie

- les mosaïques présentent des différences de résolution (1 m pour 1997, 0,5 m pour 2003 et 0,25 pour 2007) qui peuvent perturber la perception des phénomènes,

- les mosaïques présentent des décalages relatifs de 1 à 10 m alors que les différences recherchées sont du même ordre de grandeur. Les précautions à prendre consistent à rechercher les sites où les différences sont les plus importantes, à contrôler la morphologie avec le scan25 de la carte topographique, lui-même non exempt de distorsions mais considéré comme référence, et à vérifier la continuité du phénomène sur les missions photographiques anciennes.

2.2. Problèmes de radiométrie

- il existe de fortes différences de densité de couleurs entre les images, en particulier entre 1997 et 2003-2007. Cette différence est suffisante pour, localement, perturber fortement l'interprétation,

- les problèmes de ré-échantillonnage des images déjà évoqué pour la géométrie peuvent générer des perturbations radiométriques localement gênantes.

2.3. Problèmes liés à la différence d'heure ou d'époque de prise de vue

La hauteur du soleil est différente d'une mission à l'autre. Les ombres portées différentes modifient l'appréciation des limites morphologiques en les déplaçant de quelques mètres à quelques dizaines de mètres. Pour les mesures d'érosion, il est donc nécessaire de choisir les falaises orientées face au soleil et de délaisser celles accentuées par l'ombre portée même si, au premier abord, elles apparaissent plus nettement.

3. Problèmes généraux rencontrés sur tous les types de documents

3.1. Les effets d'ombre :

Ils constituent le problème principal puisque des versants entiers peuvent être invisibles et les limites des unités impossibles à tracer. Lorsqu'il a été continué pour homogénéisation du dessin, le trait est alors le résultat d'une approximation et sa validité est tout à fait relative. Le plus souvent l'interprétation a été arrêtée à la limite de l'ombre.

En outre les limites d'ombre sont différentes sur les différents documents. Cela est dû à des hauteurs de soleil (heures de prise de vue) et des altitudes de

visée différentes. Une telle différence est palpable quand les orthophotographies de 1997 et 2003, prises à haute altitude, sont comparées à celles de 2007, prises plus près du sol. Ces dernières présentes beaucoup moins de zones d'ombre, même au niveau des morphologies encaissées. Ces différences empêchent de réaliser certaines comparaisons de réseau hydrographique.

3.2. La comparaison des documents

Les comparaisons des orthophotographies entre elles et avec les photographies non orthorectifiées n'ont pu se faire qu'en quelques points particuliers pour des évènements particulièrement marqués. Les imprécisions de correction pour les premières et l'absence de correction pour les secondes empêchent pratiquement de prendre en compte des variations linéaires de dimension inférieures à 5 m, localement 10 m.

En outre, les différences de résolution (de 1m à 25 cm) et de précision de correction ont conduit à ne privilégier que quelques points d'évaluation où les différences des tracés leur étaient significativement plus importantes.

3.3. Les lignes de vol aérien

La complexité des vols aériens menés pour réaliser la couverture photographique rend le suivi des photographies non orthorectifiées peu aisé.

Annexe 3

Description sommaire des sites de mesure et d'observation de la granulométrie

1. Tronçon 5

Site n° 1 : Cône alluvial

Géologie : formations alluviales de dépôts de type cônetque du lit mineur actif. Pas de substratum visible (Illustration 9),

Morphologie : plaine d'épandage sans accident morphologique,

Granulométrie des alluvions : hétérogène, allant des sables fins aux blocs métriques,

Commentaires :

- aucune organisation géométrique des éléments n'est décelée

- les blocs métriques, localisés à quelques 1000 m du rivage, témoignent que la rivière peut, en phase de crue, développer une très forte énergie de transport,

Site n° 2_1 : Cône alluvial

Géologie : formations alluviales de dépôts de type cônetque du lit mineur actif. Pas de substratum visible,

Morphologie : plaine d'épandage sans accident morphologique,

Granulométrie des alluvions : hétérogène, allant des sables fins aux blocs métriques,

Commentaires : aucune organisation géométrique des éléments n'est décelée.

Site n° 2_2 : Cône alluvial

Géologie : formations alluviales de dépôts de type cônetque du lit mineur actif. Pas de substratum visible,

Morphologie : plaine d'épandage sans accident morphologique,

Granulométrie des alluvions : hétérogène, allant des sables fins aux blocs métriques,

Commentaires : aucune organisation géométrique des éléments n'est décelée.

Site n° 3 : Cône alluvial

Géologie : formations alluviales de dépôts de type cônetque du lit mineur actif. Pas de substratum visible,

Morphologie : plaine d'épandage sans accident morphologique,

Granulométrie des alluvions : hétérogène, allant des sables fins aux blocs métriques,

Commentaires : aucune organisation géométrique des éléments n'est décelée.

Site n° 4 : Cône alluvial

Géologie : formations alluviales de dépôts de type cônetque du lit mineur actif. Pas de substratum visible,

Morphologie : plaine d'épandage sans accident morphologique,

Granulométrie des alluvions : hétérogène, allant des sables fins aux blocs métriques,

Commentaires : aucune organisation géométrique des éléments n'est décelée.

Site n° 5 : Entrée du Cône alluvial

Géologie : formations alluviales de dépôts de type torrentiel. Substratum visible, en limite nord du méandre, vers l'amont (coulée de type lahar),

Morphologie : méandre accentué de la rivière qui coule entre des falaises creusées dans le cône alluvial ancien (Illustration 10),

Granulométrie des alluvions : hétérogène, allant des sables fins aux blocs métriques,

Commentaires : aucune organisation géométrique des éléments n'est décelée.

2. Tronçon 4

Site n° 6 : Pont 4 voies

Géologie : substratum basaltique et lahar,

Morphologie : encaissement dans le substratum et les formations du cône alluvial ancien,

Granulométrie des alluvions : hétérogène, allant des sables fins aux blocs métriques,

Commentaires : aucune organisation géométrique des éléments n'est décelée.

Site n° 7 : Pont Rivière du Mât

Géologie : substratum basaltique massif et coulées indurées,

Morphologie : encaissement dans le substratum,

Granulométrie des alluvions : hétérogène, allant des sables fins aux blocs métriques, mais peut être plus fin que précédemment,

Commentaires : aucune organisation géométrique des éléments n'est décelée.

3. Tronçon 3

Site n° 8 : Méandre Cap Argile, zone concave

Géologie : formations alluviales de dépôts de type torrentiel. Le substratum n'est pas visible,

Morphologie : encaissement dans d'anciennes terrasses,

Granulométrie des alluvions : hétérogène, allant des sables fins aux blocs métriques,

Commentaires : aucune organisation géométrique des éléments n'est décelée.

Site n° 9 : Méandre Cap Argile, zone convexe

Géologie : formations alluviales de dépôts de type torrentiel. Le substratum n'est pas visible,

Morphologie : encaissement dans d'anciennes terrasses,

Granulométrie des alluvions : hétérogène, allant des sables fins aux galets. La granulométrie est plus fine qu'en zone concave du méandre, ce qui est logique,

Commentaires : aucune organisation géométrique des éléments n'est décelée.

Site n° 10 : Passerelle Cap Argile

Géologie : formations alluviales de dépôts de type torrentiel. Le substratum basaltique supporte la passerelle,

Morphologie : encaissement dans d'anciennes terrasses et, localement, dans le substratum,

Granulométrie des alluvions : hétérogène, allant des sables fins aux galets

Commentaires : aucune organisation géométrique des éléments n'est décelée mais la répartition des éléments fins et grossiers, tantôt en rive gauche, tantôt en rive droite (Illustration 33) témoigne d'un déplacement rapide du lit vif dans le lit mineur.

Illustration 34 - Divagation du lit vif signalé par le déplacement de la granulométrie

Site n° 10b : Pont de l'Escalier

Géologie : formations alluviales de dépôts de type torrentiel,

Morphologie : la rivière est encaissée dans le substratum basaltique,

Granulométrie des alluvions : hétérogène, allant des sables fins aux galets

Commentaires : aucune organisation géométrique des éléments n'est décelée.

4. Tronçon 1

Site n° 11 : Pont de Salazie

Géologie : formations alluviales très réduites de dépôts de type torrentiel,

Morphologie : la rivière est encaissée dans le substratum basaltique où elle a creusé un défilé étroit (30 m environ),

Granulométrie des alluvions : hétérogène, allant des galets aux blocs métriques

Commentaires : les alluvions sont organisées selon 3 niveaux de dépôts (lit actuel et 2 terrasses) séparés de 2 à 4 m et figurant des niveaux de crue successifs (Illustration 34)

Illustration 35 - Repérage de 3 niveaux de dépôts dans le défilé de la Rivière du Mât en aval du pont de Salazie (altitude croissante : jaune, marron)

Site n° 13 : Pont de la Savane

Géologie : substratum basaltique dans lequel la rivière a creusé un défilé. Quelques gros blocs sont observés,

Morphologie : la rivière est encaissée dans le substratum où elle a creusé un profond (50 m environ) défilé étroit (20 m environ),

Granulométrie des alluvions : hétérogène, allant de galets (une plage de quelques m²) à quelques blocs métriques (1 à 4 m),

Commentaires : aucune organisation géométrique des éléments n'est décelée.

Site n° 14 : Nord Mare à Poule d'eau

Géologie : les alluvions reposent sur le substratum composé de brèches basaltiques qui apparaît ça et là sur ce site d'alluvionnement intermédiaire. Il est donc probable

qu'il n'y ait pas de surcreusement important susceptible de stocker un grand volume d'alluvions,

Morphologie : 3 niveaux de dépôts peuvent être observés sur ce site, qui rappellent les 3 niveaux vus sous le pont de Salazie (site n° 11).

Granulométrie des alluvions : les alluvions rencontrées sur ce site sont très hétérogènes quant à leur taille (mm à plurimétrique) et à leur degré d'émoussé (anguleux à sub-sphérique),

Commentaires : les alluvions présentent en ce point, par rapport à l'axe du cours d'eau, une organisation dans leur répartition volumétrique :

- dans et à proximité du lit vif, sur environ 25 m de large, outre la présence d'éléments de taille centimétrique à décimétrique qui tapissent le sol, se concentrent de nombreux blocs métriques (1 à 5 m) généralement émoussés, impliquant un transport,

- au-delà de cette zone, se développe un niveau d'alluvions subactuelles qui domine de 2 à 4 m le lit vif. La taille des éléments, à émoussé variable, varie de 0,1 à 1,5 m.

5. Tronçon « rivière 4 »

Site n° 12_1 : Passerelle Rivière des Fleurs Jaunes

Géologie : formations alluviales réduites de dépôts de type torrentiel, en amont d'un seuil,

Morphologie : la rivière est encaissée dans le substratum où elle a creusé un défilé étroit (30 m environ),

Granulométrie des alluvions : hétérogène, allant des sables aux blocs métriques

Commentaires : aucune organisation géométrique des éléments n'est décelée. La présence d'un barrage a certainement perturbé cette zone.

Site 12_2 : Ravine Grosse Roche

Aucune mesure n'a été faite au niveau de ce petit torrent étroit puisqu'il ne présente pas de plage d'alluvions. Il est toutefois intéressant d'y noter la présence de blocs grossiers subanguleux décimétriques à métriques qui sont mobilisés lors de certaines crues.

Site n° 15_1 et 15_2 : Pont Carozin

Géologie : les alluvions reposent sur le substratum basaltique qui prend la forme d'un dyke à léger pendage vers l'est. Il est donc probable qu'il n'y ait pas de surcreusement susceptible de stocker un grand volume d'alluvions,

Morphologie : 2 niveaux de dépôts peuvent être observés sur ce site, à savoir le lit vif et une unité peu différenciée qui réunit probablement niveau d'alluvions subactuelles et terrasse,

Granulométrie des alluvions : les alluvions rencontrées sur ce site sont très hétérogènes quant à leur taille (mm à plurimétrique) et à leur degré d'émoussé (anguleux à subsphérique),

Commentaires : les alluvions présentent la même organisation générale que sur le site 14, avec une concentration des gros blocs près de l'axe du cours d'eau et celle des blocs plus petit au niveau des alluvions subactuelles. L'extension des surfaces correspondant à ces deux unités a conduit à réaliser une mesure sur chacune (15_1 pour les gros blocs et 15_2 pour les autres)

Site n° 16 : Le Mathurin

Géologie : à proximité de la confluence entre la Rivière des Fleurs Jaunes et la ravine de la Roche à Jacquot, les alluvions reposent sur le substratum basaltique qui est composé de brèches volcaniques injectées de sills basaltiques. Il est donc probable qu'il n'y ait pas de surcreusement susceptible de stocker un grand volume d'alluvions,

Morphologie : 2 niveaux de dépôts peuvent être observés sur ce site, à savoir le lit vif et un niveau d'alluvions subactuelles. En amont de la confluence, la rivière coule entre des terrasses qui, en rive gauche, peuvent atteindre 10 m pour les plus hautes,

Granulométrie des alluvions : les alluvions rencontrées sur ce site sont également très hétérogènes quant à leur taille (mm à plurimétrique) et à leur degré d'émoussé (anguleux à subsphérique),

Commentaires : les alluvions présentent la même organisation générale que sur le site 14 et 15, avec une concentration des gros blocs près de l'axe du cours d'eau et celle des blocs plus petit au niveau des alluvions subactuelles. L'observation d'un point du site (Illustration 35) suggère une explication possible à cette répartition des éléments grossiers et moyens à fins observée depuis le site 14. Lors des crues, la rivière transporte et dépose l'ensemble des sédiments. A l'issue de la crise, l'énergie de la rivière décroit et évacue les matériaux fins et moyens pour ne laisser en place que les plus grossiers. Cette évacuation pourra être accentuée lors de crues postérieures plus modestes.

Illustration 36 - Répartition de la taille des blocs au sein de la ravine de la Roche à Jacquot

Centre scientifique et technique
3, avenue Claude-Guillemin
BP 36009
45060 – Orléans Cedex 2 – France
Tél. : 02 38 64 34 34

Service géologique régional "région"
Adresse
Adresse
Code postal – Ville - France
Tél. :

Document public

Etude hydrogéomorphologique de la Rivière du Mât
et propositions de gestion
Volume 2/5 : Evolution géomorphologique

BRGM/RP-56364-FR

Annexe 1
Cartographie des formations alluviales
à l'échelle du 1 : 25 000

Planche 1/3
Interprétation des orthophographies
IGN de 1997

Présent

brgm

- Alluvions actuelles
- Alluvions subactuelles végétalisées
- Terrasse
- Substratum et formations indurées (lahars)
- Colluvions (éboulis)

0 500 1000
mètres

N

Document public

Etude hydrogéomorphologique de la Rivière du Mât
et propositions de gestion
Volume 2/5 : Evolution géomorphologique

BRGM/RP-56364-FR

Annexe 1
Cartographie des formations alluviales
à l'échelle du 1 : 25 000

Planche 2/3
Interprétation des orthophographies
IGN de 2003

Alluvions actuelles
Alluvions subactuelles végétalisées
Terrasse
Substratum et formations indurées (lahars)
Colluvions (éboulis)

0 500 1000
mètres

N

Document public

Etude hydrogéomorphologique de la Rivière du Mât
et propositions de gestion
Volume 2/5 : Evolution géomorphologique

BRGM/RP-56364-FR

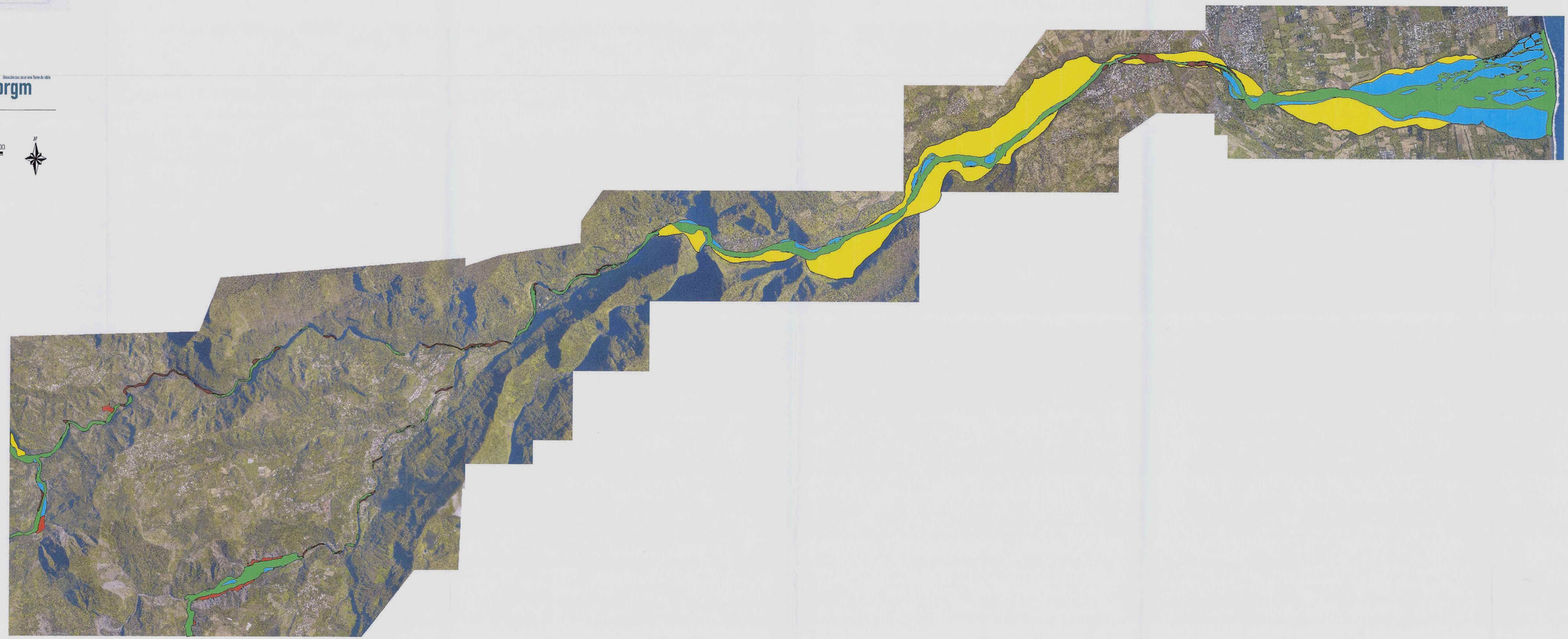
Annexe 1
Cartographie des formations alluviales
à l'échelle du 1 : 25 000

Planche 3/3
Interprétation des orthophographies
AIGL de 2007

Alluvions actuelles
Alluvions subactuelles végétalisées
Terrasse
Substratum et formations indurées (lahars)
Colluvions (éboulis)

0 500 1000
mètres

N



Document public

Etude hydrogéomorphologique de la Rivière du Mât et propositions de solutions de gestion

Volume 3/5 : Analyse pluviométrique et hydrologique

Rapport final

BRGM/RP-56364-FR
Février 2008

Ressources, territoires et habitats
Énergie et climat
Développement durable
Prévention des risques
Infrastructures, transports et mer

Présent pour l'avenir

Liberté • Égalité • Fraternité
RÉPUBLIQUE FRANÇAISE

Géosciences pour une Terre durable
brgm

Document public

Etude hydrogéomorphologique de la Rivière du Mât et propositions de solutions de gestion

Volume 3/5 : Analyse pluviométrique et hydrologique

Rapport final

BRGM/RP-XXXXX-FR
Février 2008

Étude réalisée dans le cadre des projets
de Service public du BRGM 2007 07RISY032

Ph. STOLLSTEINER
Avec la collaboration de **B. AUNAY**

Vérificateur :	**Approbateur :**
Nom : V. PETIT	Nom : JL NEDELLEC
Date :	Date :
Signature :	Signature :

En l'absence de signature, notamment pour les rapports diffusés en version numérique, l'original signé est disponible aux Archives du BRGM.

Le système de management de la qualité du BRGM est certifié AFAQ ISO 9001:2000.

Présent pour l'avenir

Liberté • Égalité • Fraternité
RÉPUBLIQUE FRANÇAISE

Géosciences pour une Terre durable
brgm

Mots clés : hydrogéomophologie, pluviométrie, Rivière du Mât, transport solide.

En bibliographie, ce rapport sera cité de la façon suivante :
Stollsteiner Ph. - collab. Aunay B. (2008) – Etude hydrogéomorphologique de la Rivière du Mât et propositions de solutions de gestion. Rapport BRGM RP-56364-FR ; 72 p.

© BRGM, 2007, ce document ne peut être reproduit en totalité ou en partie sans l'autorisation expresse du BRGM.

Synthèse

Dans le cadre de la directive européenne relative à la gestion des inondations du 26 novembre 2007 et suite à la mission d'expertise de l'Inspection Générale de l'Environnement de juillet 2006 relative à la prévention des inondations à La Réunion, la DDE de la Réunion met en place un Plan de Gestion des Risques d'Inondation (PGRI) et souhaite disposer des éléments de **compréhension du fonctionnement hydrogéomorphologique des principales rivières à enjeux de La Réunion afin de pouvoir mettre en œuvre des solutions de gestion**.

Cette première étude, cofinancée par la DDE Réunion et la dotation de Service Public du BRGM, s'attache à la **Rivière du Mât** et ses principaux affluents (Fleurs Jaunes, Bras des Cavernes et Bras des Lianes). Basée sur les références méthodologiques connues ainsi que sur les spécificités de l'île et du bassin versant concerné, cette première étude du PGRI revêt un caractère expérimental dont le but est de d'asseoir l'approche méthodologique pour les autres rivières à enjeux.

Après avoir présenté les données de base nécessaires, l'étude exposera les résultats relatifs à l'analyse géomorphologique puis hydrologique de la rivière.

Ce diagnostic permettra de :

- définir les caractéristiques des crues de projet,
- d'évaluer le transport solide,
- proposer des modes de gestion adaptés à la dynamique de ce cours d'eau.

L'étude est développée dans les 5 volumes suivants :

- Volume 1/5 : Synthèse bibliographique ;
- Volume 2/5 : Evolution géomorphologique ;
- **Volume 3/5 : Analyse hydrologique et pluviométrique ;**
- Volume 4/5 : Estimation du transport solide ;
- Volume 5/5 : Analyse de risque.

Le présent volume présente l'étude pluviométrique et hydrologique de cette rivière.

Suite à la courte période d'observations disponibles, il est apparu que les objectifs de l'étude hydrologique ne pouvaient pas être atteints au moyen de traitements statistiques directs et nécessitaient la réalisation d'une étude pluviométrique.

L'étude pluviométrique a principalement permis :

- de caractériser les précipitations survenant sur le bassin versant étudié. L'influence de l'exposition directe aux précipitations est observée comme venant généralement de l'est. En effet, à altitude égale, la pluviométrie observée dans le cirque est inférieure à celle observée sur les versants exposés directement aux précipitations. Le nombre de jours de pluie et la moyenne annuelle de précipitation sont plus importants à Bras Panon qu'à Salazie, Hell-Bourg ou Mare à Vieille Place malgré des montants pluviométriques nettement supérieurs lors des cyclones,

- de fournir une estimation de la fréquence des évènements extrêmes observés, on peut notamment citer :

    - Durant Hyacinthe (janvier 1980), 1170 mm en 12 h et 3240 mm en 72 h à Grand Ilet durant Hyacinthe (janvier 1980),

    - 1689 mm de pluie journalière le 28 février 1964 à Belouve, pluie dont la période de retour peut être estimée à cent ans.

    - Mais également pour des pluies de durée inférieure, qui sans être aussi remarquables constituent des valeurs pluviométriques de références, telle la pluviométrie du 04/02/98 à Mare à Vieille Place :
        - 168 mm en 1 heure dont la période de retour a été estimé à 20 ans ,
        - 422 mm en 3 heures dont la période de retour a été estimé voisine de 40 ans,
        - 690 mm en 6 heures.
- d'estimer les valeurs fréquentielles et le gradex des pluies de durée égale au temps de concentration des bassins versants de l'étude,
- permettre une évaluation de la relation pluie – lame ruisselée.

Vu le peu de stations hydrométriques où des données étaient disponibles, l'étude a consister à déterminer l'ensemble des caractéristiques de crues nécessaires à l'étude au droit de la station hydrométrique principale (barrage, ancienne RN2) située sur la Rivière du Mât puis à les transposer aux autres points de calcul souhaités du bassin versant.

L'analyse pluie-débit des observations disponibles et l'utilisation des formules existantes ont permis, au droit de la station principale :

- d'évaluer à 4h le temps de concentration

- de définir le temps de base des crues et le temps de pluie « efficace »,

- quantifier la relation pluie lame ruisselée à l'échelle de la crue.

La trop courte période d'observation des débits ne permettant pas de réaliser des estimations statistiques fiables nécessaires à l'atteinte des objectifs, il est apparu nécessaire de réaliser une modélisation hydrologique avec le logiciel GARDENIA du BRGM afin de compléter les séries de données au moyen de débits simulés, en utilisant la pluviométrie horaire observée à Mare à Vieille Place.

Le calage, réalisé simultanément sur treize des évènements observés sur la période 2000-2007, fournit un coefficient d'ajustement voisin de 0.95 et a permis de reconstituer de manière satisfaisante les débits et volumes des crues observés.

Une fois calé, le modèle a été utilisé pour simuler, à partir des épisodes pluvieux dont la pluie journalière mesurée a atteint 250 mm à la station de Mare à Vieille Place, les débits horaires au droit de la station principale. Il a ainsi permis la reconstitution au pas de temps horaire :

- des hydrogrammes des crues non observées sur la période 2000-2006,
- des hydrogrammes des crues significatives de la période 1993-2000,
- d'un hydrogramme possible de Hyacinthe.

A partir de ces hydrogrammes reconstitués et des résultats de l'étude pluviométrique (Gradex), une analyse statistique à été réalisée afin de préciser le débit décennal et centennal au droit de la station principale.

Les valeurs fréquentielles calculées et les hydrogrammes de crues ont été ensuite définis au droit des différents points de calculs souhaités sur le bassin versant en considérant :

- les temps de concentration calculés au droit de ces points,
- un volume de crue proportionnel à la superficie du bassin versant,
- un débit maximal de crue définie à partir du volume et du temps de *concentration en considérant une crue triangulaire de durée égale au* temps de concentration augmenté du temps de pluie « efficace ».

La réalisation de cette étude a permis de montrer :

- la difficulté du calage des modélisations hydrologiques, principalement due à la variabilité des précipitations dans le temps mais également dans l'espace,
- la robustesse des calages qui fournissent des résultats sensiblement identiques malgré des périodes de calage différentes,

- l'importance de la quantité et qualité des données mesurées tant pour la pluviométrie (pluviomètre, radar,...) que pour l'hydrométrie et la topographie en vue de l'obtention de résultats fiables.

L'amélioration (renforcement et développement) du réseau des stations hydrométriques s'avère donc nécessaire.

Cette étude a permis de définir les débits liquides qui permettront, dans le volume 4/5, de proposer une évaluation du transport solide :

- par crues et par année sur la période 1993-2007,
- lors de la crue de Hyacinthe.

Les crues de projet pour d'éventuels aménagements ont, dans la partie aval de la Rivière du Mât, des débits maxima instantanés importants (1635 m3/s en décennal et entre 2865 et 3300 m3 /s en centennal), des temps de concentration courts (environ 4h) et des temps de base pouvant, lors des cyclones, dépasser quatre jours (Gamède, Diwa,..). Les volumes écoulées peuvent ainsi être considérables (160 millions de m3 lors de Gamède). Même si les forts débits sont relativement rares, le débit de 300 m3/s n'est en moyenne dépassé que durant 24 heures par an, cette rivière possède des caractéristiques hydrauliques laissant présager un transport solide significatif.

Sommaire

1. Introduction 13

2. Etude pluviométrique 17

2.1. GENERALITES 17
2.1.1. Objectif 17
2.1.2. Contexte climatologique 17
2.1.3. Principaux organismes contactés et données collectées 18

2.2. PLUIES ANNUELLES, MENSUELLES ET NOMBRE DE JOURS DE PLUIE .. 20
2.2.1. Pluies annuelles 20
2.2.2. Répartition mensuelle 23
2.2.3. Nombre de jours de pluies 24

2.3. PLUIES JOURNALIERES 25

2.4. INTENSITES PLUVIOMETRIQUES 26
2.4.1. Ajustements Météo France 26
2.4.2. Traitements réalisés pour la station de MAVP 26

2.5. CONCLUSION DE L'ETUDE PLUVIOMETRIQUE 29

3. Étude hydrologique 30

3.1. BUT DE L'ÉTUDE 30

3.2. PRINCIPALES CARACTERISTIQUES DU BASSIN VERSANT 30

3.3. DONNEES COLLECTEES 33
3.3.1. La station hydrométrique "Barrage" (Amont prise d'eau irrigation, n° 22056) de la Rivière du Mât. 34
3.3.2. La station hydrométrique "au pont de l'Escalier" (n° 22078) de la Rivière du Mât 36
3.3.3. La station hydrométrique "amont AEP " (n° 26008) du Bras des Lianes. 36

3.4. EXPLOITATION DIRECTE DES DONNEES 36
3.4.1. Présentation 36
3.4.2. Evaluation du débit maximum instantané décennal 36
3.4.3. Evaluation du temps de concentration 37
3.4.4. Temps de base des crues 41

3.4.5. Estimation du débit maximal instantané centennal 41
3.4.6. Volume des crues 43

3.5. MODELISATION HYDROLOGIQUE GLOBALE 44
3.5.1. Le modèle GARDENIA 44
3.5.2. Calage du modèle 52
3.5.3. Simulation des crues non observées 62

3.6. EXPLOITATION DES DEBITS SUR LA PERIODE 1993-2006 A LA STATION PRINCIPALE 63
3.6.1. Evaluation de la crue centennale 63
3.6.2. Coefficient d'écoulement en crue 64
3.6.3. Temps de base des crues 65
3.6.4. Débit moyen journalier maximal annuel 67
3.6.5. Débits horaires classés 68

3.7. TRANSPOSITION DES RESULTATS EN D'AUTRES POINTS DU BASSIN VERSANT. 69
3.7.1. Méthodologie 69
3.7.2. Caractéristiques des crues au droit des autres points de calcul. 69

3.8. CONCLUSION DE L'ETUDE HYDROLOGIQUE 73

Bibliographie 76

Liste des illustrations

Illustration 1 : Données pluviométriques et périodes d'observations collectées (Source : Météo France) 19

Illustration 2 :Localisation des postes pluviométriques et des stations hydrométriques de la zone d'étude (Source : Météo France, carte IGN) 20

Illustration 3 :Estimations des valeurs fréquentielles des totaux pluviométriques annuels. 21

Illustration 4 : Ajustement suivant une loi de Gauss des montants pluviométriques annuels observés à la station de Hell-Bourg (période 1957-2006) 22

Illustration 5 :Valeurs pluviométriques mensuelles moyennes et extrêmes observées aux différentes stations. 23

Illustration 6: Corrélations des pluies mensuelles aux différentes stations 24

Illustration 7: Nombre moyen annuel de pluie journalière observée supérieure ou égale à un seuil (en mm). 25

Illustration 8: Valeurs fréquentielles avec leur intervalle de confiance des pluies maximales journalières annuelles. 25

Illustration 9: valeurs fréquentielles des pluies de durée t (variant de 1h à 96h) à MAVP d'après Météo France. 26

Illustration 10: Ajustement fréquentiel suivant une loi de Gumbel des pluies maximales de durée variable 27

Illustration 11: Estimation des valeurs fréquentielles, en mm, des pluies de une heure à 4 heures et journalière à la station de Mare à Vieille Place (MAVP) à partir de la période 1993-2007. 28

Illustration 12: Valeurs pluviométriques décennales et centennales pour quelques pas de temps 29

Illustration 13 :Altimétrie du bassin versant de la Rivière du Mât 31

Illustration 14 : Plan de situation du bassin versant. 33

Illustration 15: Principales données hydrométriques collectées (source ORE) 34

Illustration 16 : photographie de la station et d'une crue de la Rivière du Mât au niveau du Barrage 34

Illustration 17 : Comparaison entre les courbes d'étalonnage de l'OLE, de Sogreah et de Dumay (DDE) 35

Illustration 18 : Hydrogramme d'une crue et hyétogramme correspondant- Définition des principales caractéristiques 37

Illustration 19: Quelques exemples de dates de début et fin de pluies et de crues calcul de Tb et Tc. 38

Illustration 20 : Principales caractéristiques des différents sous bassins versant 39

Illustration 21 :Temps de concentration calculés par utilisations de formules 40

Illustration 22 : Valeurs fréquentielles de débits maxima instantanés suivant hypothèses retenues à la station Barrage de la Rivière du Mât 42

Illustration 23 : valeurs fréquentielles de débits maxima instantanés au droit de différents bassins versants 43

Illustration 24 : Représentation schématique des éléments du bilan hydrologique d'un bassin versant 44

Illustration 25 : Principe du modèle hydrologique GARDENIA pour la simulation du débit d'un cours d'eau ou d'un niveau piézométrique (Schéma classique) 46

Illustration 26 : Réduction des débits maxima avec le pas de temps horaire 49

Illustration 27 : Evapotranspiration potentielle (en mm) calculée au pas de temps journalier avec la formule de Penman Montheith à la station de Gillot Aéroport (source Météo France) 51

Illustration 28 : Crues utilisées lors des calages des modélisations 53

Illustration 29 : Exemples de calage réalisé uniquement avec le poste de Mare à Vieille Place 54

Illustration 30 : Exemples d'isohyetes de quelques cyclones (Source Météo France) 55

Illustration 31: Calage sur 2000-2007 avec pluviométrie pondérée par utilisation des isohyètes 56

Illustration 32 :Calage sur 2000-2007 avec pluviométrie pondérée par utilisation des pluies journalières. 57

Illustration 33 : Résultats du calage de la modélisation GARDENIA : comparaison débits mesurés débits simulés sur la période 2000-2007. 58

Illustration 34 : Résultats du calage de la modélisation GARDENIA : comparaison débits mesurés débits simulés sur la période 2000-2007(suite). 59

Illustration 35 :Corrélations entre volumes et débits maxima mesurés et simulés des crues sur la période 2000-2007 59

Illustration 36 : Comparaison des volumes et des débits maximum des crues simulés et observés 60

Illustration 37 : Calage réalisé uniquement sur la période 2006-2007 61

Illustration 38 : HYACINTHE : Hydrogramme simulé à partir d'un ietogramme reconstitué 63

Illustration 39 : Valeurs fréquentielles de débits maxima instantanés suivant hypothèses retenues à la station Barrage de la Rivière du Mât 64

Illustration 40 : Corrélation pluie – lame ruisselée en crue 65

Illustration 41 :Ajustement suivant une loi de Galton du temps de base des crues simulées sur la période 1993-2007 66

Illustration 42 : Ajustement, suivant une loi de Gumbel, des débits maxima moyens journaliers sur la période 1993-2006. 67

Illustration 43 : Valeurs fréquentielles de débits maxima instantanés suivant hypothèses retenues à la station Barrage de la Rivière du Mât 68

Illustration 44 : Courbe des débits horaires simulés classés des crues (1993/2007) et débits moyens journaliers (2000-2006). 68

Illustration 45 : Localisation des points d'estimation des volumes de transport solide et de détermination des hydrogrammes de crue 70

Illustration 46 : Caractéristiques des bassins versants, volumes annuels et valeurs extrêmes des crues simulées au droit des points de calculs 71

Liste des annexes

Annexe 1 Relation hauteur-débit à la station (ancienne RN2) de la Rivière du Mât *(extrait rapport SOGREAH N°2850098 R2 de mars 2004).* 79

Annexe 2 Estimation des débits maxima instantanés des crues de la période 1993-2002 (SOURCE ORE) et Comparaison des principales caractéristiques des crues observées et simulées à la station (ancienne RN2) 83

Annexe 3 Simulation des crues non observées à la station (ancienne RN2) 91

1. Introduction

Dans le cadre de la directive européenne relative à la gestion des inondations du 26 novembre 2007 et suite à la mission d'expertise de l'Inspection Générale de l'Environnement de juillet 2006 relative à la prévention des inondations à La Réunion, la DDE de la Réunion met en place un Plan de Gestion des Risques d'Inondation (PGRI) et souhaite disposer des éléments de **compréhension du fonctionnement hydrogéomorphologique des principales rivières à enjeux de La Réunion afin de pouvoir mettre en œuvre des solutions de gestion**.

Cette première étude, cofinancée par la DDE Réunion et la dotation de Service Public du BRGM, s'attache à la **Rivière du Mât** et ses principaux affluents (Fleurs Jaunes, Bras des Cavernes et Bras des Lianes). Basée sur les références méthodologiques connues[1] ainsi que sur les spécificités de l'île et du bassin versant concerné, cette première étude du PGRI revêt un caractère expérimental dont le but est de d'asseoir l'approche méthodologique pour les autres rivières à enjeux.

Après avoir présenté les données de base nécessaires, l'étude exposera les résultats relatifs à l'analyse géomorphologique puis hydrologique de la rivière.

Ce diagnostic permettra de :

- définir les caractéristiques des crues de projet,
- d'évaluer le transport solide,
- proposer des modes de gestion adaptés à la dynamique de ce cours d'eau.

L'étude est développée dans les 5 volumes suivants :

- Volume 1/5 : Synthèse bibliographique ;
- Volume 2/5 : Evolution géomorphologique ;
- **Volume 3/5 : Analyse hydrologique et pluviométrique ;**
- Volume 4/5 : Estimation du transport solide ;
- Volume 5/5 : Analyse de risque.

Le présent volume présente l'étude pluviométrique et hydrologique de cette rivière.

---

[1] Approche hydrogéomorphologique pour la cartographie des zones inondables, méthodologie pour l'élaboration des PPRI, Directive Européenne pour la gestion des inondations,...

Suite à la courte période d'observations disponibles, il est apparu que les objectifs de l'étude hydrologique ne pouvaient être atteints au moyen de traitements statistiques directs et nécessitaient la réalisation d'une étude pluviométrique.

2. Etude pluviométrique

2.1. GENERALITES

2.1.1. Objectif

Le but de l'étude pluviométrique est principalement de :

- caractériser les précipitations survenant sur le bassin versant étudié,
- permettre une estimation de la fréquence des évènements extrêmes observés,
- fournir une estimation des valeurs fréquentielles et du Gradex des pluies de durée égale au temps de concentration des bassins versants de l'étude qui soient représentatives de la pluviométrie de ces bassins,
- permettre une évaluation de la relation pluie – lame ruisselée.

Les courbes IDF (Intensité – Durée – Fréquence) représentative du bassin versant n'étant pas disponibles et les données brutes, permettant de les obtenir, n'étant disponibles qu'à quelques postes et ce sur de courte période, il est apparu nécessaire et préférable :

- de définir les valeurs fréquentielles des pluies journalières maximales à l'aide des séries journalières des postes longue durée ;
- d'étudier, au droit des postes fournissant les données d'intensités, la décomposition des pluies journalières en différents pas de temps ;
- d'appliquer cette décomposition aux valeurs fréquentielles journalières afin de définir les valeurs fréquentielles des pluies de durée variable.

2.1.2. Contexte climatologique

De part son climat tropical océanique, fortement influencé par l'anticyclone de l'Océan Indien, l'île de La Réunion a une pluviométrie très élevée (de 2 à 9 m/an sur le coté au vent). Mais c'est davantage aux précipitations exceptionnelles (par leur intensité, par le cumul de pluie par événement) que nous nous intéresserons, car elles sont à l'origine des crises érosives des ravines.

La pluviométrie dépend de l'exposition aux vents d'alizés et de l'altitude. On observe aussi que si l'altimétrie influence fortement la répartition des pluies, l'optimum pluviométrique ne correspond pas obligatoirement à la ligne de crête topographique, mais souvent à un effet de rempart, à mi-pente (Bargeas, 1984).

Les bassins versants des grandes ravines se situent également dans la région centrale de l'île ou les pluies orographiques sont maximales, et jouent pratiquement toute l'année, sans qu'il n'y ait véritablement d'opposition entre saison sèche et saison pluvieuse.

Les crises érosives sont avant tout liées aux précipitations exceptionnelles qui s'abattent périodiquement sur l'île à l'occasion des cyclones ou des dépressions cycloniques.

Les cyclones qui intéressent l'île de la Réunion naissent généralement à proximité de Diego Garcia, au droit de la zone de convergence intertropicale (entre 5 et 20° de latitude sud et 80° de longitude est).

Une des principales conditions de leur formation est la température de la mer qui doit être supérieure à 27 °C sur plusieurs dizaines de mètres de profondeur.

Par convention internationale le terme « cyclone tropical » désigne dorénavant toute perturbation tourbillonnaire, caractérisée par la vitesse moyenne de ses vents, qui peut-être :

- inférieure ou égale à 62 km/h pour une dépression ;
- comprise entre 63 et 117 km/h pour une tempête ;
- ou supérieure ou égale à 118 km/h pour un ouragan.

Cette activité cyclonique se situe généralement entre mi novembre et fin avril. Elle comporte en moyenne 11 évènements : 4 ouragans, 5 tempêtes et 2 dépressions.

En dehors des vents violents qui les caractérisent, ces cyclones peuvent s'accompagner de pluies longues et intenses et de marées de tempête (houle et surélévation du niveau moyen de la mer).

De plus amples informations sont disponibles dans la littérature spécialisée ou dans diverses publications de Météo France.

Parmi les nombreux cyclones survenus, on ne s'intéressera dans le cadre de cette étude qu'aux cyclones étant à l'origine de crues et/ou d'inondations significatives. Sur la période récente, où l'on dispose de données sur le bassin versant (1993-2007), on notera la présence de 14 perturbations cycloniques (cyclones et/ou tempêtes tropicales) à l'origine de crues significatives. A cette liste il faut ajouter le cyclone le plus récent constituant une référence vis-à-vis des précipitations et des crues : le cyclone Hyacinthe survenu en janvier 1982. Pour plus de détails, on se reportera utilement à une publication réalisée par Météo France (1998).

Si certains évènements cycloniques peuvent être générateurs de pluies exceptionnelles, ils ne constituent pas la totalité des pluies journalières exceptionnelles observées. Lors des cyclones, le montant pluviométrique observé dépend plus du trajet du cyclone que de l'altitude du poste. Les épisodes pluvieux exceptionnels dus aux cyclones se caractérisent plus par un montant pluviométrique important que par leur intensité. Celles-ci ne sont généralement pas supérieures à celles observées lors d'orages localisés mais leurs extensions spatiales et la durée des pluies sont plus importantes. Ils génèrent ainsi plus fréquemment des évènements « crues exceptionnelles » sur les grands bassins versants. Les orages localisés, de fréquence plus courante que les cyclones, généreront principalement des crues exceptionnelles sur les petits bassins versants.

2.1.3. Principaux organismes contactés et données collectées

Les données pluviométriques collectées ont été fournies par Météo France. Le tableau (Illustration 1) précise les postes, les périodes d'observations et le type de données collectées. Il indique

également la date de mise en service, les coordonnées et l'altitude de ces différentes stations. La localisation de ces postes figure sur l'Illustration 2, notamment les quatre postes du haut bassin versant : Hell-Bourg, Salazie, Mare à Vieille Place et Belouve.

Les données recueillies auprès de la Météo France comportent :

- les données journalières des cinq postes situés sur le bassin versant, ou à proximité immédiate, sur leurs périodes maximales d'observations. La durée disponible varie entre 55 ans (Hell-Bourg) et 11 ans (Salazie village). Ces données s'arrêtent au 28/02/2007.
- les données horaires du poste de Mare à Vieille Place lors des épisodes pluvieux significatifs sur la période d'observation allant du 01/11/1997 au 28/02/2007.

Stations Numéro	Période d'observation	Latitude	Longitude	Altitude (m)	Pas de temps des données	Mois et/ou année incomplets ou manquants
Belouve 974 21 260	09/1955 – 06/2007	-21029	55327	1 500	Journalier	Période antérieure à 1984, et 01/87, 10/93, 02/94, 07/01
Bras Panon 974 02 240	01/1993– 06/2007	-20597	55376	510	Journalier	-
Hell-Bourg 974 21 270	01/1952 – 06/2007	-21032	55317	970	Journalier	Antérieure à 1959, de 70 à 76 et 03/62, 02/67, 11/85, 11/93
Mare à Vieille Place 974 21 210	08/1989 – 06/2007	-21010	55310	880	Horaire, Journalier	-
Salazie 974 21 240	01/1996 – 06/2007	-21012	55327	476	Horaire, journalier	1996 et 1997

Illustration 1 : Données pluviométriques et périodes d'observations collectées (Source : Météo France)

Il n'a pas été procédé à une visite des stations pluviométriques. Il n'est donc pas possible de préciser de manière exhaustive la qualité relative des données collectées.

Les séries de données ne sont pas complètes et comportent des interruptions. L'Illustration 1 récapitule, pour les stations ayant les plus longues séries de données, les périodes d'observations disponibles et les mois de données manquantes.

Par suite de la quantité disponible des données et du but de l'étude, axée sur les crues, il n'a pas été jugé utile de procéder à un complètement systématique des données mensuelles ou annuelles manquantes.

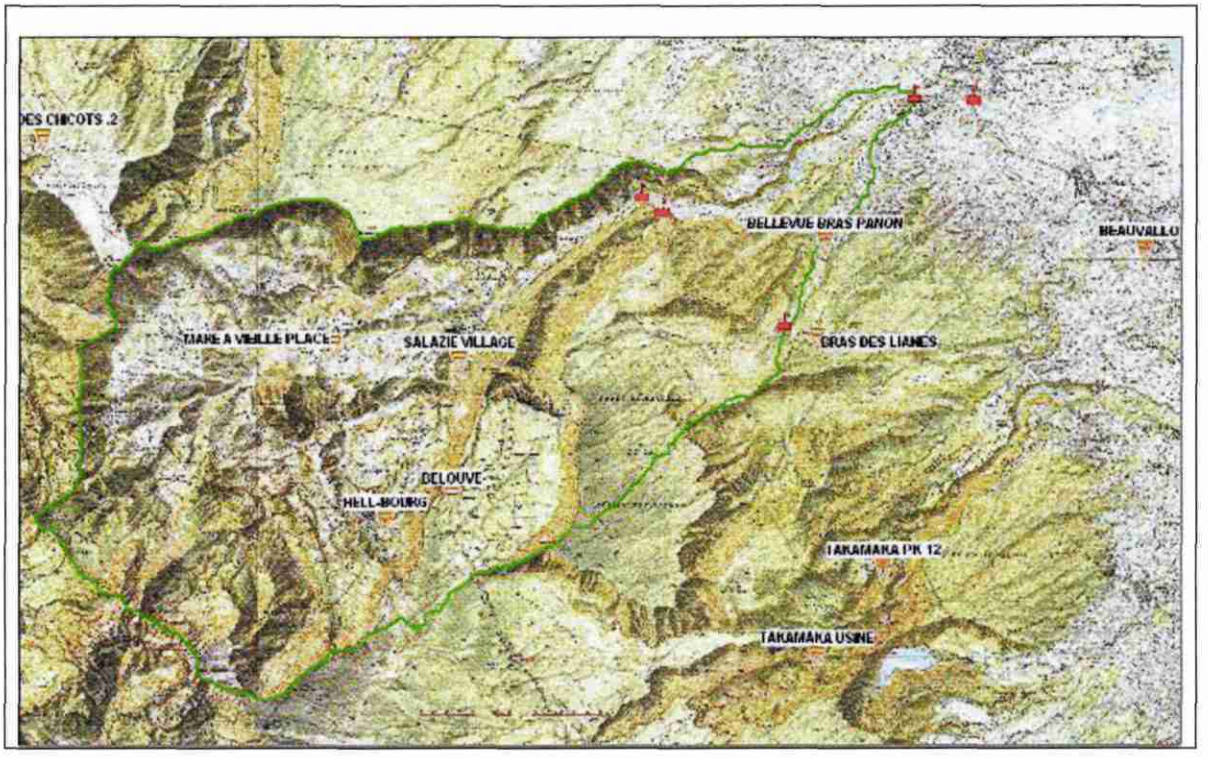


Illustration 2 :Localisation des postes pluviométriques et des stations hydrométriques de la zone d'étude (Source : Météo France, carte IGN).

2.2. PLUIES ANNUELLES, MENSUELLES ET NOMBRE DE JOURS DE PLUIE

2.2.1. Pluies annuelles

La pluviométrie annuelle sur le bassin versant est relativement importante avec une moyenne interannuelle, dans le cirque, supérieure à 3 m et un minimum observé de 1375 mm à Hell-Bourg en 1983. La pluviométrie annuelle est un peu supérieure à Bélouve et nettement plus importante sur Bras Panon.

Afin d'évaluer la variabilité interannuelle des précipitations, il a été procédé à des ajustements des pluies annuelles suivant une loi de Gauss. Afin de compléter et étendre les séries de données, les valeurs mensuelles ont été définies à l'aide de corrélations inter station lorsqu'il n'y avait qu'une seule valeur mensuelle manquante dans une année. (cf. § pluies mensuelles, ci après).

Les résultats de ces ajustements et l'intervalle de confiance à 95% de ces valeurs sont récapitulés dans l'Illustration 3. L'Illustration 4 est un exemple des ajustements réalisés (station de Hell-Bourg).

On constate, d'après les valeurs indiquées que la pluviométrie moyenne annuelle est voisine de :

- 3050 mm à Hell-Bourg et Mare à Vieille Place,
- supérieure à Belouve (et Salazie Village) et surtout nettement supérieure à Bras Panon Salazie Village.

Il faut toutefois relativiser ces estimations dans la mesure où la période utilisée est différente d'une station à l'autre. On constate, en effectuant un ajustement sur une période plus courte, que les valeurs de la station d'Hell-Bourg change de façon significative. L'analyse de cette différence permet de constater que la période récente (1993-2007) est ainsi plus contrastée et d'en conclure que les valeurs extrêmes obtenues à Mare à Vieille Place sont probablement surestimées.

Ces valeurs permettent également de montrer :

- l'influence non négligeable des montants pluviométriques des cyclones sur le montant annnuel,
- la faible relation entre l'altimétrie et la pluviométrie.
- la forte pluviométrie sur la facade est.

Temps de retour (an)		Hell-Bourg (mm)	Belouve (mm)	Bras Panon (mm)	Mare à Vieille Place (mm)	Hell-Bourg (mm)
Sèches	**100**	705	380	2345	425	560
	I.C 95	(420)	(780)	(780)	(770)	
	10	1760	1765	3440	1615	1680
	I.C 95	(350)	(670)	(680)	(660)	
2		**3050**	**3455**	**4790**	**3070**	**3050**
I.C 95		(320)	(615)	(635)	(620)	
Humides	**10**	4340	5140	6130	4520	4410
	I.C. 95	(350)	(670)	(680)	(670)	
	100	5400	6530	7230	5710	5530
	I.C.95	(420)	(780)	(780)	(770)	
Période d'observation		1957 -2006	1984 - 2006	1993-2006	1990- 2006	1990-2006
I.C. : intervalle de confiance						

Illustration 3 :Estimations des valeurs fréquentielles des totaux pluviométriques annuels.

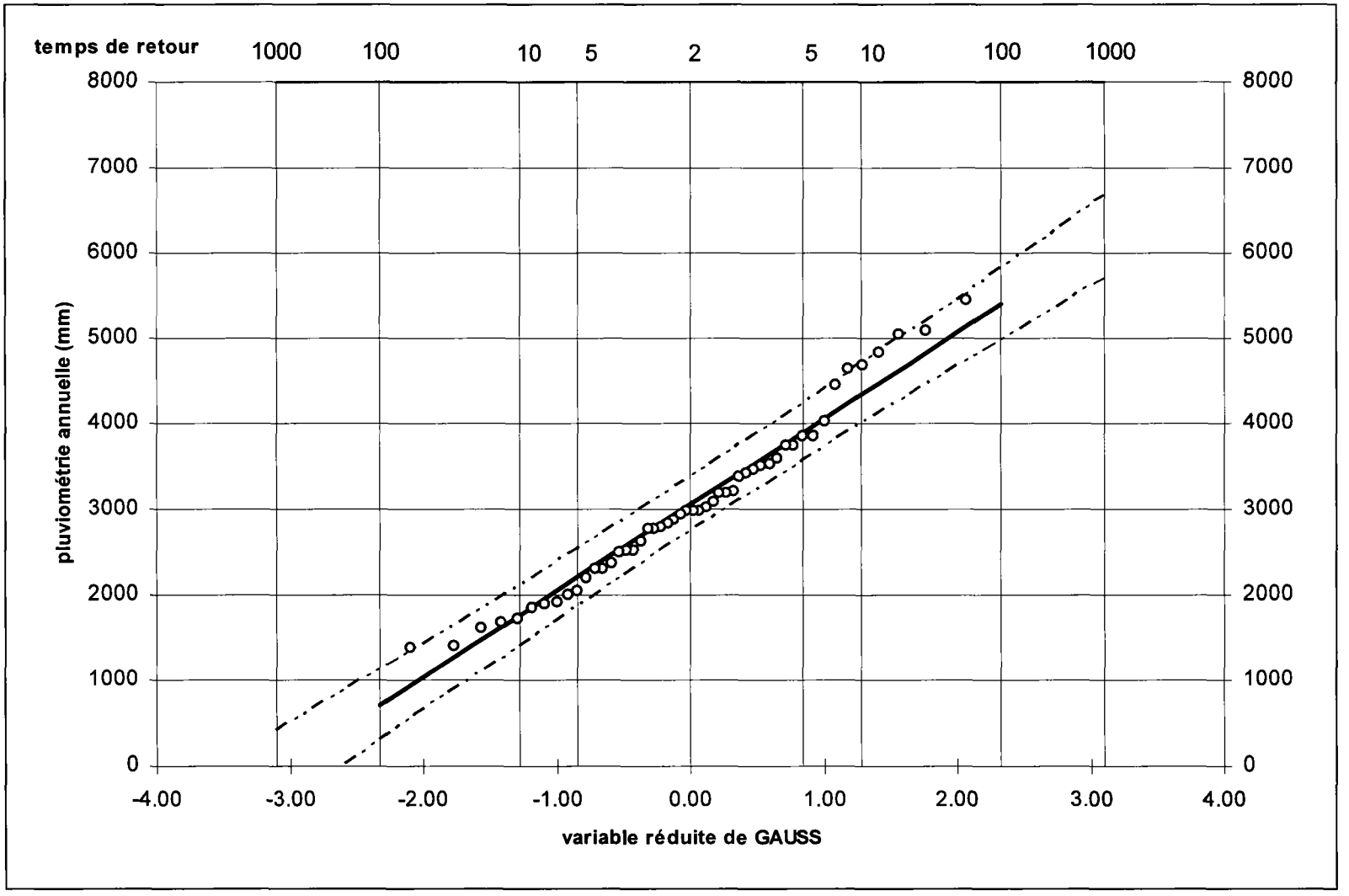


Illustration 4 : Ajustement suivant une loi de Gauss des montants pluviométriques annuels observés à la station de Hell-Bourg (période 1957-2006)

2.2.2. Répartition mensuelle

L'Illustration 5 indique la répartition et la variabilité mensuelle de la pluviométrie observée aux différentes stations calculée sur la totalité de leur période d'observation. Les valeurs maximales sont indiquées en caractère gras.

Mois	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	Année
Max.	1740	3757	2689	474	608	280	345	263	170	210	337	917	5225
MAVP	565	816	598	204	180	83	91	99	66	59	100	246	3068
08/89– 06/07													
Min.	83	86	57	46	9.4	3.4	26	28	5.	6.	3.	8.2	1620
Max.	**3591**	**4495**	**2922**	1339	748	535	326	550	474	430	511	1097	5786
Hell-Bourg	637	763	548	253	146	105	126	122	91	83	123	243	3116
01/52-06/07													
Min.	113	24	73	26	12	21	24	4.4	4.	8.5	8.5	11	1375
Max.	2033	3920	2690	**2024**	888	504	440	**779**	308	**481**	520	1074	**7386**
Belouve	631	885	626	312	179	113	145	155	92	85	134	264	3546
09/55-06/07													
Min.	114	13	69	20	22	3.6	14	5.8	7.	0	12	52	1816
Max.	1970	3832	2771	721	**966**	238	496	372	364	234	327	**1487**	5821
Salazie	709	1119	718	288	285	112	212	228	148	101	141	358	4473
03/96-06/07													
Min.	96	164	128	74	23	35	66	52	13	8.	32	74	2903
Max.	991	2945	1633	644	842	**650**	**593**	486	**489**	300	**753**	1117	7564
Bras Panon	621	943	637	357	349	201	276	278	249	184	231	458	4788
01/93-06/07													
Min.	219	208	183	157	74.4	45.8	64.2	138	30.3	77.2	61.4	92.6	3689

Illustration 5 :Valeurs pluviométriques mensuelles moyennes et extrêmes observées aux différentes stations.

Celle-ci montre clairement :

- ✓ l'existence de deux saisons bien marquées : la saison sèche (juin à octobre) et la saison humide (décembre à avril voire mai) ;

- ✓ des variations et tendances identiques aux stations du haut du bassin versant,
- ✓ une pluviométrie plus importante à Belouve et surtout à Bras Panon ,

On constate sur les chroniques la grande variabilité, pour un mois donné, d'une année à l'autre d'autant plus marqué à Hell-Bourg et la forte incidence des cyclones

On peut ainsi noter que les montants pluviométriques records sont obtenus lors du passage de cyclones notamment :

- ✓ Hyacinte : janvier 1980,
- ✓ Gamède : février 2007,
- ✓ Diwa : Mars 2006.

Les corrélations réalisées (Illustration 6) sur les pluies mensuelles, sur la période commune récente 1996-2007, fournissent des résultats satisfaisants entre les postes de :

- ✓ Hell-Bourg et Belouve,
- ✓ Salazie et Mare à Vieille Place,

Elles indiquent, sur la période commune d'observation, que la pluviométrie la plus forte, pour les stations du haut bassin versant, est observée à Salazie.

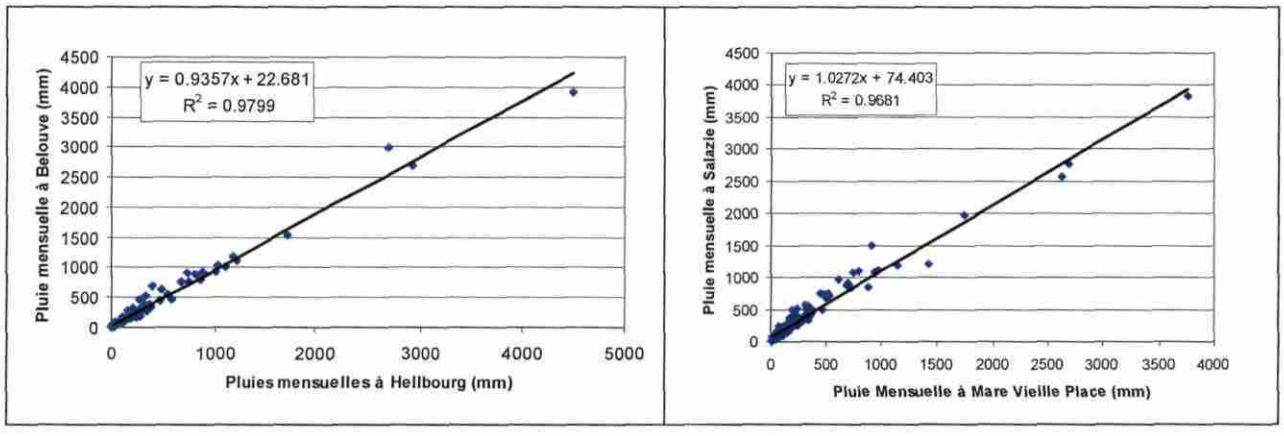


Illustration 6: Corrélations des pluies mensuelles aux différentes stations

2.2.3. Nombre de jours de pluies

L'analyse du nombre de jours de pluie annuel (Illustration 7), fait apparaître un nombre moyen annuel de jours de pluie voisin de 220 jours sur le haut bassin versant avec en moyenne près de 6 jours par an où le total pluviométrique dépasse 100 mm et 2 jours où il dépasse 250 mm. Sur l'ensemble des périodes

d'observation indiquées, à Hell-Bourg, à Mare à Vieille Place comme aux autres stations, seuls 3 jours ont dépassé les 1 mètre de précipitation. Le nombre de jours de pluie est supérieur à Bras Panon (versant exposé).

		Valeur du seuil de pluie journalière (mm)							
Station Période	Nbre d'années Observées	0	1	10	50	100	250	500	1000
M.A.V.P. 90-06	17	264	137	47.7	12.9	5.9	1.9	0.5	0.2
Hell-Bourg 77-06	30	220	174	53.3	12.3	5.7	2	0.5	0.1
Bras Panon 93-06	14	271	221	108	21	7.1	1.7	0.1	-

Illustration 7: Nombre moyen annuel de pluie journalière observée supérieure ou égale à un seuil (en mm).

2.3. PLUIES JOURNALIERES

Il a été procédé ensuite aux ajustements des pluies maximales journalières annuelles suivant une loi de Gumbel pour les stations ayant une longue période d'observation et pour la station de MAVP. L'Illustration 8 présente les principaux résultats. La période de suivi de MAVP étant courte et étant plutôt une période humide, l'intervalle de confiance à 80 % est très important. Il est donc probable que les valeurs réelles se situent dans la partie inférieure de l'intervalle de confiance. Un ajustement, sur cette même période, de l'échantillon tronqué des pluies journalières supérieures à 100 mm (Illustration 8 , colonne 5) conduit à des valeurs élevées voisines de celles obtenues au poste de Belouve.

Période de retour	Belouve	Bras Panon	Hell-Bourg	Mare à Vieille Place (1990-2007)	
(année)	(1957-2007)	(1993-2007)	(1957-2007)	Maxima annuel	PJ>100 mm
2	**400**	**280**	**355**	**425**	**515**
IC 80%	[350, 460]	[225, 355]	[315, 405]	[330, 545]	
10	**870**	**555**	**740**	**935**	**960**
IC 80%	[770, 1010]	[455, 745]	[660, 860]	[765, 1250]	
100	**1450**	**895**	**1230**	**1575**	**1520**
IC 80%	[1265, 1725]	[715, 1260]	[1070, 1455]	[1260, 2175]	

Illustration 8: Valeurs fréquentielles avec leur intervalle de confiance des pluies maximales journalières annuelles.

On retiendra donc, pour les postes du haut bassin versant, que la **pluie décennale journalière** peut être comprise entre **740 mm et 935 mm** et la **pluie journalière centennale entre 1230 et 1520 mm.** La pluviométrie à Bras Panon, supérieure au pas de temps annuel, est, à ce pas de temps, nettement inférieure.

2.4. INTENSITES PLUVIOMETRIQUES

2.4.1. Ajustements Météo France

Les valeurs fréquentielles des pluies de durée variable (entre 1h et 96h) ont été fournis par Météo France pour la station de Mare à Vieille Place. Ces valeurs ont été déterminées par ajustement statistique suivant une loi exponentielle (méthode du renouvellement) avec les valeurs observées, sur la période 1994-2005, supérieures à un seuil.

L'Illustration 9, ci- après, récapitule les valeurs décennales et centennales pour les différentes durées et indique les valeurs maximales observées.

	Hauteur pluviométrique pour différentes durées à Mare à Vieille Place Période d'observation 1994 -2005						
Durée	1 h	3 h	6 h	12 h	24 h	48 h	96 h
Seuil (mm)	42	54	74	76	93	92	228
Décennale	116	218	341	463	650	837	1307
Centennale	177	317	502	681	965	1262	2123
Max Observé	168	422	690	1007	1359	1469	1551
date	04/02/98	04/02/98	04/02/98	04/02/98	04/02/98	03/02/98	21/02/98

Illustration 9: valeurs fréquentielles des pluies de durée t (variant de 1h à 96h) à MAVP d'après Météo France.

Après examen des ajustements transmis, les valeurs fréquentielles fournies n'ont pas été retenues car, hormis celles pour 96 heures, elles paraissent fortement sous estimées. Elles fournissent toutefois une indication sur les ratios entre les valeurs de pluies fréquentielles de différentes durées.

2.4.2. Traitements réalisés pour la station de MAVP

N'ayant collectées que les données pluviométriques horaires (à heure ronde) de la station de MAVP sur la période (1993-2007), s'il n'est pas possible de réaliser une détermination précise des hauteurs pluviométriques fréquentielles pour ce pas de temps ni pour un pas de temps trop proche

de l'heure *(Il faudrait pour cela posséder les données avec un pas de temps inférieur à l'heure)*, il est toutefois apparu nécessaire de les évaluer au mieux.

Afin d'illustrer ce propos nous ne citerons en exemple que les valeurs de la pluie maximale observée :

- pluie maximale en 1h : le 04/02/98 : 168 mm,
- pluie maximale en 1h (ronde), le 04/02/98 à 22h : 157,2 mm.

A partir de ces données horaires, les pluies de durée 2, 3 heures et 4 heures ont été calculées par épisode. Les valeurs maximales de ces pluies, à raison d'une valeur par évènement indépendant, ont été ensuite ajustées en faisceau suivant la méthode du renouvellement (Illustration 10).

L'Illustration 11 ci-dessous résume les principaux résultats obtenus et fournit les valeurs fréquentielles des pluies journalières, valeurs intermédiaires entre les pluies en 12 h et les pluies en 24 h, sur la période 1993-2007.

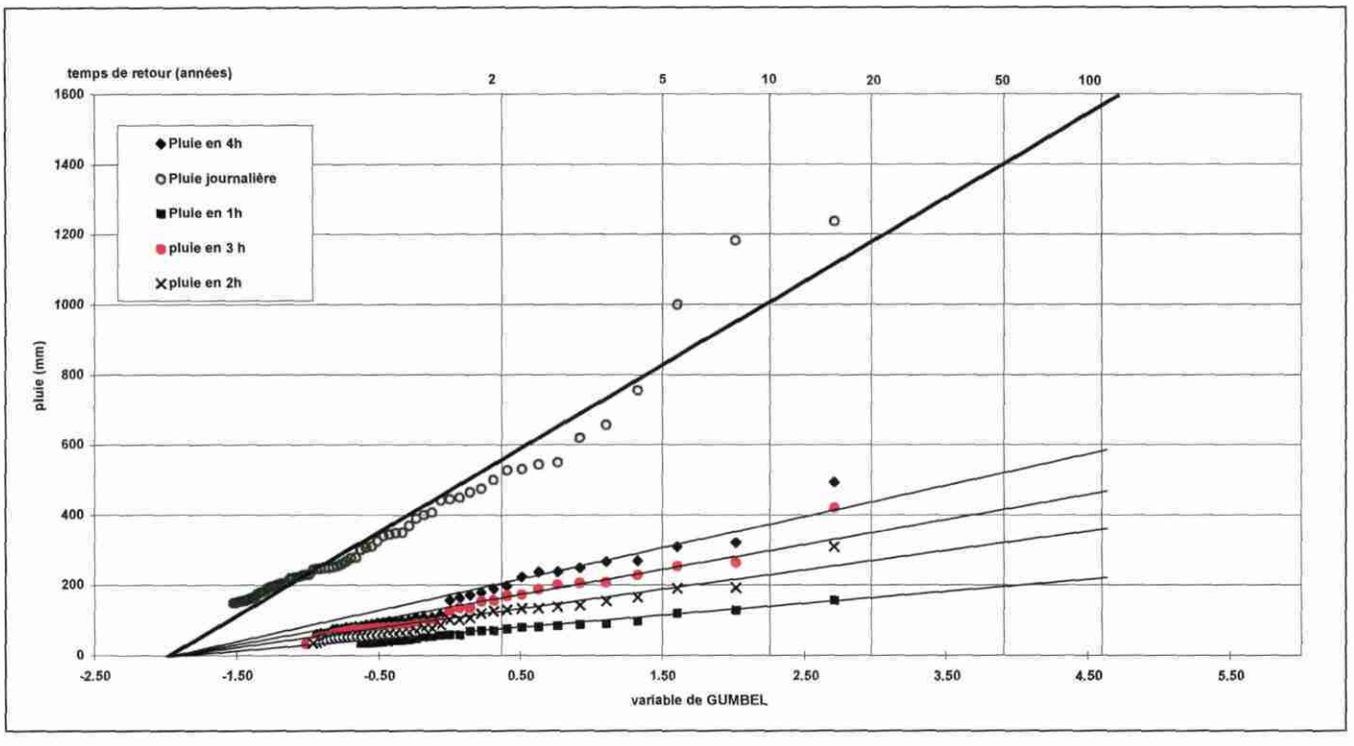


Illustration 10: Ajustement fréquentiel suivant une loi de Gumbel des pluies maximales de durée variable

Pluie du 04 février 1998

D'après les évaluations ci-dessus, on peut estimer que la pluie du 04/02/98 a une période de retour d'environ 20 ans en une heure et voisine de cinquante ans pour les durées variant de 2 heures à la journée.

Durée de pluie	1 h	2 h	3 h	4 h	1 J
Seuil (mm)	35	35	35	60	100
Décennale	140	225	300	360	1000
Vicennale	165	260	350	420	1175
Centennale	220	350	470	560	1560
Gradex	34	55	72	85	238
Max Observé (heure ronde)	157	310	422	493	1237
date	04/02/98	04/02/98	04/02/98	04/02/98	04/02/98

Illustration 11: Estimation des valeurs fréquentielles, en mm, des pluies de une heure à 4 heures et journalière à la station de Mare à Vieille Place (MAVP) à partir de la période 1993-2007.

Cyclone Hyacinthe (janvier 1980)

Les observations collectées font état, durant Hyacinthe, des montants pluviométriques suivants observés à la station de Grand Ilet :

Pluies journalières : 858 mm le 24, 706 mm le 25, 1044 mm le 26, 877 mm le 27,

Mais également de :

- 110 mm en 1 heure,
- 605 mm en 6 heures,
- 1170 mm en 12 heures,
- 3240 mm en 72 heures,
- 3485 mm en 96 heures.

D'après ces informations, il apparaît que les précipitations ont été relativement constantes pendant une durée, d'au moins douze heures, avec une intensité très voisine de 100 mm/h.

La période de retour de cet évènement peut ainsi être estimée comme :

- ✓ inférieure à la décennale pour une durée d'une heure,
- ✓ légérement supérieure à la vicennale pour une durée de 4 heures,

✓ supérieure à la décennale, mais inférieure à la vicennale, pour la pluie journalière.

2.5. CONCLUSION DE L'ETUDE PLUVIOMETRIQUE

Sur ce bassin versant, on observe l'influence de l'exposition directe aux précipitations venant généralement de l'est. En effet, à altitude égale, la pluviométrie observée dans le cirque est inférieure à celle observée sur les versants exposés directement aux précipitations. Le nombre de jours de pluie et la moyenne annuelle de précipitation sont plus importants à Bras Panon qu'à Salazie, Hell-Bourg ou Mare à Vieille Place malgré des montants pluviométriques nettement supérieurs lors des cyclones.

Ces pluies cycloniques constituent, au droit des stations du haut bassin versant, des records de pluviométrie à l'échelle mondiale avec par exemple :

- 1170 mm en 12 h et 3240 mm en 72 h à Grand Ilet durant Hyacinthe (janvier 1980),
- 1689 mm de pluie journalière le 28 février 1964 à Belouve, pluie dont la période de retour peut être estimée à cent ans.

Les pluies de durée inférieure sans être aussi remarquables constituent également des valeurs pluviométriques de références, on citera notamment la pluviométrie du 04/02/98 à Mare à Vieille Place :

- 168 mm en 1 heure (période de retour estimée à 20 ans),
- 422 mm en 3 heures (période de retour estimée voisine de 40 ans),
- 690 mm en 6 heures.

L'ensemble de ces observations réalisées conduisent, sur l'ensemble du bassin versant, à des valeurs frequentielles exceptionnelles et ce pour les différents pas de temps. L'Illustration 12 résume quelques unes de ces valeurs.

Station	Durée	Pluie Décennale (mm)	Pluie Centennale (mm)
Mare à Vieille Place	1 heure	140	220
	4 heures	360	560
Belouve	Journalière	870	1450
Bras Panon	Annuelle (Humide)	6130	7230

Illustration 12: Valeurs pluviométriques décennales et centennales pour quelques pas de temps

3. Étude hydrologique

3.1. BUT DE L'ÉTUDE

Le but de l'étude hydrologique est, d'une manière générale, de définir, en différents points du bassin versant :

- ✓ les débits de projet, c'est-à-dire généralement les débits maxima instantanés des crues de période de retour variable avec, au minimum, la valeur centennale qui sert de base minimale aux aménagements de protection contre les crues,
- ✓ les volumes des crues dans la mesure où ce sont ces volumes qui vont permettre d'estimer les volumes de sédiments transportés,
- ✓ les différentes caractéristiques des crues dans la mesure où celles-ci sont susceptibles de fournir des informations permettant d'une manière ou d'une autre de mieux cerner les formes et dimensions des crues, evaluer des temps de base, temps de concentration,....

Elle s'appuiera notamment sur les données hydrométriques existantes, les résultats d'études déjà réalisées et les observations de terrain.

3.2. PRINCIPALES CARACTERISTIQUES DU BASSIN VERSANT

La Rivière du Mât, la plus longue de l'île : 36 kilomètres, se situe au Nord-Est de l'île de la Réunion. Elle prend sa source dans le cirque de Salazie et draine un bassin versant d'environ 150 km². Elle comporte plusieurs affluents dont les plus importants sont la rivière Fleurs Jaunes, le Bras des Cavernes et le Bras des Lianes (Illustration 13 et Illustration 14).

Très encaissée dans sa partie amont, la Rivière du Mât serpente entre les pentes raides des îlets (lambeaux de plateaux isolés par les ravines) et emprunte de profondes gorges avant de s'élargir dans un vaste cône de déjection sur lequel s'étendent en partie les communes de Bras Panon et Saint André (cf. volume 2/5, Evolution géomorphologique).

D'après les caractéristiques morphologiques géologiques et pédologiques observées sur les cartes (cf. volume 2/5) et lors des visites de terrain (Octobre 2007), ce bassin versant peut être décomposé en, au moins, cinq parties distinctes :

- ✓ une zone de ruissellement sensiblement homogène composée des sous bassins versants du haut de la Rivière du Mât et de la rivière Fleurs Jaunes,
- ✓ une zone globalement plus perméable (notamment la partie amont) constituée du bassin versant du Bras des cavernes,
- ✓ une zone globalement plus imperméable constituée du bassin versant du Bras des Lianes,

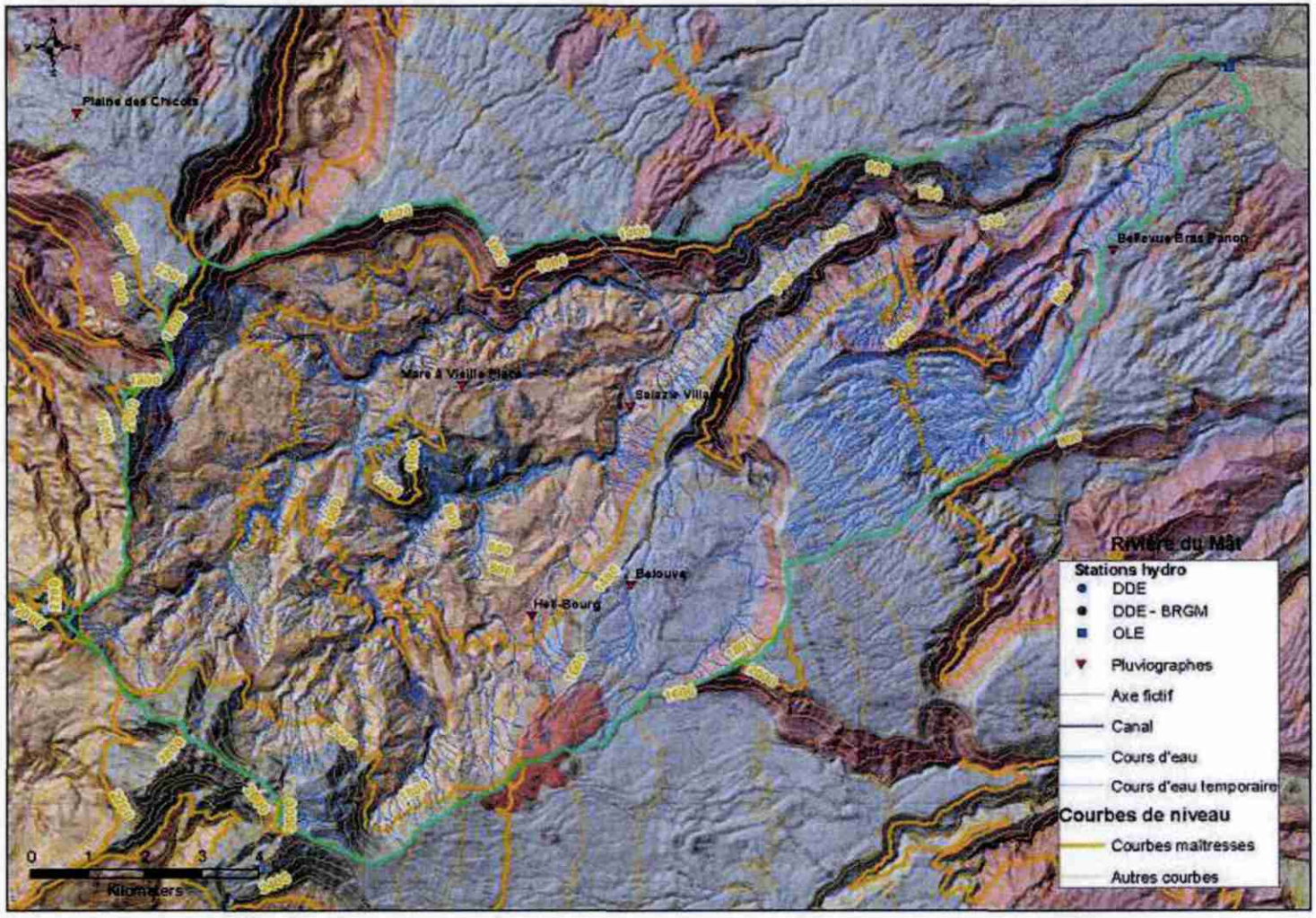


Illustration 13 :Altimétrie du bassin versant de la Rivière du Mât

- ✓ une zone de transfert des écoulements, située entre la confluence Rivière du mat- Rivière Fleurs Jaunes et le pont de la route à 4 voies (RN2),
- ✓ enfin en aval, une zone d'étalement et d'ecrêtement des crues.

Ces visites de terrain ont également permis de visiter les stations hydrométriques afin de pouvoir définir et/ou vérifier les relations hauteur débit et juger de la qualité des données collectées.

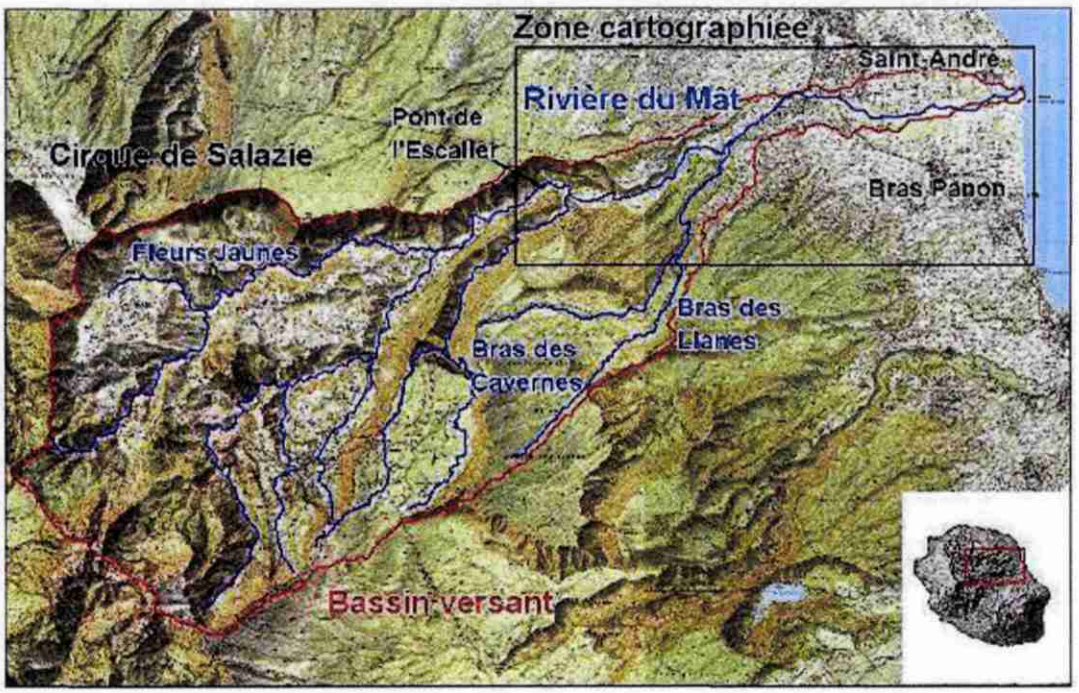


Illustration 14 : Plan de situation du bassin versant.

3.3. DONNEES COLLECTEES

Les données hydrométriques collectées sont principalement les données figurant dans les annuaires réalisés par l'Office de l'Eau pour les années 1999 à 2006 (débit journalier, coordonnées des stations,...) ainsi que des données spécifiquement demandées dans le cadre de cette étude (débits et/ou hauteurs instantanés) concernant les stations du bassin versant de la Rivière du Mât. Ces stations, le type de données et leurs périodes d'observation sont indiquées dans l'Illustration 15.

Les données collectées, après contrôle et validation, ont ensuite été utilisées afin de définir le maximum de paramètres hydrologiques au droit de ces bassins versants. Le nombre et le type de paramètres pouvant être étudiés dépendent directement du nombre et de la qualité des données recueillies.

Station N°	Type de données fournies	Période d'observation	Superficie B.V. (km²)	x	y	z
Rivière du Mât Barrage 22056	Hauteurs et débits instantanés en crue Débits moyens journaliers	07/1999-02/2007	145	171760	66690	110
Rivière du Mât Escalier 22078	Hauteur et débits instantanés, Débits moyens journaliers	1999- 2006	91	165412	64411	260
Bras des lianes 26008	Débits moyens journaliers Débits maxima instantanés	1999-2006 1989-2007	7.2	168735	61412	666

Illustration 15: Principales données hydrométriques collectées (source ORE) .

3.3.1. La station hydrométrique "Barrage" (Amont prise d'eau irrigation, n° 22056) de la Rivière du Mât.

Mise en service le 19/07/1999, elle est gérée par l'Office de l'Eau (Illustration 16). Elle contrôle un bassin versant d'environ 145 km² situé entre les altitudes 110 et 3061 m NGR autour d'une valeur moyenne de 1084 m NGR.

Illustration 16 : photographie de la station et d'une crue de la Rivière du Mât au niveau du Barrage

Cette station, située quasiment sous le pont de l'ancienne RN2, comporte un enregistreur de niveau et des échelles (0-7,5m). Ces équipements ont été installés quelques dizaines de mètres en amont d'un barrage de dérivation ayant une dénivelé amont aval d'environ 7 mètres.

Cet ouvrage en grande partie désaffecté stabilise altimétriquement le lit du cours d'eau en amont et donc la section de la station. Latéralement cette section comporte en rive droite un mur pouvant être contourné lors des très fortes crues et par un rocher en rive gauche. Suite à cette configuration la relation de transformation hauteur-débit peut être considérée comme stable et univoque en moyennes et hautes eaux.

Courbes d'étalonnage de la station Barrage (ancienne RN2)

Il existe une grande différence entre les courbes d'étalonnage de la station établies par l'Office de l'Eau, SOGREAH (2004) et Dumay (2003). Si les deux premières courbes d'étalonnage sont du même ordre de grandeur, celle de Dumay donne des débits notablement plus forts (Illustration 17). Ces différences sont très importantes : ainsi pour la cote 650 cm, la courbe SOGREAH donne 1480 m^3/s et celle de Dumay 2768 m^3/s, soit un écart de 87%.

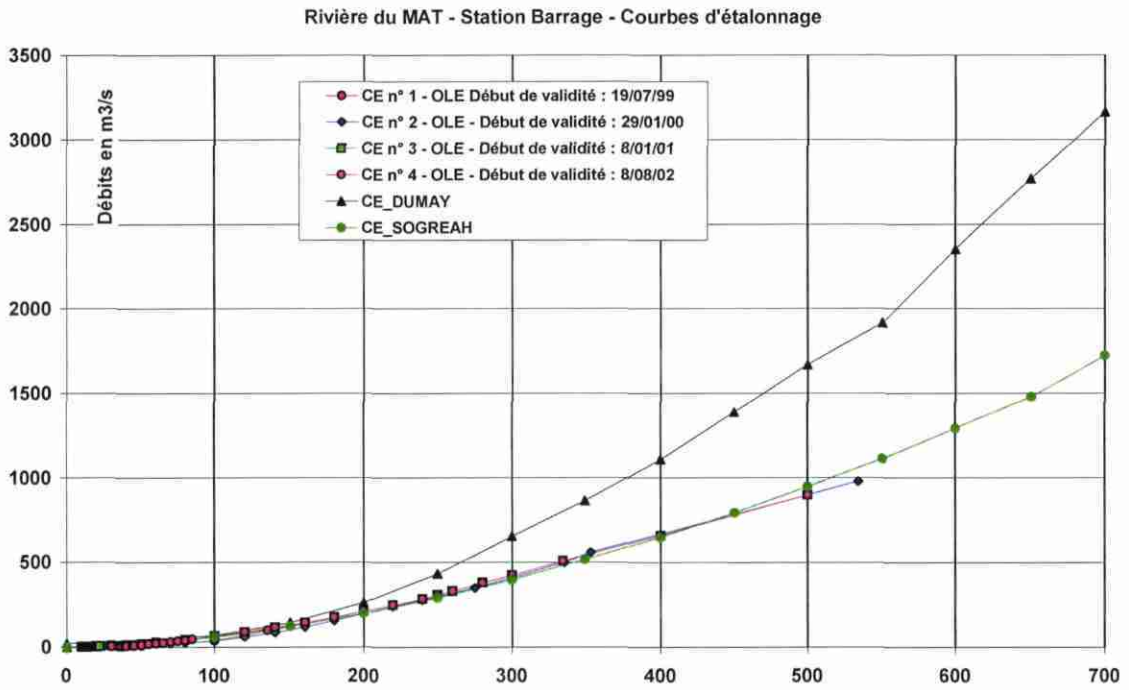


Illustration 17 : Comparaison entre les courbes d'étalonnage de l'OLE, de Sogreah et de Dumay (DDE)

Suite à la visite du site, aux contrôles topographiques réalisés et aux calculs hydrauliques de vérification, la courbe et les équations définies par la SOGREAH sont apparues satisfaisantes. Pour la suite de l'étude, la courbe d'étalonnage établie par SOGREAH en 2004 a été retenue. Les informations concernant la station et les détails de la relation hauteur débit retenue figurent en annexe 1.

3.3.2. La station hydrométrique "au pont de l'Escalier" (n° 22078) de la Rivière du Mât

Elle contrôle un bassin versant de près de 92 km² et se situe à 110 m d'altitude. Cette station, située juste en aval du pont de l'Escalier, comporte un enregistreur de niveau et des échelles. Elle se situe dans des gorges et si ses berges peuvent être considérées comme stables, il n'en va pas de même du fond du thalweg. Ce fond constitué d'alluvions varie notamment durant les crues et il n'est donc ainsi pas possible de déterminer de relation hauteur débit stable et précise en hautes eaux. Cette station a donc été considérée comme inexploitable dans le cadre de cette étude.

3.3.3. La station hydrométrique "amont AEP " (n° 26008) du Bras des Lianes.

Elle contrôle un petit bassin versant d'environ 7.2 km² et se situe à l'altitude 666 m NGR. D'après les informations collectées auprès de l'Office de l'Eau et au vu du site de la station, les données de la station du Bras des Lianes (amont AEP) peuvent être considérés comme fiables. Cette station ne contrôle toutefois qu'une petite partie du bassin versant. Par ailleurs la pluviométrie, sur le versant est, augmentant sensiblement avec l'altitude, les débits spécifiques de ce bassin seront probablement plus élevés que sur le reste du bassin versant.

3.4. EXPLOITATION DIRECTE DES DONNEES

3.4.1. Présentation

Cette partie de l'étude a pour but de préciser et/ou de définir les débits de pointe des crues et les coefficients de ruissellement en crue de fréquence décennale au droit des bassins versants suivis, afin de transposer les résultats à des bassins versants non suivis.

3.4.2. Evaluation du débit maximum instantané décennal

Rivière du Mât au barrage

Au droit de la station « Rivière du Mât barrage » il existe actuellement deux types de données sur les débits instantanés des crues :

- données de débits maxima observés et enregistrés : crues de la période 2000-2007
- données de débits maxima instantanés estimés : crues de la période 1993-1999 (cf. annexe 2).

Même si la totalité des crues de la période 1993-1999 n'ont pas été suivies tout en supposant que les plus importantes l'ont été, celles-ci peuvent être utiles pour juger et évaluer la représentativité de l'échantillon, d'un premier ajustement statistique.

L' ajustement des crues, dont le débit de pointe est supérieur à 200 m3 /s, a été réalisé suivant une loi de Gumbel (méthode du renouvellement). Il a conduit à une estimation d' un débit décennal de :

- 1500 m3/s à partir des valeurs de la période 2000-2007,

- 2100 m3/s à partir des valeurs de la période 2000-2007 complétées par les estimations 1993-1999.

Les deux valeurs sont très différentes et indiquent qu'un des deux échantillons n'est pas représentatif et qu'il est par conséquent nécessaire de compléter cette analyse.

Bras des Lianes amont AEP

L'Office de l'eau nous a communiqué les débits maxima instantanés des crues sur la période 1989-2007, soit 32 valeurs. Ces valeurs varient de 80 m^3/s à 267 m^3/s (crue du 15/12/04). Les ajustements de ces valeurs, suivant une loi de Gumbel (méthode du renouvellement et du maximum annuel) conduisent à une évaluation du débit maximal de fréquence décennal compris entre 180 et 250 m^3/s avec une valeur probable d'environ 220 m^3/s. D'après cette estimation on constate que le débit spécifique en crue de cette partie du bassin versant est nettement supérieur à celui observé à la station principale. Ceci s'explique principalement par :

- une pluviométrie probablement supérieure,
- un coefficient de ruissellement supérieur.

3.4.3. Evaluation du temps de concentration

Le temps de concentration (t_c) est le temps que met une particule d'eau provenant de la partie du bassin la plus éloignée "hydrologiquement" de l'exutoire pour parvenir à celui-ci (Illustration 18). On peut estimer t_c en mesurant la durée comprise entre la fin de la pluie nette et la fin du ruissellement direct ou à partir de formules empiriques. Le schéma ci-dessous donne la signification des principales caractéristiques d'une crue.

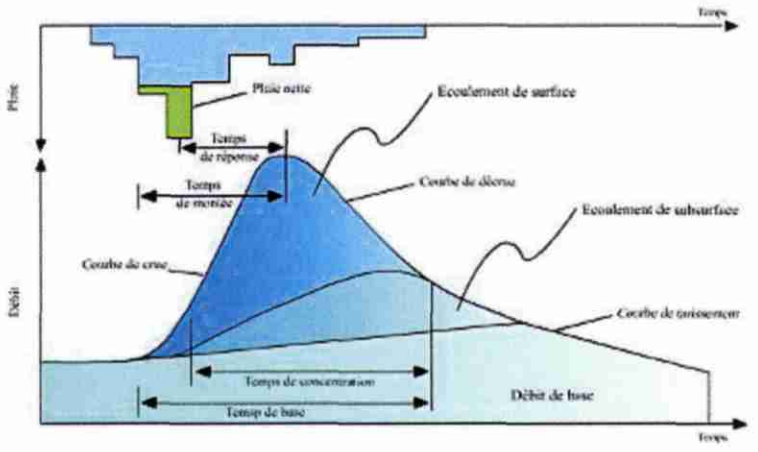


Illustration 18 : Hydrogramme d'une crue et hyétogramme correspondant- Définition des principales caractéristiques

Estimation du temps de concentration à partir des mesures de terrain

L'observation et l'analyse des hydrogrammes de crues peut fournir des indications intéressantes sur les temps caractéristiques des crues, par exemple temps de montée, temps de décrue et temps de base. L'observation conjointe avec les enregistrements pluviométriques permet non pas de mesurer mais d'estimer les temps de concentration.

En effet, il est très difficile voire impossible de mettre directement en évidence le temps de concentration d'un bassin car :

- les données pluviographiques sont rarement disponibles sur le bassin versant. Par ailleurs, les évènements pluvieux se déplacent et ne concernent souvent qu'une partie du bassin versant ;
- en début d'averse, tout ou une partie de la pluie ne participe pas au ruissellement mais à la saturation des sols. Après saturation le ruissellement atteint progressivement la station, il y a donc concomittance entre début de pluie « efficace » et « début du ruissellement rapide »,
- en fin de crue, les débits sont principalement constitués par la vidange des aquifères et de la couche superficielle, il n'est ainsi pas aisé de déterminer avec précision la fin du ruissellement rapide.

Le dépouillement de quelques hydrogrammes et de quelques hyétogrammes « simples » ont toutefois permis d'établir l'Illustration 19 en « considérant comme fin de la pluie efficace » le moment où la valeur pluviométrique atteint une valeur inférieure à celle observée au début du ruissellement rapide.

	Pluie « efficace » à MAVP		Ruissellement « rapide » à la station Barrage sur la Rivière du Mât			
Crue	Début (hhmm)	Fin (hhmm)	Début de crue (hhmm)	Fin de la crue (hhmm)	T_b (h)	Tc (h)
Ando	06/01/2001 1:00	07/01/2001 11:00	05/01/2001 23:00	07/01/20011 6:00	41	5
	04/11/2002 17:00	05/11/2002 3:00	04/11/2002 17:00	05/11/2002 7:00	14	4
	09/04/2003 07:00	09/04/2003 13:00	09/04/2003 07:00	09/04/2003 17:00	10	4
	12/03/2004 00:00	13/03/2004 00:00	12/03/2004 01:00	13/03/2004 03:00	26	3

Illustration 19: Quelques exemples de dates de début et fin de pluies et de crues calcul de Tb et Tc.

Estimation du temps de concentration à partir de formules empiriques

Les formules de calcul du temps de concentration sont multiples, certaines s'adaptent mieux à des bassins versants de montagnes d'autres sont plus spécifiquement adaptés à des plaines. Les temps de concentration ont été estimés à l'aide de quatre formules, Kirpich, Giandotti, Passini-Ventura et celle utilisant le rectangle équivalent. Les principales caractéristiques morphologiques nécessaires à l'évaluation du temps de concentration sont résumées dans le tableau (Illustration 20) ci-dessous.

Les résultats de ces calculs sont récapitulés dans l'Illustration 21.

Station	Périmètre (km)	Superficie B.V. (km^2)	Longueur thalweg (km)	Altitude max. (m)	Altitude min. (m)	Pente moyenne (%)
Rivière Fleurs Jaunes	38.2	43.0	17.3	3013	324	15.5
Rivière du Mât amont	31.9	44.2	18.0	3070	324	15.3
Bras des lianes station	16.5	7.2	7.6	2032	666	17.9
Bras des lianes confluence	27.5	21.7	12.9	2032	145	14.7
Bras des cavernes confluence	29.	21.3	14.5	2077	224	12.8
Rivière du Mât Escalier	46.6	91.8	22.0	3070	260	12.8
Rivière du Mât Barrage	59.5	145	30.4	3070	110	9,7
Rivière du Mât Embouchure	74.3	153	37.2	3070	0	8.3

Illustration 20 : Principales caractéristiques des différents sous bassins versant

	Temps de Concentration (minutes)				
Formule	Kirpich	Giandotti	Passini Ventura	Rectangle équivalent	Retenu
Rivière Fleurs Jaunes	73	75	141	172	140
Rivière du Mât amont	76	77	145	129	130
Bras des lianes station	37	45	56	67	60
Bras des lianes confluence	59	65	105	117	120
Bras des cavernes confluence	69	70	116	134	130
Rivière du Mât Escalier	95	101	215	191	180
Rivière du Mât Barrage	135	129	320	262	240
Rivière du Mât Embouchure	168	142	377	388	300

Illustration 21 :Temps de concentration calculés par utilisations de formules

D'après ces formules empiriques, le temps de concentration de la Rivière du Mât au barrage varie entre 2h et 5 h. Ces résultats confirment l'ordre de grandeur évalué avec les hydrogrammes. Nous retiendrons un temps de concentration voisin de 4 heures. Pour les autres stations ce temps s'échelonne entre 1h et 6h30. Le temps de concentration retenu a été choisi voisin de la moyenne des résultats et légèrement inférieur à celui fourni par la méthode du rectangle équivalent. La valeur retenue pour chaque bassin est indiquée dans la dernière colonne.

3.4.4. Temps de base des crues

Le temps de base des crues peut se définir aux moyens des différents hydrogrammes observés. C'est la durée définie entre le début et la fin du ruissellement rapide.

Ce temps se définit, par la méthode de l'hydrogramme unitaire, comme étant la somme du temps de pluie « efficace » (durée de la pluie nette) et du temps de concentration, supposé constant pour un bassin versant donné, soit :

$$T_b = T_c + T_e$$

avec :

T_e - temps de pluie « efficace »,

T_c - temps de concentration du bassin versant

T_b - temps de base des crues.

Le temps de base des crues a été défini pour l'ensemble des crues observées de la période 2000-2007 ayant un débit de pointe instantané supérieur à 150 m^3/s. Ces temps de base ont été ensuite ajustés suivant une loi de Galton. Un exemple d'ajustement des temps de base, suivant une loi de Galton, est fourni au chapitre 3.6.3.

3.4.5. Estimation du débit maximal instantané centennal

Au droit de la station du Barrage de la Rivière du Mât

Afin de réaliser une évaluation du débit maximum instantané de fréquence centennale, nous prolongeons l'évaluation de la crue décennale (cf. § 3.4.2) jusqu'à une fréquence « pivot » puis nous appliquons la méthode du GRADEX** pour l'extrapolation à la fréquence centennale.

Deux périodes de retour ont été testées pour le point pivot : 20 et 50 ans.

La valeur utilisée est le Gradex de durée égale au temps de concentration retenu pour le bassin versant c'est-à-dire 4h. Le Gradex des pluies s'élève à 85 mm et se traduit par un Gradex des débits de 856 m3 /s au droit de la station « barrage, ancienne RN2 ».

Les résultats obtenus sont récapitulés dans le tableau (Illustration 22).

*** : GRADEX : Gradient des valeurs extrêmes (collectif, 1994).*

Débit décennal (m3/s)	Coefficient de ruissellement	Point Pivot Débit (m3/s)	Débit Centennal (m3/s)	Coefficient de ruissellement
1500	**0.41**	20 ans 1750	**3150**	0.55
		50 ans 2085	**2685**	0.48
2100	0.58	20 ans 2450	3850	0.68
		50 ans 2920	3520	0.62

Illustration 22 : Valeurs fréquentielles de débits maxima instantanés suivant hypothèses retenues à la station Barrage de la Rivière du Mât

Cette même démarche, appliquée à la station amont AEP du bras des lianes, permet, même si elle fournit une valeur trop forte du coefficient de ruissellement, d'estimer une valeur centennale du débit maximum :

- au droit de la station,
- probablement par excès, au droit de la confluence.

Ainsi que présupposé (cf. § 3.4.2), on constate que le débit spécifique de crue sur le Bras des Lianes est sensiblement supérieur au débit spécifique global de la Rivière du Mât.

Afin d'estimer les valeurs centennales au droit des autres sous bassins une démarche identique à été réalisée en utilisant les coefficients de ruissellement obtenus à la station « Barrage ». L'Illustration 23 récapitulent les débits décennaux et les débits centennaux obtenus avec :

- 1 : Période de retour du point « pivot » : 20 ans,
- 2 : Période de retour du point « pivot » : 50 ans.

Lieu	P10	Q10	P100	Q100
Rivière Fleurs Jaunes	*270*	570	420	1 : 1160 2 : 960
Rivière du Mât amont	250	580	390	1 : 1160 2 : 960
Bras des lianes Station	140	220	225	1 : 420 2 : 390
Bras des lianes confluence	225	530	350	1 : 870 2 : 840
Bras des cavernes confluence	225	270	350	1 : 570 2 : 490
Rivière du Mât Escalier	300	1040	470	1 : 2210 2 : 1880

Illustration 23 : valeurs fréquentielles de débits maxima instantanés au droit de différents bassins versants

Par suite de la forte perméabilité du bassin versant, il est fortement probable que les débits maxima fréquentiels estimés ci-dessus pour le bras des cavernes soient surestimés.

3.4.6. Volume des crues

Les ajustements réalisés ont montré que le temps de base des crues pouvait s'ajuster suivant une loi de Galton. Par ailleurs il est généralement admis que les débits maxima instantanés des crues suivent la loi des valeurs extrêmes (loi GEV) dont la loi de Gumbel est une bonne approximation, il en résulte que le volume des crues ne suit pas une loi de Gumbel et qu'il n'y a donc pas lieu de tenter un ajustement, d'autant que la taille de l'échantillon est restreinte.

L'échantillon des débits moyens journaliers maxima paraît également trop court pour réaliser un ajustement statistique.

3.5. MODELISATION HYDROLOGIQUE GLOBALE

3.5.1. Le modèle GARDENIA

Présentation

Le modèle hydrologique global GARDENIA (Thiery, 2003) est un modèle hydrologique global développé par le BRGM. Ce logiciel simule le cycle de l'eau (Illustration 24), depuis les précipitations sur le bassin versant jusqu'au débit à l'exutoire d'une rivière (ou d'une source) ou au niveau ponctuel d'un aquifère (niveau piézométrique).

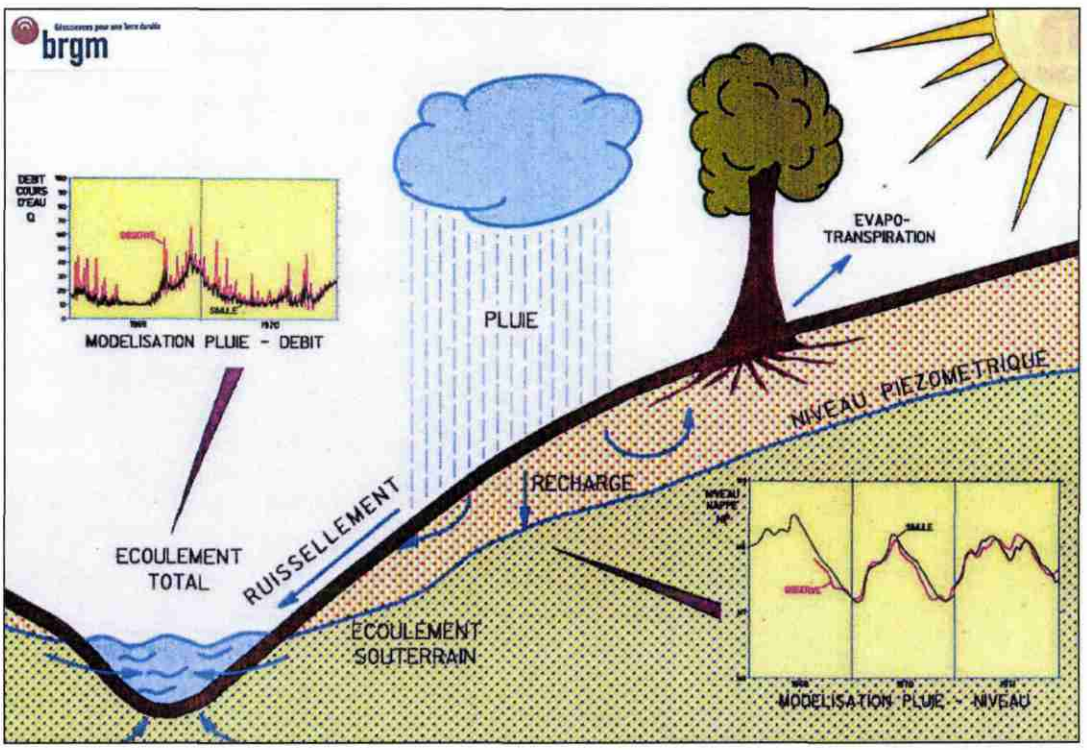


Illustration 24 : Représentation schématique des éléments du bilan hydrologique d'un bassin versant

Ce modèle est global, car il considère des « données d'entrée » globales en pluie et évapotranspiration potentielle et une sortie unique qui est, suivant le cas le débit à l'exutoire ou le niveau piézométrique en un point de la nappe sous-jacente. GARDENIA simule le cycle de l'eau par plusieurs réservoirs en cascade.

Fonctionnement du modèle

Plusieurs schémas hydrauliques peuvent être utilisés :

- le schéma type GARDENIA au sens strict avec son module de production propre. Plusieurs configurations sont possibles avec notamment 1 (Illustration 25) ou 2 réservoirs souterrains. Dans la présente étude ces deux configurations ont été testées. Dans la configuration à 1 réservoir souterrain, les 3 réservoirs représentent schématiquement :
  - la zone superficielle du sol sujette à la reprise par évaporation ;
  - la zone non saturée siège des écoulements rapides (ruissellement et composante rapide des écoulements karstiques) ;
  - la zone saturée siège des écoulements lents de l'aquifère ;
- le schéma mixte type GARDENIA avec le module de production type GR4 ;
- le schéma type GR4 développé par Edijatno et Michel (1989).

Les échanges entre les réservoirs sont définis par des fonctions de transfert faisant intervenir une dizaine de paramètres globaux (réserve utile, temps de tarissement, etc.) définis pour un bassin versant ou une entité homogène au sein d'un bassin versant.

Pour initialiser l'état de remplissage des réservoirs, il est nécessaire, en modélisation hydrologique globale, de prendre en compte une période d'initialisation. Celle-ci doit être d'autant plus longue que l'inertie ou « mémoire » de l'aquifère est grande. Cela suppose de disposer de chroniques de pluie et d'ETP sur une période aussi longue que possible antérieurement à la période de calage.

Le calage du modèle consiste à ajuster au mieux les données d'entrée (pluie, ETP) et les données de sortie (débit ou niveau piézométrique) avec un jeu de paramètres aussi réaliste que possible, calé sur l'exploitation de l'ensemble des données disponibles. Ce calage s'effectue par une méthode semi-automatique. L'utilisateur fournit un jeu de paramètres initiaux, donne des bornes de variations plausibles pour chacun d'eux et indique ceux qui doivent être optimisés. L'optimisation concomitante des différents paramètres est effectuée selon un algorithme non-linéaire adapté de la méthode de Rosenbrock. Le logiciel teste des valeurs de ces paramètres jusqu'à trouver un jeu fournissant la meilleure adéquation entre séries calculées et observées. Ce calage s'effectue sous le contrôle de l'utilisateur qui peut le contraindre, notamment par la fixation des valeurs de certains paramètres ou de bornes plausibles.

Une fois calé, le modèle peut être utilisé pour :

- Calculer les différents termes du bilan hydrologique en permettant notamment, dans une certaine mesure, de différencier les deux composantes de l'écoulement :
  - celle rapide que l'on peut assimiler au ruissellement superficiel et à la composante rapide des écoulements karstiques ;
  - celle lente que l'on peut assimiler à la composante lente des écoulements souterrains, c'est à dire à la contribution des aquifères au débit des rivières.
- Simuler des débits ou des niveaux résultant d'épisodes climatiques exceptionnels. Ces simulations permettent le dimensionnement d'ouvrages tels que retenues pour l'irrigation, aménagements de sources, fondations de bâtiments, niveaux de sous-sol, dimensionnement d'ouvrages hydrauliques pour l'évacuation des crues ou pour la régulation des débits (barrages), etc. ;

- Faire une extension de débits ou de niveaux piézométriques sur une longue période pendant laquelle on ne possède pas de mesures, à partir de différents scénarios climatiques ;
- Émission de prévisions de débits ou de niveaux piézométriques. Il est possible de prolonger une série observée jusqu'à une certaine date à partir de scénarios de précipitations prévisionnels pour les semaines ou mois futurs (sècheresses, périodes de hautes eaux) ;
- Reconstituer des valeurs manquantes dans une chronique de débits (rivière ou source), ou de niveau piézométrique (nappe). Les séries ainsi complétées peuvent être utilisées dans d'autres calculs ou modélisations.

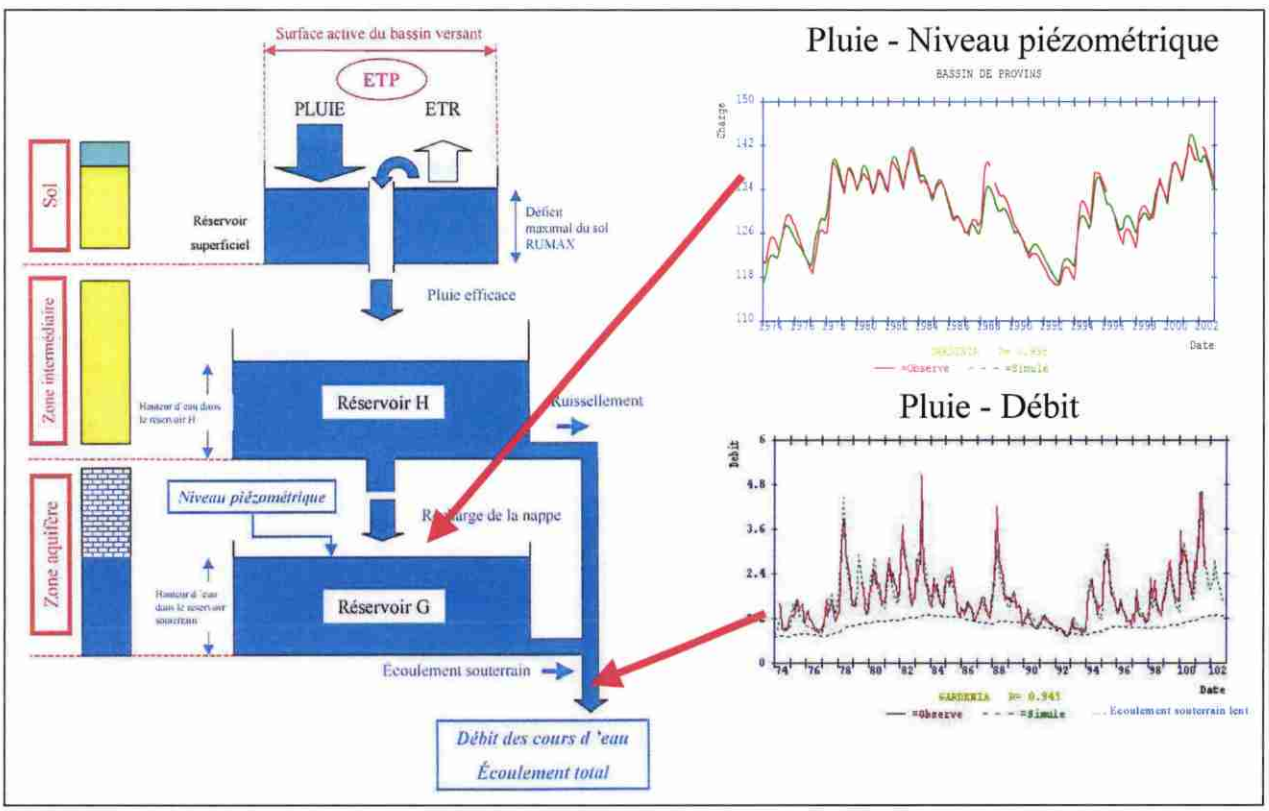


Illustration 25 : Principe du modèle hydrologique GARDENIA pour la simulation du débit d'un cours d'eau ou d'un niveau piézométrique (Schéma classique)

Les équations du bilan hydrologique

L'exploitation des modèles hydrologiques globaux GARDENIA pluie – débit et pluie – niveau piézométrique permet de quantifier les différents termes du bilan hydrologique.

Les équations du bilan hydrologique global pluie – débit sont les suivantes :

$$PLUIE = ETR + PEF$$
$$PEF = Q_{RAP} + Q_{SOUT} + dSTO$$
$$QRivière = (Q_{RAP} + Q_{SOUT}) + Q_{Echange}$$

avec :

PLUIE Lame d'eau précipitée sur le bassin

ETR Lame d'eau évapotranspirée sur le bassin

PEF Hauteur de pluie efficace ou écoulement global

Q_{RAP} Lame d'eau écoulée rapide (Ruissellement superficiel + écoulement karstique rapide)

Q_{SOUT} Lame d'eau écoulée correspondant à l'écoulement souterrain lent

$Q_{Echange}$ Lame d'eau écoulée correspondant au débit d'échange avec d'autres systèmes hydrologiques

$Q_{Echange} > 0$ *si apport extérieur au bassin*

$Q_{Echange} < 0$ *si sortie d'eau bassin*

Dans les modélisations hydrologiques globales pluie – niveau piézométrique le niveau piézométrique est déduit de la hauteur d'eau dans le réservoir souterrain (G) par la relation :

$$NP = \frac{G}{SG} + NB$$

avec :

NP Niveau piézométrique

G Hauteur d'eau dans le réservoir souterrain

SG Coefficient d'emmagasinement global

NB Niveau de base

On peut donc ainsi différencier deux types d'écoulements :

- les écoulements rapides représentés par le ruissellement superficiel et la composante rapide des écoulements karstiques ;
- les écoulements lents représentant la composante lente de l'écoulement souterrain. C'est ce que nous assimilerons à la contribution des aquifères au débit des rivières.

Cette décomposition entre les écoulements lents et souterrains doit toutefois être considérée comme indicative, car les modèles ne calent pas sur ces composantes qu'on ne sait pas mesurer de façon simple.

De plus, ces termes « lent » et « rapide » doivent être relativisés en fonction notamment des valeurs des temps de demi-tarissement (TG) et de demi-percolation (THG).

Les termes du bilan hydrologique peuvent être calculés à des pas de temps différents.

Dans le schéma hydraulique type GARDENIA sensu stricto, les symboles ont la signification suivante :

Paramètres	Unité	Dénomination
BV	km²	Surface du bassin versant
Débit d'échange	m^3/s	Débit d'échange avec d'autres systèmes hydrologiques $Q_{Echange} > 0$ *si apport extérieur au bassin* $Q_{Echange} < 0$ *si sortie d'eau bassin*
Coef. PLUIE	%	Coefficient correcteur de la pluie
Coef. ETP	%	Coefficient correcteur de l'ETP
RUMAX	mm	Capacité de rétention maximale du sol
RUIPER	mm	Hauteur d'égal ruissellement percolation
THG	Pas de temps	Temps de demi-percolation
TG1	Pas de temps	Temps de demi-tarissement rapide du réservoir souterrain H
TG1_2	Pas de temps	Temps de demi-transfert entre les réservoirs souterrains H et G
TG2	Pas de temps	Temps de demi-tarissement lent du réservoir souterrain G
Coef. Ajustement	Sans unité	Coefficient d'ajustement
Pondération	Sans unité	Pondération des débits (0=non, 1=oui)

Le schéma type GR4 comporte les paramètres suivants :

Paramètres	Unité	Dénomination
THUN	Pas de temps	Temps de décroissance de l'hydrogramme
CRUIS	%	Coefficient de ruissellement
NIVH	mm	Capacité du réservoir d'eau gravitaire
EXCHD	Pas de temps	Échange externe vers le réservoir gravitaire

Les spécificités du modèle utilisé (version 7.0)

- **Pas de temps du modèle**

Le modèle GARDENIA fonctionne habituellement avec un pas de temps de modélisation journalier, pentadaire (5 jours), décadaire ou mensuel. La version 7, utilisée dans la présente étude, permet d'utiliser des pas de temps quelconques, plus fins notamment, pour simuler des crues de petits bassins versants pour lesquels les temps de concentration sont nettement inférieurs à la journée. C'est cette possibilité qui a été utilisé dans les simulations réalisées. Le pas de temps choisi a été celui correspondant aux données pluviométriques récoltées : pas de temps horaire.

Les débits maxima instantanés simulés par le modèle seront au pas de temps horaire et devront donc être corrigés pour être comparés aux débits maxima observés. Une corrélation sur la population des hydrogrammes observés entre 2000 et 2007 a été réalisée afin d'estimer la réduction opérée par ce changement de pas de temps. Cette réduction est de l'ordre de 12% (Illustration 26)

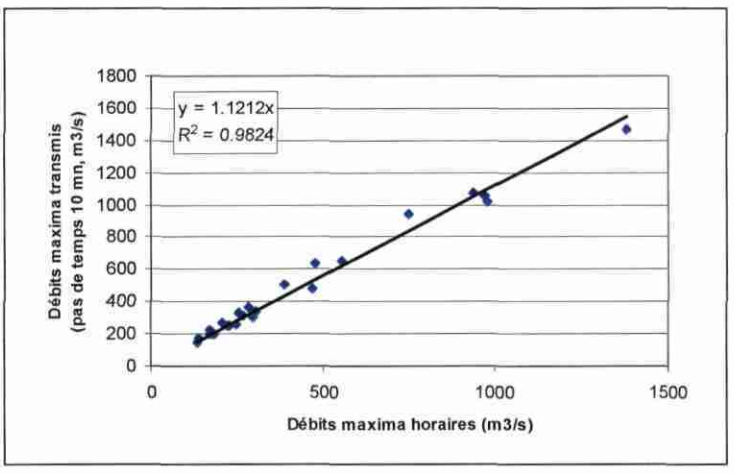


Illustration 26 : Réduction des débits maxima avec le pas de temps horaire

- **Index d'état de remplissage du réservoir superficiel**

Nous avons à simuler des crues exceptionnelles séparées dans le temps par des périodes importantes souvent de l'ordre de l'année. Certaines de ces crues peuvent

survenir soit après une longue période sans pluie soit après une période plus ou moins longue de pluies. Il nous a donc paru utile d'utiliser un index de l'état initial de saturation du réservoir superficiel. Nous avons utilisé l'algorithme de Thornthwaite avec calcul au pas de temps horaire de la réserve dans le sol (RU) pour une RUMAX donnée. Pour ces calculs, la réserve utile dans le sol au démarrage des calculs a été prise égale à 0 mm.

- **Calage des crues de façon isolée ou simultanée**

Les calages peuvent être réalisés de façon :

- **séparés pour chaque crue.** Ils conduisent alors à des jeux de paramètres différents d'une crue à l'autre. Cette méthode n'a pas été utilisée dans le cadre de cette étude.
- **simultanément sur plusieurs crues sélectionnées**. Les séries temporelles de données (pluies, ETP et débits) sont mises bout à bout même si elles sont discontinues dans le temps. Pour prendre en compte l'état de remplissage du réservoir superficiel au démarrage de l'épisode pluvieux, on pourra s'appuyer sur l'index décrit précédemment. Pour vider la réserve dans le sol au démarrage d'un nouvel épisode de crue, on pourra :
  - soit artificiellement mettre une très forte ETP pendant 1 à 3 pas de calcul,
  - soit laisser suffisamment d'espace entre une crue et la suivante pour que le réservoir superficiel se vide.

Cette méthode permet d'obtenir un jeu de paramètre représentatif des différentes crues modélisées. Ce jeu de paramètres peut ensuite être utilisé pour faire de reconstitutions d'hydrogrammes de crue plus fiables.

- **Facteur correctif sur les pluies**

Le facteur correctif pour passer de la pluie sur un poste à la pluie moyenne sur le bassin versant peut être obtenu soit en optimisant le coefficient de correction sur la pluie, soit en optimisant la taille du bassin versant. Cette dernière méthode s'avère plus efficace pour le calage du modèle mais donne les mêmes résultats. Multiplier la taille du bassin par un facteur k est équivalent à multiplier par k : la pluie, l'ETP et tous les paramètres exprimés en mm (Capacités de réservoirs, Hauteur d'équi-ruissellement - percolation RUIPER, RUMAX et NIVH).

- **Hauteur d'ETP**

Si l'évapotranspiration est un élément essentiel du bilan hydrologique, son importance en période de crue est faible par rapport aux très fortes précipitations. L'évapotranspiration potentielle (ETP) peut être calculée par des formules empiriques comme celle de Penman Montheith à partir de paramètres climatologiques mesurés dans les stations météorologiques. La station la plus proche de la zone étudiée est celle de Gillot Aéroport située à 21 m d'altitude.

L'Illustration 27 récapitule les valeurs mensuelles et annuelles sur la période 1995-2006 et donne les statistiques sur la période de 53 ans allant de 1953 à 2005. La valeur annuelle varie entre 2069 mm et 1321 mm autour d'une valeur moyenne interannuelle de 1765 mm : sa variabilité est de 8,3 %.

Année	Janv	Févr	Mars	Avr	Mai	Juin	Juil	Août	Sept	Oct	Nov	Déc	Total
1995	201.1	172.6	169.5	143.0	137.3	111.2	157.0	156.5	144.9	196.8	168.4	137.3	1895.6
1996	156.0	179.9	157.5	139.9	148.7	132.7	136.5	148.7	162.7	192.1	175.3	176.7	1906.7
1997	203.3	171.2	182.1	166.8	137.1	137.2	143.0	146.1	154.8	169.1	168.1	198.6	1977.4
1998	228.2	126.6	188.3	162.5	157.6	129.0	134.0	154.0	154.0	177.1	185.6	156.3	1953.2
1999	199.8	159.6	151.5	162.0	139.5	135.3	144.3	171.5	155.6	166.7	205.1	184.1	1975.0
2000	172.3	164.9	186.0	156.2	135.9	153.8	146.4	160.7	187.3	188.5	204.1	212.4	2068.5
2001	169.1	186.9	186.1	170.4	152.6	151.0	138.8	164.9	159.8	178.5	191.2	176.3	2025.6
2002	164.2	172.9	174.4	154.2	138.4	132.0	129.3	158.0	162.0	195.6	180.8	182.5	1944.3
2003	176.0	174.8	203.5	138.4	142.6	147.8	163.3	159.8	165.6	176.9	178.3	200.2	2027.2
2004	190.4	164.9	182.2	154.2	142.2	148.7	138.5	168.4	110.2	174.5	194.6	167.9	1936.7
2005	180.1	128.6	138.5	142.5	145.4	135.0	138.8	148.3	152.4	165.5	153.5	177.7	1806.3
2006	173.4												
Valeurs statistiques sur la période de 53 ans 1953-2005													
Année	**Janv**	**Févr**	**Mars**	**Avr**	**Mai**	**Juin**	**Juil**	**Août**	**Sept**	**Oct**	**Nov**	**Déc**	**Total**
Moyenne mm/mois	**174.4**	**149.8**	**156.0**	**137.4**	**128.6**	**117.7**	**122.8**	**137.1**	**143.6**	**162.5**	**164.6**	**170.3**	**1764.7**
Moyenne mm/jour	**5.6**	**5.3**	**5.0**	**4.6**	**4.1**	**3.9**	**4.0**	**4.4**	**4.8**	**5.2**	**5.5**	**5.5**	**4.8**
Maximum	228.2	186.9	203.5	170.4	157.6	153.8	163.3	171.5	187.3	196.8	205.1	228.5	2068.5
Minimum	61.4	60.0	53.3	88.1	74.1	76.7	81.0	108.0	110.2	137.1	133.2	137.3	1321.9
Ecart type	22.8	20.2	21.6	15	14.1	16.3	15.2	15.3	15.1	14.7	18.7	19	147
Variabilité %	13.1	13.5	13.8	10.9	11.0	13.8	12.4	11.2	10.5	9.0	11.4	11.2	8.3

144.3 Valeurs manquantes complétées par les moyennes interannuelle 1993-2004 sauf 1994 et 1999
Code valeur manquante

Illustration 27 : Evapotranspiration potentielle (en mm) calculée au pas de temps journalier avec la formule de Penman Montheith à la station de Gillot Aéroport (source Météo France)

L'évapotranspiration potentielle Penman est fonction de la température de l'air, de la durée d'insolation, de l'humidité relative de l'air et de la vitesse moyenne du vent. L'altitude du bassin versant étudié est comprise entre 110 m et plus de 3000 m. Or les paramètres comme la température de l'air diminuent avec l'altitude. Ainsi l'analyse des moyennes mensuelles observées sur 32 postes de La Réunion sur une période de 5 ans a montré une bonne corrélation entre l'altitude et la température moyenne.

Elle est comprise entre :

- 21 à 29° C pour Le Port (altitude 11 m)

- 14 à 22° C pour Dos d'Ane (altitude 930 m).

Cela signifie que dans la zone d'étude, en l'absence de station permettant de calculer l'ETP, on pourra en première approximation utiliser celle de Gillot aéroport affectée d'un facteur correctif notablement inférieur à 1 (de l'ordre de 0,70 environ).

Cependant, nous verrons que pour l'application des modèles hydrologiques globaux aux crues, on peut, en première approximation, prendre une valeur moyenne interannuelle par pas car les hauteurs d'ETP sont négligeables par rapport à celles des pluies.

C'est pourquoi une valeur constante par pas, équivalente à 4,8 mm/jour, a été retenue dans les modélisations.

- **Choix du pas de temps de calcul**

Le pas de temps de calcul a été choisi de façon à ce qu'il soit suffisamment fin pour réduire au maximum les risques de décalage temporel entre les données tout en reproduisant au mieux les débits simulés. Ce pas de temps doit aussi tenir compte de la précision des dépouillements des pluviographes manuels : le pas de temps minimal

est plutôt de l'ordre de 15 minutes. De plus les pas de temps débit et pluie doivent être de même durée, le pas de temps de 1 heure a donc été retenu,

3.5.2. Calage du modèle

Données de calage

Les calages ont été réalisés sur la station « barrage, ancienne RN2 » avec les crues de la période 2000-2007 pour lesquelles la pluviométrie journalière observée au poste de Mare à Vieille Place à atteint ou dépassée 250 mm. Certaines crues, dont le débit de pointe observé a été supérieur à 250 m^3/s, n'ont pu être retenues par suite de lacune dans les données. In fine, parmi les principaux évènements de la période 2000-2007 figurant dans l'Illustration 28, treize ont été utilisées pour la réalisation des différents calages.

Calages réalisés

- **Avec un seul poste : Mare à Vieille Place (MAVP)**

Pour des bassins versants à temps de concentration très courts, le mieux est de trouver un indice pluviométrique simple et rapide permettant de cerner au mieux l'importance des crues en train de se produire. Pour cela, il a semblé intéressant d'essayer de caler cette modélisation d'après les informations d'un seul poste pluviométrique. Dans un premier temps, nous avons voulu essayer de caler le modèle sur une seule station permettant ainsi une rapidité de traitement pour la fonction spécifique d'annonce et/ou confirmation de crues.

Ce type de calage avait déjà été réalisé lors d'une étude antérieure (calage avec le poste de MAVP) et avait conduit à des résultats de simulations satisfaisants (coefficient d'ajustement de 0,968). Ce calage a été repris et a donné de bons résultats pour toutes les crues, même pour celles non encore simulées, sur la période 2000- 2006 (coefficient d'ajustement de 0,936). A contrario, la simulation n'était pas excellente pour Gamède (crue de février 2007) dont les débits simulés étaient sensiblement sous estimés. L'Illustration 29 fournit quelques exemples des crues simulées.

		date évènement crue		Débit max. station (m3/s)		Pluie à Mare Vieille Place (mm)			Montant Pluviométrique de l'évènement (mm)				
n°	nom	début	fin	instantané	journalier	total	max. journalier	max. horaire	Salazie	Belouve	Hell-Bourg	Gd Ilet	Bras Panon
1	CONNIE	27/01/2000	01/02/2000	470	212	869.6	475.2	58.6	814.8	940	1020.5		550.2
		15/02/2000	16/02/2000	250	120	585.6	250	**31.2**	478.8	667	660.5		174
2	ANDO	05/01/2001	09/01/2001	750	348	1189.6	755.4	87.8	921	827.5	785.5		246
3	DINA	21/01/2002	25/01/2002	970	501	1548.4	1000	79.6	1695.6	1375.5	1573		665.6
	HARY	08/03/2002	12/03/2002	L	L	638.4	222.2		659	736	838		205
		09/04/2002	11/04/2002	L	L	257	223.8	42.6	372	292	230		164
		10/05/2002	12/05/2002	L	102	169.6	90.6		177.6	138	137.5		162
4		04/11/2002	05/11/2002	550	110	326.8	325.4	90.6	305	250	261		328
		10/02/2003	13/02/2003	L	L	385.2	219.4	47	561	440	396		388
5		01/04/2003	09/04/2003	390	92	290.6	99	26.6	490	258	303		304
		15/08/2003	16/08/2003	-	52	189.6	182		198	142	120		82
		27/12/2003	28/12/2003	-	29	177.2	156.4		173	176	137	L	165
		20/02/2004	22/02/2004	230	77	225.2	203	32	344	267	216	97	145
6		11/03/2004	13/03/2004	270	103	347	175.8	37.8	341	255	125	188	153
		03/12/2004	04/12/2004	170	79	126.4	107.8		208	144	140	110	154
		13/12/2004	15/12/2004	L	L	474.4	445.2		858	365	227	217	385
7		18/12/2004	21/12/2004	180	120	266	164.2	18.8	304	249	253	283	438
8		15/02/2005	19/02/2005	480	161	439.8	195.6	36.4	579	365	249	461	905
9		19/03/2005	25/03/2005	300	149	643	276.2	36.8	966	781	600	539	478
10		21/11/2005	23/11/2005	280	109	184.4	107.4	34.8	205	115	106	138	559
11		16/02/2006	19/02/2006	940	342	831.8	400	138.2	895	765	726	860	82
12	DIWA	03/03/2006	10/03/2006	1380	780	2573.4	1181.8	101.8	2659	2571	2818	3160	987
		14/01/2007	17/01/2007	-	L	278.2	162.4		172	391.4	276.5	172	438.2
13	GAMEDE	24/02/2007	01/03/2007	980	606	2155	550	57.6	1986	3161	3672	2155	495.6

Illustration 28 : Crues utilisées lors des calages des modélisations (station « Barrage, ancienne RN2)

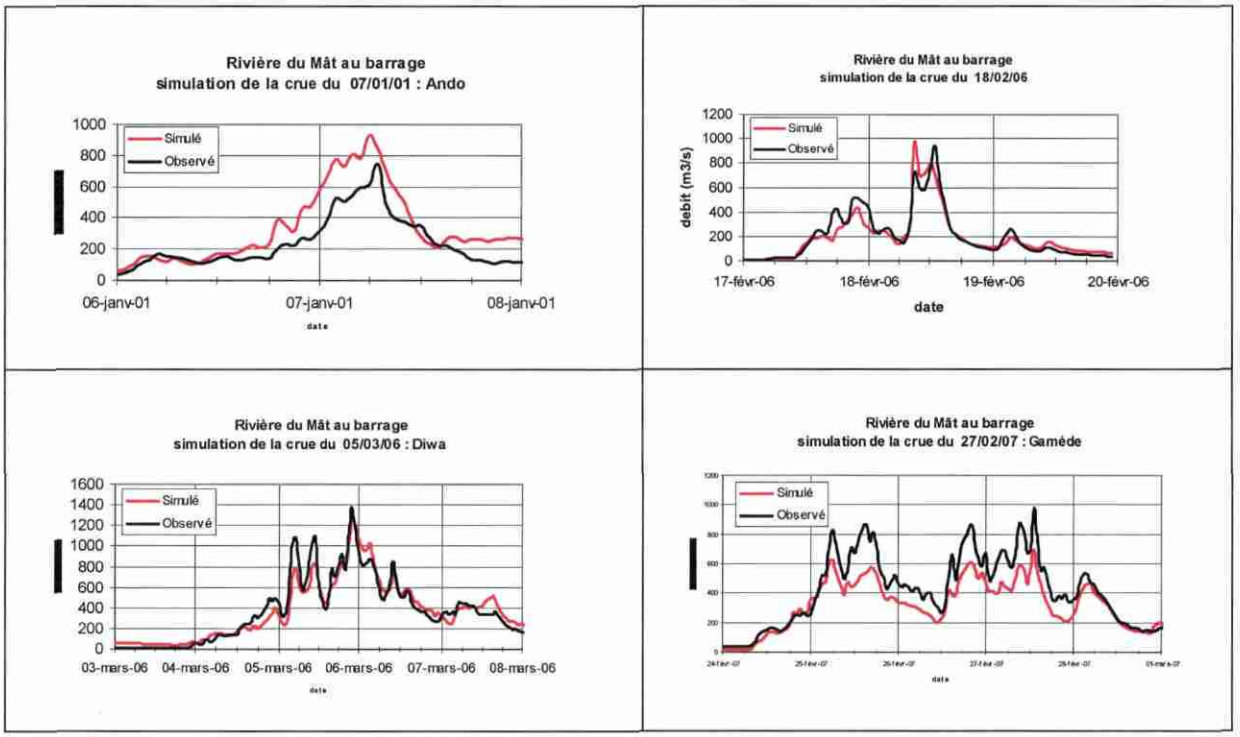


Illustration 29 : Exemples de calage réalisé uniquement avec le poste de Mare à Vieille Place

Il convient, à ce stade de signaler que la simulation précédente considérait comme productive un bassin versant de 52, 4 km^2 (crues de 2000-2003). Cet aspect soulevait ainsi quelques problèmes de bilan et de transposition des résultats à d'autres bassins versants.

Avec l'année 2007 et GAMEDE, ce coefficient d'ajustement a baissé à 0,936 mais la superficie du bassin versant productif est passée à 70 km^2.

Malgré un calage satisfaisant, ces graphiques permettent de constater que certaines crues sont moins bien simulées que d'autres, certaines sont sous estimés : Gamède et la crue du 21 novembre 2005, a contrario, surestimation pour ANDO.

- **Evaluation de la pluie globale reçue par le bassin versant à l'aide des Isohyètes.**

La méthode consiste à comparer la pluviométrie totale de l'évènement observée à la station de Mare à Vieille Place avec la pluviométrie moyenne déduite des isohyètes pour chaque évènement.

On utilise ensuite, comme pluie sur le bassin, la pluviométrie horaire de la station de Mare à Vieille Place affectée du coefficient correcteur (défini par évènement).

Exemples Illustration 30:

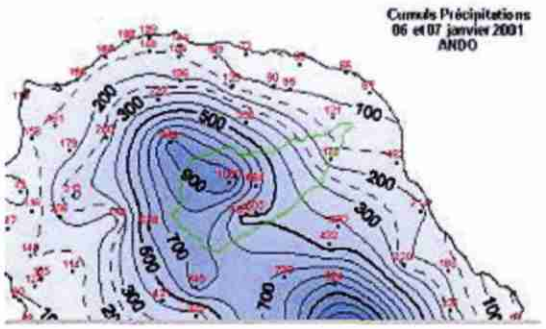
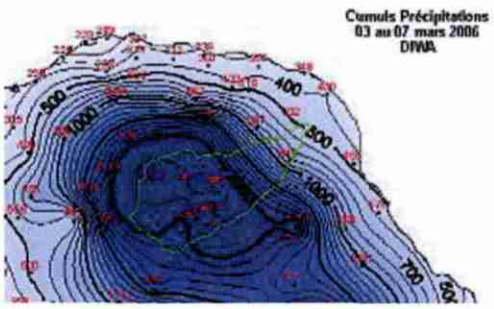
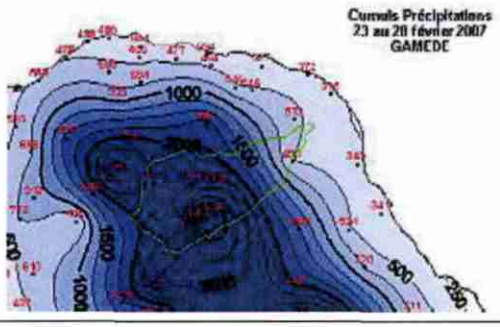
Ando : pluviométrie moyenne sur le bassin versant évaluée à : 560 mm Pluie à MAVP : 1000 mm Facteur correctif : 560/1000 = 0.56 Toutes les valeurs horaires observées à MAVP seront multipliées par ce facteur.	
Diwa : pluviométrie moyenne sur le bassin versant évaluée à : 2080 mm Pluie à MAVP : 2487 mm Facteur correctif : 2080/2487 = 0.84	
Gamède : pluviométrie moyenne sur le bassin versant évaluée à : 2080 mm Pluie à MAVP : 2167 mm Facteur correctif : 0.96	

Illustration 30 : Exemples d'isohyetes de quelques cyclones (Source Météo France)

Ce traitement a été réalisé pour 8 des 13 crues de calage.

La correction apportée par les isohyètes a permis d'améliorer le coefficient de calage (0,946) et d'augmenter, mais pas suffisamment, la superficie considérée comme productive (83 km^2) (Illustration 31).

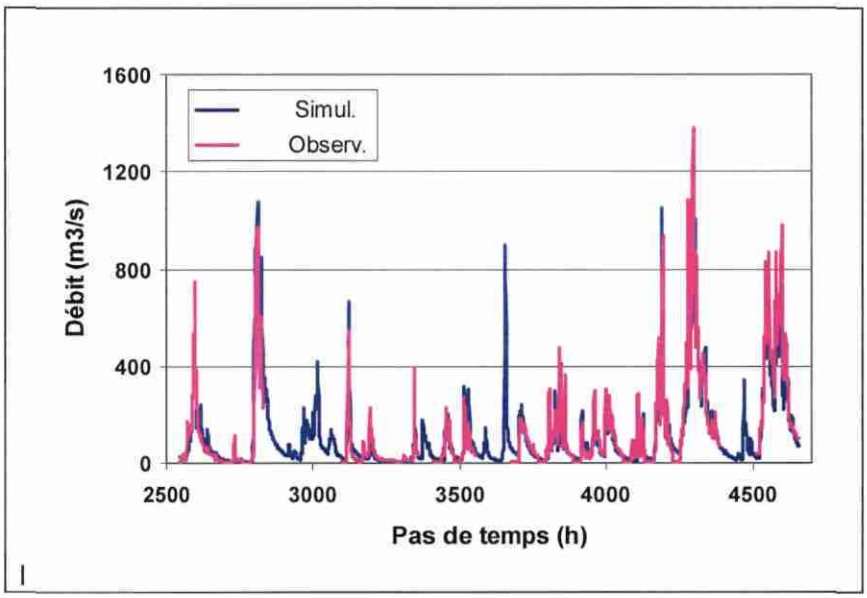


Illustration 31: Calage sur 2000-2007 avec pluviométrie pondérée par utilisation des isohyètes

- **Calages en utilisant les valeurs de pluies journalières**

Pour ces calages la pluie observée à MAVP a été pondérée, non pas par les montants pluviométriques totaux de l'évènement, mais par la pluviométrie moyenne estimée sur le bassin à partir des valeurs observées aux différents postes pluviométriques (cinq postes) au pas de temps journalier.

Ces coefficients, qui sont variables d'un évènement à l'autre (cf.Illustration 30), ont été pris constants pour l'ensemble des crues. Plusieurs calages, faisant appel à des combinaisons différentes de ces coefficients variant entre 0,10 et 0,30, ont été testés.

La meilleure combinaison a paru être celle avec les coefficients suivant :

- Mare à Vieille Place : 0.3,
- Salazie, Belouve, Hell-Bourg : 0.2,
- Bras Panon : 0.1

Avec cette pluviométrie, le calage a pu être réalisé avec la superficie réelle du bassin versant soit 145 km^2. Le coefficient d'ajustement étant satisfaisant (0,951) et la comparaison visuelle débit observé-débit simulé étant satisfaisante, seul ce calage sera utilisé pour la suite de l'étude.

L'Illustration 32 montre les débits mesurés et simulés sur l'ensemble de la période de calage 2000-2007. Le résultat du calage à donné lieu à un graphique pour chaque crue. Ils figurent sur l'Illustration 33 et sur Illustration 34.

Le coefficient d'ajustement pourrait être amélioré en ajustant par évènement la pondération des différents postes mais cela n'apporterait rien pour l'utilisation voulue c'est-à-dire la simulation des crues non observées.

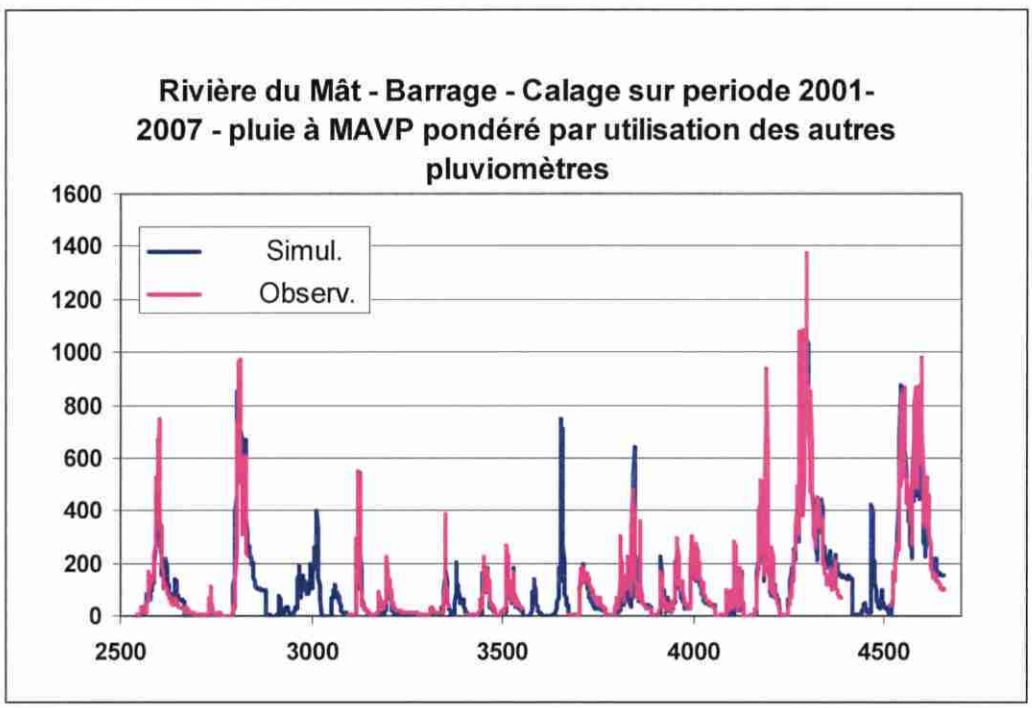


Illustration 32 :Calage sur 2000-2007 avec pluviométrie pondérée par utilisation des pluies journalières.

L'Illustration 35 et le tableau (Illustration 36) permettent de comparer pour les crues principales les débits et volumes mesurés et simulés.

Malgré un coefficient de calage très satisfaisant et des volumes simulés observés très semblables, on peut noter la tendance du modèle à simuler des débits maxima inférieurs aux débits maxima « mesurés ». Cette tendance s'ajoute à la diminution des débits par suite du passage au pas de temps une heure. La corrélation entre débits maxima en dix minutes et débits maxima simulés en une heure est acceptable (R=0.92, Illustration 35), notamment si l'on fait abstraction de quelques crues dégradées (crue du 17 février 2005) ou des crues dont une partie est probablement dégradée par suite de lacunes de données (pluie du 27 et 28/02/07 reconstituées et non observées à Mare à Vieille Place). La colonne 4 du tableau (Illustration 36) indique la valeur de débit maximal obtenu en utilisant cette corrélation (augmentation de 25%).

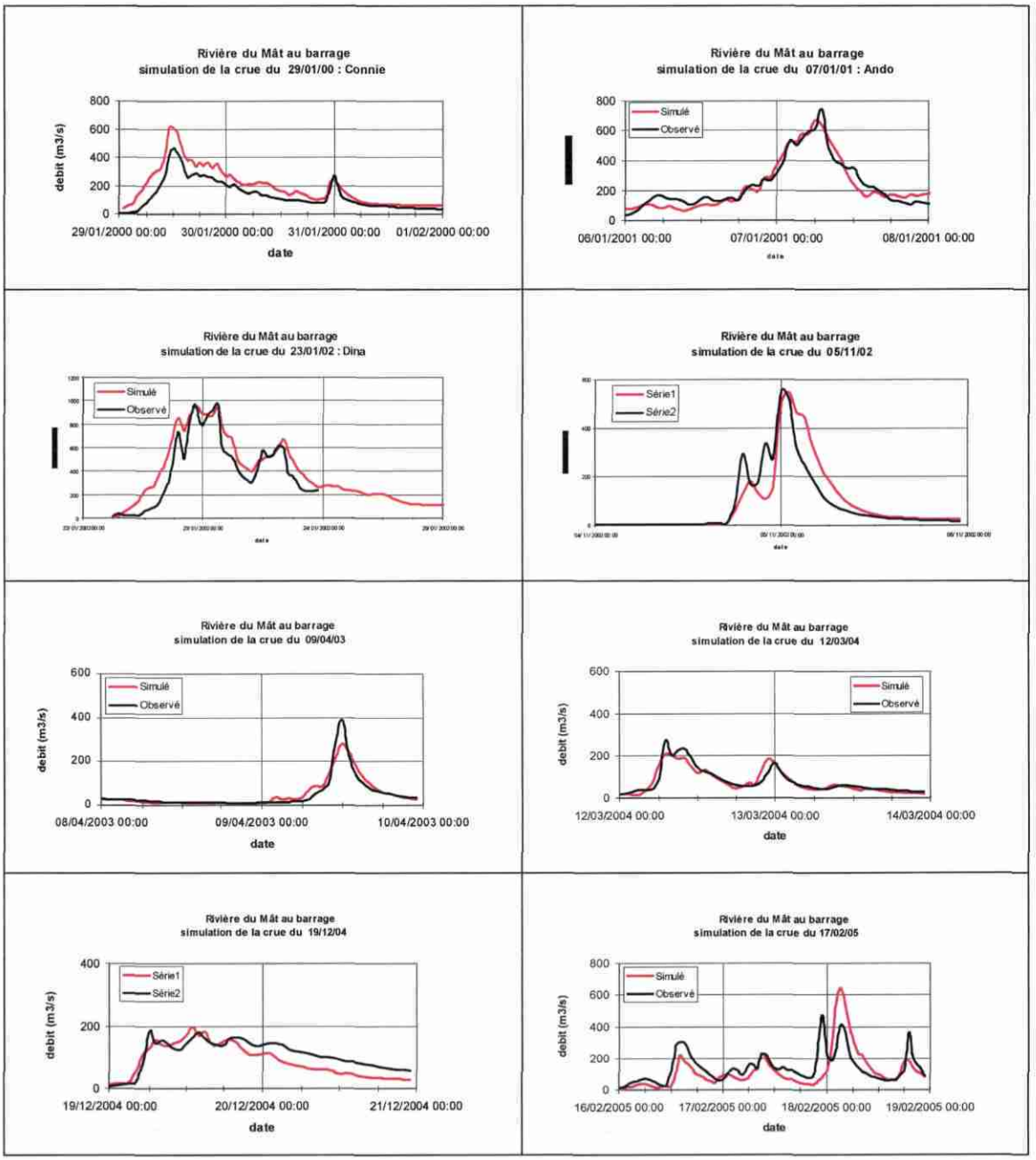


Illustration 33 : Résultats du calage de la modélisation GARDENIA : comparaison débits mesurés débits simulés sur la période 2000-2007.

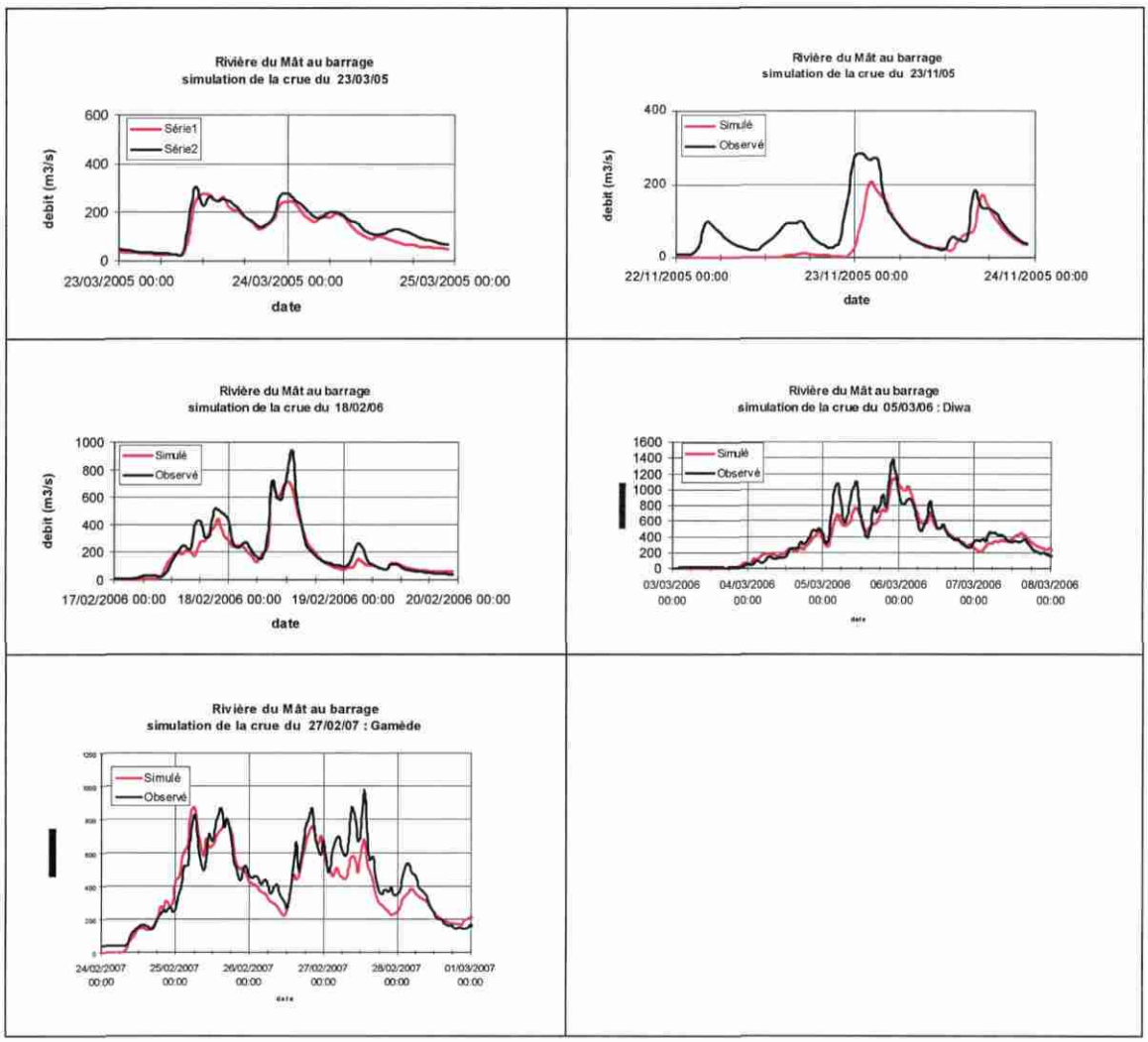


Illustration 34 : Résultats du calage de la modélisation GARDENIA : comparaison débits mesurés débits simulés sur la période 2000-2007(suite).

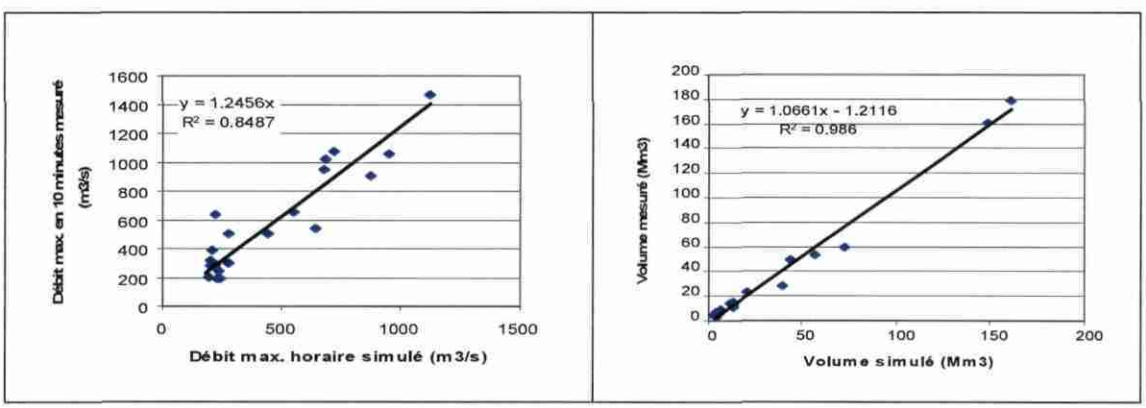


Illustration 35 :Corrélations entre volumes et débits maxima mesurés et simulés des crues sur la période 2000-2007

Date	Débit max. horaire simulé	Débit max. horaire mesuré	débit max. simulé corrigé	débit max. 10 Minutes	Volume (Mm3) de la crue simulé	Volume (Mm3) de la crue mesuré
29-janv.-00	609	469	761	483	40	28
7-janv.-01	677	747	846	948	57	54
23-janv.-02	950	972	1188	1060	73	60
5-nov.-02	546	552	683	654	13	13
9-avr.-03	282	389	353	505	6	6
12-mars-04	207	232	259	316	6	7
19-déc.-04	196	184	245	204	13	16
16-févr.-05	214	302	268	395	4	8
17-févr.-05	228	224	285	637	7	10
18-févr.-05	643	476	804	545	13	11
18-févr.-05	183	360	229		3	4
20-mars-05	236	170	294	197	5	4
21-mars-05	224	296	280	296	12	14
23-mars-05	279	304	349	304	21	24
23-nov.-05	205	268	256	284	4	6
18-févr.-06	717	937	896	1077	44	50
5-mars-06	1126	1376	1408	1464	149	161
7-mars-06	446	447	558	510		
8-mars-06	249	180	311	198		
9-mars-06	236	209	295	248		
25-févr.-07	876	831	1095	903	162	179
27-févr.-07	680	980	850	1020		

Illustration 36 : Comparaison des volumes et des débits maximum des crues simulés et observés

Bilan du calage

Sur les crues de la période de calage allant de 2001 à 2007, le bilan global s'établit ainsi :

- Pluie : 13 018 mm
- EvapoTransPiration : 6 119 mm
- Ecoulement rapide : 4 256 mm
- Ecoulement lent : 1 620 mm

- Variation de stock : 1 023 mm

Nota bene : il ne paraît pas possible de déduire directement un bilan annuel de celui-ci dans la mesure où seules les périodes de crues sont simulées.

Influence de la période de calage et sensibilité du calage sur les résultats

L'analyse des calages précédents a montré que l'optimum était obtenu avec une superficie productrice pour l'écoulement inférieure à la taille réelle du bassin versant. L'analyse des isohyètes montre qu'effectivement la pluviométrie est très variable sur ce bassin et que cette variabilité n'est limitée que lors de quelques épisodes exceptionnels tels Gamède, Diwa et Hyacinte, la pluviométrie extrême s'étendant lors de ces épisodes à l'ensemble du bassin versant amont. Il apparaît ainsi intéressant, pour simuler les phénomènes extrêmes et obtenir les débits maxima de tester un calage se basant uniquement sur ceux-ci. Parallèlement, il permettra de tester l'influence de la période de calage et évaluer les incertitudes sur les résultats.

Un deuxième calage a donc été réalisé en n'utilisant que les années 2006 et 2007 (Diwa et Gamède). Avec une superficie productive égale à la superficie réelle du bassin versant on obtient un coefficient d'ajustement très satisfaisant de 0,954.

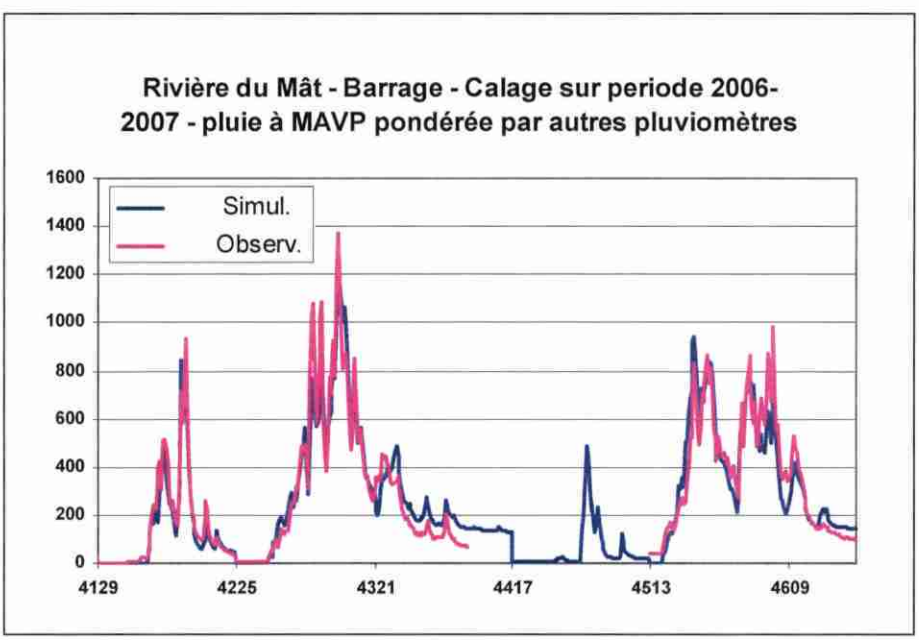


Illustration 37 : Calage réalisé uniquement sur la période 2006-2007

L'Illustration 37 permet de constater une bonne simulation des débits observés.

La corrélation entre débits maxima en dix minutes et débits maxima simulés en une heure est bonne (R=0.95). Le coefficient de passage entre débit maximal horaire simulé et débit maximal observé s'élève, pour ce calage à 1,23.

3.5.3. Simulation des crues non observées

Simulation de la période 1993-2000

L'utilisation du modèle, une fois calé, a permis de reconstituer les débits de crue sur l'ensemble de la période 1993-2007, c'est-à-dire les crues de la période antérieure (1993-2000) non suivie et les quelques crues non observées de la période 2000-2007. Le tableau, figurant en annexe1, récapitule les principales caractéristiques de ces différents évènements. Dans ce tableau, figurent cinquante épisodes de crues : 18 ont servis aux calages (encadrés en gras) et 32 ont été simulés.

En annexe 2, figurent :

- un tableau comportant l'estimation, faite par l'ORE, des débits maxima instantanés de ces crues,

- les graphiques des principales crues simulées.

Sur les treize crues pour lesquelles des estimations de débits ont été fournis par l'Office de l'Eau :

- six ont un débit maximum simulé proche ou compatible, crues N° 6, 7, 10, 20, 21 et 22 (écart de +-20%),
- trois ont un débit sensiblement différent, crues N° 1, 9 et 16 (écart +-40%)
- quatre ont un débit nettement différent, crues N° 3, 5, 19 et 26 (écart >50%).

Simulation de la crue de Hyacinte

Cette crue étant la crue de référence, il a paru intéressant d'essayer de la simuler avec les deux calages précédents. Le hyétogramme utilisé a été défini en respectant les différentes observations collectées au poste de Grand Ilet soit :

- Pluies journalières de :
  - 858 mm le 24/01,
  - 706 mm le 25,
  - 1044 mm le 26,
  - 877 mm le 27.
- Mais également :
  - 110 mm en 1 heure,
  - 605 mm en 6 heures,
  - 1170 mm en 12 heures,
  - 3240 mm en 72 heures,
  - 3485 mm en 96 heures.

Un des hyétogrammes possibles fournit par simulation un hydrogramme en trois pointes (Illustration 38). On peut ainsi constater :

- un premier pic ayant une montée régulière, du à un hyétogramme à palier constant,
- un deuxième pic avec un débit maximal horaire d'environ 1100 m^3/s
- un dernier pic dont le débit maximum horaire atteint 1825 m^3/s soit, d'après la relation précédemment définie, un débit maximal d'environ 2280 m3/s dont la période de retour peut être évaluée comme étant comprise entre 30 et 50 ans.

Il est à noter que l'état des réservoirs en début de crue et la répartition des montants pluviométriques, hors intensité maximale, n'influe pas sur le débit maximal obtenu.

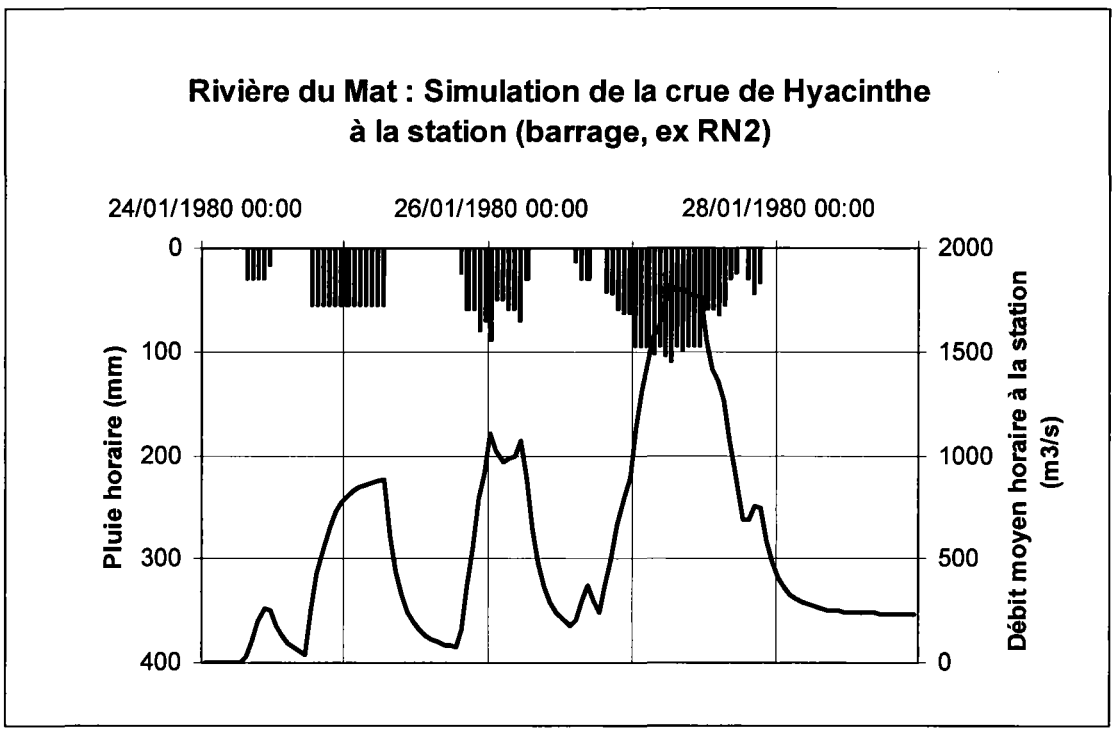


Illustration 38 : HYACINTHE : Hydrogramme simulé à partir d'un ietogramme reconstitué

3.6. EXPLOITATION DES DEBITS SUR LA PERIODE 1993-2006 A LA STATION PRINCIPALE

3.6.1. Evaluation de la crue centennale

A l'aide de l'ensemble des crues simulées sur la période 1993-2007, la démarche explicitée au paragraphe 3.4.5 a été reconduite afin de préciser les valeurs fréquentielles des débits maxima instantanés, c'est-à-dire :

- détermination par ajustement, suivant une loi de Gumbel (échantillon tronqué), du débit décennal,

- extrapolation de l'ajustement jusqu'à la période du point pivot,
- application du Gradex à partir d'un point « pivot » situé à une période de retour de 20 ou de 50 ans.

L'Illustration 39 ci-dessous présente les valeurs obtenues.

Débit décennal horaire (m3/s)	Débit décennal maximal (m3/s)	Coefficient de ruissellement	Point Pivot Débit (m3/s)	Débit Centennal (m3/s)	Coefficient de ruissellement
1310	**1635**	**0.45**	20 ans 1900	**3300**	0.58
			50 ans 2265	**2865**	0.51

Illustration 39 : Valeurs fréquentielles de débits maxima instantanés suivant hypothèses retenues à la station Barrage de la Rivière du Mât

Concernant Hyacinthe, la simulation fournit un débit maximal de 2280 m^3/s légèrement inférieur à l'estimation de l'Office (-10%), il constitue toutefois le débit maximal simulé et peut être estimé comme ayant une période de retour voisine de 50 ans.

Nota bene : l'utilisation du calage réalisé uniquement sur les années 2006-2007 ne modifie que très légèrement les résultats fréquentiels, on obtient alors les débits maxima suivants :

- *décennal horaire : 1400 m^3/s*
- *décennal instantané : 1725 m^3/s,*
- *centennal instantané de 3000 et 3400 m^3/s, suivant point pivot.*

Par contre ce calage modifie la valeur du débit maximal survenu durant Hyacinthe :

- *débit horaire maximal : 2485 m^3/s,*
- *correspondant à un débit maximal d'environ 3000 m^3/s soit une crue de période de retour comprise entre 50 et 100 ans.*

Le choix de la période de calage peut donc influer sensiblement sur la simulation d'un évènement particulier mais semble peu influer sur les valeurs fréquentielles.

3.6.2. Coefficient d'écoulement en crue

Sur l'ensemble des crues simulées (50 épisodes), le coefficient d'écoulement en crue varie de 0,27 à 0,52 avec une moyenne se situant à 0,37.

L'Illustration 40 montre la corrélation obtenue entre pluie et lame ruisselée.

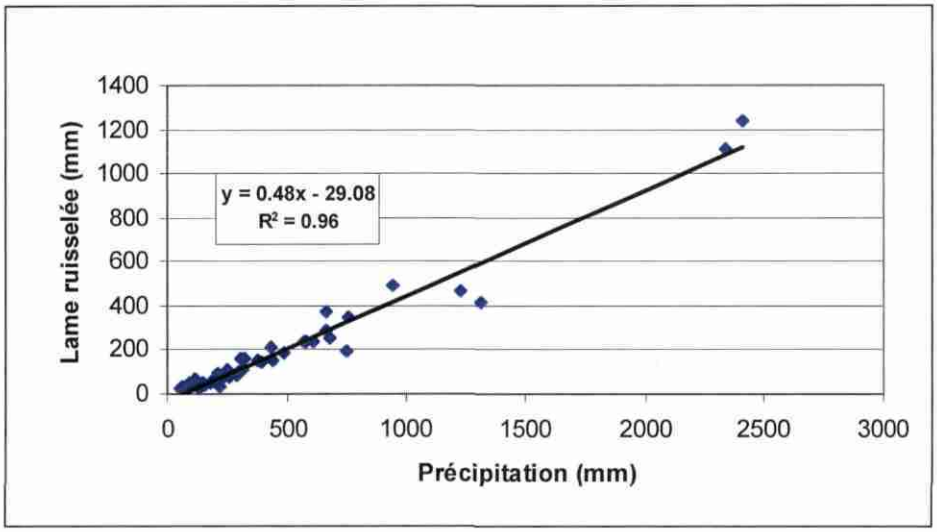


Illustration 40 : Corrélation pluie – lame ruisselée en crue

Cette corrélation permet d'évaluer la lame ruisselée, et donc le volume de crue, à partir de la pluviométrie.

3.6.3. Temps de base des crues

- **Temps de base**

Le temps de base des crues, déterminé à partir des hydrogrammes obtenus varient entre 7 et 101 heures (Gamède et Diwa), avec une moyenne de 30 heures et un temps de base médian d'environ 26 heures. Si l'on considère un temps de concentration de 4 à 6h, on obtient ainsi une durée pour la pluie nette variant de 3 h à 98 heures. Ces temps de base ont été ajustés suivant une loi de Galton (Illustration 41).

- **Temps de base de la crue triangulaire associée**

Pour chacune des crues simulées de volume V et débit maximum instantané on peut définir le temps de base de la crue triangulaire associée par

$$Tb = V / 1.8\ Qmax$$

Avec :

Tb :	temps de base	(heures)
V :	Volume de la crue	(10^6 m^3)
Qmax :	débit maximum instantané	(m^3/s)

Le temps de base des crues de la crue triangulaire associé varie entre 8 et 82 heures avec une moyenne de 23 heures.

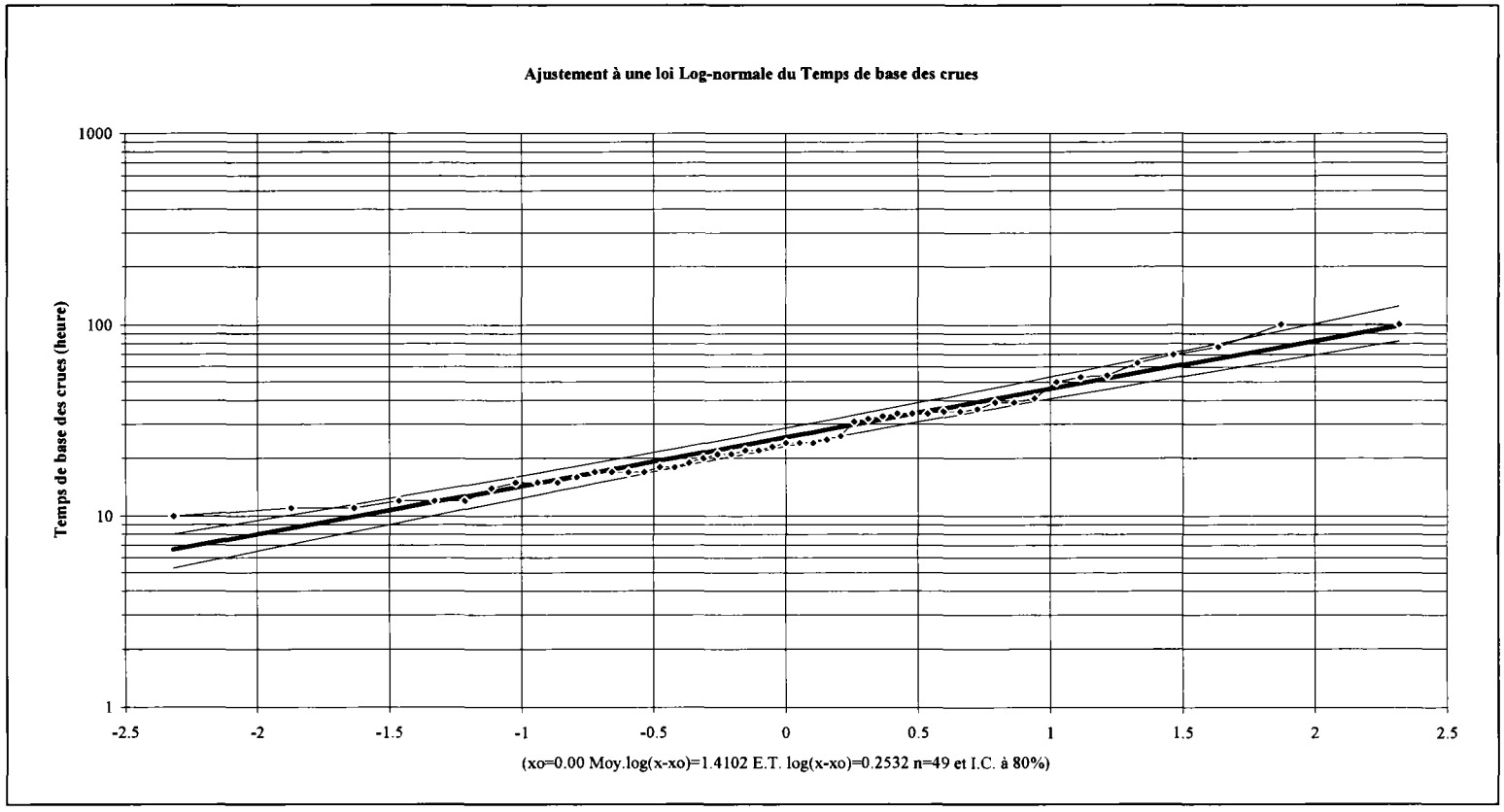


Illustration 41 :Ajustement suivant une loi de Galton du temps de base des crues simulées sur la période 1993-2007

3.6.4. Débit moyen journalier maximal annuel

Suite à l'extension des données sur la période 1993-2000, il est apparu envisageable d'évaluer les valeurs fréquentielles des débits moyens journaliers maxima. Pour cela un ajustement fréquentiel des débits maxima annuel sur la période 1993-2007 selon une loi de Gumbel a été réalisé. Sur cet ajustement (Illustration 42) a été porté le Gradex des débits moyens journaliers.

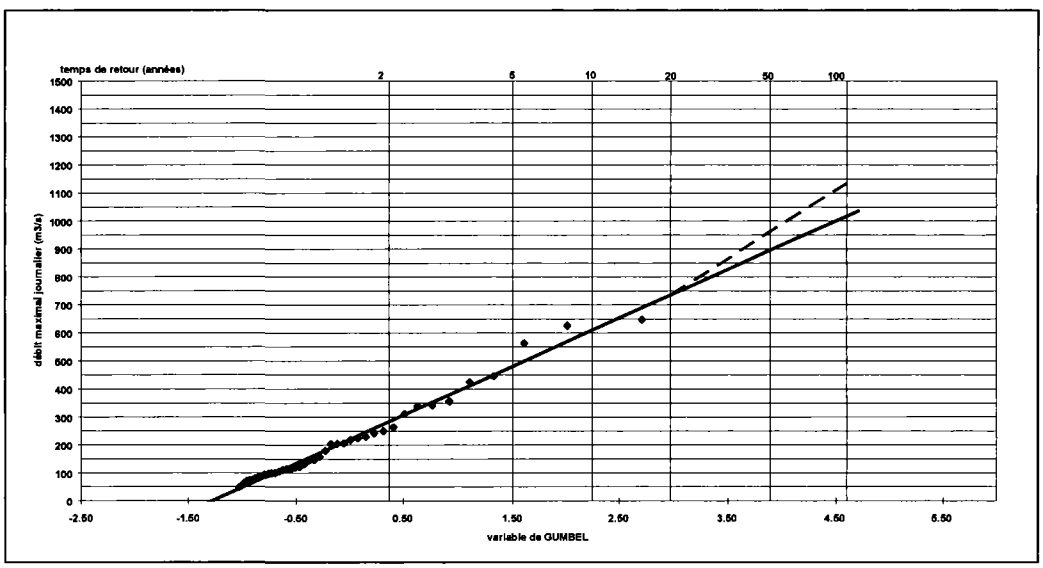


Illustration 42 : Ajustement, suivant une loi de Gumbel, des débits maxima moyens journaliers sur la période 1993-2006.

De cet ajustement on peut en déduire les valeurs décennales et les valeurs fréquentielles au point pivot (Illustration 43). La valeur centennale a été obtenue en utilisant le Gradex journalier des débits obtenu à partir du Gradex journalier moyen des pluies des stations pluviométriques du cirque de Salazie.

Débit moyen journalier décennal (m3/s)	Point Pivot Débit (m3/s)	Débit moyen journalier centennal (m3/s)
610	20 ans 735	**1135**
	50 ans 900	**1070**

Illustration 43 : Valeurs fréquentielles de débits maxima instantanés suivant hypothèses retenues à la station Barrage de la Rivière du Mât

3.6.5. Débits horaires classés

La courbe des débits horaires simulés classés sur la période 1993-2007, permet de constater les durées de dépassement pour un débit donné (Illustration 44). On constate ainsi qu'en moyenne au niveau annuel le débit de :

- 500 m3/s est dépassé durant moins de douze heures,
- 300 m3/s n'a lieu que durant un jour,
- 200 m3/s n'est dépassé que durant deux jours.

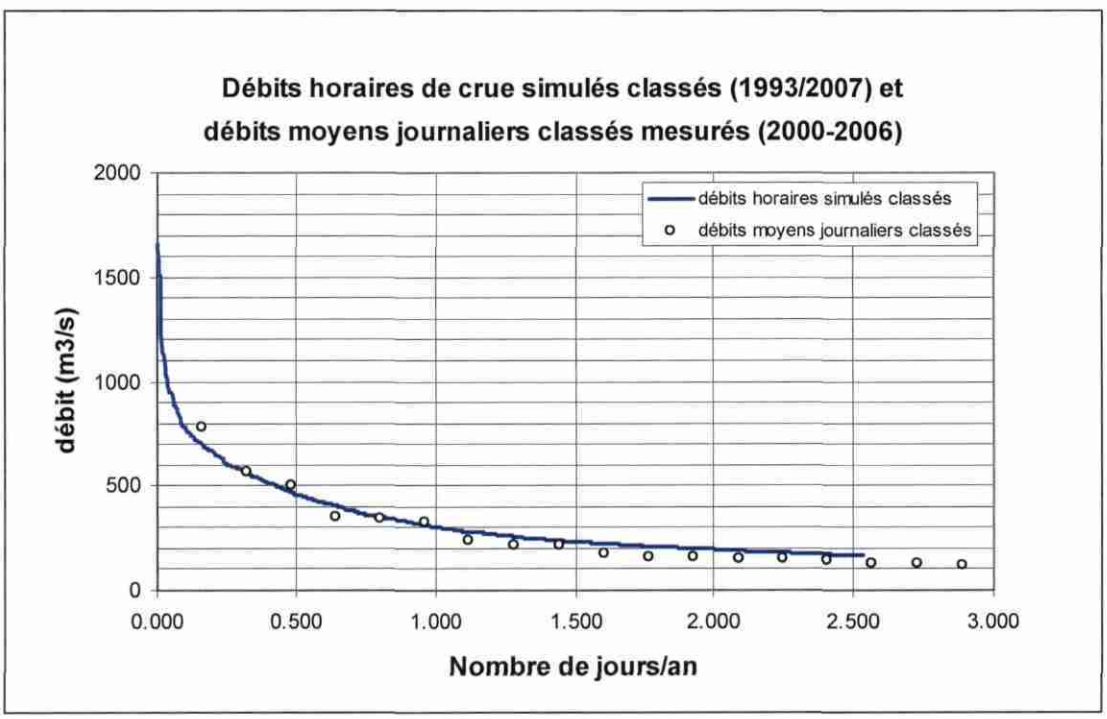


Illustration 44 : Courbe des débits horaires simulés classés des crues (1993/2007) et débits moyens journaliers (2000-2006).

Sur cette illustration a été également reporté les débits moyens journaliers classés de la période 2000-2006. Ceci permet de constater un bon raccordement entre les deux courbes.

3.7. TRANSPOSITION DES RESULTATS EN D'AUTRES POINTS DU BASSIN VERSANT.

3.7.1. Méthodologie

N'ayant que pas ou peu de données sur le restant du bassin versant (hormis sur le Bras des Lianes), il n'est pas possible de réaliser une modélisation permettant cette même démarche en d'autres points. Les principaux objectifs quantitatifs de l'étude étant d'évaluer les apports liquides et les transports solides de la Rivière du Mât en différents points, il apparaît nécessaire de transposer ces résultats afin de définir en tous point de calcul des hydrogrammes permettant d'estimer les débits et les volumes solides transportés.

Pour ce faire, on considère que :

- la lame ruisselée est similaire sur l'ensemble du bassin versant,
- les crues sont de forme triangulaire simple avec un temps de montée égal au temps de décrue.

Pour chaque crue simulée à la station Barrage, le temps de base de la crue triangulaire équivalente est calculé à l'aide de la relation :

$$Tb = V/1,8.Qmax$$

Le temps de pluie nette de chaque évènement s'obtient en soustrayant de ce temps de base le temps de concentration estimé à cette station : 4 heures (cf. § 3.4.3).

Pour chaque point de calcul souhaité, il est alors ainsi possible de calculer :

- le temps de base des crues, en ajoutant au temps de pluie nette de l'évènement le temps de concentration calculé en ce point,
- le volume de la crue, à l'aide de la pluviométrie durant l'évènement et de la relation définie au §3.6.2,
- le débit maximal instantané de la crue
- L'Illustration 46 ci-dessous récapitule ainsi les caractéristiques des crues aux différents points de calcul prévisionnel pour l'évaluation de la capacité maximale de transport.

3.7.2. Caractéristiques des crues au droit des autres points de calcul.

Les points de calcul prévisionnel sont :

- les sections où des analyses granulométriques ont été réalisées,
- les sections situées en aval et/ou amont des confluences significatives.

Ces sections sont situées sur l'Illustration 45.

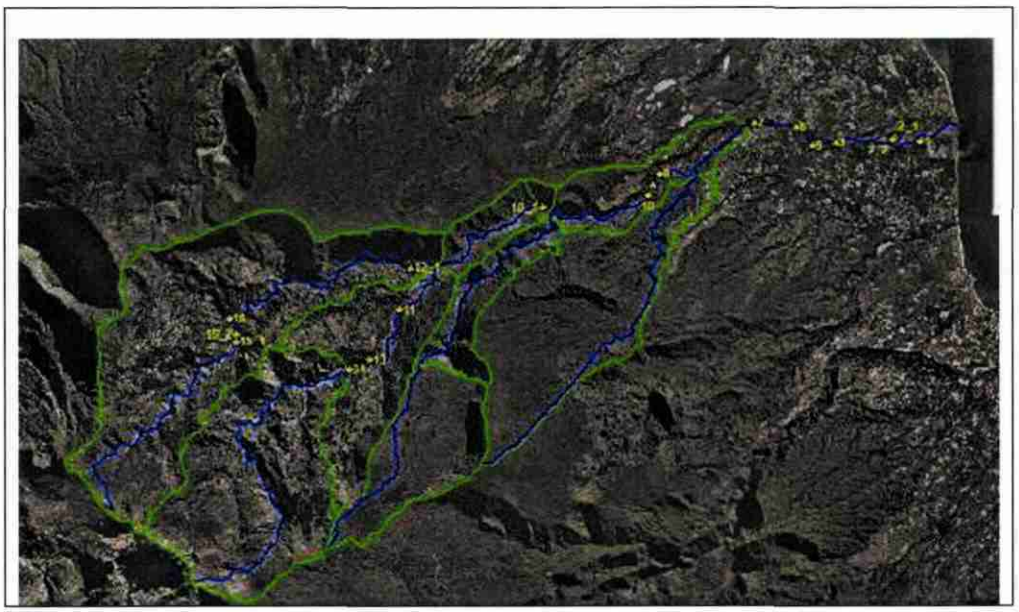


Illustration 45 : Localisation des points d'estimation des volumes de transport solide et de détermination des hydrogrammes de crue

Toutes les crues simulées à la station hydrométrique durant la période 1993-2007 et la crue de Hyacinthe ont été ainsi définies à ces différents points de calcul. On obtient ainsi la simulation des crues sur 15 ans et la simulation d'une crue pouvant être considérée comme voisine de la période de retour 50 ans.

L'Illustration 46ci-après récapitule les valeurs caractéristiques des bassins versants (superficie et temps de concentration) les volumes annuels et les valeurs extrêmes des crues simulées au droit de ces points de calculs. Par suite de la faible différence de superficie et de l'absence de la possibilité d'écrêtement des crues les hydrogrammes de crue des points situés en aval de la station « Barrage ancienne RN2 » ont été considérés identiques à ceux de la station.

PROFIL	R. Mât Amont		R. Fleurs Jaunes		R. du Mât			
Section (n° de la station sur illustration 45)	14	Amont confluence RFJ	(15.1 et 15.2)	amont confluence()	Aval confluence R.F.J	ESCALIER()	(9 et 8)	STATION
Temps de concentration (Heures)	1.4	2	1	2.3	2.1	3	3.8	4
Superficie (km2)	28	44	20	43	87	92	118	145
ANNEE	VOLUMES DES CRUES (millions de m3)							
1993	35	55	25	54	109	115	148	182
1994	11	17	8	16	33	35	45	56
1995	11	18	8	17	35	37	47	58
1996	6	10	5	10	20	21	27	33
1997	7	11	5	11	22	23	29	36
1998	33	52	24	51	103	108	139	171
1999	10	15	7	15	30	32	40	50
2000	12	18	8	18	36	38	49	60
2001	8	13	6	12	25	27	34	42
2002	27	43	19	42	85	90	115	141
2003	2	3	1	3	6	6	8	10
2004	10	15	7	15	30	32	41	50
2005	11	17	8	16	33	35	45	56
2006	40	63	29	62	125	132	169	208
2007	34	53	24	52	106	112	143	176
Hyacinthe	46	72	33	71	143	151	194	238
1993/2006	256	403	183	394	797	842	1 080	1 328
2000-2006	109	172	78	168	340	360	461	567
Débit max. inst.	559	846	410	812	1 662	1 666	2 042	2 481
Débit max. moy.	143	216	105	207	424	425	521	634

Illustration 46 : Caractéristiques des bassins versants, volumes annuels et valeurs extrêmes des crues simulées au droit des points de calculs

3.8. CONCLUSION DE L'ETUDE HYDROLOGIQUE

Vu le peu de stations hydrométriques où des données sont disponibles, l'étude a consisté à déterminer l'ensemble des caractéristiques de crues nécessaires à l'étude au droit de la station hydrométrique principale (barrage, ancienne RN2) située sur la Rivière du Mât puis à les transposer aux autres points de calcul souhaités du bassin versant.

L'analyse pluie-débit des observations disponibles et l'utilisation des formules existantes ont permis, au droit de la station principale :

- d'évaluer à 4h le temps de concentration
- de définir le temps de base des crues et le temps de pluie « efficace »,
- quantifier la relation pluie lame ruisselée à l'échelle de la crue.

La trop courte période d'observation des débits ne permettant pas de réaliser des estimations statistiques fiables nécessaires à l'atteinte des objectifs, il est apparu nécessaire de réaliser une modélisation hydrologique avec le logiciel GARDENIA du BRGM afin de compléter les séries de données au moyen de débits simulés.

Cette modélisation pluie débit a été réalisée sur les débits de crue survenant au droit de la station principale, au pas de temps horaire, avec, comme principale donnée d'entrée, la pluviométrie horaire observée à Mare à Vieille Place.

Par suite de la variabilité des pluies, différentes hypothèses de pondération sur les données pluviométriques horaires ont du être été testés. Le meilleur calage a été obtenu en pondérant la pluviométrie horaire par une combinaison des valeurs pluviométriques journalières observées aux cinq postes principaux du bassin versant. Ce calage, réalisé simultanément sur treize des évènements observés sur la période 2000-2007, fournit un coefficient d'ajustement voisin de 0.95 et a permis de reconstituer de manière satisfaisante les débits et volumes des crues observés.

Une fois calé, le modèle a été utilisé pour simuler, à partir des épisodes pluvieux dont la pluie journalière maximale mesurée a atteint 250 mm à la station de Mare à Vieille Place, les débits horaires au droit de la station principale. Il a ainsi permis la reconstitution, au pas de temps horaire :

- des hydrogrammes des crues non observées sur la période 2000-2006,
- des hydrogrammes des crues significatives de la période 1993-2000,
- d'un hydrogramme possible de Hyacinthe.

A partir de ces hydrogrammes reconstitués et des résultats de l'étude pluviométrique , une analyse statistique (Gradex) à été réalisée afin de préciser le débit décennal et centennal au droit de la station principale.

Les crues de projet pour d'éventuels aménagements ont, dans la partie aval de la Rivière du Mât, des débits maxima instantanés importants (1635 m3/s en décennal et entre 2865 et 3300 m3 /s en centennal), des temps de concentration courts (environ 4h) et des temps de base pouvant, lors des cyclones, dépasser quatre jours (Gamède, Diwa,..). Les volumes écoulées peuvent ainsi être considérables (160 millions de m3 lors de Gamède). Même si les forts débits sont relativement rares, le débit de 300 m3/s n'est en moyenne dépassé que durant 24 heures par an, cette rivière possède des caractéristiques hydrauliques laissant présager un transport solide significatif.

Les valeurs fréquentielles calculées et les hydrogrammes de crues ont été ensuite définis au droit des différents points de calculs souhaités sur le bassin versant en considérant :

- les temps de concentration calculés au droit de ces points,

- un volume de crue proportionnel à la superficie du bassin versant, approximation satisfaisante pour la partie amont (cirque), probablement plus critiquable pour les bassins versants des deux principaux affluents qui ont un comportement hydraulique différents mais qui, par suite de leurs caractéristiques, n'influent pas sur l'évaluation du transport solide. Par ailleurs une évaluation des débits de projet a été réalisée sur le bras des Lianes.

- un débit maximal de crue définie à partir du volume et du temps de concentration en considérant une crue triangulaire de durée égale au temps de concentration augmenté du temps de pluie « efficace ».

Pour vérification, ces hypothèses ont été appliquées à la station principale, afin de s'assurer que l'évaluation du transport solide était similaire à celle obtenue avec les hydrogrammes initiaux.

L'étude hydrologique a ainsi permis de définir les débits liquides qui permettront ainsi une évaluation du transport solide :

- par crues et par année sur la période 1993-2007,

- lors de la crue de Hyacinthe.

Mais cette étude à également mis en évidence :

- la difficulté du calage des modélisations hydrologiques, principalement due à la variabilité des précipitations dans le temps mais également dans l'espace,

- la robustesse des calages qui fournissent des résultats sensiblement identiques malgré des périodes de calage différentes,

- l'importance de la quantité et qualité des données mesurées tant pour la pluviométrie (pluviomètre, radar,...) que pour l'hydrométrie et la topographie en vue de l'obtention de résultats fiables.

L'amélioration (renforcement et développement) du réseau des stations hydrométriques s'avère donc nécessaire.

Bibliographie

Anonyme (1992) – Guide d'estimation des débits de crue à la Réunion. Conseil Régional, DDE, Météo France, BCEOM, SOGREAH.

Agence de l'eau Rhônes-méditerranée-Corse (1999) - La gestion des rivières Transport solide et attérissements. Guide méthodologique.

Bargeas A. (1984) – Apports de la simulation par modèles hydrologiques.Applications à l'évaluation globale de la ressource en eau de l'île de La Réunion. Thèse de doctorat en Sciences de la Terre, Université de Bordeaux III, 384 p.

Collectif (1994) - Comité français des grands barrages. Les crues de projet des barrages. Méthode du GRADEX.

Dumay H. -(Janvier 2003)- Traitement des données hydrométriques – Régionalisation d'un modèle pluie débit sur le département de la Réunion – Janvier 2003 – DDE de la Réunion. *

Cyclone Gamède – (Février 2007) - Synthèse des crues de la saison cyclonique 2006-2007- Office de l'Eau

LCHF – (1984) - Monographie de la Rivière du Mât – DDE de la Réunion.

Mayoka M. (Avril 1998) Les cyclones à la Réunion – Centre des Cyclones Tropicaux de la Réunion – Météo France .

Meunier M. (2001) – Les torrents du Nord-Ouest de la Martinique. Hydrologie des crues, érosion, hydraulique et dynamique torrentielles. Etudes du Cemagref, série équipements pour l'eau et l'environnement, n°24.

Normand M. Thiery D. – (Mars 2006) - Modélisation hydrologique globale pluie - débit des crues des ravines de La Réunion - Rapport BRGM/RP 54593 FR - Projet DYNTOR.

SOGREAH – (Mars 2004) – Estimation des volumes fréquentiels de crues – Bassin versant de la Rivière du Mât – DYNTOR – BRGM – Région Réunion- Département de la Réunion – Rapport N° 2850098 R2.

Annexe 1

Relation hauteur-débit à la station (ancienne RN2) de la Rivière du Mât *(extrait rapport SOGREAH N°2850098 R2 de mars 2004).*

RELATION HAUTEUR / DEBIT A L'AMONT IMMEDIAT DE LA PRISE D'EAU

Cette relation hauteur débit s'est appuyée sur une modélisation de calcul de ligne l'eau, réalisée à partir de dix profils topographiques, à l'aide du logiciel HEC-RAS.
Elle a permis, dans un premier temps, de mettre en évidence que le seuil de la prise d'eau réalise bien une "coupure hydraulique" entre l'amont et l'aval de l'ouvrage, pour les débits considérés (de 100 à 4 000 m^3/s), c'est-à-dire que le niveau d'eau à l'aval du déversoir n'a pas d'influence sur les niveaux à l'amont.

Dès lors, il a été possible de restreindre l'emprise du modèle hydraulique à la portion de rivière à l'amont du seuil, en prenant en compte une condition limite à l'aval du modèle (donc au droit du seuil) tirée de la relation hauteur / débit de la prise d'eau.

La prise d'eau peut être décomposée en quatre éléments pour réaliser les calculs hydrauliques :

- Le seuil déversant central, de type "Creager",
- La pile limitant le seuil en rive droite ;
- Le seuil de prise d'eau proprement dit, plus à droite,
- Limitant le seuil déversant en rive gauche, la culée gauche de l'ouvrage.

LA PRISE D'EAU VUE DU PONT DE LA RD48 -1

Les principales caractéristiques de ces éléments et les relations hydrauliques utilisées sont explicitées dans le rapport SOGREAH N° 2850098 R2 de mars 2004.

Au final, le débit total est la somme des débits de toutes les parties de l'ouvrage.

Globalement l'expression du débit en fonction de la charge de l'écoulement mesurée depuis la crête du seuil "Creager" (114 m NGR) peut s'écrire :

$$Q = 35\ a\ He^{3/2} + 1.68\ [18\ (He-1)^{3/2} + 10\ (He-4)^{3/2} + 10\ (He-5)^{3/2} + 5\ (He-5.50)^{3/2}]$$

Avec : He en m (charge de l'écoulement), Q en m³/s.

LOI HAUTEUR DEBIT AU DROIT DE LA STATION

La loi de débit calculé au niveau de l'ouvrage de prise a été ensuite intégrée au modèle hydraulique numérique comme condition limite aval. Le calcul des courbes de remous a alors permis de connaître le niveau d'eau au droit de la station hydrométrique, environ 50 m à l'amont du barrage. Il met en évidence la présence d'un régime critique d'écoulement pour les forts débits (> 1 000 m^3/s) au droit de la station. Au-delà de ce débit, la loi hauteur-débit de la station ne dépend donc plus des caractéristiques de l'écoulement au droit de la prise d'eau.

La loi hauteur-débit retenue combine :

- La loi de débit du seuil pour les faibles débits (< 200 m^3/s), confirmée par les mesures de l'ORE,
- La loi de régime critique d'écoulement au-delà de 1 300 m^3/s,
- Une courbe de transition entre 200 et 1 300 m^3/s, conforme aux mesures de l'ORE.

Cette loi présente de fortes incertitudes, notamment liées aux fortes vitesses, aux variations brutales du niveau d'eau et aux surélévations ou abaissement dus à la courbure de l'écoulement.

Cette loi se traduit mathématiquement par la formulation suivante :

$$\textbf{si } H <= 650 \text{ cm } Q = 0.02475\ H^{1.6981};$$

$$\textbf{si } H => 650 \text{ cm } Q = 0.00235\ H^{2.0616}.$$

avec H en cm et Q en m^3/s.

Annexe 2

Estimation des débits maxima instantanés des crues de la période 1993-2002 (SOURCE ORE) et Comparaison des principales caractéristiques des crues observées et simulées à la station (ancienne RN2)

Relevés instantanés de hauteurs d'eau ou/et de débits maxi observés en crue de la Riv. Mât amont prise d'irrigation

Date	Hauteur maxi (m)	Débit maxi (m3/s)	Remarques
15 au 27/01/1980		2500	Cyclone Hyacinthe
08/02/1986	+ 3.00 / seuil déversoir	540	Cyclone Erinesta
12/02/1987		2200	Cyclone Erinesta
19/01 au 05/03/1993		3 crues >1000	Cyclones Colina, Finella
04/02/1998		1800	
25/02/1998		>1000	
29/01/2000	3.36 au limnigraphe	500	Cyclone Connie
15/02/2000	2.34 au limnigraphe	270	Tempête tropical Eline
07/01/2001	5.00 au limnigraphe	900	Cyclone Ando
23/01/2002	5.34 au limnigraphe	980	Cyclone tropical intense Dina

Erreur relative maximale +/- 20 %

Estimation des débits maxima instantanés des crues de la période 1993-2002 (SOURCE ORE).

DATE	Débit 1h simulé	Débit max. corrélé	Débit max. estimé	volume simulé	Pluie (mm)	Tb mesuré (h)	Lr (mm)	Cr %	TB crue triangulaire equiv. (h)
20/01/93	629	787	1040	37	683	39	256	0.37	26.1
13/02/93	237	296	-	9	218	19	62	0.29	16.9
15/02/93	473	591	1380	27	484	35	187	0.39	25.4
26/02/93	307	384	-	8	109	12	53	0.49	11.1
01/03/93	671	838	1790	71	943	54	491	0.52	47.0
03/03/93	407	508	553	23	304	31	159	0.52	25.1
21/12/93	900	1125	980	15	297	11	106	0.36	7.6
02/03/94	242	302	-	13	251	25	92	0.37	24.5
09/03/94	337	421	680	41	668	63	286	0.43	54.6
13/03/95	456	571	690	31	431	36	214	0.50	30.2
11/04/95	219	273	-	6	155	17	41	0.27	12.2
05/05/95	197	246	-	7	132	17	48	0.37	15.8
08/12/95	241	302	-	7	149	17	47	0.32	12.5
31/12/95	275	343	-	12	264	24	82	0.31	19.1
22/01/96	495	619	-	9	213	12	62	0.29	8.1
09/02/96	277	347	500	10	222	21	66	0.30	15.2
10/02/96	210	263	-	5	88	14	35	0.39	10.6
11/04/96	202	252	-	9	191	24	59	0.31	19.0
24/01/97	276	345	720	34	580	77	234	0.40	54.5
05/02/98	1661	2076	1800	68	1228	32	470	0.38	18.2
22/02/98	437	546	670	21	390	22	145	0.37	21.4

DATE	Débit 1h simulé	Débit max. corrélé	Débit max. estimé	volume simulé	Pluie (mm)	Tb mesuré (h)	Lr (mm)	Cr %	TB crue triangulaire equiv. (h)
24/02/98	593	741	-	22	378	21	154	0.41	16.6
25/02/98	1150	1437	>1000	34	577	18	238	0.41	13.3
03/08/98	214	268	-	8	184	24	53	0.29	15.8
04/02/99	292	365	-	16	313	34	111	0.35	24.3
10/03/99	214	268	-	9	205	22	64	0.31	19.3
13/03/99	289	361	-	22	377	39	151	0.40	33.5
15/02/00	351	438	260	12	236	18	80	0.34	14.6
10/03/02	400	500	-	34	610	70	235	0.39	37.7
27/12/03	202	253	-	6	143	16	38	0.27	12.1
15/12/04	747	933	-	22	440	23	152	0.35	13.1
16/01/07	425	532	-	13	237	17	89	0.37	13.4
29/01/00	609	761	483	40	753	50	277	0.37	29.2
07/01/01	677	846	948	54	666	41	373	*0.56*	35.5
23/01/02	950	1188	1060	73	1310	35	505	0.39	34.2
05/11/02	546	683	654	13	289	14	93	0.32	10.9
09/04/03	282	353	505	6	118	10	41	0.35	9.5
12/03/04	207	259	316	6	206	26	43	0.21	13.3
19/12/04	196	245	204	13	253	34	92	0.36	30.2
16/02/05	214	268	395	4	97	12	30	0.31	8.9
17/02/05	228	285	637	7	114	20	46	0.40	12.9
18/02/05	643	804	545	13	256	15	92	0.36	9.2
18/02/05	183	229		3	52	7	22	0.43	7.8

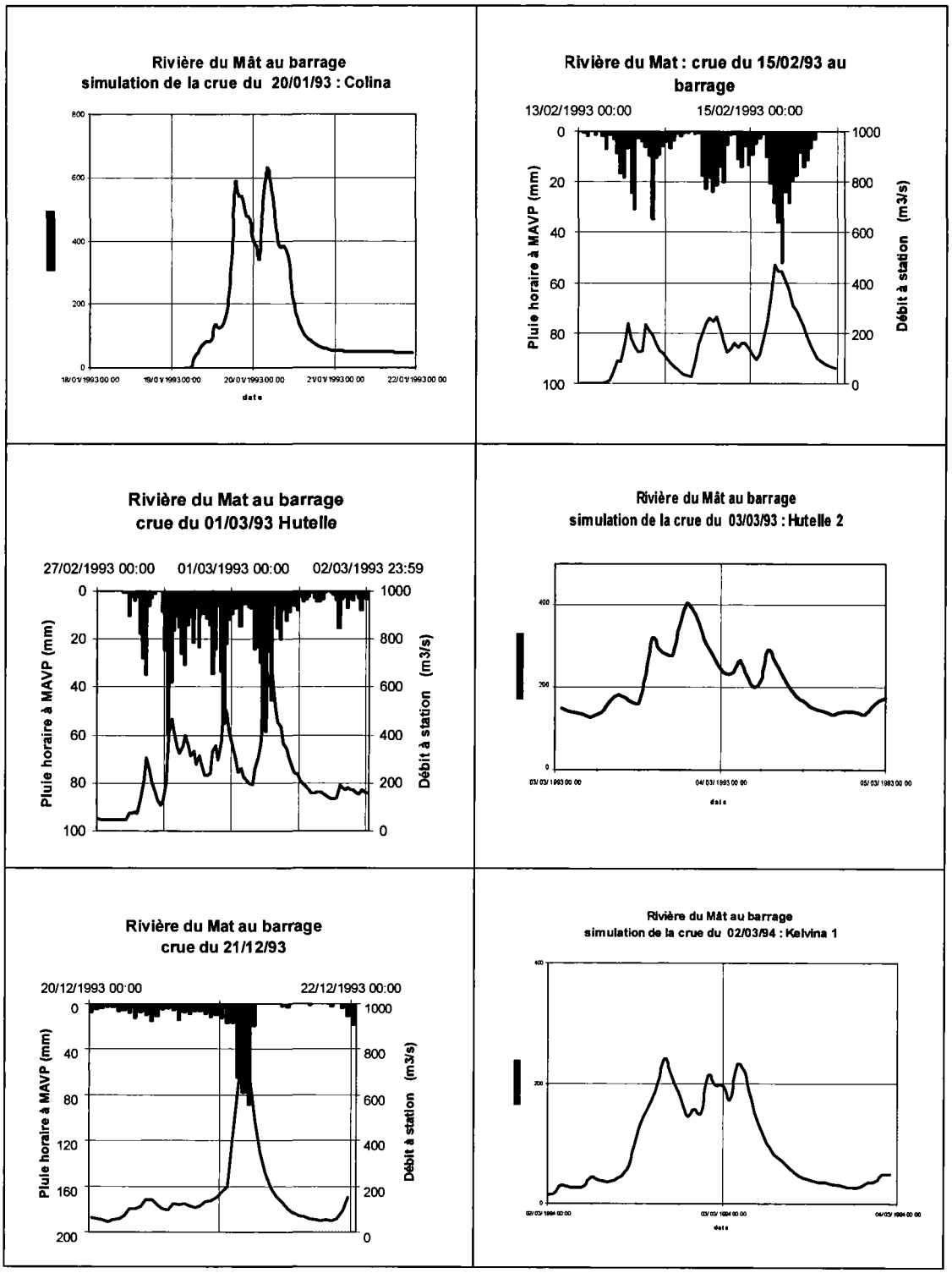
DATE	Débit 1h simulé	Débit max. corrélé	Débit max. estimé	volume simulé	Pluie (mm)	Tb mesuré (h)	Lr (mm)	Cr	TB crue triangulaire equiv. (h)
20/03/05	236	294	197	5	130	15	31	0.24	8.5
21/03/05	224	280	296	12	213	33	83	0.39	23.8
23/03/05	279	349	304	21	322	34	145	0.45	33.5
23/11/05	205	256	284	4	89	11	24	0.27	7.6
18/02/06	717	896	1077	44	762	53	304	0.40	27.3
05/03/06	1126	1408	1464	149	2344	101	1030	0.44	58.8
27/02/07	876	1095	1020	162	2412	101	1120	0.46	82.2
mini	183	229	197	3	52	7	22	21%	7.6
maxi	1661	2076	1800	162	2412	101	1120	56%	82.2
Val. Moyenne	448	561	740	26	442	30	178	37%	22.6

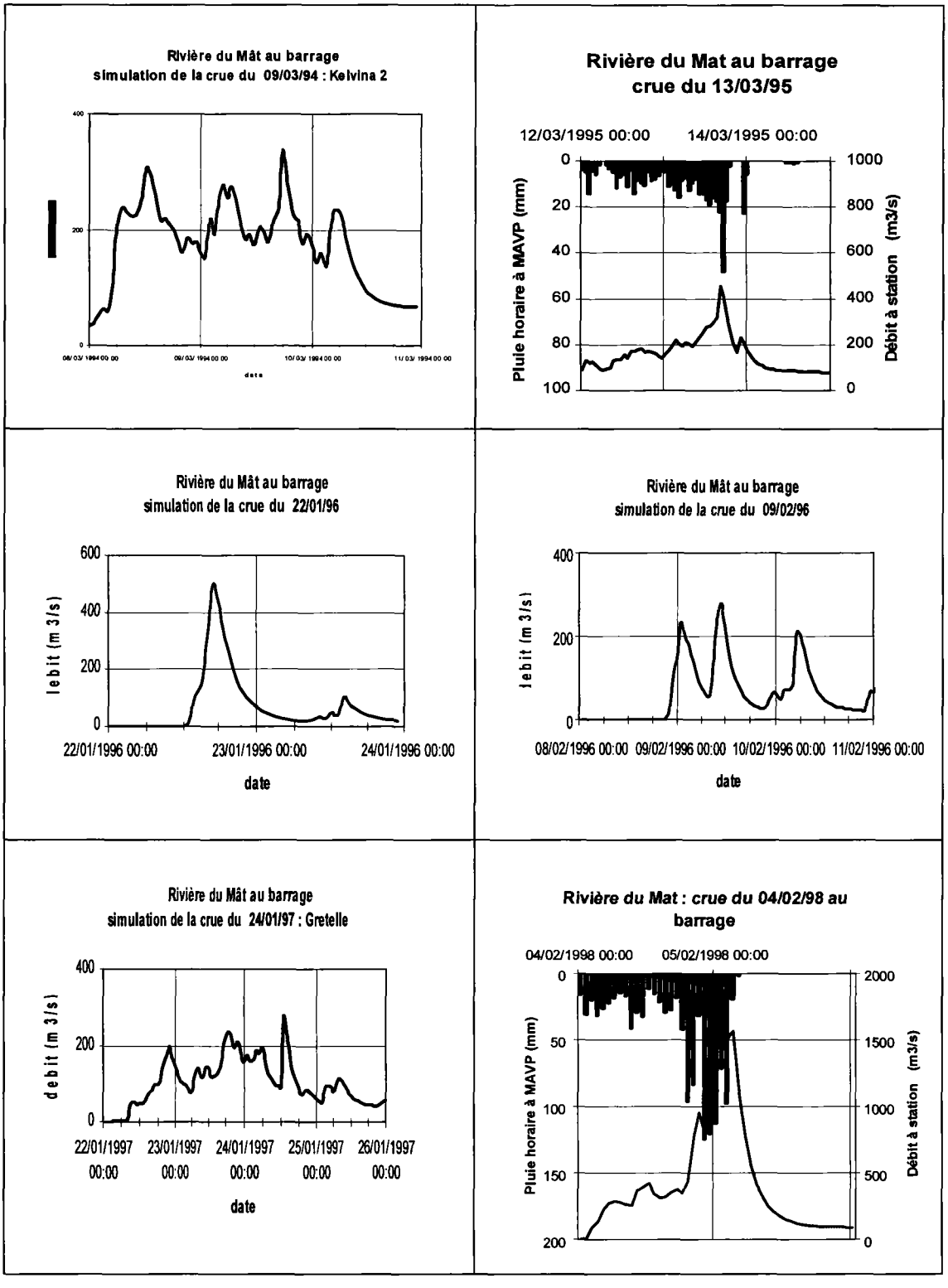
Comparaison des principales caractéristiques des crues observées et simulées à la station (ancienne RN2)

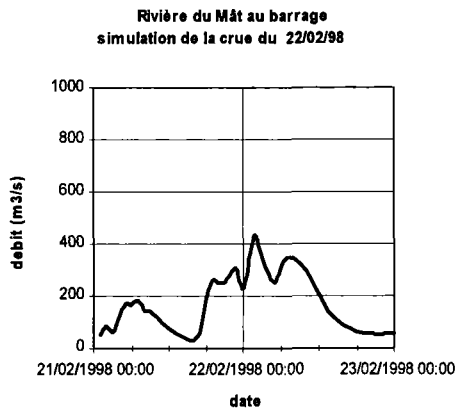
Nota bene : Les crues observées ayant servies au calage sont encadrées en « gras ».

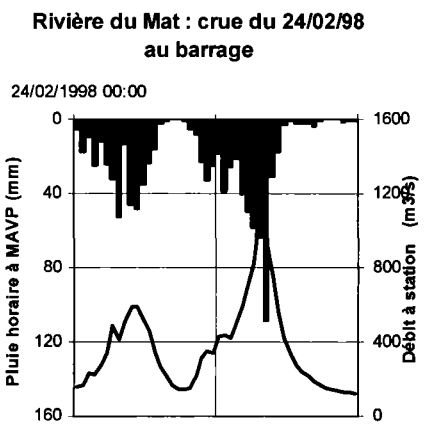
Annexe 3

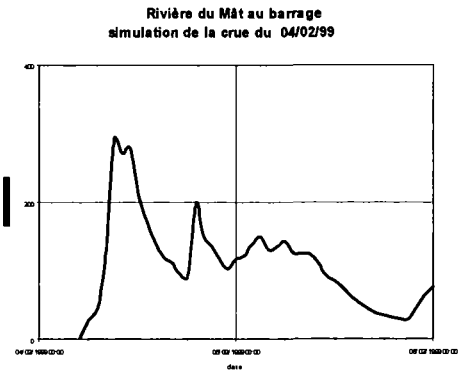
Simulation des crues non observées à la station (ancienne RN2)

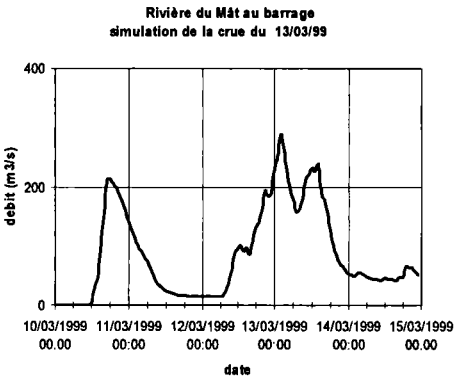

Rivière du Mât au barrage
simulation de la crue du 20/01/93 : Colina
Rivière du Mat : crue du 15/02/93 au barrage
13/02/1993 00:00
15/02/1993 00:00
Pluie horaire à MAVP (mm)
Débit à station (m3/s)
Rivière du Mat au barrage
crue du 01/03/93 Hutelle
27/02/1993 00:00
01/03/1993 00:00
02/03/1993 23:59
Rivière du Mât au barrage
simulation de la crue du 03/03/93 : Hutelle 2
Rivière du Mat au barrage
crue du 21/12/93
20/12/1993 00:00
22/12/1993 00:00
Rivière du Mât au barrage
simulation de la crue du 02/03/94 : Kelvina 1

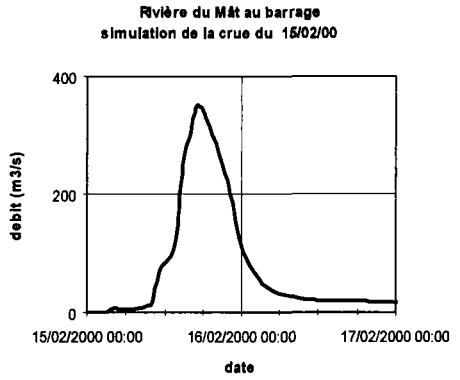

Rivière du Mât au barrage
simulation de la crue du 09/03/94 : Kelvina 2
400
200
0
08/03/1994 00:00
09/03/1994 00:00
10/03/1994 00:00
11/03/1994 00:00
date
Rivière du Mat au barrage
crue du 13/03/95
12/03/1995 00:00
14/03/1995 00:00
Pluie horaire à MAVP (mm)
0
20
40
60
80
100
1000
800
600
400
200
0
Débit à station (m3/s)
Rivière du Mât au barrage
simulation de la crue du 22/01/96
Debit (m 3/s)
600
400
200
0
22/01/1996 00:00
23/01/1996 00:00
24/01/1996 00:00
date
Rivière du Mât au barrage
simulation de la crue du 09/02/96
Debit (m 3/s)
400
200
0
08/02/1996 00:00
09/02/1996 00:00
10/02/1996 00:00
11/02/1996 00:00
date
Rivière du Mât au barrage
simulation de la crue du 24/01/97 : Gretelle
debit (m 3/s)
400
200
0
22/01/1997 00:00
23/01/1997 00:00
24/01/1997 00:00
25/01/1997 00:00
26/01/1997 00:00
date
Rivière du Mat : crue du 04/02/98 au barrage
04/02/1998 00:00
05/02/1998 00:00
Pluie horaire à MAVP (mm)
0
50
100
150
200
2000
1500
1000
500
0
Débit à station (m3/s)

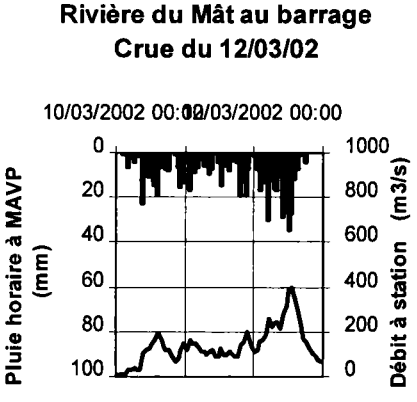

Rivière du Mât au barrage
simulation de la crue du 22/02/98
1000
800
600
400
200
0
debit (m3/s)
21/02/1998 00:00
22/02/1998 00:00
23/02/1998 00:00
date

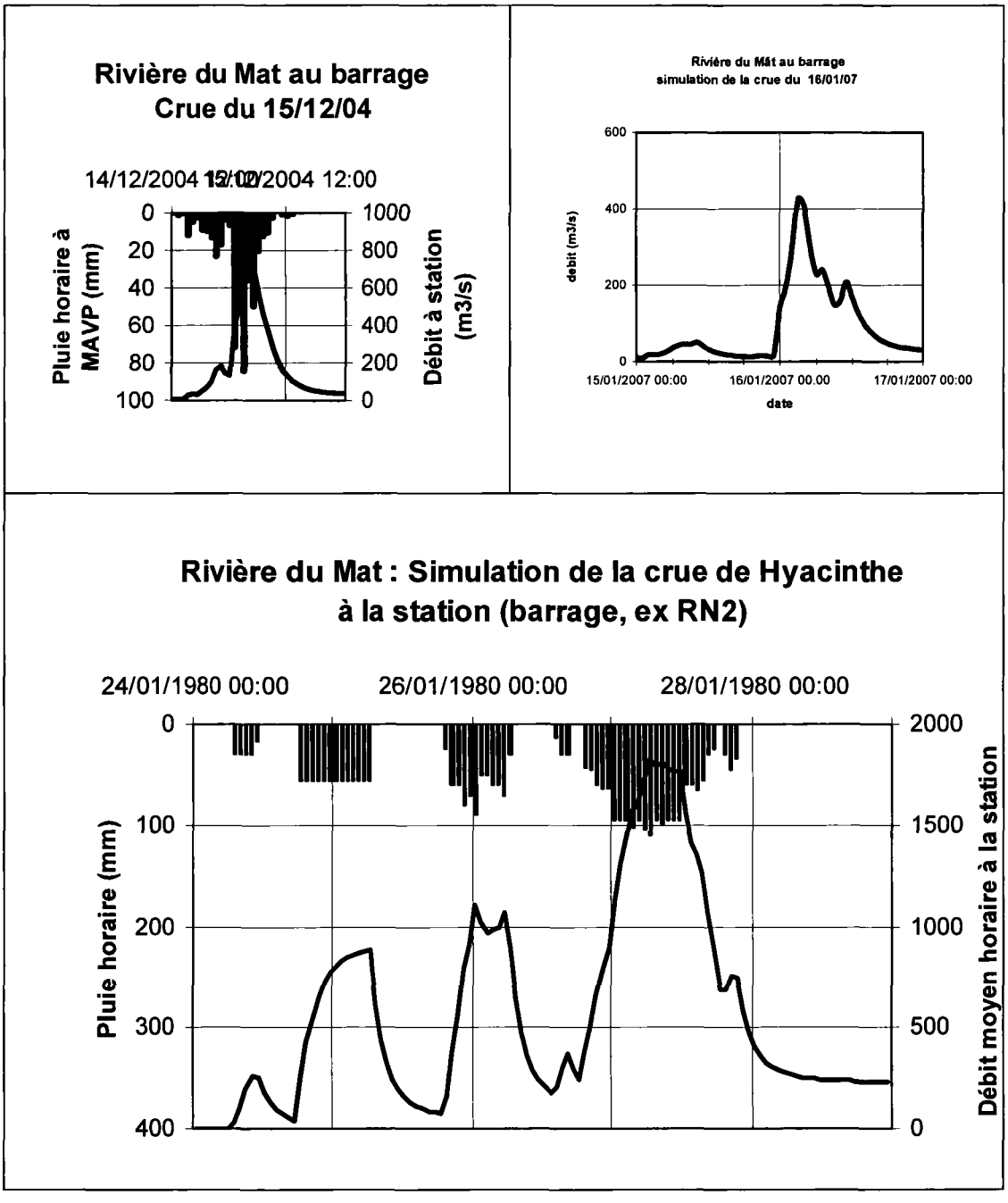

Rivière du Mat : crue du 24/02/98
au barrage
24/02/1998 00:00
0
40
80
120
160
Pluie horaire à MAVP (mm)
1600
1200
800
400
0
Débit à station (m3/s)


Rivière du Mât au barrage
simulation de la crue du 04/02/99
400
200
0
date


Rivière du Mât au barrage
simulation de la crue du 13/03/99
400
200
0
debit (m3/s)
10/03/1999 00.00
11/03/1999 00:00
12/03/1999 00:00
13/03/1999 00:00
14/03/1999 00:00
15/03/1999 00.00
date


Rivière du Mât au barrage
simulation de la crue du 15/02/00
400
200
0
debit (m3/s)
15/02/2000 00:00
16/02/2000 00:00
17/02/2000 00:00
date


Rivière du Mât au barrage
Crue du 12/03/02
10/03/2002 00:00
12/03/2002 00:00
0
20
40
60
80
100
Pluie horaire à MAVP (mm)
1000
800
600
400
200
0
Débit à station (m3/s)


Rivière du Mat au barrage
Crue du 15/12/04
14/12/2004 12:00
15/12/2004 12:00
Pluie horaire à MAVP (mm)
Débit à station (m3/s)
0
20
40
60
80
100
1000
800
600
400
200
0
Rivière du Mât au barrage
simulation de la crue du 16/01/07
debit (m3/s)
600
400
200
0
15/01/2007 00:00
16/01/2007 00.00
17/01/2007 00:00
date
Rivière du Mat : Simulation de la crue de Hyacinthe
à la station (barrage, ex RN2)
24/01/1980 00:00
26/01/1980 00:00
28/01/1980 00:00
Pluie horaire (mm)
Débit moyen horaire à la station
0
100
200
300
400
2000
1500
1000
500
0

Centre scientifique et technique
3, avenue Claude-Guillemin
BP 36009
45060 – Orléans Cedex 2 – France
Tél. : 02 38 64 34 34

Service géologique régional Réunion
5, rue Ste Anne BP 906
97478 – St Denis Cedex
France
Tél. : 02 62 21 22 14

Document public

Etude hydrogéomorphologique de la Rivière du Mât et propositions de solutions de gestion

Volume 4/5

Estimation du transport solide

Rapport Final

BRGM/RP-56364-FR
Mars 2008

Ressources, territoires et habitats
Énergie et climat
Développement durable
Prévention des risques
Infrastructures, transports et mer

Présent pour l'avenir

Liberté • Égalité • Fraternité
RÉPUBLIQUE FRANÇAISE

Géosciences pour une Terre durable
brgm

Document public

Etude hydrogéomorphologique de la Rivière du Mât et propositions de solutions de gestion

Volume 4/5

Estimation du transport solide

Rapport Final

BRGM/RP-56364-FR
Mars 2008

Étude réalisée dans le cadre des projets
de Service public du BRGM 2007 07RISY032

Ph. STOLLSTEINER, B. AUNAY, Y. DE LA TORRE

Vérificateur :	**Approbateur :**
Nom : M. GARCIN	Nom : JL NEDELLEC
Date :	Date :
Signature :	Signature :

En l'absence de signature, notamment pour les rapports diffusés en version numérique, l'original signé est disponible aux Archives du BRGM.

Le système de management de la qualité du BRGM est certifié AFAQ ISO 9001:2000.

Présent pour l'avenir

Liberté • Égalité • Fraternité
RÉPUBLIQUE FRANÇAISE

Géosciences pour une Terre durable
brgm

Mots clés : hydrogéomorphologie, pluviométrie, Rivière du Mât, transport solide.

En bibliographie, ce rapport sera cité de la façon suivante :
Stollsteiner Ph. ; Aunay B ; De la Torre Y. (2008) – Etude hydrogéomorphologique de la Rivière du Mât et propositions de solutions de gestion. Rapport BRGM RP-56364-FR ; 51 p.

© BRGM, 2007, ce document ne peut être reproduit en totalité ou en partie sans l'autorisation expresse du BRGM.

Synthèse

Dans le cadre de la directive européenne relative à la gestion des inondations du 26 novembre 2007 et suite à la mission d'expertise de l'Inspection Générale de l'Environnement de juillet 2006 relative à la prévention des inondations à La Réunion, la DDE de la Réunion met en place un Plan de Gestion des Risques d'Inondation (PGRI) et souhaite disposer des éléments de **compréhension du fonctionnement hydrogéomorphologique des principales rivières à enjeux de La Réunion afin de pouvoir mettre en œuvre des solutions de gestion**.

Cette étude, cofinancée par la DDE Réunion et la dotation de Service Public du BRGM, s'attache à la Rivière du Mât qui présente des risques d'inondation et d'érosion de berges importants, en particulier sur les 10 derniers kilomètres à l'aval.

Basée sur les références méthodologiques connues ainsi que sur les spécificités de l'île et du bassin versant concerné, cette première étude du PGRI revêt un caractère expérimental dont le but est de d'asseoir l'approche méthodologique pour les autres rivières à enjeux.

L'étude est développée en 5 volumes dont le présent se propose, suite à l'analyse géomorphologique et hydrologique de la rivière, d'estimer le transport solide potentiel de ce cours d'eau à partir de sa capacité maximale de transport.

Ces estimations ont été réalisées en considérant :

- les apports liquides définis dans le volume 3 de la présente étude,
- que les affluents tels que le Bras des Cavernes et le Bras des Lianes ne participaient que très peu à l'alimentation en apports solides (cf. volume 2),
- que la formule de Sogreah Lefort permettait, dans le contexte de la Rivière du Mât, la meilleure évaluation de ce potentiel.

Afin de caler cette évaluation mais également de constituer un état de référence pour les évaluations futures des mesures topographiques ont été réalisées. Il a ainsi été réalisé :

- un lever topographique de l'ensemble de la zone située en aval de la RN2 permettant ainsi de réaliser un modèle numérique de surface,
- des profils en long de cette même zone (profils en long extrême et moyen),
- un profil en long de la Rivière du Mât et de son affluent la Rivière Fleurs Jaunes.

Les calculs et bilans réalisés à l'aide des levés précédents et en supposant une capacité maximale de transport satisfaite aux droits des profils amont de la Rivière du Mât et de la Rivière Fleurs Jaunes montrent que la Rivière du Mât a :

- une capacité annuelle moyenne de transport de sédiments d'environ 130 000 m^3 dans sa partie amont, capacité sensiblement équivalente à son principal affluent qu'est la Rivière Fleurs Jaunes,

- une capacité annuelle moyenne de transport de sédiments d'environ 250 000 m^3 dans sa partie intermédiaire avec une capacité annuelle variant entre 0 (2003) et 1 000 000 m^3 (2006) et avec seulement une année sur trois ou elle dépasse 110 000 m^3. Cette capacité maximale fournit des résultats compatibles avec une érosion estimée de l'ordre de 100 à 200 m^3/ha.

- une capacité de transport pouvant atteindre 1 500 000 m^3 lors des évènements exceptionnels (Hyacinthe).

- dans sa partie aval une capacité actuelle variant, suivant la pente et la section considérées, entre 1 200 000 et 1 600 000 m^3.

La capacité de transport de la partie intermédiaire, régulée par quelques stockages intermédiaires limités, n'est pas suffisante, hors crues exceptionnelles, pour permettre une stabilité du lit en aval du seuil de l'ancien barrage d'irrigation (station hydrométrique).

La rivière va, en effet, chercher à saturer son débit liquide avec des sédiments qui ne seront pas disponibles dans cette partie du cours d'eau. Il va s'ensuivre une érosion et des attaques de berges en aval immédiat de cette zone c'est-à-dire en aval de la RN2. Cette tendance est confirmée par les affouillements et érosions de berges observées et par la tendance à la formation de méandres.

En aval du profil P35, la capture lors de Gamède de la zone d'exploitation de la carrière rend plus délicate l'analyse de l'évolution du lit. Cette dérivation a modifiée l'équilibre naturel de la rivière et a favorisée le dépôt d'alluvions dans l'ancien lit moyen. Après la crue, la partie de ce chenal a été supprimé afin de permettre la reprise des activités de la carrière Holcim. La suppression de ce chenal équivaut globalement, tout au moins temporairement, à une surélévation du fond du lit et à une réduction de la pente de l'écoulement. La modification de ces deux paramètres entrainant automatiquement une surélévation de la ligne d'eau, il s'ensuit que les risques de chenalisation et de débordement en rive gauche sont de ce fait aggravés.

Par ailleurs, une nouvelle rupture du cordon séparant la carrière Holcim de la rivière ne peut être exclue lors de la prochaine crue significative. Elle entrainerait l'inondation des installations Holcim et pourrait entraîner une érosion rapide de la frange de terrain séparant cette zone d'extraction de la mer avec possibilité d'invasion marine jusqu'à ce point, en particulier si l'extraction atteint, à cet endroit, une cote située sous le niveau de la mer.

Globalement sur la période récente, on a donc assisté à :

- un enfoncement du lit et à des érosions massives des berges entre la RN2 et le profil P35,

- à un exhaussement du lit à l'aval.

Cette configuration va probablement s'accentuer jusqu'à l'obtention d'un nouvel équilibre ou jusqu'à l'apparition d'une crue majeure car seule susceptible d'apporter un surplus de sédiments qui peut atteindre, d'après les estimations réalisées, jusqu'à 500 000 m^3 (Hyacinthe).

Suivant les caractéristiques mécaniques et la résistance à l'érosion du substratum situé en fond de lit, cette érosion peut se répercuter, éventuellement jusqu'au seuil, en amont de la RN2 via une érosion régressive.

En aval du profil P35, la capture lors de Gamède de la zone d'exploitation de la carrière rend plus délicate l'analyse de l'évolution du lit. Cette dérivation a modifiée l'équilibre naturel de la rivière et a favorisée le dépôt d'alluvions dans l'ancien lit moyen. Les dépôts peuvent s'accentuer et favoriser une surélévation des lignes d'eau en crue. Celle-ci, source potentielle de débordement latéral, peut être grandement aggravée par la suppression d'une partie du lit mineur comme ce fut le cas après Gamède.

Conformément aux recommandations prônées par la mission d'expertise effectuée en 2006 par, il serait souhaitable de continuer à acquérir des connaissances dans ce domaine. Pour cela le BRGM préconise la réalisation d'un ou plusieurs bassins versants pilotes. Ceux ci seraient équipés de plusieurs stations hydrométriques et de plusieurs enregistreurs pluviométriques, voire d'images radar, afin de déterminer au mieux la pluviométrie et la lame ruisselée. Parallèlement un suivi régulier de la topographie permettrait de quantifier les débits solides. En raison de la présence des seuils de prise d'eau réalisés pour le transfert Est-Ouest, la Rivière du Mât et/ou la rivière de Patate à Durand, qui possède une fosse à sédiments en amont, pourraient être retenues dans le cadre d'un tel projet.

Sommaire

1. Introduction **11**

2. Rappels **13**

2.1. CONTEXTE ET EVOLUTION GEOMORPHOLOGIQUE 13

2.2. HYPOTHESES SUR LES CONDITIONS HYDROLOGIQUES DE L'ETUDE ... 14

2.3. TRANSPORTS SOLIDES PAR LES COURS D'EAU 15
2.3.1. Généralités 15
2.3.2. Les laves torrentielles 18

3. Données utilisées **19**

3.1. GRANULOMETRIE 19

3.2. TOPOGRAPHIE 21
3.2.1. Ensemble de la rivière 21
3.2.2. Zone amont 21
3.2.3. Zone aval 21

3.3. TRAITEMENTS « DIFFERENTIELS » DES MNS 23
3.3.1. Pertinence des données 24
3.3.2. Méthodologie de calcul de bilans 25

4. Evaluation de la capacité maximale de transport **27**

4.1. CHAMP D'APPLICATION 27

4.2. FORMULES POSSIBLES 28

4.3. CALCUL DE LA CAPACITE MAXIMALE DE TRANSPORT 31

5. Confrontation et interprétation des résultats **37**

5.1. METHODOLOGIE 37
5.1.1. Mécanismes élémentaires d'ajustement du profil en long 38
5.1.2. Variations de pente le long d'un cours d'eau 38
5.1.3. Cassures de pente sans apports externe 38
5.1.4. Apports latéraux d'éboulis ou de torrents 39
5.1.5. Interaction entre transport solide et morphologie d'un cours d'eau 39

5.2. INFORMATIONS QUALITATIVES 40
5.2.1. Profil en long du « fond extrême » 40
5.2.2. Profil en long du « fond moyen » 41
5.2.3. Evolution du lit en plan 41
5.2.4. Prélèvements dans le lit 43

5.3. INTERPRETATION 45

5.4. BILAN VOLUMETRIQUE GLOBAL 48

6. Conclusion 51

Liste des illustrations

Illustration 1 : Plan de situation du bassin versant 12

Illustration 2 - Correspondance entre les types d'écoulements, les types de cours d'eau et les modes de transports solides. 16

Illustration 3 – Localisation des mesures granulométriques 19

Illustration 4 : Localisation des profils en long réalisés sur la partie amont de la Rivière du Mât (en bleu) et de la Rivière Fleurs Jaunes (en jaune) 20

Illustration 5 : Localisation des profils en travers réalisés sur la partie aval de la Rivière du Mât 20

Illustration 6 : Profil en long de la Rivière du Mât 22

Illustration 7 : Densité des points des différents TIN 24

Illustration 8 : Formules utilisées pour évaluer la capacité maximale de transport 29

Illustration 9 : Caractéristiques des matériaux du lit, du cours d'eau et estimation du débit « critique » 30

Illustration 10 : Evaluation de la capacité maximale de transport de la Rivière du Mât suivant la formule de Sogreah Lefort (partie amont) 32

Illustration 11 : Evaluation de la capacité maximale de transport de la Rivière du Mât suivant la formule de Sogreah Lefort (partie aval,pente fond moyen 2006) 34

Illustration 12 : Evaluation par tronçon de la capacité maximale de transport de la Rivière du Mât suivant la formule de Sogreah Lefort (pente 2006) 36

Illustration 13 : Organisation du module de transport solide dans ETC (Brochot et al., 1998) 37

Illustration 14 : Profil en long du « fond extrême » de la Rivière du Mât entre la passerelle, la RN2 (4 voies) et la mer en 2007 40

Illustration 15 : Evolution du profil en long du « fond moyen » de la Rivière du Mât entre la RN2 (4 voies) et la mer entre 2002 et 2007 41

Illustration 16 : Observations réalisées en avril 2006 des zones d'érosion et dépôts consécutives aux crues de février - mars 2006 42

Illustration 17 : Différentiel d'altitude du lit (en rouge abaissement, en bleu exhaussement) sur la partie aval de la Rivière du Mât 44

Illustration 18 - Capture de la zone d'exploitation de la carrière par la Rivière du Mât lors de Gamède 45

Illustration 19 : Différentiel de volume de sédiments en partie aval de la Rivière du Mât entre 2002-2006 et 2006-2007. 46

Illustration 20 : Données recueillies sur les volumes de matériaux extraits en m^3 dans les rivières de la Réunion 46

Illustration 21 : Photographie du lit de la Rivière du Mât entre la station hydrométrique et la RN2 (4 voies). 47

Illustration 22 : Bilan des entrées / sorties en sédiments établis (en milliers de m^3) d'après les mesures du MNT et les évaluations de transports de la zone aval à la RN2 50

Liste des annexes

Annexe 1 Estimation de la capacité maximale de transport suivant la formule de Meyer Peter 57

Annexe 2 Calcul de la capacité maximale de transport, par la formule Sogreah Lefort, de la partie aval RN2 avec pentes de 2007 61

1. Introduction

Dans le cadre de la directive européenne relative à la gestion des inondations du 26 novembre 2007 et suite à la mission d'expertise de l'Inspection Générale de l'Environnement de juillet 2006 relative à la prévention des inondations à La Réunion, la DDE de la Réunion met en place un Plan de Gestion des Risques d'Inondation (PGRI) et souhaite disposer des éléments de **compréhension du fonctionnement hydrogéomorphologique des principales rivières à enjeux de La Réunion afin de pouvoir mettre en œuvre des solutions de gestion**.

Cette première étude, cofinancée par la DDE Réunion et la dotation de Service Public du BRGM, s'attache à la **Rivière du Mât** et ses principaux affluents (Fleurs Jaunes, Bras des Cavernes et Bras des Lianes). Basée sur les références méthodologiques connues[1] ainsi que sur les spécificités de l'île et du bassin versant concerné, cette première étude du PGRI revêt un caractère expérimental dont le but est de d'asseoir l'approche méthodologique pour les autres rivières à enjeux.

D'un linéaire de 36 km et drainant un bassin versant de 146 km², la Rivière du Mât est l'un des cours d'eau majeur de La Réunion (**Erreur ! Source du renvoi introuvable.**). Elle recueille notamment les eaux du cirque de Salazie et présente des risques d'inondation et d'érosion de berges importants, en particulier sur les 10 derniers kilomètres à l'aval.

L'étude est développée dans les 5 volumes suivants :

- Volume 1/5 : Synthèse bibliographique ;
- Volume 2/5 : Evolution géomorphologique ;
- Volume 3/5 : Analyse hydrologique et pluviométrique ;
- **Volume 4/5 : Estimation du transport solide ;**
- Volume 5/5 : Analyse de risque.

Après un rappel sur les apports des volumes précédents et sur le transport solide, le présent volume se propose d'estimer le transport solide potentiel de ce cours d'eau en se basant sur le calcul (formules théoriques) de sa capacité de transport maximal et sur l'analyse différentielle des modèles numériques de surface (MNS) de la partie aval.

[1] Approche hydrogéomorphologique pour la cartographie des zones inondables, méthodologie pour l'élaboration des PPRI, Directive Européenne pour la gestion des inondations,...

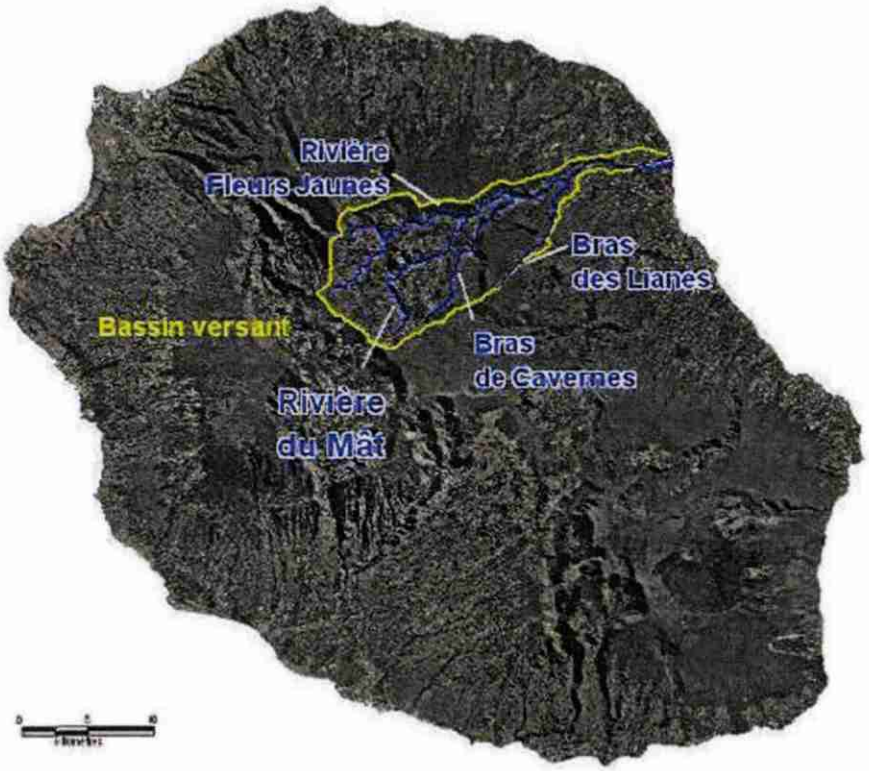


Illustration 1 : Plan de situation du bassin versant

2. Rappels

2.1. CONTEXTE ET EVOLUTION GEOMORPHOLOGIQUE

Ce chapitre rappelle brièvement les éléments utiles à ce rapport de l'analyse géomorphologique réalisée dans le volume 2/5 de l'étude.

La Rivière du Mât montre un bon exemple de rivière torrentielle provoquant, depuis le bassin de réception jusqu'au cône alluvial, en passant par le chenal d'écoulement des phénomènes de forte à très forte intensité, respectivement érosion initiale, alluvionnement final et transport intermédiaire.

Du fait d'un contexte géologique et climatique sensible, la présence abondante de roches peu consolidées, disloquées et remobilisées par différents épisodes volcaniques et climatiques favorise les glissements et phénomènes d'érosion qui sont fréquents et intenses notamment dans le cirque, mais aussi à l'amont du cône alluvial.

L'étude des photographies aériennes prises entre 1966 et 2007 a permis d'approcher une zonéographie de la sensibilité à l'érosion du cirque de Salazie et de localiser les sites qui paraissent les plus affectés par ces processus d'érosion. Ils se concentrent sur les environs des villages de Grand-Ilet et de Hell-Bourg. La comparaison des photographies en quelques points permet d'estimer le recul moyen des limites des plateaux sur lesquels sont installées ces localités à environ 3 m/an, sur une trentaine d'années.

Les matériaux sont ensuite transportés par la Rivière des Fleurs Jaunes pour le nord du cirque et la Rivière du Mât pour le sud. Il ne semble pas qu'il se produise, au niveau du cirque, de dépôts alluviaux intermédiaires importants dans ces rivières bien qu'une zone d'élargissement existe pour chacune d'entre elles (amont confluence Rivière Fleurs Jaunes - Ravine Roche à Jacquot ; amont pont de la Savane) : la présence de basalte sub-affleurant dans les deux cas élimine la possibilité de constitution d'une importante réserve de sédiment par surcreusement local.

L'absence d'une importante réserve alluvionnaire intermédiaire semble également à noter tout au long du chenal d'écoulement, entre la confluence des deux précédentes rivières et l'entrée dans le cône alluvial. Le « point dur » que constitue le barrage-seuil de la station hydrométrique est en effet rapidement comblé de sédiment, le surplus pouvant transiter vers l'aval. Peu d'élargissements du cours d'eau sont visibles et le substratum basaltique est souvent observé, ce qui paraît, là encore, exclure la présence de surcreusements importants.

Il semble donc que lors des épisodes pluvieux, la majeure partie des matériaux arrachés à la zone du cirque soit transportée jusqu'à la côte, pour s'accumuler dans le cône alluvial voire être évacuée à la mer. Les dégâts infligés à la carrière d'extraction de granulats située dans la partie sud du cône alluvial montrent que la force du courant est encore conséquente à l'exutoire de la rivière et permet un tel transport.

2.2. HYPOTHESES SUR LES CONDITIONS HYDROLOGIQUES DE L'ETUDE

Ce chapitre renvoie au volume 3/5 du rapport qui contient l'étude pluviométrique et hydrologique.

L'étude hydrologique et l'étude d'évaluation du transport solide ont été réalisées en considérant que :

- le bassin versant amont du Bras des Cavernes est relativement plat, perméable, qu'il alimente principalement les sources et restitue peu d'écoulement de surface susceptible d'occasionner un charriage conséquent de sédiments,

- le bassin versant du Bras des Lianes est relativement arrosé, moins perméable, alimente le ruissellement superficiel mais présente un faible charriage potentiel.

Cette étude hydrologique a été mené, vu le peu de données disponibles, en déterminant l'ensemble des caractéristiques des crues nécessaires à l'étude au droit de la station hydrométrique principale (barrage, ancienne RN2) située sur la Rivière du Mât puis à les transposer aux autres points de calcul souhaités du bassin versant.

L'analyse pluie-débit des observations disponibles et l'utilisation des formules existantes ont permis, au droit de la station principale :

- d'évaluer à 4h le temps de concentration,

- de définir le temps de base des crues et le temps de pluie « efficace »,

- quantifier la relation pluie lame ruisselée à l'échelle de la crue.

La trop courte période d'observation des débits (2000-2007) ne permettant pas de réaliser des estimations statistiques fiables nécessaires à l'atteinte des objectifs, il est apparu nécessaire de réaliser une modélisation hydrologique avec le logiciel GARDENIA du BRGM afin de compléter les séries de données au moyen de débits simulés.

Cette modélisation pluie débit a été réalisée sur les débits de crue survenant au droit de la station principale, au pas de temps horaire, avec, comme principale donnée d'entrée, la pluviométrie horaire observée à Mare Vieille Place. Le calage, réalisé simultanément sur treize des évènements observés sur la période 2000-2007, fournit un coefficient d'ajustement voisin de 0.95 et a permis de reconstituer de manière satisfaisante les débits et volumes des crues observés.

Une fois calé, le modèle a été utilisé pour simuler, à partir des épisodes pluvieux ayant une pluie journalière mesurée supérieure ou égale à 250 mm à la station de Mare à Vieille Place, les hydrogrammes, au pas de temps horaire, au droit de cette station. Il a ainsi été possible de reconstituer, au pas de temps horaire :

- les hydrogrammes des crues non observées sur la période 2000-2006,

- les hydrogrammes des crues significatives de la période 1993-2000,

- un hydrogramme possible de Hyacinthe.

A partir de ces hydrogrammes reconstitués et des résultats de l'étude pluviométrique (Gradex), une analyse statistique à été réalisée afin de préciser le débit décennal et centennal au droit de la station principale.

Les valeurs fréquentielles calculées et les hydrogrammes de crues ont été ensuite définis au droit des différents points de calculs souhaités sur le bassin versant en considérant :

- les temps de concentration calculés au droit de ces points,
- un volume de crue proportionnel à la superficie du bassin versant, approximation satisfaisante pour la partie amont (cirque), probablement moins pour les bassins versants des deux principaux affluents qui ont un comportement hydraulique différents mais qui, par suite de leurs caractéristiques, n'influent pas sur l'évaluation du transport solide.
- un débit maximal de crue définie à partir du volume et du temps de concentration en considérant une crue triangulaire de durée égale au temps de concentration augmenté du temps de pluie « efficace ».

A des fins de vérification, ces hypothèses ont été appliquées à la station principale, afin de s'assurer que l'évaluation du transport solide était similaire à celle obtenue avec les hydrogrammes initiaux. Les écarts d'évaluation sur le volume sont de l'ordre de 10%.

2.3. TRANSPORTS SOLIDES PAR LES COURS D'EAU

2.3.1. Généralités

Le schéma (Illustration 2) ci-dessous résume les différents types d'écoulements susceptibles de se produire à la Réunion. Il montre que lorsque la pente change et que la fourniture de matériaux est illimitée la nature et la dangerosité (ou puissance destructrice) du cours d'eau change.

Lorsque le transport solide est important, la morphologie d'une rivière torrentielle est susceptible d'être modifiée durant les crues. Cette problématique doit alors être étudié et prise en considération lors des études d'aménagement.

Si l'on raisonne en termes de capacité maximale de transport du cours d'eau récepteur, on peut distinguer différents type d'apports :

- Cas 1 : l'apport de matériaux est inférieur à la capacité maximale de transport. Les matériaux mis en mouvements sont en totalité repris par la crue. C'est généralement le cas des mouvements de faible ampleur qui ont lieu en période de crues.
- Cas 2 : l'apport de matériaux est supérieur à la capacité maximale de transport du cours d'eau. C'est le cas des mouvements de grande ampleur dont les volumes sont largement supérieurs à ce que peut évacuer la rivière. C'est aussi le cas des

mouvements qui ont lieu dans les réseaux hydrographiques secondaires ou hors période de crue (les débits liquides sont insuffisants).

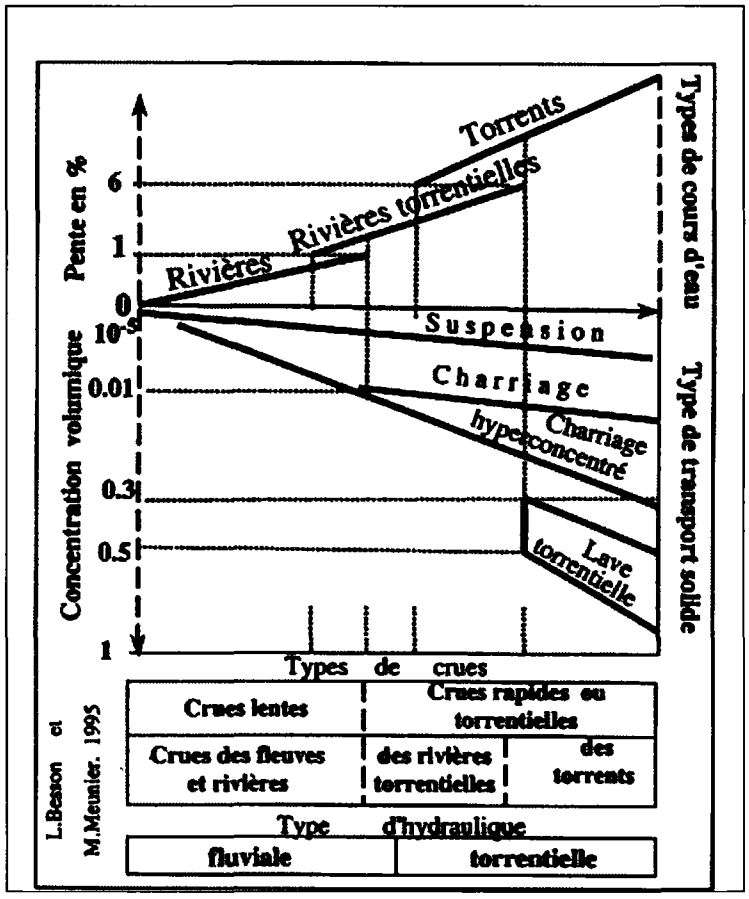


Illustration 2 - Correspondance entre les types d'écoulements, les types de cours d'eau et les modes de transports solides.

En termes de cinétique :

- les mouvements de terrain type « cas 1 » sont les plus efficaces et les plus rapides pour ce qui concerne le cheminement des matériaux du versant à la mer,

- les mouvements de type « cas 2 » sont en général beaucoup moins efficaces en terme d'apports de matériaux à la rivière puisqu'ils sont dépendants d'autres évènements climatiques et sont sujets à des phénomènes de reprise et de dépôts intermédiaires, avant leur arrivée dans le lit du cours d'eau principal.

Les cônes de déjection des grandes rivières ont fait l'objet d'aménagements de protection contre les inondations qui ont été dimensionnés par des études sur des modèles réduits physiques. Ces études ont fourni des lois débits solides/débits liquides qui ont été utilisées pour estimer, sur la base de chroniques de débits observés ou recréés, les débits solides annuels qui transitent à l'embouchure des grandes rivières. Nous disposons ainsi d'une estimation des apports de matériaux aux rivières étudiées. Toutefois, cette estimation ne différencie par les apports en provenance des versants

de ceux du lit et des berges, et elle comprend les matériaux transportés en suspension et par charriage.

L'hypothèse de base du calcul est que la rivière fonctionne à capacité maximale de transport au niveau de son cône de déjection. Cette hypothèse permet d'utiliser des formules théoriques de transport solide : soit de transport total (charriage + suspension soit de charriage. Des lois théoriques reliant le débit solide au débit liquide sont ainsi établies. En reproduisant une chronique de débits liquides sur une longue période (soit observée, soit crée), on obtient une chronique de débits solides. Celle-ci peut reproduire un débit solide écoulé par année sur une longue période ou représenter le débit solide transporté lors d'un événement climatique particulier. Les résultats par année sont analysés statistiquement et permettent d'évaluer la production annuelle fréquentielle de matériaux. Les résultats pour un événement climatique donné permettent de quantifier la production de matériaux de cet événement.

A la Réunion, 9 cours d'eau ont fait l'objet d'estimations de la relation débit solide/ débit liquide, notée Qs/Ql, en utilisant 3 méthodes :

- par calage de modèles réduits physiques (5 cours d'eau), c'est le cas de la Rivière des Galets, la Rivière des Pluies, la Rivière St-Denis, la Rivière St-Étienne, et la Rivière des Remparts ;

- par application de formule théorique (3 cours d'eau), c'est le cas de la Rivière du Mât, de la Rivière St-Suzanne et de la Ravine du Chaudron ;

- par estimation grandeur nature lors d'un événement (1 cours d'eau), c'est le cas de la Ravine Patates à Durand pendant l'événement Hyacinthe.

L'analyse des estimations effectuées (BRGM, juin 1984) permet les remarques suivantes :

- les taux d'érosion spécifique annuels sont du même ordre de grandeur pour les rivières des trois cirques, ces taux sont supérieurs à ceux des autres rivières à fort transport solide que sont la rivière des Remparts et la ravine Patates à Durand.

- les débits solides pour des évènements exceptionnels sont du même ordre de grandeur que les débits solides annuels des années à fortes crues;

- le rapport entre les apports annuels lors d'une année exceptionnelle (Qs 100 ans) et les apports moyens annuels sont compris entre 3 et 7 suivant les rivières ;

- la Ravine Roche à Jacquot, située dans la partie amont du bassin versant de la Rivière du Mât est un secteur d'érosion active. Cette ravine a fait l'objet d'une étude hydraulique, réalisée par SOGREAH, en vue de la réalisation de travaux de correction torrentielle. L'analyse des photographies aériennes entre 1978 et 1984 a permis d'estimer sommairement les volumes solides érodés au cours de cette période. Ces volumes correspondent, en grande partie, aux volumes transportés par le cyclone Hyacinthe en 1980 ; ils sont de l'ordre de 900 000 à 1 700 000 m^3. Selon le rapport SOGREAH (2000) ces apports de matériaux proviennent : « *pour une grande part, non pas du fond de la ravine mais de zones externes : falaises et ravine Noury crée par le cyclone Hyacinthe* ». Les apports de matériaux, pour cette

partie de bassin versant (3.3 km²) correspondent à l'ordre de grandeur des débits solides estimés à Ilet Morin, pour un bassin versant de 90 km² (500 000 m^3 une année exceptionnelle - LCHF, 1984).

2.3.2. Les laves torrentielles

Les laves torrentielles se définissent généralement comme un fluide à une seule phase visqueuse, ce qui les différencie fondamentalement du charriage classique à deux phases : l'une solide l'autre liquide. Elles sont caractérisées par la mise en présence d'une matrice boueuse, dont la composition granulométrique et la teneur en eau sont comprises à l'intérieur dune fourchette assez étroite, et d'une quantité très variable de matériaux transportés, de granulométrie élevée (cailloux et blocs).

La genèse des laves implique plusieurs actions : la préparation des terrains en place, la présence d'eau en quantité adéquate, et le mélange des composants.

Les laves torrentielles sont des évènements intermédiaires entre les crues et les glissements de terrain. Les écoulements s'effectuent à des concentrations volumiques d'environ 50% de solide, par bouffées. Ces phénomènes se caractérisent par leurs soudainetés et l'importance des volumes impliqués (plusieurs milliers de m^3 de matériaux solides). Pour qu'ils se produisent, certaines conditions sont nécessaires : précipitations abondantes et terrains meubles et à forte pente.

On peut distinguer, par leur mode de formation, deux types de laves torrentielles :

- les laves de 'type hydrologique' apparaissent à la suite du lessivage des terrains de surface par des pluies torrentielles dans un bassin versant montagneux ; la crue torrentielle charrie alors des quantités très importantes de terres et de blocs ;

- les laves de 'type glissement de terrain' (les plus fréquentes à La Réunion). Un important glissement de paroi dans les gorges encaissées de rivières en obstrue le lit et parfois donne naissance à un barrage naturel. Les matériaux amassés, gorgés d'eau, sont ensuite transportés par la crue sous forme de laves torrentielles (Aubié et Cruchet, 2003).

Sur le bassin de la Rivière du Mât des laves torrentielles peuvent survenir mais, au vu des conditions requises, elles devraient s'immobiliser en parties amont du bassin versant. Elles n'influenceront donc pas directement l'estimation du transport au droit de la zone d'étude mais contribueront, par création de ces zones de stockages intermédiaires, à la fourniture de matériau permettant ainsi au cours d'eau de fonctionner à sa capacité maximale de transport dès les premières sections amont étudiées.

3. Données utilisées

L'estimation du transport solide se base sur le calcul (formules théorique) de la capacité maximale de transport et l'analyse différentielle des MNS sur la partie aval.

Ces analyses nécessitent le recours aux données, listées dans ce chapitre, sur la granulométrie et la topographie de la rivière.

3.1. GRANULOMETRIE

Les données granulométriques servent au calcul de la capacité maximale de transport. Elles ont été acquises en octobre 2007 sur le terrain au moyen d'un levé blocométrique détaillé dans le volume 2 de l'étude.

Pour rappel, l'Illustration 3, indique la localisation de ces mesures qui détermine les points d'estimation des volumes de transport solide et la détermination des hydrogrammes de crue (cf. chapitre suivant).

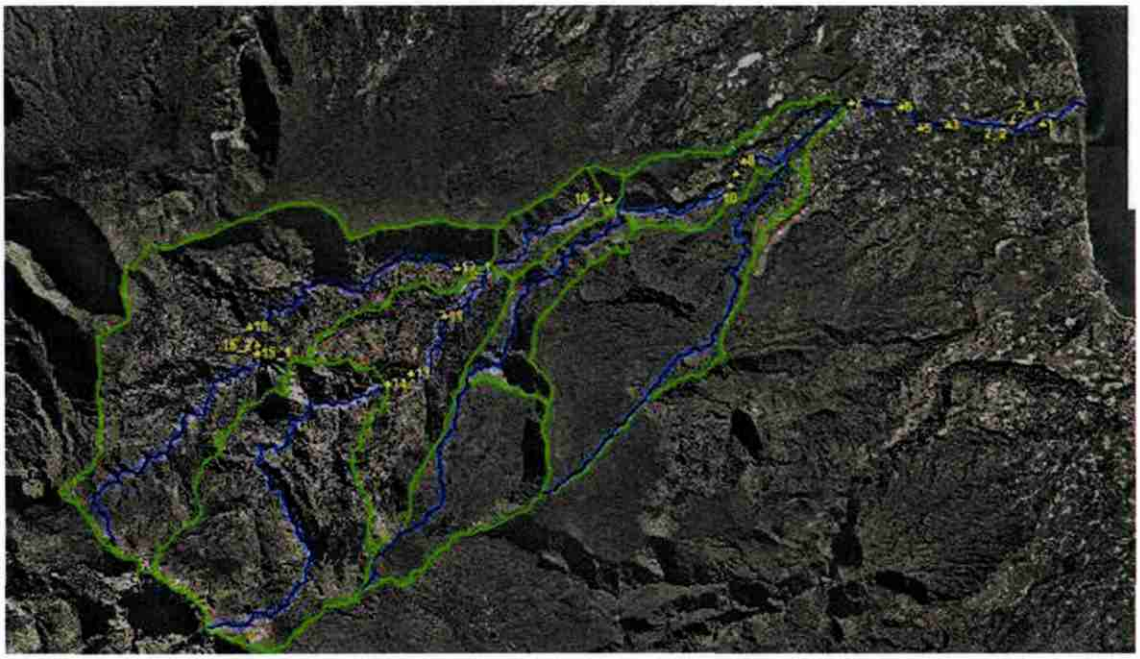


Illustration 3 – Localisation des mesures granulométriques

Les caractéristiques granulométriques de ces stations, obtenues à partir des prélèvements, sont présentées dans l'Illustration 9.

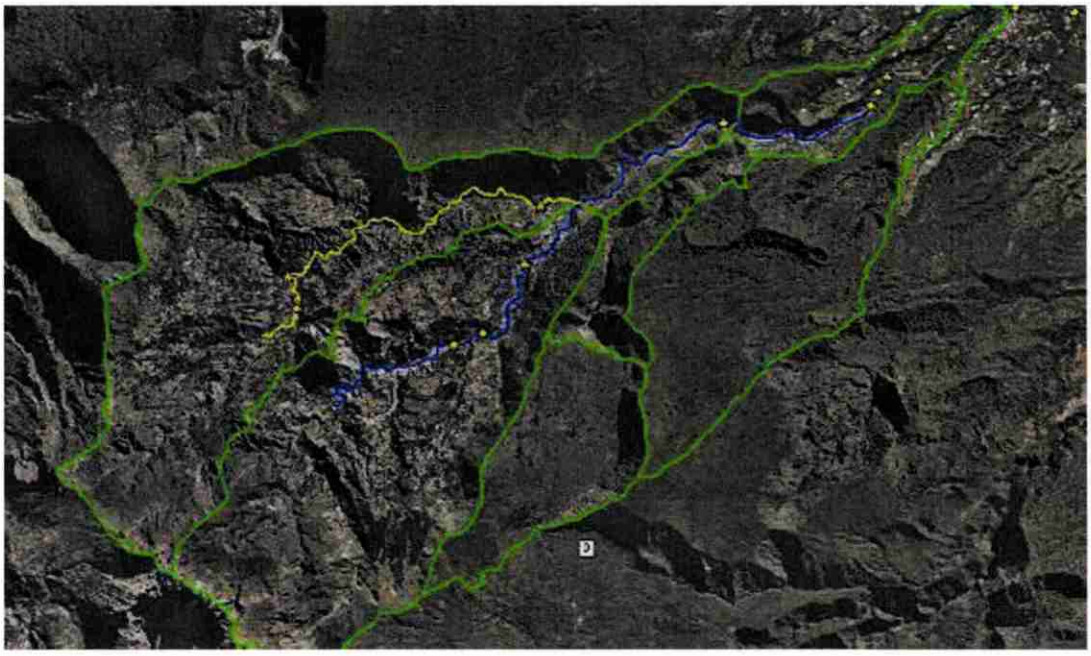


Illustration 4 : Localisation des profils en long réalisés sur la partie amont de la Rivière du Mât (en bleu) et de la Rivière Fleurs Jaunes (en jaune)

Illustration 5 : Localisation des profils en travers réalisés sur la partie aval de la Rivière du Mât

3.2. TOPOGRAPHIE

Les données topographiques se présentent soit en 2 dimensions sous la forme de profils (en long ou en travers), soit en 3 dimensions sous la forme de modèle numérique de surface (MNS).

L'ensemble des données topographiques a été acquis et traité par photogrammétrie[2] par la société AIGL. Les prises de vues réalisées dans le cadre de cette étude datent d'octobre 2007. Des données plus anciennes de 2006 (AIGL) et 2002 (Talibart) sont également disponibles (cf. volume 1).

Le détail des données utilisées est précisé ci-dessous.

3.2.1. Ensemble de la rivière

Le seul profil en long disponible sur l'ensemble de la rivière (Illustration 6) est fourni par le projet DYNTOR (Pouget et Jossot, 2004) au moyen du MNT de l'IGN de 1997 (calculé également par photogrammétrie) ré-échantillonné au pas de 10 m.

3.2.2. Zone amont

Les profils en long de la partie amont de la Rivière du Mât et de la Rivière Fleurs Jaunes, délimités sur l'illustration 6, sont également disponibles en documents joints au présent rapport. Ces profils ont été calculés par AIGL à partir des prises de vues aériennes de 2007 dans le cadre de cette étude. Sur cette illustration, sont indiqués les limites des différents bassins versants et les points d'évaluation du transport solide (étoiles).

3.2.3. Zone aval

Toujours dans le cadre de la présente étude, un nouveau Modèle Numérique de Surface (MNS[3]) a été réalisé en 2007 dans la partie aval de la Rivière du Mât, entre le Pont de l'Escalier et l'embouchure de la Rivière du Mât. Ces données ont été utilisées afin d'établir le profil en long (traitement BRGM) et les profils en travers (traitement AIGL). Ils permettent d'effectuer des bilans en les comparants aux profils et MNS antérieurs.

---

[2] La photogrammétrie consiste à déterminer les coordonnées en trois dimensions des points d'un objet par des mesures effectuées sur une ou plusieurs images photographiques prises à partir de positions différentes (méthode stéréoscopique).

[3] Le terme MNS est une représentation numérique altimétrique de la surface du sol (sens large, intégrant le bâti et la végétation). Il est différent du Modèle Numérique de Terrain (MNT) qui est une représentation de la topographie d'une zone terrestre.

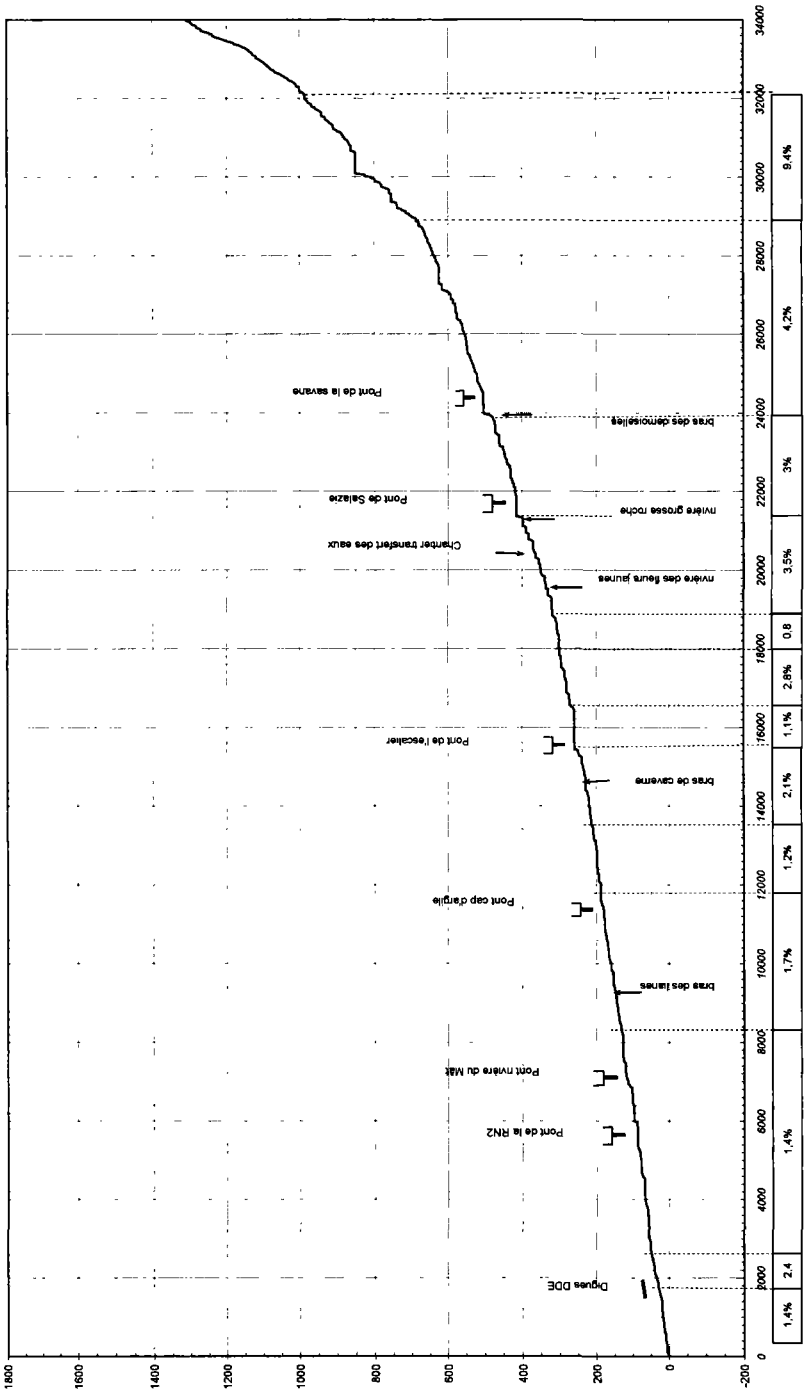


Illustration 6 : Profil en long de la Rivière du Mât

L'illustration 5 fournit la localisation des cents profils (jaune), indique la localisation des profils réalisés en 2006 toujours par AIGL (vert) et la localisation des points d'évaluation du transport solide (rouge).

Les valeurs des profils en travers ont été utilisées pour distinguer un profil en long du « fond extrême » et du « fond moyen » (traitement BRGM). Le fond extrême concerne la partie la plus basse du cours d'eau, à savoir le fond du lit actif. Cette notion s'oppose au « fond moyen » qui concerne la moyenne des altitudes d'une berge à l'autre du cours d'eau.

3.3. TRAITEMENTS « DIFFERENTIELS » DES MNS

Les bilans ont été réalisés sur les MNS suivants, tous obtenus par photogrammétrie :

- octobre 2007, acquisition effectuée par la société AIGL
- septembre 2006, acquisition effectuée par la société AIGL
- septembre 2002, acquisition effectuée par la société Talibart, complété par la Société AIGL

Les trois MNS sont numériquement représentés par des modèles tridimensionnels au format vecteur "TIN[4]". Les TIN permettent de représenter la surface topographique par une succession de facettes triangulaires adjacentes, de formes et de tailles variables construites à partir d'un nuage de points (correspondant généralement au jeu de points de référence). Ce format permet l'introduction des lignes caractéristiques de la topographie dans les données d'entrée. Dans ce cas, les triangles s'appuient sur ces lignes et aucune face ne coupe de ligne caractéristique. De ce fait, les crêtes et les talwegs sont bien représentés et, contrairement au format raster, le phénomène de lissage du terrain ne se produit pas [Mardhel *et al.*, 2006].

Les TIN ont été élaborés par photogrammétrie à partir de prises de vues aériennes dont la résolution du pixel est égale à 25 cm. D'après le bureau d'étude AIGL, la précision en Z peut-être estimé à plus ou moins 10 cm. Ce point sera développé au paragraphe suivant.

La surface couverte par ces trois MNS n'est pas identique. En 2002, seul le lit actif avait fait l'objet d'investigation. En 2007, les berges de la Rivière du Mât ont localement reculées de plusieurs dizaines de mètres. En conséquence, ces zones ne pourront être totalement comparées.

[4] Triangulated Irregular Network = réseau irrégulier de triangles

3.3.1. Pertinence des données

Végétation

L'utilisation des MNS requiert d'intégrer le fait que la surface numérique est fonction du bâti et de la végétation. Dans le cadre de la présente étude, seul le paramètre végétation doit être considéré comme influent. D'après les photographies aériennes de l'IGN (2003), la surface occupée par la végétation dans le cône alluvial de la Rivière du Mât décroît de 2002 à 2007. En conséquence, l'impact du déclin de la végétation entre 2002 et 2007 dans la partie distale du cône alluvial devrait induire une sous-estimation des bilans. Cependant, comme cela sera démontré ultérieurement lors de l'interprétation des données topographiques, cette influence ne semble pas être prépondérante sur les phénomènes de sédimentation.

Densité des points

Dans le cadre du projet Dyntor, il avait été spécifié qu'il était capital que le semis de points du MNS réalisé à partir des photogrammétries soit (i) le même d'une campagne à l'autre et (ii) le plus dense possible [Mardhel *et al.*, 2006].

Dans le cadre de la présente étude, le MNS résultant présente une densité du 2 000ème. En termes topographiques, cela signifie qu'à l'échelle d'un plan au 2 000ème, l'espacement de la distribution des points cotés n'excède pas 2 cm environ. Cette densité correspond à un espacement de points de l'ordre de 40 mètres sur le terrain.

La densité des différents TIN est comparée sur l'illustration 7. La surface utilisée fait référence au lit mineur localisé entre les berges de la Rivière du Mât. La densité des points diffère significativement entre chaque campagne d'acquisition. Cependant, aucune méthodologie n'a pu être déterminée afin de réduire cette divergence (la dégradation des MNS n'apporte pas de résultats intéressant).

Année	Nombre de nœuds	Nombre de triangle	Surface (m^2)	Densité (point / m^2)
2007	15 903	29 930	1 783 760	$8.92 . 10^{-3}$
2006	353 115	694 645	1 783 760	$1.98 . 10^{-1}$
2002	51 685	99 627	1 728 086	$2.99 . 10^{-2}$

Illustration 7 : Densité des points des différents TIN

Apport de la photogrammétrie

La détermination de bilans en termes de transport solide par une quantification de type photogrammétrique présente un certain nombre d'incertitudes. Cependant dans le contexte de la présente étude, il n'était pas envisagé d'effectuer un autre type de constitution de MNS. Les comparaisons entre MNS, bien que précises et quantitatives doivent être couplées à d'autres méthodes d'estimation (calcul du transport solide, expertise terrain...) et de validation.

Dans un futur proche, d'autres technologies telles que le LIDAR, pourraient être utilisées.

3.3.2. Méthodologie de calcul de bilans

Les bilans ont été effectués sur la partie active du lit de la rivière, c'est-à-dire entre les terrasses. Négliger la zone des terrasses permet de s'affranchir de l'influence de l'évolution de la végétation dans ce secteur.

Les calculs ont été réalisés par diverses méthodes proposées par les extensions "Spatial Analyst" et "3D Analyst" du logiciel "ArcMap" d'Esri : méthode des remblais / déblais, méthode de calcul à partir d'une surface de référence, méthode de soustraction directe.

Ces méthodes ont été appliquées d'une part aux TIN et d'autre part à des grilles régulières au pas de 1 mètre générées à partir de ces mêmes TIN.

Quelle que soit la méthode employée, la marge de variation des résultats n'excède pas ± 2%.

4. Evaluation de la capacité maximale de transport

Compte-tenu de ses caractéristiques morphologiques et hydrologiques et de celles de son bassin versant, la Rivière du Mât est à classer dans les rivières torrentielles, et est susceptible de connaître du charriage hyper concentré, et dans sa partie amont des laves torrentielles.

L'étude morphologique, volume 2/5, a principalement mis en évidence 3 zones à comportement très différents :

- le bassin versant amont (cirque) qui peut être considéré comme une zone de production et de transport. Il est susceptible de fournir des quantités importantes de sédiments,

- le bassin versant intermédiaire, qui est essentiellement une zone de transport même si on retrouve quelques petites zones de stockage temporaire,

- la zone aval de la RN2, qui est, a priori, une zone de dépôt et/ou de transfert vers l'océan,

Les bassins versants d'altitude correspondants aux affluents Bras des Lianes et Bras des Cavernes peuvent constituer une quatrième zone. En effet, bien que fortement végétalisés et à faible activité érosive, ces bassins contribuent toutefois de manière significative aux apports liquides.

Les points de calcul prévisionnel sont (Illustration 3) :

- les sections où des analyses granulométriques ont été réalisées,

- les sections situées en aval et/ou amont des confluences significatives et aux droits des deux stations hydrométriques (Escalier et ancienne RN2) afin de vérifier la cohérence des résultats, même si ces sections étant dans des gorges, les résultats ne doivent être considérés que comme indicatifs.

4.1. CHAMP D'APPLICATION

Les formules de transport solide par charriage ne s'appliquent qu'au mouvement des matériaux constituant le fond du lit d'un cours d'eau. Les matériaux transportés en suspension (matériaux de lessivage) ont une concentration indépendante du débit liquide. Elle n'est pas accessible par le calcul mais on peut la mesurer par prélèvement d'eau.

Pour mettre en œuvre les calculs de capacité de transport, il faut sélectionner un tronçon où il y a, *a priori*, équilibre entre débits liquides, apports solides, granulométrie et pente. Cela exclut les zones de gorge, les affleurements rocheux et les lits fixés par des blocs provenant des versants.

Sur les rivières torrentielles on choisit un tronçon librement divaguant, assez long pour que le calcul de pente soit valide et où il doit être possible d'effectuer sur le terrain des mesures de granulométries pertinentes.

Enfin nous rappelons qu'en hydraulique torrentielle, il faut distinguer un seuil de début de transport (qui jouerait seulement sur les matériaux déposés immédiatement mobilisables) et un seuil d'érosion du lit (plus élevé que le précédent).

Si le débit liquide n'est pas suffisant, il n'y a pas de transport. Lorsque le premier seuil est franchi, le débit solide dépend du volume disponible en dehors du matériau du lit pavé, il s'agit seulement du matériau venant des versants et du matériau déposé par une crue antérieure et facilement mobilisable.

Si le débit liquide franchit le deuxième palier, un deuxième réservoir de matériau devient disponible et on peut admettre qu'il est suffisant pour que le maximum de matériau solide soit transporté : on est alors à la capacité maximale de transport.

4.2. FORMULES POSSIBLES

Il existe de nombreuses formules permettant d'évaluer la capacité maximale de transport des cours d'eau. Ces formules ont été généralement établies pour des phénomènes et des domaines d'applications bien définis. Le choix le plus adéquat va notamment dépendre du type de cours d'eau et de la taille des sédiments. La figure ci-dessous illustre les plages d'utilisation de quelques formules en fonction de la granulométrie moyenne des sédiments et en fonction du régime de transport.

La Rivière du Mât pouvant être classée comme rivière torrentielle ayant une granulométrie du lit relativement étendue, seules les formules de Lefort et Meyer Peter, et/ou Rickenmann en partie amont, paraissent adaptées. Les estimations de la capacité de transport de la Rivière du Mât au droit des différentes sections de calculs seront réalisées au moyen de deux de ces formules.

L'Illustration 8 indique les formules et les principales conditions d'utilisation de celles-ci. Par ailleurs, d'après la bibliographie, la formule de Meyer Peter est généralement à éviter pour les lits « à tresses ».

Formule *Conditions d'utilisation*	Q_0	Q_s/Q
Meyer Peter *2,5%>i>0,04%*	$0{,}42 * B * i^{-7/6} d_m^{3/2}$	$0{,}91 * i^{7/6} * \left[1 - \left(\frac{Q_0}{Q}\right)^{3/8}\right]$
Sogreah-Lefort *20%>i>0,2%* *d>1mm* *$Q/Q_0<25$*	$0{,}92 * i^{-13/6} d_m^{5/2} * (1 - 1{,}2 * i)^{8/3}$	$2{,}7 * \left(\frac{d_{90}}{d_{30}}\right)^{0,2} * i^{1,5} * \left[1 - \left(\frac{Q_0}{Q}\right)^{0,375}\right]$

Illustration 8 : Formules utilisées pour évaluer la capacité maximale de transport

Avec :

Qs : Transport solide (m^3/s),

Q : Débit liquide (m^3/s),

Q0 : Débit de début d'entrainement (m^3/s),

i : pente de l'écoulement (m/m),

d_{50} : diamètre moyen des particules,

$d_{30,90}$: diamètre des particules tel que 70% ou 10 % seulement soient supérieures à ce diamètre,

d, dm : diamètre et diamètre moyen (m),

B : largeur du lit (m).

Nota bene : Ces formules sont établies en considérant la masse volumique du matériau égale à 2,65 kg/m³ et (ks/kr) =0 ,8 .

PROFIL	R. Mât Amont		R. Fleurs Jaunes			R. du Mât				
Section	14	Amont confluence	15.1	15.2	amont confluence	Aval confluence R.F.J	ESCALIER	9	8	STATION
d30	80	*30*	200	10	*30*	30	2	2	4	10
d50	200	*70*	300	40	*70*	70	10	10	120	40
dm	370	*110*	520	70	*110*	110	30	30	390	100
d90	1200	*300*	1200	1200	*300*	300	70	70	1200	300
Largeur du lit	70	*20*	50	70	*25*	20	15	100	85	35
Pente	0.035	*0.036*	0.046	0.046	*0.02*	0.018	0.013	0.0176	0.0176	0.014
Q0 Meyer Peter	331	15	286	20	37	33	5	24	969	68
Q0 Sogreah Lefort	26	1	30	0	5	6	1	0	155	9

PROFIL	R. du Mât (aval RN2)						
Section	6	5	4	3	2.2	2.1	1
d30	20	50	20	20	30	20	20
d50	50	100	250	50	100	120	60
dm	140	170	300	140	150	180	140
d90	400	450	800	200	450	550	400
Largeur du lit	70	140	125	110	360	370	280
Pente 2007	*0.014*	*0.018*	*0.015*	*0.015*	*0.021*	*0.021*	*0.017*
Pente 2006	0.014	0.020	0.015	0.015	0.017	0.017	0.014
Q0 Meyer Peter	224	405	1133	318	1000	1352	864
Q0 Sogreah Lefort	20	15	112	17	15	24	19

Illustration 9 : Caractéristiques des matériaux du lit, du cours d'eau et estimation du débit « critique »

4.3. CALCUL DE LA CAPACITE MAXIMALE DE TRANSPORT

Les calculs ont été réalisés au droit des sections où ont été réalisées des analyses granulométriques. Dans toute la partie intermédiaire de la Rivière du Mât, les écoulements se produisent dans des gorges où l'utilisation de formules de transport est généralement à proscrire. Leur réalisation permet toutefois de vérifier la cohérence d'ensemble de ces évaluations. Les valeurs calculées au droit de ces points sont indiquées en italique dans les différents tableaux.

L'évaluation de la capacité maximale de transport, au moyen de ces formules nécessitent certaines informations quantitatives sur les caractéristiques du cours d'eau. Elles figurent dans l'Illustration 9 ainsi que le débit seuil (Q_0) de début d'entrainement de matériau appelé également « débit critique ». La pente du tronçon aval a été définie à partir du fond moyen 2006.

Ce premier tableau permet de constater que :

- la granulométrie est relativement étendue avec une granulométrie plus faible au droit des sections étroites et amont (gorges) qu'au droit des sections de la partie aval,

- les valeurs de Q0 obtenues avec la formule de Sogreah Lefort sont très inférieures à celles obtenues avec la formule de Meyer Peter, formule qui ne peut s'appliquer, suivant la théorie, qu'à très peu de sections, ...

- d'après cette formule (Sogreah Lefort), le transport solide commence à des débits très faibles pour les sections situées en amont de la station, à des débits moyens au droit des sections de prélèvements n°8 et n°4 et à un débit relativement important au droit de la section du prélèvement n°6.

Les tableaux (Illustration 10 et Illustration 11) font état par années des évaluations de la capacité maximale de transport au droit des différentes sections d'après la formule de Sogreah – Lefort. Ainsi que précisé antérieurement, la formule de Meyer Peter est généralement à proscrire pour les lits à tresses (partie en aval de la RN2) et pour des pentes supérieures à 2,5 % c'est-à-dire en parties amont, les calculs ont toutefois été réalisés et sont joints en annexe 1 et 2.

FORMULE SOGREAH LEFORT
CAPACITE MAXIMALE DE TRANSPORT (milliers de m3)

	R. Mât (amont)		R. Fleurs Jaunes			R. du Mât				
Section	14	Amont confluence	15.1	15.2	amont confluence	Aval confluence R.F.J	ESCALIER	9	8	STATION
1993	257	1 111	182	1 198	326	684	660	1 356	401	942
1994	37	328	19	355	85	197	196	408	32	270
1995	34	340	18	367	84	201	202	422	29	274
1996	26	193	17	210	48	115	116	241	33	157
1997	23	215	11	231	55	128	128	266	19	175
1998	347	1 066	291	1 154	356	690	634	1 300	831	960
1999	28	293	14	316	72	173	174	363	23	235
2000	18	146	11	156	38	87	86	180	16	119
2001	61	256	43	279	77	159	154	315	97	220
2002	245	877	192	943	277	554	515	1 060	450	768
2003	1	56	0	60	10	31	33	70	1	42
2004	67	302	45	325	84	185	178	369	103	254
2005	38	326	23	354	80	193	195	406	45	262
2006	443	1 309	339	1 401	430	840	772	1 580	986	1 170
2007	323	1 095	255	1 181	356	702	644	1 326	617	977
1993/2007	1 951	7 913	1 460	8 530	2 378	4 940	4 689	9 662	3 684	6 824
MIN	1	56	0	60	10	31	33	70	1	42
MAX	443	1 309	339	1 401	430	840	772	1 580	986	1 170
MOYENNE	130	528	97	569	159	329	313	644	246	455
09/2002-2006	549	1 994	407	2 141	605	1 249	1 178	2 425	1 135	1 728
HYACINTHE	609	1 508	506	1 636	537	999	897	1 835	1 548	1 398

Illustration 10 : Evaluation de la capacité maximale de transport de la Rivière du Mât suivant la formule de Sogreah Lefort (partie amont)

L'Illustration 10 permet de constater que la capacité maximale de transport :

- varie peu (de 1 à 2) au droit des sections de la partie intermédiaire de la Rivière du Mât,
- varie de façon plus sensible au droit des sections amont. Il faut toutefois noter que cette variation est principalement du à la variation de la granulométrie,
- s'élève, si l'on privilégie les sections hors gorge (sections 15.1, 14, 8), en transit moyen annuel à :
    - 130 000 m^3 pour la Rivière du Mât amont,
    - 100 000 m^3 pour la Rivière Fleurs Jaunes, auxquels il faut ajouter les apports solides de la Ravine de la Roche à Jacquot. Les apports se situent donc probablement entre les valeurs obtenues à la section 15.1 et ceux de « amont confluence » qui est une section de gorges où le calcul est peu fiable. Cela revient à considérer des apports similaires à ceux de la Rivière du Mât amont.
    - 250 0000 m^3 pour la Rivière du Mât intermédiaire,
- S'élève lors de Hyacinthe, à ces mêmes sections, à
    - 610 000 m^3 pour la Rivière du Mât amont,
    - Supérieur à 510 000 m^3 pour la Rivière Fleurs Jaunes, soit du même ordre de grandeur que la Rivière du Mât,
    - 1 500 0000 m^3 pour la Rivière du Mât intermédiaire.

On notera qu'en 2004, la capacité maximale de transport est estimée à 67 000 m^3 sur la Rivière du Mât amont, volume suffisant pour remplir de sédiment la retenue du à la réalisation du seuil de prise de transfert des eaux.

L'Illustration 11 permet de constater que la capacité maximale de transport est très faible au droit de la section 6 puis augmente vers l'aval avec une capacité maximale de transport supérieure à la capacité maximale des parties amont.

Par ailleurs d'après Meunier (1999), il est admis qu'un écoulement divaguant à un débit solide inférieur de 30 à 50%. Il faut donc considérer qu'en aval du profil P35 la capacité maximale de transport doit être réduite d'au moins 30%.

FORMULE SOGREAH LEFORT
CAPACITE MAXIMALE DE TRANSPORT (milliers de m3)

	R. du Mât (partie aval RN2)						
Section	**6**	**5**	**4**	**3**	**2.2**	**2.1**	**1**
1993	806	1 137	521	787	1 044	1 081	1 181
1994	240	317	100	218	292	293	333
1995	248	323	95	222	297	296	341
1996	141	187	61	129	172	172	197
1997	156	206	64	142	189	190	217
1998	825	1 188	734	827	1 090	1 164	1 218
1999	213	278	81	191	256	255	293
2000	106	140	47	97	129	130	147
2001	186	265	123	184	244	253	275
2002	649	941	523	654	864	913	970
2003	41	50	9	34	46	45	54
2004	224	309	140	214	284	293	321
2005	235	312	91	214	286	285	329
2006	1 001	1 449	901	1 009	1 330	1 422	1 486
2007	824	1 204	708	838	1 105	1 175	1 237
TOTAL	5 895	8 308	4 196	5 758	7 627	7 968	8 599
MIN	41	50	9	34	46	45	54
MAX	1 001	1 449	901	1 009	1 330	1 422	1 486
MOYENNE	393	554	280	384	508	531	573
09/2002-2006	1 502	2 120	1 140	1 471	1 946	2 045	2 189
HYACINTHE	1 211	1 754	1 229	1 224	1 608	1 745	1 787

Illustration 11 : Evaluation de la capacité maximale de transport de la Rivière du Mât suivant la formule de Sogreah Lefort (partie aval,pente fond moyen 2006)

Suite aux différentes restrictions d'applications des formules, aux observations concernant la granulométrie et l'emplacement des prélèvements, les différentes évaluations de la capacité maximale de transport des différents tronçons de la Rivière du Mât peuvent se résumer à :

- la section 14 pour la Rivière du Mât amont,
- la section 15.1 pour la Rivière Fleurs Jaunes, à majorer par les apports de la Ravine de la Roche à Jacquot soit un total proche de ceux de la Rivière du Mât amont,
- la section 8 pour la partie intermédiaire,
- les sections de 3 à 1 pour la partie aval RN2 avec une réduction de 30% pour les sections 2 et 1. Les prélèvements (3 et 4) et (2.1 et 2.2) ayant été réalisé sur la même section, La capacité maximale sera obtenue en faisant la moyenne des deux résultats.

L'Illustration 12 récapitule ainsi les valeurs de la capacité maximale à retenir par tronçons. La pente en section aval est celle obtenue avec le fond moyen 2006.

FORMULE SOGREAH LEFORT : CAPACITE MAXIMALE DE TRANSPORT (milliers de m3)

	R. Mât (amont)	R. Fleurs Jaunes	R. Mât (int.)	R. Mât (Aval RN2)		
Section	**14**	**15.1**	**8**	**3**	**2**	**1**
1993	257	182	401	654	744	827
1994	37	19	32	159	204	233
1995	34	18	29	159	208	239
1996	26	17	33	95	121	138
1997	23	11	19	103	133	152
1998	347	291	831	780	789	853
1999	28	14	23	136	179	205
2000	18	11	16	72	91	103
2001	61	43	97	153	174	193
2002	245	192	450	588	622	679
2003	1	0	1	21	32	37
2004	67	45	103	177	202	225
2005	38	23	45	153	200	230
2006	443	339	986	955	963	1 040
2007	323	255	617	773	798	866
1993/2007	1 951	1 460	3 684	4 977	5 458	6 019
MIN	1	0	1	21	32	37
MAX	443	339	986	955	963	1 040
MOYENNE	130	97	246	332	364	401
09/2002-2006	574	426	1 175	1 364	1 463	1 605
HYACINTHE	609	506	1 548	1 227	1 174	1 251

Illustration 12 : Evaluation par tronçon de la capacité maximale de transport de la Rivière du Mât suivant la formule de Sogreah Lefort (pente 2006)

5. Confrontation et interprétation des résultats

Ce chapitre s'attache à la confrontation des calculs de capacité maximale de transport avec les données topographiques ainsi qu'à l'interprétation de ces résultats.

5.1. METHODOLOGIE

Le schéma du modèle global ETC spatialisé du CEMAGREF explicite très bien l'analyse à conduire (Illustration 13).

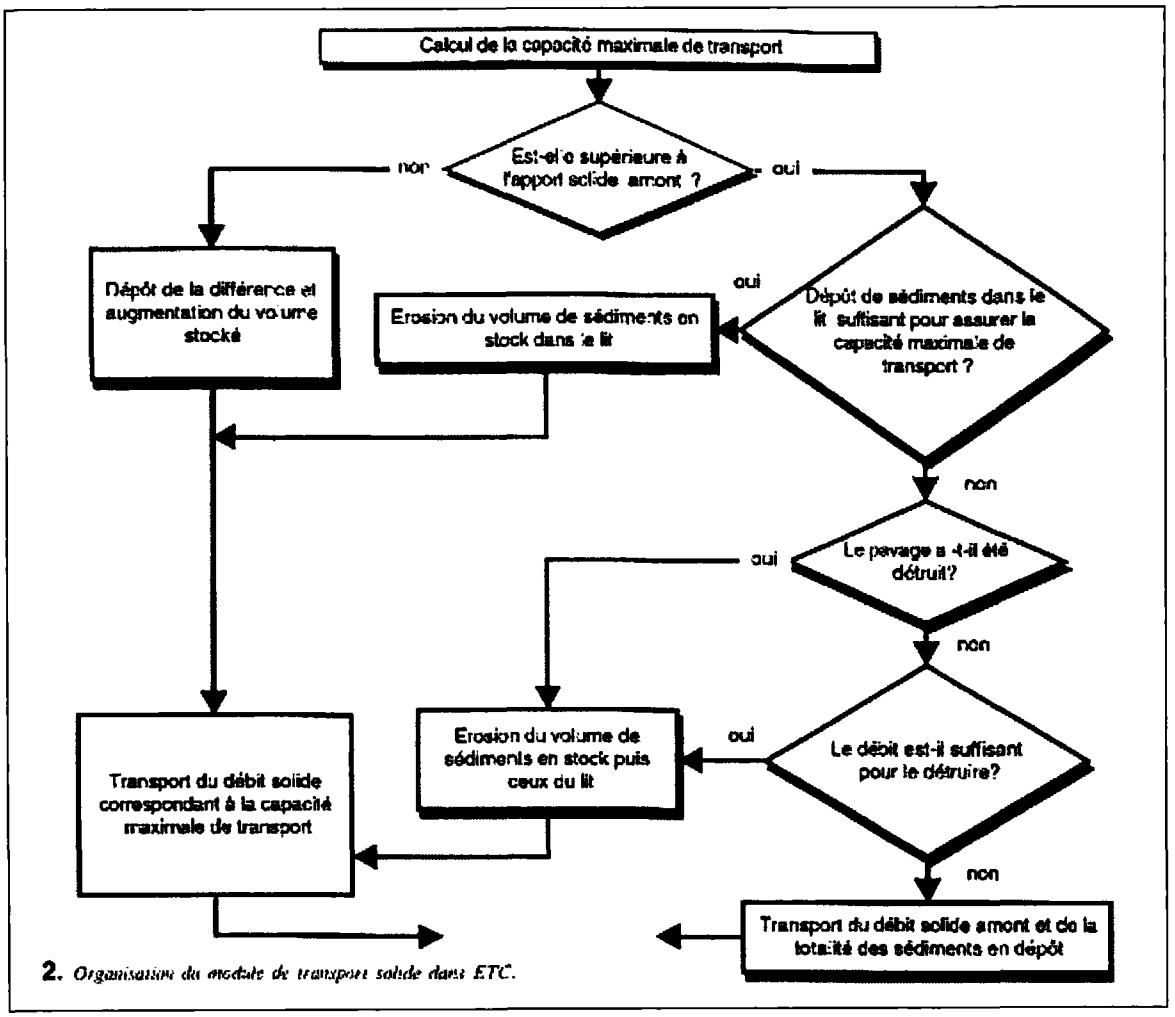


Illustration 13 : Organisation du module de transport solide dans ETC (Brochot et al., 1998)

Ce module traduit le fonctionnement des torrents dans le modèle. L'apport solide est d'abord comparé à la capacité maximale de transport :

- s'il est supérieur, le supplément est considéré comme devant se déposer. Il alimente ainsi un volume de sédiments accessibles à tout moment à l'érosion ;

- s'il est inférieur, l'écoulement s'alimente dans le volume de sédiments disponibles pour satisfaire sa capacité maximale de transport. Si cette réserve n'est pas suffisante, il y a possibilité d'érosion du lit du torrent lui-même par le biais d'une formule spécifique.

5.1.1. Mécanismes élémentaires d'ajustement du profil en long

Le profil en long est, avec le régime hydrologique d'un cours d'eau, une grandeur caractéristique pour étudier la dynamique fluviale. La stabilité dans le temps du profil en long révèle que le cours d'eau est en équilibre.

Sa variation dans l'espace est le plus souvent liée à des variations de transport solide provenant de causes externes ou à des variations des débits liquides.

Les perturbations d'origine anthropique (aménagements de protection contre les crues, ouvrages de franchissements des cours d'eau, extractions de matériaux alluvionnaires) ou naturelles (glissements de terrains) portent principalement sur la pente et sur les débits solides et liquides :

- si la pente est trop faible, il y aura dépôt jusqu'à ce que la pente soit assez forte pour assurer le transit,

- Si la pente est trop forte, il y aura érosion jusqu'à ce que la pente assure le seul transport solide amont

5.1.2. Variations de pente le long d'un cours d'eau

La pente décroît habituellement d'amont en aval, sous l'effet de trois causes :

- l'usure du matériau ;

- le triage : les granulométries plus petites sont transportées plus facilement et plus souvent que les éléments plus grossiers ; c'est le phénomène du charriage partiel ;

- l'accroissement du débit liquide : les affluents d'aval, affluents de plaine, fournissent plus d'eau que de matériaux.

5.1.3. Cassures de pente sans apports externe

Dans une rupture de pente, par exemple à l'arrivée dans une plaine littorale, le charriage des galets s'amoindrit et la rivière change de caractéristiques de transport. La rupture peut être brutale ou progressive. Il est fréquent qu'elle s'accompagne d'une

divagation intense, car cette divagation correspond à l'étalement des dépôts des matériaux grossiers.

La cassure de pente peut se déplacer vers l'amont ou vers l'aval. Si les éléments fins sont beaucoup plus volumineux que le charriage grossier, le point de cassure remonte vers l'amont. Si les éléments fins sont moins volumineux, la cassure se déplace vers l'aval.

Le tronçon aval est en équilibre si les matériaux qu'il reçoit sont acheminés jusqu'à la mer et repris par le transport littoral sous l'effet de la houle. Si la rivière s'allonge en mer, la rivière va très lentement s'exhausser.

5.1.4. Apports latéraux d'éboulis ou de torrents

En bassin versant de montagne, il est fréquent que les torrents apportent une quantité importante de matériaux. Cela induit un déficit des débits liquides devant la masse de matériaux disponibles.

A l'aval de la perturbation, la pente dans le tronçon va alors augmenter pour rétablir l'équilibre (augmentation de la capacité de transport). Il s'ensuit un exhaussement à l'amont du tronçon.

5.1.5. Interaction entre transport solide et morphologie d'un cours d'eau

Les perturbations des équilibres morphologiques peuvent provoquer des changements du style morphologique du cours d'eau et vice versa. Ce changement est évident pour les rivières largement divagantes qui, une fois aménagées, sont contraintes en largeur par des endiguements.

La transition tressage-méandrement est un signe caractéristique de perturbations. Le tressage est un signe d'excédents relatifs de matériaux. Le méandrement traduit au contraire un certain déficit relatif.

Inversement un accroissement des apports solides peut favoriser le passage d'un style à méandres à un style en tresse. Comme le résume parfaitement le guide méthodologique de l'Agence de l'Eau RMC (1999) « *la modification artificielle de la géométrie du lit perturbe localement les conditions du transport solide car la géométrie du lit est la résultante des conditions de transport solide* ».

5.2. INFORMATIONS QUALITATIVES

5.2.1. Profil en long du « fond extrême »

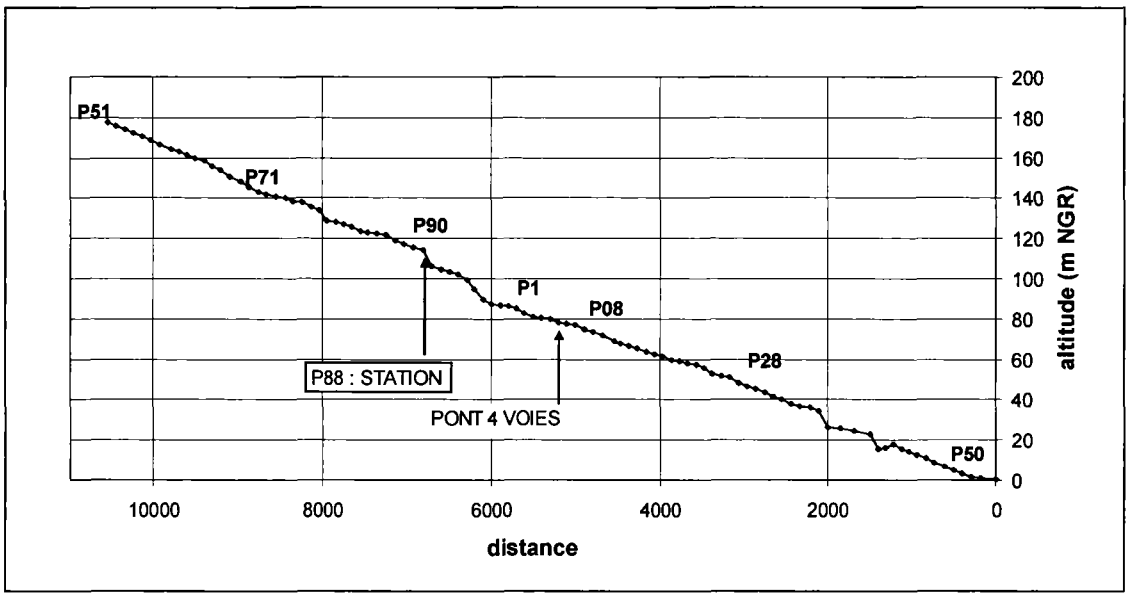


Illustration 14 : Profil en long du « fond extrême » de la Rivière du Mât entre la passerelle, la RN2 (4 voies) et la mer en 2007

Hormis l'embouchure, il est possible de distinguer sur ce profil en long, au moins, deux sections particulières (Illustration 14) :

- la section P1 qui se situe en aval immédiat du pont de la RN2,
- La section P88 qui se situe au droit de la station hydrométrique (barrage, ancienne RN2). Cette section constitue une section stable qui peut être considérée comme un point fixe.

5.2.2. Profil en long du « fond moyen »

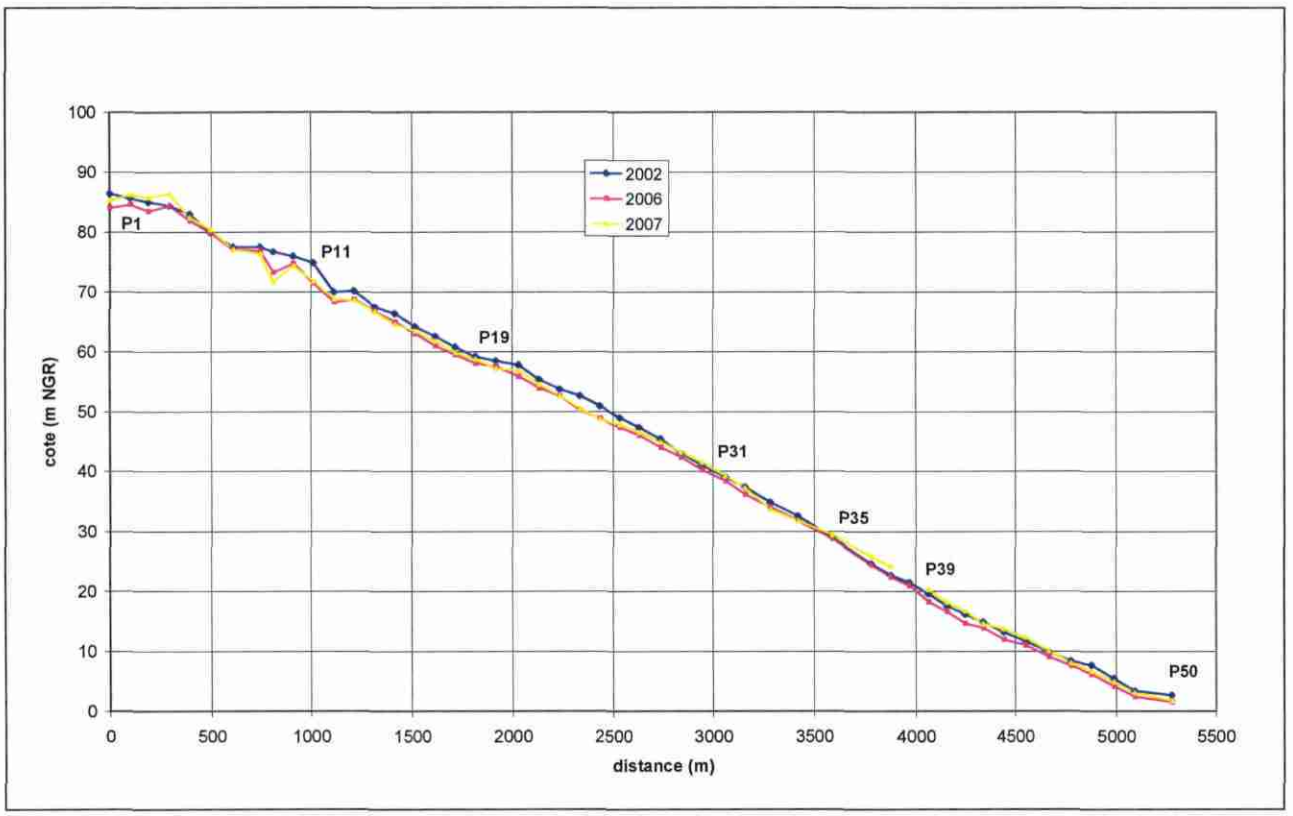


Illustration 15 : Evolution du profil en long du « fond moyen » de la Rivière du Mât entre la RN2 (4 voies) et la mer entre 2002 et 2007

L'Illustration 15 permet de constater que le fond moyen :

- s'est abaissé en amont du profil P35, principalement entre 2002 et 2006,
- s'est « engraissé » en aval de ce profil, principalement entre 2006 et 2007.

5.2.3. Evolution du lit en plan

L'Illustration 16 et l'Illustration 17 permettent de :

- constater une érosion (creusement) au droit du lit mineur jusqu'au profil P35 et des dépôts dans le lit majeur,
- cerner l'évolution du lit en plan, analyse qui est toutefois traitée plus en détail dans le volume 2/5.

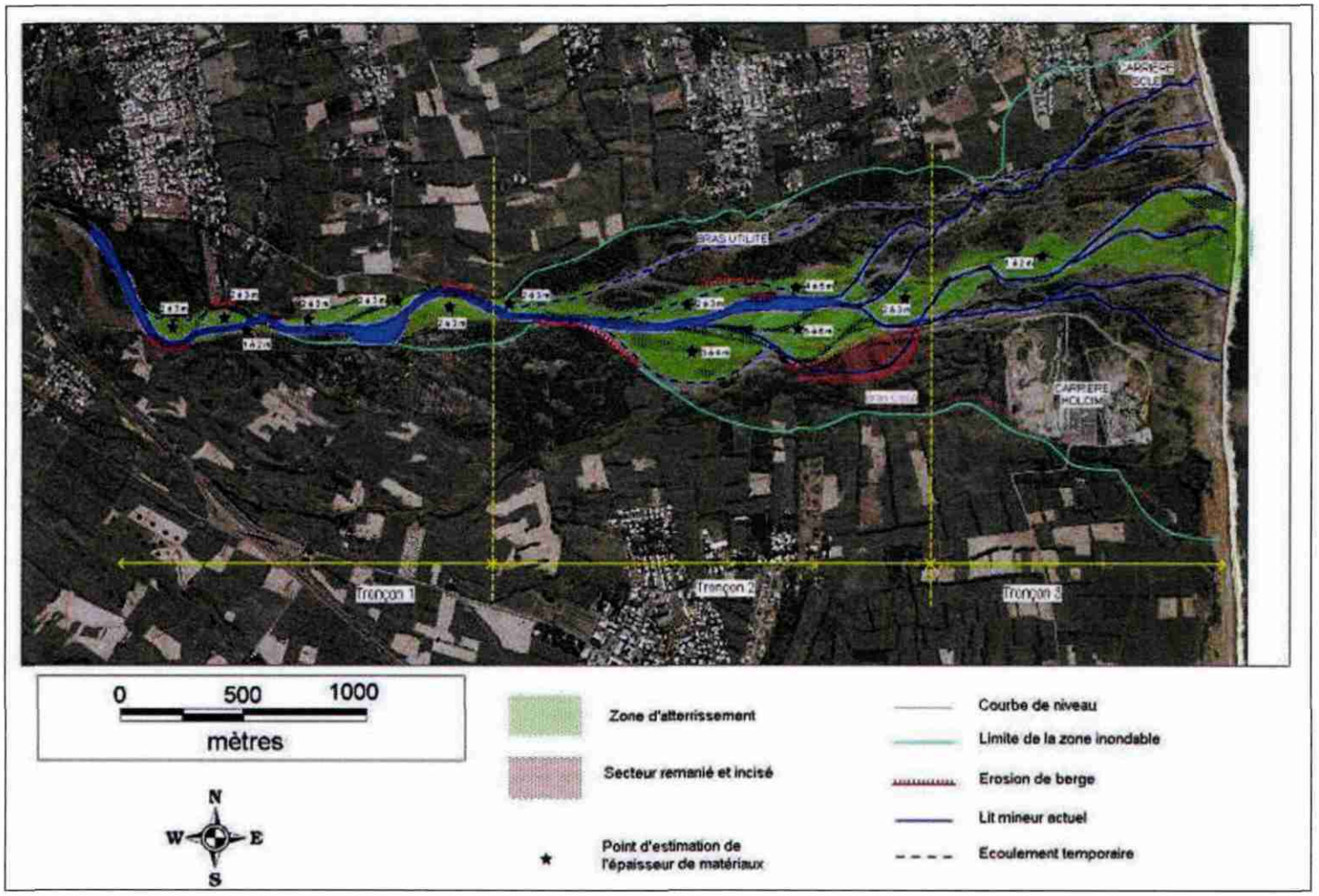


Illustration 16 : Observations réalisées en avril 2006 des zones d'érosion et dépôts consécutives aux crues de février - mars 2006

Cette évolution se traduit notamment par une réduction de la longueur du lit « en tresse » peu à peu remplacé par un lit « en méandres » en amont du profil P35. Ce phénomène est mis en évidence par le tracé des zones d'érosions de berges (en rouge). Les dernières crues ont ainsi attaquées directement les berges, successivement en rive droite puis en rive gauche.

L'exploitation des MNS a permis de calculer les différentiels de volume situés dans le lit entre les années 2002 et 2006 et 2007 (le linéaire aval a été décomposé en trois tronçons :

- Tronçon 1 entre profil P1 (pont RN2) et profil P19 (début de l'élargissement du lit),
- Tronçon 2 entre profil P19 et profil P35 (début des zones de dépôts et du lit à bras multiples),
- Tronçon 3 en aval du profil P35.

Les résultats sont présentés dans l'Illustration 19.

5.2.4. Prélèvements dans le lit

Depuis 2001 les prélèvements de matériaux dans le lit vif de la Rivière du Mât sont interdits. Seuls les prélèvements en terrasses alluviales sont autorisés. L'Illustration 20 récapitule les volumes déclarés et volumes prélevés, estimés par la DDE, sur la période 1980-2000. On constatera d'après les estimations de la capacité maximale réalisées qu'un volume de 100 000 m^3 n'est fourni par la rivière que 6 six années sur 15. En 2007, les prélèvements autorisés étaient de 130 000 m^3. Il semble toutefois qu'une partie, au moins, de ces prélèvements ont eu lieu entre le profil P32 et le profil P36.

Il faut également noter qu'une grande partie des installations se situent, non pas en lit majeur mais en lit moyen. En effet celles-ci ont été traversées par Gamède (Illustration 18) qui peut être considérée comme une crue sensiblement inférieure à la décennale.

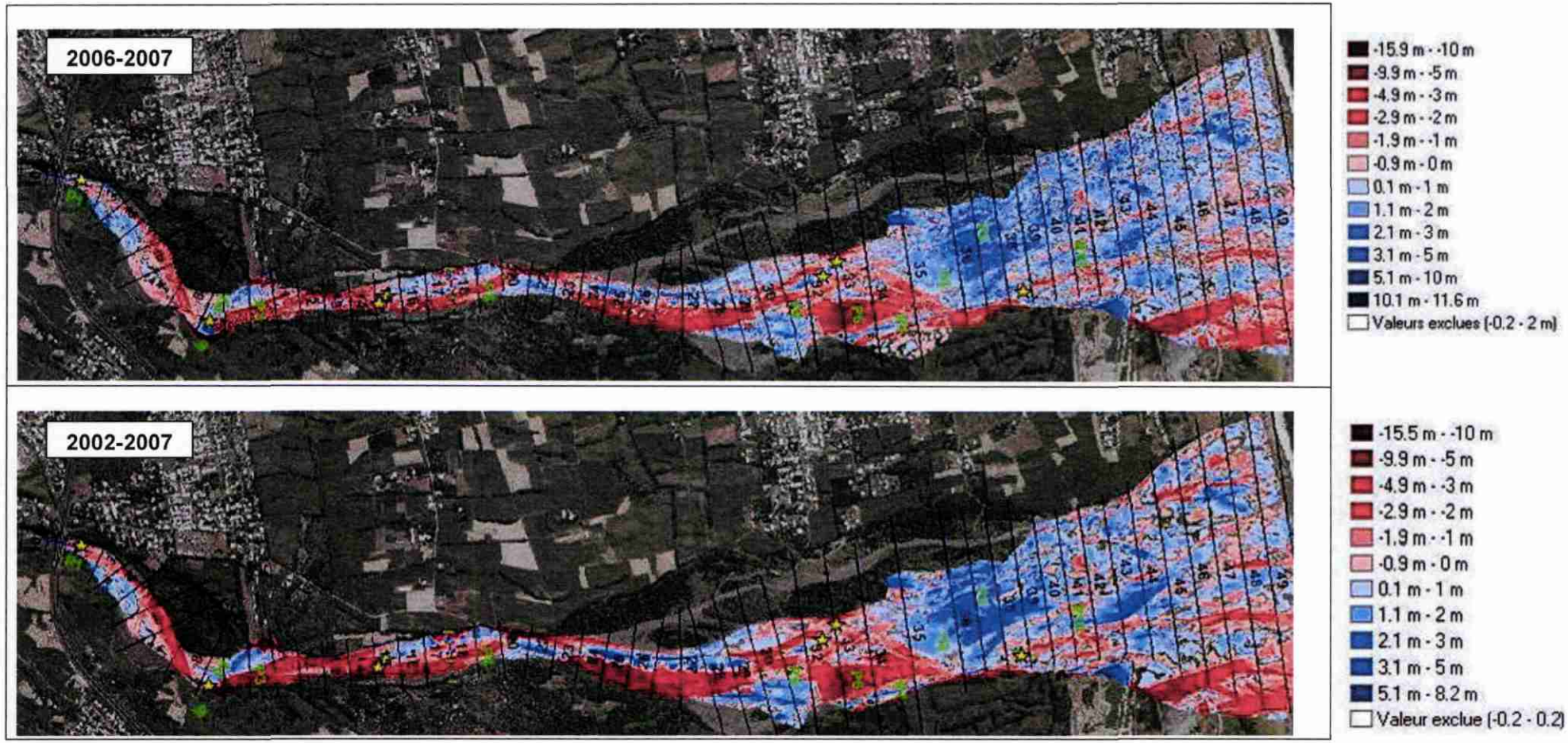


Illustration 17 : Différentiel d'altitude du lit (en rouge abaissement, en bleu exhaussement) sur la partie aval de la Rivière du Mât

Illustration 18 - Capture de la zone d'exploitation de la carrière par la Rivière du Mât lors de Gamède

Le lit mineur a d'ailleurs complètement changé de trajectoire à la suite de cet évènement. Après Gamède, les exploitants ont réalisés une digue, de solidité toute relative, permettant une mise hors d'eau de leur périmètre d'exploitation. Cette opération se ramène, hydrauliquement parlant, à une réduction sensible du lit que l'on peut, à la lumière des derniers évènements, considérer comme « lit mineur ». Il peut s'ensuivre, lors des prochaines crues significatives, une surélévation de la ligne d'eau pouvant occasionner des débordements, notamment en rive gauche.

5.3. INTERPRETATION

En conduisant le raisonnement depuis l'amont et en considérant que la rivière ne peut transporter plus que la quantité de sédiments disponible, on peut remarquer que la capacité maximale de transport des sections intermédiaires de la Rivière du Mât (aval confluence – station) est sensiblement équivalente à la somme des capacités maximales de transport des sections amont de la Rivière du Mât et de la Rivière Fleurs Jaunes. Il paraît ainsi possible de supposer que l'ensemble des apports solides amont vont pouvoir transiter lors des crues, aux volumes de stockage intermédiaire près, jusqu'à la station.

En aval de la station (cf. section 6), la capacité maximale de transport est à contrario très faible. Toutefois, cela ne signifie pas que la rivière est incapable de transporter les matériaux provenant de l'amont mais qu'elle ne dispose pas de sédiments de taille restreinte (cf. granulométrie, Illustration 9). La rivière ne coule donc pas sur ses

	Zone1 : amont profil 19			Zone2 : entre P19 et P35			Zone3 : aval P35			Total Z1+Z2+Z3		
Période	Volume +	Volume -	Cône alluvial volume	Volume +	Volume -	Cône alluvial volume	Volume +	Volume -	Cône alluvial volume	Volume +	Volume -	Cône alluvial volume
2007-2006	66 779	-356 942	-290 162	170 897	-586 209	-415 312	913 163	-458 945	454 218	1 150 839	-1 402 095	-251 256
2007-2002	50 107	-447 458	-397 351	176 397	-707 068	-530 671	780 904	-549 229	231 675	1 007 407	-1 703 755	-696 348
2006-2002	17 222	-193 577	-176 356	64 317	-187 415	-123 098	91 471	-344 691	-253 219	173 010	-725 682	-552 673

Illustration 19 : Différentiel de volume de sédiments en partie aval de la Rivière du Mât entre 2002-2006 et 2006-2007.

Rivière	1979	1980	1981	1982	1983	1984	1985	1986	1987	1988	1989	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999
Rivière St-Étienne																	281 000				
											480 000			500 000	500 000	500 000	500 000				
Rivière des Galets	89766	127123	91241	101888	98064	90847	28820	18350													
	400 000	400 000	400 000	400 000	400 000	400 000	400 000	400 000			600 000										
	de 1966 à 1983 : 175 000 à 370 000 par an					485 000 à 770 000 par an															
Rivière du Mât	26260	35305	36090	26490	16325	21148	28820	18350									306 832				
		50 000	50 000	50 000	50 000	50 000	50 000	50 000			400 000				350 000	350 000	350 000				
Rivière des Remparts																	26 000	44 000	13 360		
													160 000						400 000		
Rivière des Pluies	26500	18481	39064	63390	36972	21600	28757	21453			150 000		150 000	400 000		200 000					
	de 1965 à 1990 : 750 000												entre 1991 et 1995 : 800000								
Ravine Patates à Durand																	2 223				
Ravine du Chaudron																	46 397				
																	150 000				

Estimations DDE
Volumes déclarés
Données DDE
Volume autorisé
Données SOGREAH

Illustration 20 : Données recueillies sur les volumes de matériaux extraits en m^3 dans les rivières de la Réunion

alluvions, car il n'y en a pratiquement plus (Illustration 21) : elle a réalisé un tri granulométrique et emporté toutes les alluvions « petites et moyennes » vers l'aval.

Ainsi, toutes les alluvions disponibles, celles provenant de l'amont et celles restant dans le lit, ne permettent pas d'atteindre la capacité maximale de transport. A cet endroit, en aval du seuil de la prise d'irrigation où est installée la station hydrométrique, la rivière coule sur des coulées de laves difficilement érodables et elle ne peut se charger en sédiment afin d'atteindre sa capacité maximale de transport, capacité augmentée par les apports de débits non saturés en sédiments provenant du Bras des Lianes.

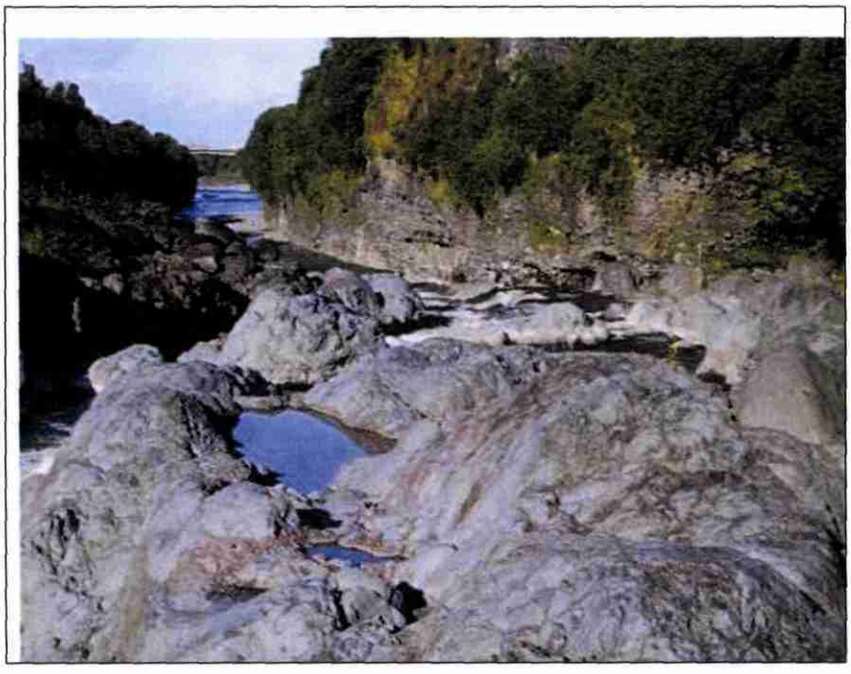


Illustration 21 : Photographie du lit de la Rivière du Mât entre la station hydrométrique et la RN2 (4 voies).

A l'aval du pont de la RN2, la rivière retrouve un lit comportant des zones érodables et va ainsi augmenter son transport solide en affouillant son lit mineur et en érodant les berges. Cette augmentation de la charge solide va perdurer jusqu'à ce que la pente soit plus faible ou que le cours d'eau s'élargisse et que la capacité maximale de transport réelle diminue à nouveau.

Les différentes observations qualitatives suivantes confirment cette interprétation :

- la diminution de la granulométrie entre la section 6 et la section 3
- le creusement du lit mineur entre le profil 1 et le profil P35,

- le dépôt en aval de ce profil,
- le changement de comportement du lit en aval de la RN2 : passage de lit en tresse à lit en méandres.

5.4. BILAN VOLUMETRIQUE GLOBAL

Sur un tronçon donné, il peut être intéressant d'effectuer un bilan volumétrique sur une période donnée qui s'exprime ainsi :

Volume vers aval = apports amont + variations du lit – extractions

Avec :
- volume vers aval = volume disponible pour le transport vers l'aval ;
- apports amont = apports solides en provenance de l'amont;
- variations du lit = volume libéré par l'abaissement du lit (positif) et/ou piégé par l'exhaussement (négatif);
- prélèvements = volumes extraits.

Si l'on tente de réaliser un bilan à l'aide des différentiels de volumes de sédiments mesurés au moyen des MNS entre septembre 2002 et 2006 et entre 2006 et 2007, on obtient une estimation qui montre une cohérence entre les volumes évalués en entrée de chaque zone et les volumes pouvant être potentiellement transportés hors de chaque zone (** y compris prélèvements de 130 000 m3 réalisés aux environs du profils P35.

Illustration 22).

*Le calcul du bilan sur la période septembre 2002-2006 est explicité, à titre d'exemple, sous l'** y compris prélèvements de 130 000 m^3 réalisés aux environs du profils P35.*

Illustration 22. Les apports solides de la crue de novembre 2002 ont été ajoutés aux apports de la période 2003-2006.

En 2007 lors de Gamède, le changement de lit mineur, via le site d'exploitation de la carrière, a du profondément perturber le fonctionnement de ce cours d'eau, ce qui rend particulièrement aléatoire la réalisation du bilan de transport dans la mesure toute une partie de la crue n'a pas emprunté le lit majeur en aval du profil P40. De ce fait des érosions et/ou des dépôts non comptabilisés ont pu survenir au droit de cette zone.

En réalisant la même démarche que précédemment, en 2007 et en considérant les pentes obtenues à partir du fond moyen 2007 (calculs des sections aval, annexe 2), il y aurait eu :

- en aval du pont de la RN2, 620 000 m^3 provenant de l'amont, dont 320 000 provenant de la Rivière du Mât et le reste provenant de la Rivière Fleurs Jaunes,

- en aval du profil P19, le volume à transporter serait d'environ 900 000 m^3 avec une capacité maximale de transport inférieure (791 000 m^3). Cette différence peut s'expliquer par une pente d'écoulement supérieure avant et pendant la crue ou par l'incertitude sur les volumes mesurés et/ou sur la capacité maximale de transport,

- en aval du profil P35, la capacité maximale de transport (1,1 Mm^3) est sensiblement identique au volume à évacuer (1,1 Millions de m3) ; En effet le différentiel de volume fait apparaître une valeur de 445 000 m3 mais parmi ceux-ci 130 000 m^3 seraient des prélèvements réalisés par les carriers au droit des profils P32 à P36.

- en aval enfin, la capacité maximale de transport (0,83 Millions de m^3) est supérieure au volume à évacuer (0,66 Millions de m3).

La perte globale en sédiment en 2007 a été évaluée, par le MNS, à 250 000 m^3 dont 120 000 par érosion naturelle qui sont à comparer avec une perte calculée de 220 000 m^3.l

Les deux bilans réalisés à l'aide des formules de la capacité maximale de transport paraissent cohérent avec les résultats du MNS, même s'il existe quelques différences par tronçons.

Cette cohérence permet de considérer que les estimations réalisées sont plausibles et que la Rivière du Mât fonctionne à sa capacité maximale de transport.

L'Illustration 12, qui résume cette capacité maximale par tronçon, fournit une estimation annuelle de ce transport. Elle permet également de constater, en considérant une pente constante sur la partie avale, une érosion permanente en aval de la 4 voies sauf les années de crues exceptionnelles (Hyacinthe et 1998), années où les apports sont positifs et peuvent atteindre lors de Hyacinthe 450 000 m^3

		ZONE 1 : amont P19			ZONE 2 : entre P19 et P35			ZONE 3 : aval P35		
Période	Volume entrant d'après section 8 a	Différentiel de volume *b*	volume total *a+b*	Capacité maximale de la zone 1 *c*	Différentiel de volume *d*	volume total e=min(*a+b,c)+d*	Capacité maximale de la zone 2 *f*	Différentiel de volume *g*	volume total min(*e,f)+g*	Capacité maximale de la zone 3
09/2002-2006	1 175	175	1 350	1364	120	1 470	1.463	250	1.713	1.605
2006-2007	617	290	910	791	285**	1 076	1 113	-455	658	835

** *y compris prélèvements de 130 000 m³ réalisés aux environs du profils P35.*

Illustration 22 : Bilan des entrées / sorties en sédiments établis (en milliers de m³) d'après les mesures du MNT et les évaluations de transports de la zone aval à la RN2

Exemple : Entre septembre 2002 et 2006, il y aurait eu :

- *en aval du pont de la RN2, 1.715 Millions de m³ (a) provenant de l'amont, dont la moitié provenant de la Rivière du Mât, le reste provenant de la Rivière Fleurs Jaunes (*Illustration 10*),*

- *en aval du profil P19, le volume est à augmenter de la variation de volume stocké en zone 1(b) soit +175 000 m³, soit 1,35 Millions de m3. Ce volume a pu être évacué vers la zone 2 dans la mesure où la capacité maximale de transport fait état de 1,36 Millions de m³ (c),*

- *en aval du profil P35, le volume est à augmenter de la variation de volume stocké en zone 2 soit +120 000 m³ (d), soit 1,47 Millions de m3. Ce volume a pu être évacué vers la zone 3 dans la mesure où la capacité maximale de transport fait état de 1,46 Millions de m³(f),*

- *en aval, le volume est à augmenter de la variation de volume stocké en zone 3 (g) soit +250 000 m³, soit 1.7 Millions de m3. Ce volume a pu être évacué vers l'aval dans la mesure où la capacité maximale de transport fait état de 1.6 Millions de m³.*

Le différentiel global de volume mesuré (MNS) s'élève à 545 000 m³ pour un volume calculé de 430 000 m³.

6. Conclusion

D'après les calculs réalisés et les hypothèses envisagées, la Rivière du Mât possède :

- une capacité annuelle moyenne de transport de sédiments d'environ 130 000 m^3 dans sa partie amont, capacité sensiblement équivalente à son principal affluent qu'est la Rivière Fleurs Jaunes,

- une capacité annuelle moyenne de transport de sédiments d'environ 250 000 m^3 dans sa partie intermédiaire avec une capacité annuelle variant entre 0 (2003) et 1 000 000 m^3 (2006) et avec seulement une année sur trois ou elle dépasse 110 000 m^3. Cette capacité maximale fournit des résultats compatibles avec une érosion estimée de l'ordre de 100 à 200 m^3/ha.

- une capacité de transport pouvant atteindre 1 500 000 m^3 lors des évènements exceptionnels (Hyacinthe). Le rapport entre la potentialité d'apports solides annuels lors d'une année exceptionnelle et celle d'année moyenne peut ainsi être évalué à 6 conformément à l'évaluation déjà existante,

- dans sa partie aval une capacité actuelle variant, suivant la pente et la section considérées, entre 1 200 000 et 1 600 000 m^3, cette capacité n'inclus pas le transport en suspension (perdu en mer pour le bilan).

Ces estimations indiquent, si l'on ne retient que la partie amont correspondant au cirque de Salazie et que l'on admet que la rivière fonctionne à sa capacité maximale, que l'érosion spécifique peut atteindre 7000 tonnes par kilomètre carré par an.

La capacité de transport de la partie intermédiaire, régulée par quelques stockages intermédiaires limités, n'est pas suffisante, hors crues exceptionnelles, pour permettre une stabilité du lit en aval du seuil de l'ancien barrage d'irrigation (station hydrométrique).

La rivière va, en effet, chercher à saturer son débit liquide avec des sédiments qui ne seront pas disponibles dans cette partie du cours d'eau. Il va s'ensuivre une érosion et des attaques de berges en aval immédiat de cette zone c'est-à-dire en aval de la RN2. Cette tendance est confirmée par les affouillements et érosions de berges observées et par la tendance à la formation de méandres.

En aval du profil P35, la capture lors de Gamède de la zone d'exploitation de la carrière rend plus délicate l'analyse de l'évolution du lit. Cette dérivation a modifiée l'équilibre naturel de la rivière et a favorisée le dépôt d'alluvions dans l'ancien lit moyen. Après la crue, la partie de ce chenal a été supprimé afin de permettre la reprise

des activités de la carrière Holcim. La suppression de ce chenal équivaut globalement, tout au moins temporairement, à une surélévation du fond du lit et à une réduction de la pente de l'écoulement. La modification de ces deux paramètres entrainant automatiquement une surélévation de la ligne d'eau, il s'ensuit que les risques de chenalisation et de débordement en rive gauche sont de ce fait aggravés.

Par ailleurs, une nouvelle rupture du cordon séparant la carrière Holcim de la rivière ne peut être exclue lors de la prochaine crue significative. Elle entrainerait l'inondation des installations Holcim et pourrait entraîner une érosion rapide de la frange de terrain séparant cette zone d'extraction de la mer avec possibilité d'invasion marine jusqu'à ce point, en particulier si l'extraction atteint, à cet endroit, une cote située sous le niveau de la mer.

Globalement sur la période récente, on a donc assisté à :

- un enfoncement du lit et à des érosions massives des berges entre la RN2 et le profil P35,

- à un exhaussement du lit à l'aval.

Cette configuration va probablement s'accentuer jusqu'à l'obtention d'un nouvel équilibre ou jusqu'à l'apparition d'une crue majeure car seule susceptible d'apporter un surplus de sédiments.

Suivant les caractéristiques mécaniques et la résistance à l'érosion du substratum situé en fond de lit, cette érosion peut se répercuter, éventuellement jusqu'au seuil, en amont de la RN2 via une érosion régressive.

En aval, a contrario, les dépôts peuvent s'accentuer et favoriser une surélévation des lignes d'eau en crue. Celle-ci, source potentielle de débordement latéral, peut être grandement aggravée par la suppression du dernier lit mineur emprunté comme ce fut le cas après Gamède où les exploitants de carrière ont réaménagé leur site en réalisant des digues dont la résistance paraît toutefois illusoire.

Conformément aux recommandations prônées par la mission d'expertise effectuée en 2006 par, il serait souhaitable de continuer à acquérir des connaissances dans ce domaine. Pour cela le BRGM préconise la réalisation d'un ou plusieurs bassins versants pilotes. Ceux ci seraient équipés de plusieurs stations hydrométriques et de plusieurs enregistreurs pluviométriques, voire d'images radar, afin de déterminer au mieux la pluviométrie et la lame ruisselée. Parallèlement un suivi régulier de la topographie permettrait de quantifier les débits solides. En raison de la présence des seuils de prise d'eau réalisés pour le transfert Est-Ouest, la Rivière du Mât et/ou la rivière de Patate à Durand, qui possède une fosse à sédiments en amont, pourraient être retenues dans le cadre d'un tel projet.

Bibliographie

Agence de l'eau Rhône-méditerranée-Corse (1999) - La gestion des rivières Transport solide et atterissements. Guide méthodologique.

Aubié S. et Cruchet M. (2003) - Les mouvements de terrain de grande ampleur dans les cirques et les grandes ravines. Inventaire des mouvements de terrain historiques. Programme 2003. Rapport BRGM/RP-52913-FR, 3 tab., 3 fig, 1 ann., 17 p.

Bougère J. (1988) - Rapport d'activité et rapport scientifique, programme quadriennal 1985-1988, *Eaux superficielles et souterraines à La Réunion, érosion et bilan de* surface. Tranche 1986-1987, 64 p.

Bougère J (1988) - Aperçu sur l'érodibilité des andosols cultivés à La Réunion, *in* Les *andosols de l'île de La Réunion. Préparation d'un programme de recherches* pluridisciplinaires. Séminaire de Saint-Denis, 24 mai 1er juin 1988, CIRAD, CNRS, INRA, ORSTOM, Université

Bougère J. (1989) Rapport d'activité et rapport scientifique, Programme quadriennal 1985-1988, Eaux superficielles et souterraines à La Réunion, Érosion et bilan de surface, Tranche 1988, 40 p, Université de La Réunion.

BRGM (1989) - *Inventaire des inondations, érosion et mouvements de terrains* principaux à La Réunion lies au cyclone Firinga (29 janvier 1989) ayant affecte les aménagements collectifs ou individuels. Rapport BRGM 89REU14.

BRGM (Juin 2004) – Projet de recherche sur l'érosion, le transport solide, et la dynamique torrentielle des rivières de La Réunion – Analyse bibliographique - Rapport BRGM/RP- 53234-FR.

BRGM (Juin 2004) – Projet de recherche sur l'érosion, le transport solide, et la dynamique torrentielle des rivières de La Réunion – Apport de matériaux dans les rivières de la Réunion - Rapport BRGM/RP- 53235-FR.

BRGM (Juin 2004) – Projet de recherche sur l'érosion, le transport solide, et la dynamique torrentielle des rivières de La Réunion – Extraction de matériaux dans le lit des cours d'eau - Rapport BRGM/RP- 53236-FR.

S. Brochot, L. Marchi et M. Lang (2002) – L'estimation des volumes des laves torrentielles : méthodes disponibles et application au torrent du poucet (Savoie). Bull. Eng. Geol. Env. (2002) 61:389-402.

S. Brochot (1998) – Données d'érosion torrentielle (ablation des versants et production de sédiments des bassin versants). Cemagref, division Erosion torrentielle neige et avalanches.

S. Brochot (1998) - Stage Correction torrentielle RTM 28 09 –02 10 98. Module conception du dispositif de prévention / protection. Cemagref Grenoble ETNA. Versions 1 & 2.

S. Brochot, V. Koulinsky et G. Rovera (1998) – Approches globales pour l'estimation de l'érosion torrentielle, apports des versants et production de sédiments.

S. Brochot (1997) – Modèle d'érosion en bassin versant montagneux. Cemagref, division Erosion torrentielle neige et avalanches.

S. Brochot (1993) – Définition de l'érosion torrentielle (apports des versants) en Haut-Vallespir (Pyrénées orientales, France). Dossier de la revue géographie alpine n°11 1993.

Chevalier P., Hébert A., Kaufman T. , Moyen J.-F. (2001) - Cartographie de l'aléa "érosion des sols" à La Réunion - Phase 1 : caractérisation et cartographie (1/100 000 à 1/50 000) des phénomènes érosifs. Rapport BRGM 01REU27.

Chevalier P., Y. De La Torre, Hébert A., Kaufman T. , (2002) - Cartographie de l'aléa "érosion des sols" à La Réunion - Phase 2 : caractérisation et cartographie (1/100 000 à 1/50 000) des phénomènes érosifs. Rapport BRGM 02REU22.

Chevalier P., Cruchet M., Mardhel V., Rançon J-Ph. et Rossi F. (2001) – Cartographie à 1/100 000 des aléas naturels à la Réunion. Rapport BRGM /RP 50918 FR – 2001 SGR/REU 12, 38 p., 1 fig., 5 tab., 1 carte hors texte.

Ducret J.M. (2001) - Contribution à la cartographie de l'aléa "érosion pluviale superficielle agricole" à La Réunion, Université de La Réunion - document APR, 84 p

ETRM (2004) – Analyse de la dynamique de deux rivières de la Réunion. Contribution d'année 1 dans le cadre du projet de recherche DYNTOR du BRGM.

Garcin M., Oliveros C, Cruchet M., Solages S. (1996) – Étude de la filière de matériaux et minéraux industriels à la Réunion. Analyse des ressources potentiellement renouvelables dans le lit des principales ravines. Rapport BRGM R 39391. Mars 1997.

Humbert M., Pasquet R. et Stieltjes L. (1981) – Les risques géologiques dans les cirques de Salazie et de Cilaos (Ile de La Réunion). Rapport BRGM 81 SGN 543, 101 p., 2 pl. h.t.

Humbert M. (1985) - Les systèmes érosifs des grandes ravines "Au Vent" à l'Ile de La Réunion. Leurs conséquences sur l'aménagement du littoral et des hauts. Volume I. Rapport BRGM 85 SGN121 GEG, 67p.

Humbert M. (1986) - Les systèmes érosifs des grandes ravines "Au Vent" à l'Ile de La Réunion. Leurs conséquences sur l'aménagement du littoral et des hauts. Volume II. Rapport BRGM 86 SGN132 GEG.

LCHF (1984) - Monographie de la Rivière du Mât – Eléments d'hydrologie, d'érosion et de transports sédimentaires.

M. Meunier (1999) – Les torrents du Nord-Ouest de la Martinique. Hydrologie des crues, érosion, hydraulique et dynamique torrentielles. Etudes du Cemagref, série équipements pour l'eau et l'environnement, n°24.

Perret S. (1993) - Propriétés physiques, hydriques et mécaniques de sols andiques de La Réunion, facteurs d'évolution des horizons culturaux, implications agronomiques et écologiques. Publication CIRAD, 279 p.

Pinchinot H., (1983) - Erosion et mouvements de terrains du secteur de Grand Ilet (cirque de Salazie) - rapport préliminaire. Rapport BRGM 83 REU18

Raunet M. (1991) - Le milieu physique et les sols de l'île de La Réunion. Conséquences pour la mise en valeur agricole. Publication CIRAD, 438 p.

Raunet M. (1988) - Aperçu sur le milieu physique et les sols andiques de La Réunion, Préparation d'un programme de recherches pluridisciplinaires, séminaire de Saint-Denis mai-juin 1988, pp 53-75.

Rivière B. (2002) – Approche méthodologique de la caractérisation des bassins versants de la Réunion en regard des phénomènes d'érosion, mémoire du DESS "Sciences et gestion de l'environnement tropical", Université de la Réunion, 111 p. et annexes.

SOGREAH – (Mars 2004) – Estimation des volumes fréquentiels de crues – Bassin versant de la Rivière du Mât – DYNTOR – BRGM – Région Réunion- Département de la Réunion – Rapport N° 2850098 R2

SOGREAH – (Septembre 2006) – Rivière du Mât – Travaux d'urgence suite aux crues de février et mars 2006 - Propositions de principes généraux et de recommandations – DDE de la Réunion – Rapport N° 4700348

SOGREAH – (Mars 2007) – Rivière du Mât – Travaux d'urgence suite aux crues de février et mars 2006 - Propositions de principes généraux et de recommandations – DDE de la Réunion – Rapport complémentaire N° 4700348 R2

SOGREAH – (Janvier 2008) – Rivière du Mât – Etude de pertinence des travaux sur le secteur de Pelvoisin en rive gauche de la Rivière du Mât – DDE / SEECL - Ile de la Réunion – Rapport N° 4700575

Annexe 1

Estimation de la capacité maximale de transport suivant la formule de Meyer Peter

PROFIL	R. Mât Amont		R. Fleurs Jaunes			R. du Mât				
Section	14	Amont confluence	15.1	15.2	amont confluence	Aval confluence R.F.J	ESCALIER	9	8	STATION
ANNEE	FORMULE MEYER PETER CAPACITE MAXIMALE DE TRANSPORT (milliers de m3)									
1993	2	873	0	455	281	677	600	1 074	2	790
1994	0	245	0	111	63	185	177	313	0	211
1995	0	253	0	116	62	188	182	321	0	211
1996	0	145	0	68	37	108	104	183	0	120
1997	0	159	0	69	40	119	115	203	0	136
1998	76	864	49	487	334	704	579	1 051	189	841
1999	0	218	0	96	52	161	157	277	0	181
2000	0	112	0	56	31	84	78	140	0	96
2001	0	201	0	105	66	158	140	250	0	185
2002	0	704	0	385	253	560	469	853	34	666
2003	0	40	0	17	7	28	30	51	0	29
2004	0	233	0	117	71	180	161	289	0	208
2005	0	238	0	103	56	177	175	304	0	194
2006	0	1 065	0	595	406	860	705	1 283	111	1 033
2007	0	881	0	484	327	712	587	1 069	0	850
1993/2007	78	6 231	49	3 264	2 085	4 903	4 259	7 660	336	5 751
MIN	0	40	0	17	7	28	30	51	0	29
MAX	76	1 065	49	595	406	860	705	1 283	189	1 033
MOYENNE	5	415	3	218	139	327	284	511	22	383
09/2002-2006	0	1 576	0	832	540	1 245	1 071	1 927	111	1 464
HYACINTHE	149	1 243	69	725	524	1 037	821	1 505	462	1 260

PROFIL	R. du Mât aval RN2						
Section	6	5	4	3	2.2	2.1	1
ANNEE	CAPACITE MAXIMALE DE TRANSPORT (milliers de m3)						
1993	546	503	4	473	18	0	138
1994	108	16	0	51	0	0	0
1995	104	25	0	54	0	0	0
1996	63	33	0	42	0	0	4
1997	65	0	0	23	0	0	0
1998	678	846	240	686	405	263	555
1999	85	0	0	30	0	0	0
2000	58	20	0	36	0	0	0
2001	127	110	0	109	0	0	0
2002	509	582	67	498	162	23	313
2003	5	0	0	0	0	0	0
2004	129	127	0	114	18	0	68
2005	78	47	0	42	0	0	14
2006	849	1 079	168	874	349	100	686
2007	658	779	0	658	99	0	414
TOTAL	4 062	4 167	480	3 689	1 050	386	2 192
MIN	5	0	0	0	0	0	0
MAX	849	1 079	240	874	405	263	686
MOYENNE	271	278	32	246	70	26	146
09/2002-2006	1 061	1 253	168	1 030	367	100	769
HYACINTHE	1 111	1 545	582	1 197	941	685	1 196

Annexe 2

Calcul de la capacité maximale de transport, par la formule Sogreah Lefort, de la partie aval RN2 avec pentes de 2007

FORMULE SOGREAH LEFORT
CAPACITE MAXIMALE DE TRANSPORT (milliers de m3)

	R. Mât (amont)	R. Fleurs Jaunes	R. Mât (int.)	R. Mât (Aval RN2)		
Section	**14**	**15.1**	**8**	**3**	**2**	**1**
1993	257	182	401	671	1 061	795
1994	37	19	32	164	299	224
1995	34	18	29	164	306	229
1996	26	17	33	98	177	132
1997	23	11	19	106	194	146
1998	347	291	831	798	1 096	822
1999	28	14	23	140	263	197
2000	18	11	16	74	132	99
2001	61	43	97	157	247	185
2002	245	192	450	602	872	654
2003	1	0	1	22	48	36
2004	67	45	103	181	289	216
2005	38	23	45	157	295	221
2006	443	339	986	976	1 337	1 003
2007	323	255	617	791	1 113	835
1993/2007	1 951	1 460	3 684	5 101	7 728	5 794
MIN	1	0	1	22	48	36
MAX	443	339	986	976	1 337	1 003
MOYENNE	130	97	246	340	515	386
TOTAL	1 951	1 460	3 684	5 101	7 728	5 794
HYACINTHE	609	506	1 548	1 252	1 609	1 208

Centre scientifique et technique
3, avenue Claude-Guillemin
BP 36009
45060 – Orléans Cedex 2 – France
Tél. : 02 38 64 34 34

Service géologique régional Réunion
5, rue Ste Anne BP 906
97478 – St Denis Cedex
France
Tél. : 02 62 21 22 14

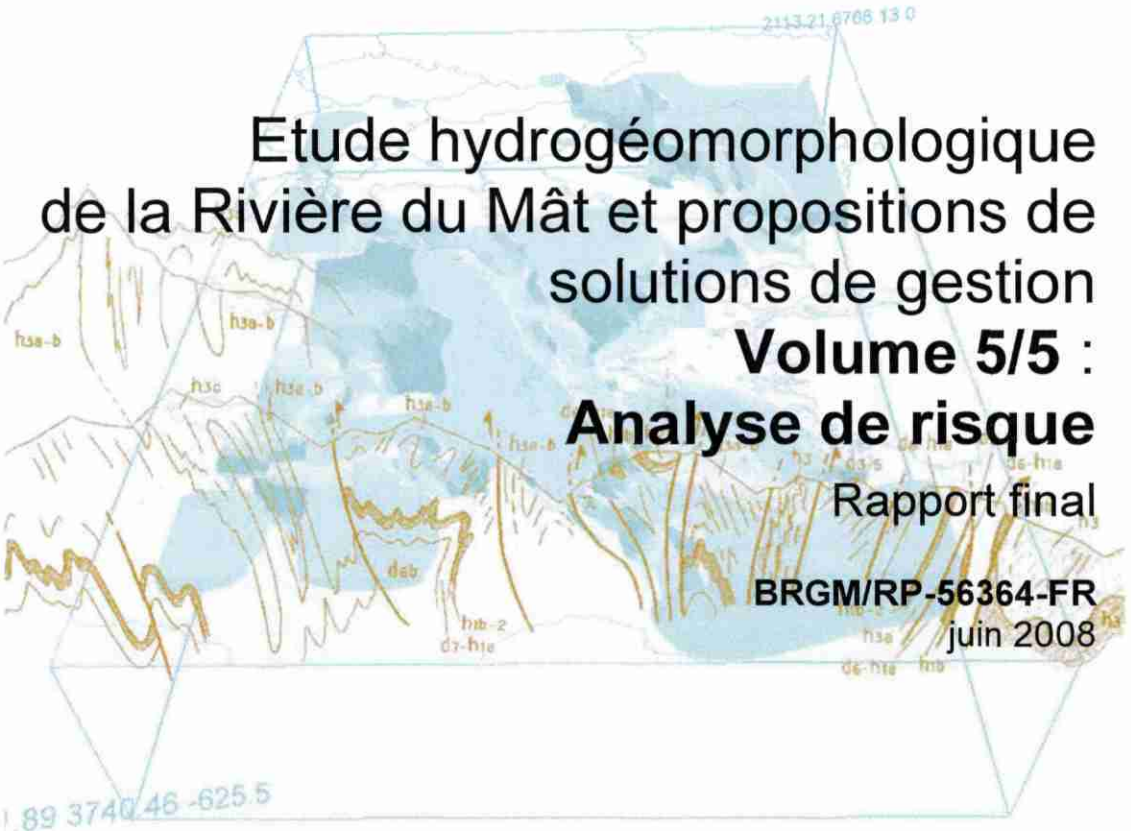
Document public

Etude hydrogéomorphologique de la Rivière du Mât et propositions de solutions de gestion

Volume 5/5 : **Analyse de risque**

Rapport final

BRGM/RP-56364-FR
juin 2008



Géosciences pour une Terre durable
brgm

Document public

Etude hydrogéomorphologique de la Rivière du Mât et propositions de solutions de gestion
Volume 5/5 : Analyse de risque

Rapport final

BRGM/ RP-56364-FR
juin 2008

Étude réalisée dans le cadre des projets
de Service public du BRGM 2007 07RISY032

Y. DE LA TORRE ; Ph. STOLLSTEINER et A. MALBRUNOT

Vérificateur :	**Approbateur :**
Nom : M. GARCIN	Nom : JL NEDELLEC
Date :	Date :
Signature :	Signature :

En l'absence de signature, notamment pour les rapports diffusés en version numérique, l'original signé est disponible aux Archives du BRGM.

Le système de management de la qualité du BRGM est certifié AFAQ ISO 9001:2000.

Géosciences pour une Terre durable
brgm

Mots clés : Enjeux, Erosion, Gestion, Hydrogéomorphologie, Inondation, Risque.

En bibliographie, ce rapport sera cité de la façon suivante :
De la Torre Y. ; Stollsteiner Ph. et Malbrunot A. (2008) – Etude hydrogéomorphologique de la Rivière du Mât et propositions de solutions de gestion – Volume 5/5 : Analyse de risque. Rapport BRGM RP-56364-FR ; 67 p.

© BRGM, 2007, ce document ne peut être reproduit en totalité ou en partie sans l'autorisation expresse du BRGM.

Synthèse

Dans le cadre de la directive européenne relative à la gestion des inondations du 26 novembre 2007 et suite à la mission d'expertise de l'Inspection Générale de l'Environnement de juillet 2006 relative à la prévention des inondations à La Réunion, la DDE de la Réunion met en place un Plan de Gestion des Risques d'Inondation (PGRI) et souhaite disposer des éléments de **compréhension du fonctionnement hydrogéomorphologique des principales rivières à enjeux de La Réunion afin de pouvoir mettre en œuvre des solutions de gestion**.

Cette première étude, cofinancée par la DDE Réunion et la dotation de Service Public du BRGM, s'attache à la **Rivière du Mât** qui présente une exposition importante aux inondations et aux érosions de berges, notamment dans sa partie aval.

Basée sur les références méthodologiques connues ainsi que sur les spécificités de l'île et du bassin versant concerné, cette première étude du PGRI revêt un caractère expérimental dont le but est de d'asseoir l'approche méthodologique pour les autres rivières à enjeux.

L'étude est développée en 5 volumes dont le présent et dernier se propose, suite à l'analyse du fonctionnement de la rivière, de conduire une analyse de risque sur la partie aval de la Rivière du Mât et de proposer des solutions de gestion.

Les enjeux présents sont de 4 types principaux (cartographie issue des PLU). Leur croisement avec le zonage des aléas (PPRI pour les inondations) permet d'identifier les zones exposées par type d'enjeux :

- diverses **zones urbaines** et d'urbanisation future de St-André et Bras-Panon ;
- **infrastructure routière** majeure de la RN2 (pont et secteur de Paniandy) ;
- diverses **zones agricoles** sur les deux rives ;
- diverses **zones naturelles** y compris celles d'intérêt économique (carrière Holcim) et touristique (Lieu dit Rivière du Mât).

Le croisement des zone exposées avec les types d'enjeux permet en outre de distinguer plusieurs niveaux de risques, à savoir :

- un **risque fort** pour les secteurs habités des zones urbaines et le pont de la RN2 ;
- un **risque moyen** pour les secteurs non habités mais présentant des infrastructures importantes et/ou fortement fréquentés (RN2 à Paniandy et carrière Holcim) ;

- un **risque faible** pour les secteurs agricoles et naturels.

En outre, un profil en long « objectif » est évalué afin de servir à la gestion du niveau du lit avec un profil haut maximal pour prévenir les inondations liées à un exhaussement du lit (curages préventifs) et un profil bas minimal pour prévenir le déchaussement des ouvrages (pont de la RN2, seuil-barrage).

Enfin, sur la base de ces éléments et d'une analyse des types et des scenarios de protections possibles, des solutions de gestion sont choisies et proposées :

- pour les zones urbaines, protection par digue longitudinale ou prévention par acquisition des terrains à l'amiable ou modification des documents d'urbanisme (la solution dépend notamment du coût relatif des ouvrages et de la valeur économique des secteurs concernés) ;

- pour la RN2, une protection des fondations du pont par renforcement des appuis ou ancrage d'un seuil de réengravement et protection du secteur de Paniandy par implantation d'une digue ou d'un seuil en arrière de la berge ;

- pour les zones agricoles et naturelles, un suivi des niveaux du lit (et remodelage en fonction du profil « objectif ») et des berges, la mise en place d'un système d'alerte et d'évacuation, notamment pour les secteurs très fréquentés comme la carrière HOLCIM, et gestion raisonnée des extractions (profondeur, zones d'extraction) pour éviter la salinisation des eaux souterraines.

Ces propositions sont des principes de gestion et d'aménagement. Le chiffrage de ces mesures et les dimensions des ouvrages devant être validées ultérieurement.

Enfin, comme indiqué dans les conclusions du vol. 4 de l'étude, les connaissances scientifiques sur la dynamique torrentielle de l'île pourraient être améliorées en réalisant des bassin-versants expérimentaux (celui de la Rivière du Mât et/ou de Patates à Durand) mieux équipés en stations hydrométriques et pluviométriques et faisant l'objet d'un suivi topographique.

Sommaire

1. Introduction 9

2. Cartographie des zones exposées aux inondations et érosion de berges 11

2.1. INVENTAIRE DES ZONES A ENJEUX ACTUELS ET FUTURS 11

2.2. DEFINITION DES ZONES INONDABLES ET D'EROSION DE BERGE 13
2.2.1. Zones inondables 13
2.2.2. Zones d'érosion de berge 15

2.3. ZONES EXPOSEES ET ANALYSE DE RISQUE 17

3. Définition d'un profil en long « objectif » 21

3.1. DEFINITION ET METHODOLOGIE 21

3.2. ANALYSE DE L'EVOLUTION RECENTE DE L'ALTITUDE DU LIT 21

3.3. TENDANCE D'EVOLUTION FUTURE DU LIT EN ALTITUDE 27

3.4. PROPOSITION D'UN PROFIL EN LONG « OBJECTIF » 28
3.4.1. Estimation des niveaux d'eau en crue centennale 28
3.4.2. Niveaux de fondation des ouvrages et des protections existantes 29
3.4.3. Proposition d'un profil « objectif » du lit extrême 31

4. Propositions de solutions de gestion 37

4.1. PRINCIPES DE LA GESTION DES RISQUES 37

4.2. TYPES DE PROTECTION 38
4.2.1. Chenal curé 39
4.2.2. Ouverture de terrasses basses, arasement de bancs et remodelage du lit vif 39
4.2.3. Apport extérieur mécanique de matériaux 43
4.2.4. Seuils en U et en V 43
4.2.5. Promotion des érosions de berges 45
4.2.6. Protection longitudinale 45
4.2.7. Protection par épis 46
4.2.8. Importance des dimensions de la protection et impact sur le profil en long de la rivière 48

4.3. PROPOSITIONS DE SOLUTIONS DE GESTION 51

5. Conclusion 59

Liste des illustrations

Illustration 1 – Inventaire des enjeux à partir des PLU de St-André et Bras-Panon 12

Illustration 2 – Zones inondables issues des PPRI et largeur du plan d'eau (Manning Strickler) 14

Illustration 3 – Calcul des lignes d'eau selon Manning Strickler 15

Illustration 4 – Zones d'érosion de berge 16

Illustration 5 – Synthèse des zones exposées et du risque 17

Illustration 6 - Zones exposées aux inondations ou aux érosion de berge 19

Illustration 7 – Niveau de risque des zones exposées 20

Illustration 8 - Evolution du profil en long du fond extrême du lit de la Rivière du Mât Secteur amont du pont de l'ex-RN2 (source Sogreah) 22

Illustration 9 - Evolution du profil en long du fond extrême du lit de la Rivière du Mât du pont de l'ex-RN2 au Pk 2,5 (source Sogreah) 23

Illustration 10 - Evolution du profil en long du fond extrême du lit de la Rivière du Mât en aval du pont de la RN2 (Pk 1,2 à l'exutoire) - (source Sogreah) 24

Illustration 11 - Eléments topographiques utilisés (source Sogreah) 25

Illustration 12 - Evolution des pentes du fond extrême en aval du pont de l'ex RN2 (source Sogreah) 26

Illustration 13 - Coupe longitudinale du seuil aval du pont de l'ex RN2 (source Sogreah) 29

Illustration 14 - Coupes de la pile profilée en aval du seuil de l'ex RN2 (source Sogreah) 30

Illustration 15 - Cotes du fond extreme « objectif » proposé (source Sogreah) 32

Illustration 16 - Profil en long « objectif » sur le secteur intermediaire (Pont ex RN2 au PK 2,6) (source Sogreah) 34

Illustration 17 - Profil en long « objectif » sur le secteur aval (PK 2,0 à l'exutoire) (source Sogreah) 35

Illustration 18 – Principes de gestion des risques 37

Illustration 19 - Types de protections envisageables en fonction du contexte morphologique 38

Illustration 20 - Terrasses végétalisées ou en cours de végétalisation 40

Illustration 21 - Exemple de remodelage du lit sur le profil P5 40

Illustration 22 - Position des berges et des terrasses végétalisées (source Sogreah) 42

Illustration 23 - Principe d'affouillement en aval d'un seuil 44

Illustration 24 – Exemple de protection longitudinale (rive gauche de la Rivièredes Galets) 45
Illustration 25 - Epis marteaux en rive droite de la Riviere des Pluies 47
Illustration 26 - Epi marteau en rive droite de la Rivière des Galets 47
Illustration 27 - Synthèse des résultats sur l'évaluation des effets de la largeur et de la mise en place de seuils sur la Rivière des Galets 49
Illustration 28 - Variation de la pente du fond moyen du lit en fonction de la largeur de l'endiguement 50
Illustration 29 – Synthèse du risque et des principe de gestion à adopter 52
Illustration 30 – Proposition de solutions de gestion retenues à partir des scénarios Sogreah 55

Liste des annexes

Annexe 1 Scenarios d'aménagement proposés par Sogreah 61

1. Introduction

Dans le cadre de la directive européenne relative à la gestion des inondations du 26 novembre 2007 et suite à la mission d'expertise de l'Inspection Générale de l'Environnement de juillet 2006 relative à la prévention des inondations à La Réunion, la DDE de la Réunion met en place un Plan de Gestion des Risques d'Inondation (PGRI) et souhaite disposer des éléments de **compréhension du fonctionnement hydrogéomorphologique des principales rivières à enjeux de La Réunion afin de pouvoir mettre en œuvre des solutions de gestion**.

Cette étude, cofinancée par la DDE Réunion et la dotation de Service Public du BRGM, s'attache à la **Rivière du Mât** et ses principaux affluents (Fleurs Jaunes, Bras des Cavernes et Bras des Lianes). Basée sur les références méthodologiques connues[1] ainsi que sur les spécificités de l'île et du bassin versant concerné, cette première étude du PGRI revêt un caractère expérimental dont le but est de d'asseoir l'approche méthodologique pour les autres rivières à enjeux.

D'un linéaire de 36 km et drainant un bassin versant de 146 km², la Rivière du Mât est l'un des cours d'eau majeur de La Réunion. Elle recueille notamment les eaux du cirque de Salazie et présente des risques d'inondation et d'érosion de berges importants.

L'étude est développée dans les 5 volumes suivants :

- Volume 1/5 : Synthèse bibliographique ;
- Volume 2/5 : Evolution géomorphologique ;
- Volume 3/5 : Analyse hydrologique et pluviométrique ;
- Volume 4/5 : Estimation du transport solide ;
- **Volume 5/5 : Analyse de risque.**

Le présent rapport s'attache à la dernière partie de l'étude, c'est-à-dire l'analyse de risque. Elle se base sur les informations apportées dans les volumes précédents sur le fonctionnement de la rivière pour :

- Qualifier les zones à enjeux et définir les enjeux ;
- qualifier les zones exposées en termes d'érosion et d'inondation ;

---

[1] Approche hydrogéomorphologique pour la cartographie des zones inondables, méthodologie pour l'élaboration des PPRI, Directive Européenne pour la gestion des inondations,...

- définir un profil en long « objectif » ;
- proposer des solutions de gestion adaptée.

La définition du profil en long « objectif » et des solutions de gestion ont fait l'objet de travaux spécifiques réalisés par Sogreah dans le cadre de cette étude[2]. Ces éléments sont repris dans les chapitres dédiés de ce rapport.

Ce volume s'attache uniquement à l'aval de la rivière (agglomérations de St-André et Bras-Panon) où se concentrent les principaux aléas d'inondation et d'érosion liés aux crues. Plus encaissée, la partie amont n'est que peu exposée aux inondations et les problèmes d'érosion relèvent plus globalement de la problématique des mouvements de terrain qui affecte l'ensemble du cirque de Salazie.

[2] Sogreah, 2008 – PGRI de la Rivière du Mât. Assistance technique pour l'élaboration d'un profil objectif et de propositions d'aménagements. AMa/BPt/ADl- n° 4700577, 35 p.

2. Cartographie des zones exposées aux inondations et érosion de berges

2.1. INVENTAIRE DES ZONES A ENJEUX ACTUELS ET FUTURS

Les Plans Locaux d'Urbanisme (PLU) des communes de St-André et Bras-Panon[3] permettent de connaître l'occupation actuelle du territoire et les zones futures réservées pour l'urbanisation, en accord avec le Schéma de Cohérence Territorial de l'Est de La Réunion (SCOT-Est).

L'Illustration 1 fait apparaître 3 types principaux d'enjeux :

- les zones urbaines : enjeu humain fort en raison de la présence d'habitation ;
- les zones agricoles : enjeu économique ;
- les zones naturelles : enjeux écologique, économique (la carrière HOLCIM est située en zone naturelle) et touristique (zones récréatives).

Il convient en outre de rajouter les infrastructures routières avec la RN2 qui traverse la rivière (pont) et longe les terrasses en rive droite.

[3] A ce jour, seul le PLU de Bras Panon est approuvé.

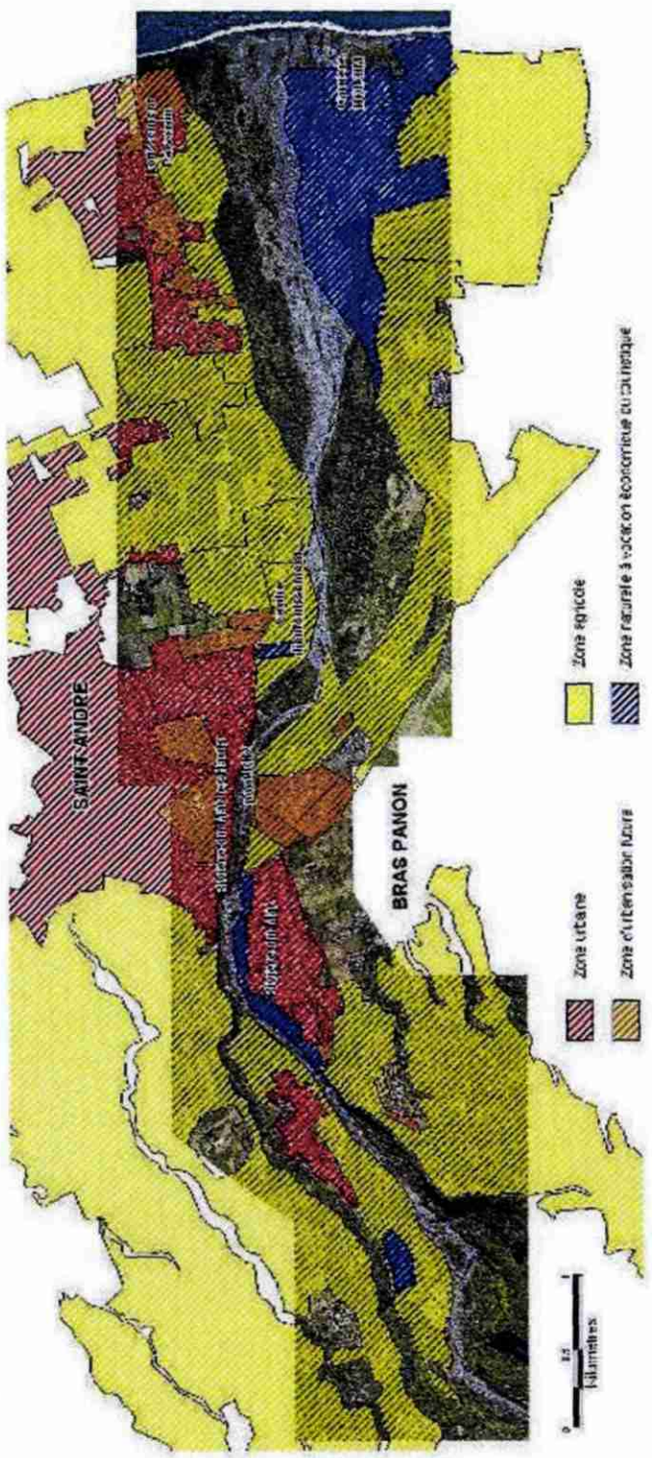


Illustration 1 – Inventaire des enjeux à partir des PLU de St-André et Bras-Panon

2.2. DEFINITION DES ZONES INONDABLES ET D'EROSION DE BERGE

2.2.1. Zones inondables

La cartographie des zones inondables est fournie par la DDE et s'appuie sur les zonages des Plans de Prévention des Risques Inondation (PPRI) existants [4] (Illustration 2).

Un calcul simplifié des lignes d'eau a, en outre, été réalisé afin de vérifier que les modifications des sections d'écoulement liées aux dernières crues n'ont pas modifiées fondamentalement les zones inondables. Ce calcul a été réalisé en utilisant, pour quelques sections aval (Illustration 2), la formule de Manning Strickler en se basant sur la topographie de 2007 :

$$Q = S \times V$$

$$V = K \times i^{1/2} \times R^{2/3}$$

Avec :

K	Coefficient de Manning-Strickler
V	Vitesse moyenne en m/s
i	Pente hydraulique moyenne
S	Section mouillée en m^2
Q	Débit en m^3/s

Les calculs ont été réalisés pour:

- Gamède afin de vérifier la cohérence des résultats avec les observations réalisés,
- la crue centennale (3300 m3/s)

Ils ont été effectués en considérant un coefficient de Manning Strickler global de 25 en amont du profil P32 et de 20 en aval (Illustration 2).

L'Illustration 3 présente les principaux résultats. La largeur du plan d'eau n'inclus pas les zones émergeantes.

[4] A ce jour, seul le PPRI de la commune de Bras Panon est approuvé.

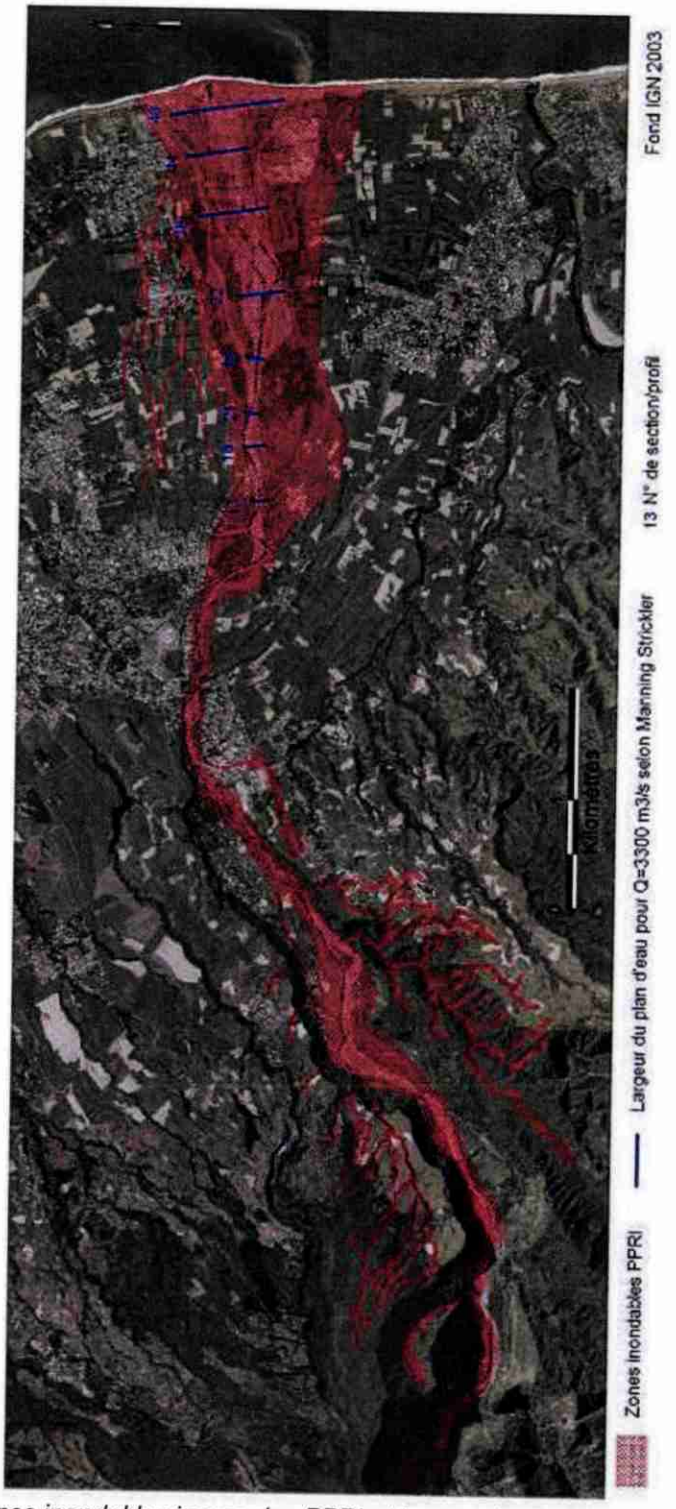


Illustration 2 – Zones inondables issues des PPRI et largeur du plan d'eau (Manning Strickler)

	Gamède Q=1020 m3/s		Crue Centennale Q=3300 m3/s	
Section (N° profil)	Cote m NGR	Largeur du plan d'eau (m) Nombre de bras	Cote m NGR	Largeur du plan d'eau (m) Nombre de bras
P13	66.2	76 1	69.3	140 1
P18	60.2	152 2	61.8	180 1
P21	56.0	107 1	58.0	115 1
P26	47.0	143 2	48.7	170 2
P32	36.4	260 6	37.4	380 4
P38	22.5	325 7	23.6	520 4
P44	12.1	290 6	13.4	505 3
P48	4.2	370 9	5.2	765 5

Illustration 3 – Calcul des lignes d'eau selon Manning Strickler

Il convient toutefois de préciser que ces calculs ont été réalisés :

- sans prise en compte du niveau aval, cela peut conduire, suivant le niveau aval marin de référence, à une légère sous estimation de la ligne d'eau sur le profil le plus en aval (P48),
- en considérant des sections stables.

Il ressort de ces calculs que les zones inondables en l'état actuel sont entièrement inclues dans les zones inondables figurant dans les PPRI (Illustration 2).

2.2.2. Zones d'érosion de berge

La BD Ortho 1997 de l'IGN permet de cartographier la position des berges à cette date et de la comparer avec l'orthophotographie de AIGL de 2007 (cf. volume 2).

L'Illustration 4 fait apparaître des reculs maximums de l'ordre de 150 à 200 m entre les deux dates selon les profils. Une position des berges à +10 ans est présentée selon le principe où l'érosion continuerait de la même manière sur ces secteurs.

Illustration 4 – Zones d'érosion de berge

2.3. ZONES EXPOSEES ET ANALYSE DE RISQUE

Le croisement des enjeux et des aléas permet de déterminer les zones exposées (Illustration 6) et de les hiérarchiser en niveau de risque en fonction de la nature des enjeux (Illustration 5).

La prise en compte des aléas est considérée ici de manière « booléenne », à savoir inondable ou pas, érodable ou pas. La classification en 3 niveaux de risque dépend donc des types d'enjeux exposés aux aléas. Les enjeux humains (habitations) correspondent à un risque fort ; les infrastructures stratégiques à l'échelle régionale à un risque moyen et les zones agricoles et naturelles à un risque faible.

Type d'enjeu	Zones exposées	Exposition aléas	Risque	Justification Risque
Zones urbaines actuelle (y compris urbanisation future)	St-André - aval pont RN2 **[1a]***	Inondation Erosion	Fort	Secteur habité inondable et érodable
	Lotissement Pelvoisin **[1b]**	Inondation Erosion	Fort	Secteur habité inondable et érodable
	St-André – rive gauche aval **[1c]**	Inondation Erosion	Fort	Secteur habité inondable et érodable
	Rivière du Mât les hauts **[1d]**	Inondation	Fort	Secteur habité inondable
Infrastructures routières	Pont RN2 **[2a]**	Erosion	Fort	Infrastructure d'intérêt régional / affouillement
	RN2 à Paniandy **[2b]**	Erosion	Moyen	Infrastructure d'intérêt régional / érosion future potentielle
Zone agricole	Différentes zones sur St-André et Bras-Panon **[3]**	Inondation Erosion	Faible	Bien agricole inondable
Zone naturelle (y compris d'intérêt économique et touristique)	Carrière HOLCIM et Unité de préfabrication GTOI **[4a]**	Inondation Erosion	Moyen	Activité économique d'intérêt régional inondable et érodable
	Lieu dit « Rivière du Mât » **[4b]**	Inondation Erosion	Faible	Zone d'intérêt touristique inondable
	Différentes zones sur St-André et Bras-Panon **[4c]**	Inondation Erosion	Faible	Zone d'intérêt écologique inondable

Illustration 5 – Synthèse des zones exposées et du risque

* La numérotation des zones exposées renvoie à leur localisation en Illustration 6 et Illustration 7.

A noter que le terme « Erosion » concerne ici le recul des berges mais aussi l'abaissement du lit, plus de détails sont donnés sur cet aspect dans le chapitre suivant sur le profil en long de ce secteur de la rivière.

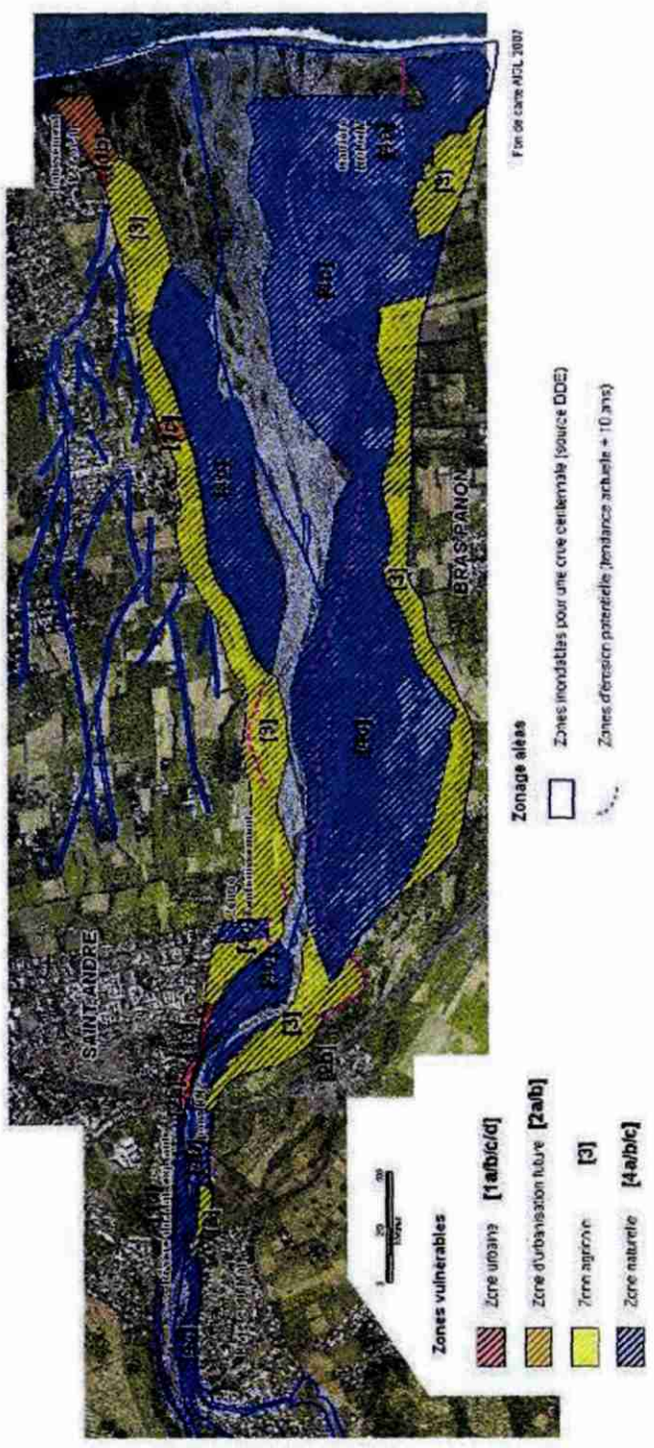


Illustration 6 - Zones exposées aux inondations ou aux érosion de berge

Illustration 7 – Niveau de risque des zones exposées

3. Définition d'un profil en long « objectif »

Ce chapitre reprend les éléments apportés par Sogreah dans le cadre de cette étude (Sogreah, 2008 – réf. en introduction).

3.1. DEFINITION ET METHODOLOGIE

Le profil en long « objectif » que l'on cherche à déterminer correspond à la pente et au niveau altitudinal du lit, si possible le plus proche de l'état « naturel » (c'est-à-dire avant l'implantation des ouvrages actuels), permettant :

- d'éviter les risques d'inondation par submersion sur les secteurs à enjeux : on peut alors parler plutôt de profil en long objectif maximum : en dessous de ce profil, les berges ne sont pas inondables au vu des hauteurs d'eau estimées. A partir de ce profil et au-dessus, les berges à enjeux deviennent inondables ;

- de garantir la stabilité des ouvrages existant dans le lit (piles de ponts, perrés, prises d'eau, etc.) : on peut alors parler plutôt de profil en long objectif minimal : en dessous de ce profil, on a risque d'affouillement ou d'instabilité des ouvrages, au-dessus de ce profil, les ouvrages ne présentent pas de risque de ruine par affouillement.

Ces profils seront définis par tronçons sur la partie aval de la Rivière du Mât (en aval du pont de l'ex RN2 où se situent les principaux enjeux exposés à l'érosion et la submersion. Le seuil situé en aval du pont de l'ex RN2 permet en effet de fixer le lit en amont de ce pont.

3.2. ANALYSE DE L'EVOLUTION RECENTE DE L'ALTITUDE DU LIT

L'altitude du lit passée, actuelle et futur conditionne en grande partie l'aléa inondation par submersion et les risques d'affouillement des ouvrages existants dans le lit.

Les illustrations ci-après indiquent les différents niveaux du fond extrême (FEX) depuis 1976 (plus ancienne topographie récupérée) jusqu'à aujourd'hui (topographie par photogrammétrie de 2007) depuis l'amont du pont de l'ex RN2 jusqu'à l'exutoire. **Le PK0 est situé au droit du pont de l'actuelle RN2** (Illustration 8, Illustration 9, Illustration 10**).**

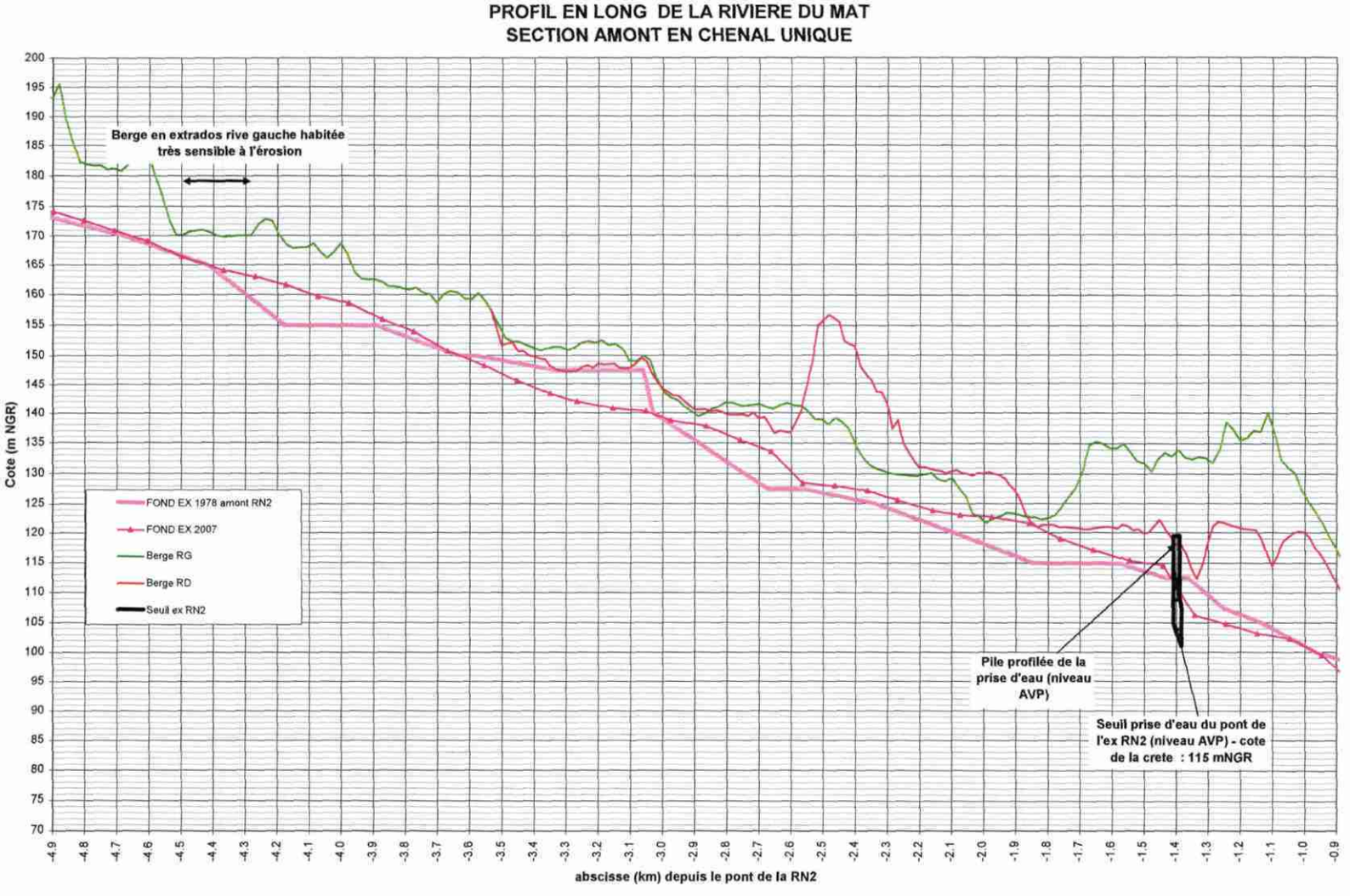


Illustration 8 - Evolution du profil en long du fond extrême du lit de la Rivière du Mât Secteur amont du pont de l'ex-RN2 (source Sogreah)

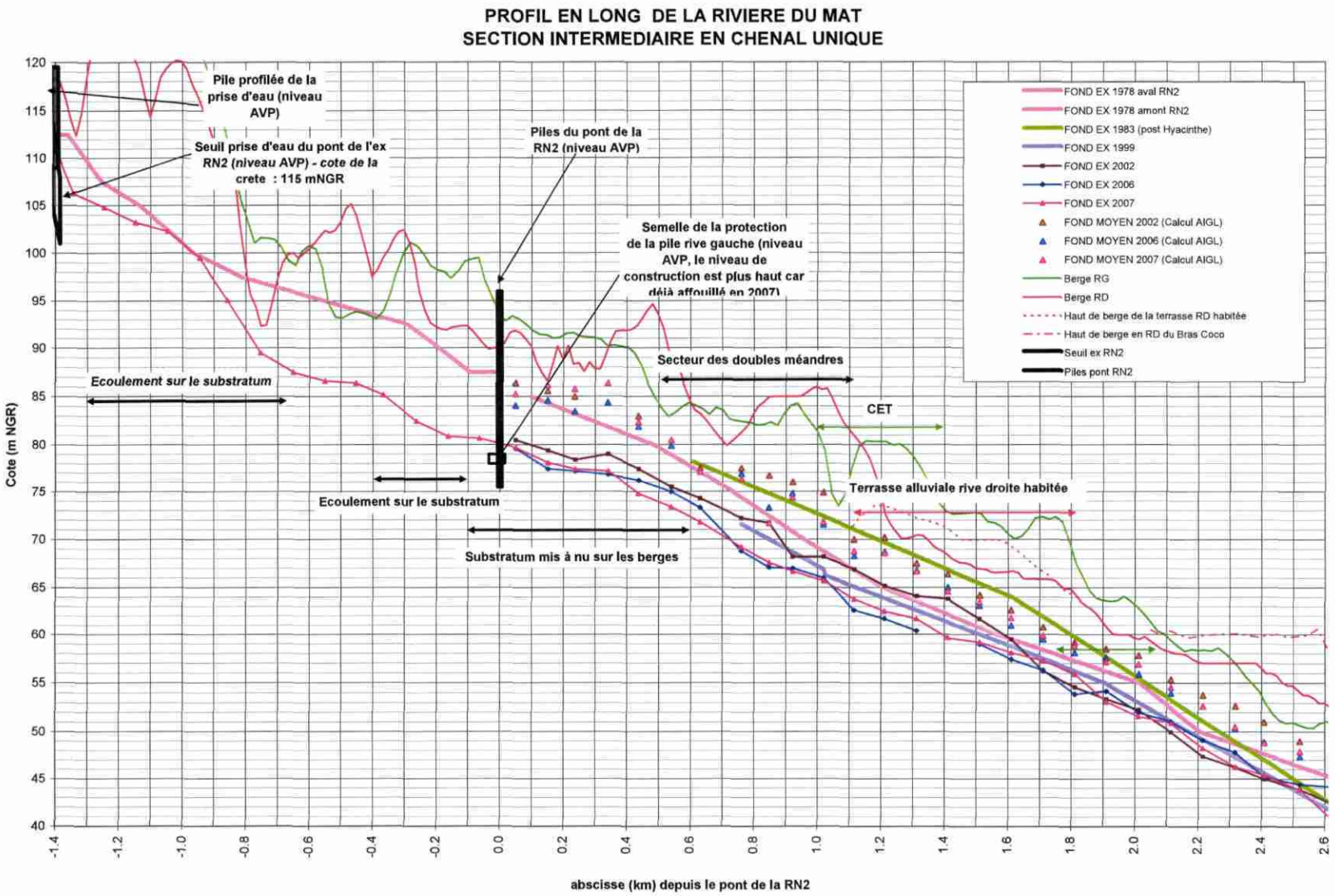


Illustration 9 - Evolution du profil en long du fond extrême du lit de la Rivière du Mât du pont de l'ex-RN2 au Pk 2,5 (source Sogreah)

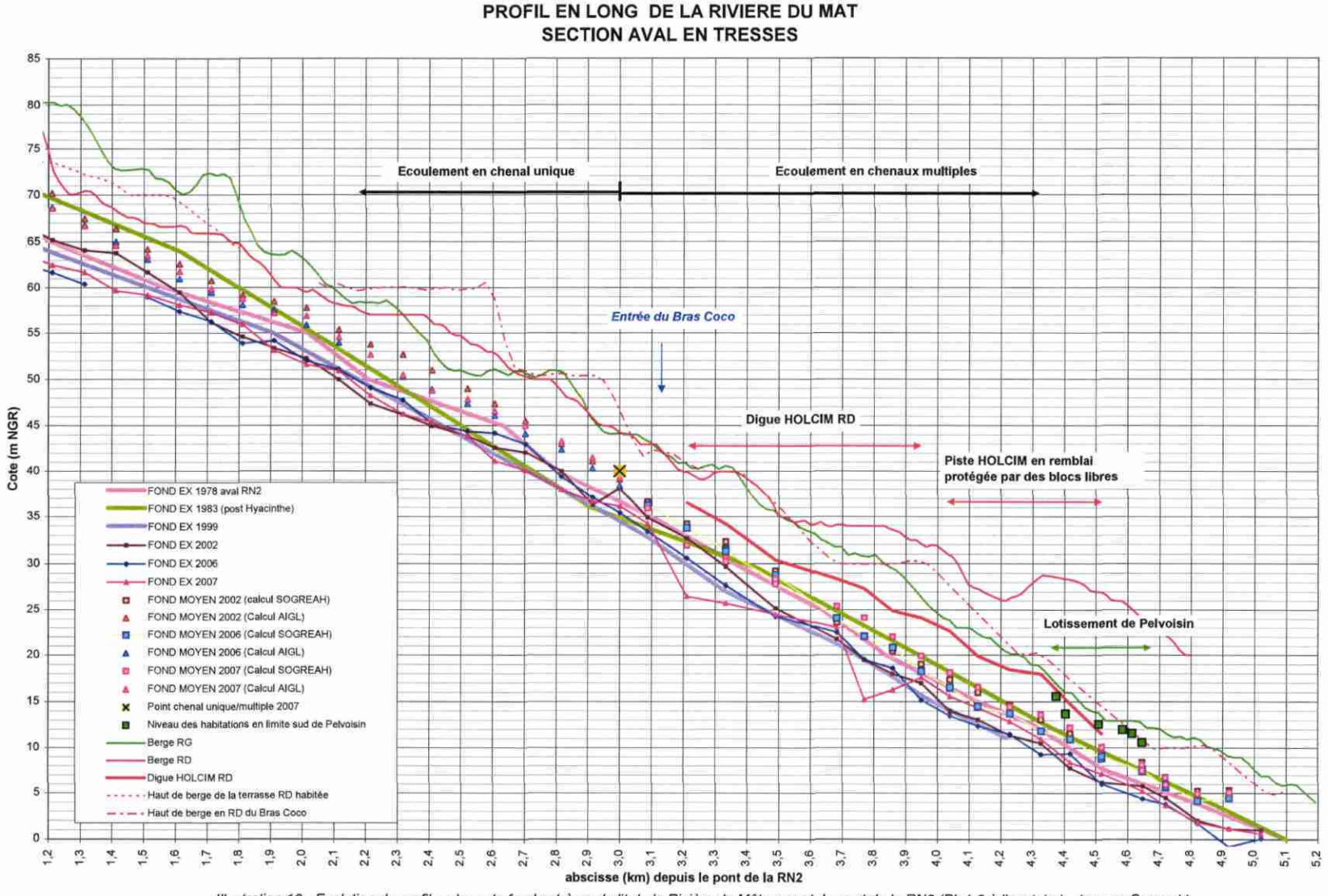


Illustration 10 - Evolution du profil en long du fond extrême du lit de la Rivière du Mât en aval du pont de la RN2 (Pk 1,2 à l'exutoire) - (source Sogreah)

Les données topographiques anciennes sont rares en amont du pont de la RN2 (1978, 2007) et plus nombreuses en aval de ce pont (1978, 1983, 1993, 1999, 2002, 2006 et 2007).

Elles proviennent des sources suivantes (Illustration 11) :

Année	Source	Secteur concerné	Type
1966	Aménagement du périmètre d'irrigation de St-André-Cambuston. Prise d'eau sur la Rivière du Mât – AVP – SOGREAH – Janvier 1966 (R 9170, archive n° 1024)	Prise d'eau en aval du pont de l'ex RN2	FEX
1976	Etude hydraulique du franchissement de la Rivière du Mât – Septembre 1976 – SOGREAH – R12640 – Archive n° 264 DDE/CDOA	Pont de la RN2	FEX
1978	Planches 1/5000 de l'IGN	Tout le linéaire étudié	FEX
1983	Monographie LCHF	Aval du pont de la RN2 jusqu'à l'exutoire	FEX
1993	PT OIT Doublement du pont de la RN2 sur la Rivière du Mât – Etude hydraulique (SOGREAH, décembre 1994, 304071R1, archive n° 262)	Secteur aval d'écoulement en tresses (PK 2, 4 à l'exutoire)	FEX
1999	Talibart P3739 et photogrammétrie	Aval du pont de la RN2 à l'exutoire	FEX
2002	Talibart – photogrammétrie	Aval du pont de la RN2 à l'exutoire	FEX et FM
2006	AIGL	Aval du pont de la RN2 à l'exutoire	FEX et FM
2007	AIGL	Tout le linéaire étudié	FEX et FM

Illustration 11 - Eléments topographiques utilisés (source Sogreah)

Les pentes du fond extrême de la Rivière du Mât ont pu ainsi être estimées depuis le pont de l'ex RN2 (aval du seuil). Trois secteurs de pente homogène ont pu être identifiés :

- de l'aval du seuil de la prise d'eau (PK -1,2) jusqu'à l'aval du secteur où le substratum est apparent (PK +0,9) ou à proximité du lit ;
- du PK +0,6 (fin du substratum apparent ou proche) au PK +2,5 environ (secteur d'écoulement en chenal unique sur les alluvions récentes) ;
- du PK +2,5 à l'exutoire (PK +5,00), secteur d'écoulement en tresses avec fortes divagation du lit sur son cône de déjection.

PENTE DU FOND EXTREME							
Secteur (PK amont – PK aval)	1978	1983	1993	1999	2002	2006	2007
-1,2 → 0,6	1,7 %	1,4 %	--	--	1,15 %	0,9 % (amont du secteur) à 1,93 % (aval)	1,68 à 5,2 à 1,5 % (fond en érosion régressive) sur substraction
+0,6 → 2,5	1,5 %	--	--	1,4 %	Entre 1,55 et 1,72 %	1,35 %	1,43 %
2,5 → 5	1,88 %	1,72 %	1,77 %	1,92 %	--	1,92 %	1,77 %

Illustration 12 - Evolution des pentes du fond extrême en aval du pont de l'ex RN2 (source Sogreah)

La comparaison des altitudes du fond extrême et du fond moyen (Illustration 8) et des pentes (Illustration 12) appellent les observations suivantes :

- **De l'aval du seuil de l'ex RN2 au PK 0,6 environ** : le lit de la Rivière du Mât est dans un processus d'incision plus ou moins marqué selon que le niveau du lit a atteint le substratum ou non.

  En aval immédiat du seuil (PK -1,4), le fond du lit a très peu évolué entre 1966 et 2007 : la rivière s'écoule sur le substratum qui semble ne pas avoir été incisé depuis 1966. De même jusqu'au PK -0,7 (700 m en aval du pied du seuil), le lit n'a pas évolué.

  En revanche, en aval de ce PK, le lit a subi de très fortes incisions. Notamment sous le pont de la RN2, l'incision entre 1976 et 2007 n'a cessé de se poursuivre : le lit atteint aujourd'hui un niveau situé 8 m sous le niveau du lit extrême de 1976. Les études antérieures mentionnent qu'avant 1976, le lit aurait descendu rapidement de quelques mètres en amont du pont de l'ancien CFR (600 m en amont du pont de la RN2 actuelle) en traversant un horizon

tendre situé sur les coulées boueuses (Etude hydraulique du franchissement de la Rivière du Mât, Sept 1976, archive SOGREAH n° 264).

Cette incision sous le pont de la RN2 serait toutefois limitée par la présence de lahars durs situés à 75 – 75,5 m NGR (sondages de l'étude hydraulique du doublement du pont de la RN2, archive SOGREAH N° 262, décembre 1994).

La pente sur ce secteur (aval du seuil à aval du pont de la RN2) est de ce fait relativement irrégulière, le plus généralement comprise entre 1,4 et 1,7 % mais avec des secteurs à 5 % (présence du substratum entre les PK -1,07 et -0,7).

En aval du pont de la RN2, le fond moyen a peu évolué sur ce secteur entre 2002 et 2007. Suite à un léger abaissement entre 2002 et 2006, on observe un léger exhaussement du niveau en 2007 ;

- **Du PK + 0,6 au PK +2,5, la Rivière du Mât s'écoule sur des alluvions récentes en un chenal unique**. Le niveau du fond extrême actuel est le plus bas depuis 1978 (2 à 5 m plus bas) et la pente s'est sensiblement abaissée de 1,5 % et 1,4 %. Cet abaissement de la pente s'explique par une augmentation du méandrement de la rivière, en parallèle de son incision. Le fond moyen s'est également abaissé entre 2002 et 2007. L'abaissement du lit a provoqué la déconnection d'un ancien chenal en rive gauche entre les PK 0,1 et 0,9 ;

- **En aval du PK +2,5 (voire en aval du PK+2),** la pente de la Rivière du Mât augmente sensiblement du fait de la présence du cône de déjection qui offre à la rivière une plus grande largeur de divagation. Elle est proche de 1,8 à 1,9 % sur toute la période de données topographiques (1976-2007).

  L'abaissement du lit entre les PK 2,4 et 4 a provoqué la déconnection d'un ancien chenal (encore en eau en 2003) en rive gauche. La terrasse où passe ce chenal est de plus en plus végétalisée.

  Le niveau du fond extrême à l'exutoire a peu évolué (légère augmentation) entre 2006 et 2007 mais reste encore inférieur au niveau de 1978 (d'environ 1 m), les extractions réalisées dans les chenaux principaux dans les années 90, avaient en effet provoqué un abaissement important : en 1999, le niveau du fond extrême est 2 à 4 m plus bas que le niveau de 1978.

  Le fond moyen sur ce secteur s'est abaissé entre 2002 et 2006 puis a remonté entre 2006 et 2007. Le niveau actuel du fond moyen est légèrement supérieur au fond moyen de 2002.

3.3. TENDANCE D'EVOLUTION FUTURE DU LIT EN ALTITUDE

Au vu des analyses de l'évolution passée, on pourrait s'attendre à :

- une poursuite de l'incision du fond de l'aval du seuil à l'aval du pont de la RN2, sur les secteurs où le substratum n'est pas encore apparent ou en fonction de l'érodabilité de celui-ci notamment sous le pont de la RN2 ;

- une relative stabilité ou faible incision sur le secteur d'écoulement à chenal unique (PK 0,6 à PK 2,5). Si le méandrement à chenal unique se poursuit et n'est pas contré ;
- un exhaussement du lit sur le cône de déjection (aval du PK 2,5), retour progressif au niveau de 1978, si toutefois les modifications humaines du lit ne viennent pas contredire son évolution naturelle (absence d'extractions, maintien d'un écoulement en chenaux multiples). Cet exhaussement sera sans doute relativement lent, la pente actuelle étant proche de la « pente naturelle » et les largeurs importantes (capacité de transport solide inchangée).

3.4. PROPOSITION D'UN PROFIL EN LONG « OBJECTIF »

3.4.1. Estimation des niveaux d'eau en crue centennale

Des corrélations ont été effectuées entre les largeurs d'écoulement et les débits sur différentes rivières torrentielles (écoulements en tresses) de La Réunion (Rivière des Galets, Rivière des Pluies, Rivière Saint-Etienne).

En comparant les valeurs pour les différents cours d'eau, il apparaît que la loi reliant la largeur L et le débit Q est relativement constante pour ces rivières.

En testant le couple (L ; Q) pour Gamède sur la Rivière du Mât (à partir de photos aériennes obliques en période de crue), on observe que celui-ci se situe également dans la fourchette des couples des autres rivières à fort transport solide.

Les hauteurs maximales en conséquence (pour une gamme de débits testés allant jusqu'à des débits centennaux à plus que centennaux) sont estimées en moyenne à 2 à 3 m, maximales de 4 à 5 m par rapport au fond moyen avant endiguement.

Les calculs effectués sur la base de la formule de Manning Strickler (cf. § 2.2.1) indiquent que les hauteurs d'eau par rapport au Fond extrême 2007 sont :

- en moyenne de 5,5 m en amont du PK 2,5 ;
- en moyenne de 3,8 m en aval du PK 2,5.

En comparant les fonds moyens et les fonds extrêmes de 2007, on remarque que l'écart entre fond moyen et fond extrême est :

- en moyenne de 4,2 m en amont du PK 2,5 ;
- en moyenne de 2,5 m en aval du PK 2,5.

Avec ces valeurs, les hauteurs d'eau par rapport au fond moyen avec le calcul de Manning Strickler seraient en moyenne de 1,3 m au dessus du fond moyen.

Nous retiendrons donc préférentiellement **la valeur expérimentale légèrement supérieure de 3 m par rapport au fond moyen pour la hauteur d'eau de crue centennale en amont du PK 2,5 et de 2 m en aval du PK 2,5**.

Sans autre élément disponible nous conserverons ces valeurs.

Avec ces estimations et les niveaux de berges qui figurent sur l'Illustration 8, les secteurs potentiellement inondables en crue centennale avec les niveaux actuels et récents du lit sont tous situés en aval du pont de la RN2. il s'agit de :

- la terrasse alluviale habitée de rive droite située en aval du centre d'enfouissement (PK 1,1 à 3,5). Notons qu'elle faisait partie du lit actif en 1950 ;
- le secteur d'activité d'extractions HOLCIM en rive droite dans le lit majeur (PK 3,1 à l'exutoire) comprenant le Bras Coco ;
- les secteurs les plus bas du quartier de Pelvoisin en rive gauche (débordements potentiels de PK 3,8 à l'exutoire) et le secteur d'exploitation SETTAMA.

3.4.2. Niveaux de fondation des ouvrages et des protections existantes

Les ouvrages situés dans le lit depuis le pont de l'ex RN2 jusqu'à l'exutoire sont les suivants, de l'amont vers l'aval :

- Le pont de l'ex RN2. Il ne comprend pas de piles. Ses culées sont construites sur le substratum rocheux en retrait du lit.
- Le seuil situé immédiatement en aval du pont de l'ex RN2. Ses cotes sont précisées sur le plan ci-dessous (Illustration 13) :

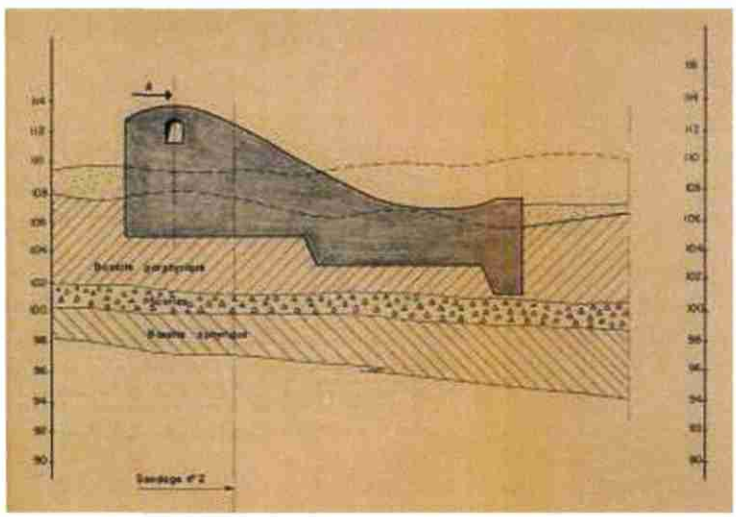


Illustration 13 - Coupe longitudinale du seuil aval du pont de l'ex RN2 (source Sogreah)

Son implantation est reportée sur l'Illustration 8. Notons que ce seuil est sujet à une érosion extrêmement forte dans sa partie aval.

- La pile profilée servant de chambre de vanne à la prise d'eau. Elle repose sur le seuil précédent. Ses cotes sont précisées sur le plan ci-dessous (Illustration 14) :

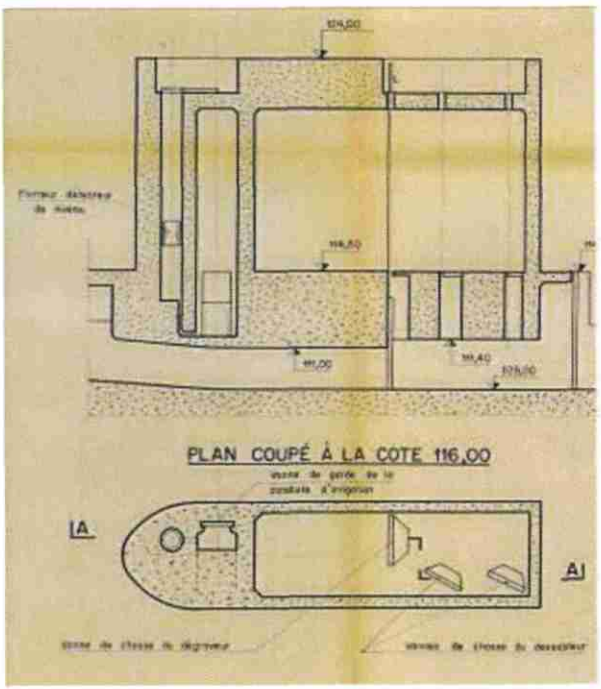


Illustration 14 - Coupes de la pile profilée en aval du seuil de l'ex RN2 (source Sogreah)

- Le pont de la RN2 composé de 2 ouvrages comportant chacun 2 piles et 2 culées. Les piles sont situées en retrait du lit et protégées par des murs en béton armé.

  La pile rive gauche, très sensible, est de plus protégée par un perré en enrochements liés qui comprend un sabot parafouille. Ce sabot de 1 m d'épaisseur est disposé selon l'AVP entre les cotes 79 m NGR et 78 m NGR. Il semble en réalité qu'il ait été construit moins profondément car il est déjà fortement affouillé aujourd'hui alors que la cote du fond extrême est de 80 m NGR. Il est reporté sur l'Illustration 8 ;

- Une digue en enrochements libres a été réalisée par la DDE fin 2006 suite aux crues de février et mars 2006 entre le PK 2,4 et le PK 2,75. Elle avait pour objectif de centrer les écoulements dans le lit. Ses cotes d'arase ne sont pas connues, mais elle est submersible et fusible. Cette digue merlon n'est pas ancrée en pied.

- Une digue en enrochements libres a été réalisée (reconstruite) par l'entreprise HOLCIM entre les PK 3 et 3,75 de mars à octobre 2007 pour protéger ses installations situées dans le lit majeur de rive droite. Les cotes d'arase de cette digue sont reportées sur l'Illustration 8.

Cette digue-merlon est submersible et donc fusible en cas de crue centennale. Elle présente une hauteur de 4 m par rapport au TN du lit et un sabot de 3 m de hauteur en moyenne sous le lit, soit une hauteur totale de 7 m. Cette digue s'appuie sur une piste en remblai située 2 m au-dessus du niveau du lit côté HOLCIM.

3.4.3. Proposition d'un profil « objectif » du lit extrême

Au vu des conclusions des paragraphes précédents, il est proposé **le profil en long « objectif » ci-après pour le fond extrême** du lit.

Ce profil se décompose en 2 profils :

- un profil « objectif » minimum du pont de l'ex-RN2 au PK2 (secteur à chenal unique) ;
- un profil « objectif » maximum depuis le PK1 (point amont de la terrasse habitée de rive droite, secteur à enjeux inondabilité) jusqu'à l'exutoire.

Le profil en long correspondant pour le fond moyen (fond moyen estimé de pied de berge à pied de berge sans les terrasses végétalisées déconnectées du lit actif) a été tracé également sur les hypothèses d'un écart de (données topographiques et calculs AIGL 2007) :

- 7,3 m au dessus du fond extrême « objectif » en amont du PK0 ;
- 4,2 m au dessus du fond extrême « objectif » entre les PK0 et 2,5 ;
- 3 m au dessus du fond extrême « objectif » entre les PK 2,5 et 3,7 ;
- 2,5 m au dessus du fond extrême « objectif » entre les PK 3,7 et l'exutoire.

Le profil en long objectif du fond extrême est basé sur les éléments suivant (Illustration 15):

PK	PT AIGL	Cote FEX min ou pente	Justification	Cote FEX max ou pente	Justification
- 1,343	P88	106,3 m NGR	Cote 2007 du fond ex (substratum)		
	--	Suivi du FEX 2007	Substratum ou proche		
- 0,367	P98	85,2 m NGR	Cote 2007 du FEX (substratum)		
- 0,064	P101	84 m NGR	Pour permettre revanche de 3 m au dessus du FEX, soit environ 2 m, au dessus de la face supérieure de la semelle		

PK	PT AIGL	Cote FEX min ou pente	Justification	Cote FEX max ou pente	Justification
			du pont de la RN2 **(niveaux à confirmer par des études d'affouillement spécifiques à l'ouvrage)**		
1,211	P13	1,42 %	Pente stabilisée à 1,44 %, proche état naturel	63,8 m NGR	Niveau à partir duquel on déborde RD* (terrasse habitée)
1,711	P18			57,3 m NGR	Niveau à partir duquel on déborde RD (terrasse habitée)
2,012	P21	54 m NGR	Permet pente 1,44 % entre P101 et p21	53,8 m NGR	Niveau à partir duquel on déborde RD (terrasse habitée)
3,087	P32			35,0 m NGR	Mise en eau du Bras Coco** (risque HOLCIM)
3,859	P38			25,5 m NGR	Niveau à partir duquel on déborde RG** (amont Pelvoisin)
4,419	P44			9,5 m NGR 10,5 m NGR	Niveau à partir duquel on déborde RD (installations HOLCIM) et RG** (au droit de Pelvoisin)
4,820	P48			4,0 m NGR	Niveau à partir duquel on déborde RG** (SETTAMA)

* pour des hauteurs d'eau de 3 m au dessus du Fond Moyen

** pour des hauteurs d'eau de 2 m au dessus du Fond Moyen

Illustration 15 - Cotes du fond extreme « objectif » proposé (source Sogreah)

Les illustrations ci-après (retracent ces profils en long objectif et permettent de mettre en évidence les points suivants (Illustration 16, Illustration 17) :

- au niveau du pont de la RN2 et immédiatement en aval, il n'est pas possible de concilier un fond objectif minimum (protection de la semelle rive gauche du pont de la RN2) et un fond objectif maximum (inondabilité de la terrasse rive droite en aval du double méandre) ;
- le Bras Coco est mis en eau pour un niveau du lit proche de celui de 1978 et 2007. Ce niveau provoque l'inondation par le *sud* des installations HOLCIM ;
- les installations HOLCIM (secteur d'entrepôt des machines) sont inondables pour un niveau du lit au droit des installations légèrement inférieures au niveau de 1978 (légèrement supérieur au niveau actuel) ;

- le secteur de Pelvoisin est en limite d'inondabilité pour un niveau proche à légèrement supérieur à celui de 1978 (donc supérieur au niveau actuel).

Par conséquent, la notion de profil objectif maximum ou minimum n'a réellement de sens en terme de gestion des inondations que pour le pont de la RN2, le secteur de Pelvoisin et les installations HOLCIM. Pour la terrasse habitée de rive droite en aval du double méandre, il ne semble pas possible d'assurer des niveaux du lit qui permettraient d'éviter leur inondabilité. Rappelons que cette terrasse faisait partie du lit actif il y a quelques décennies.

Notons enfin que ces profils max. et min. ne constituent pas forcément des profils « naturels » possibles compte-tenu de la dynamique de la rivière. Il s'agit bien de profils objectifs maximum ou minimum à ne pas dépasser. A l'avenir, un suivi topographique sera à poursuivre afin de définir si des actions sur le lit (curages ou extractions) sont à mener.

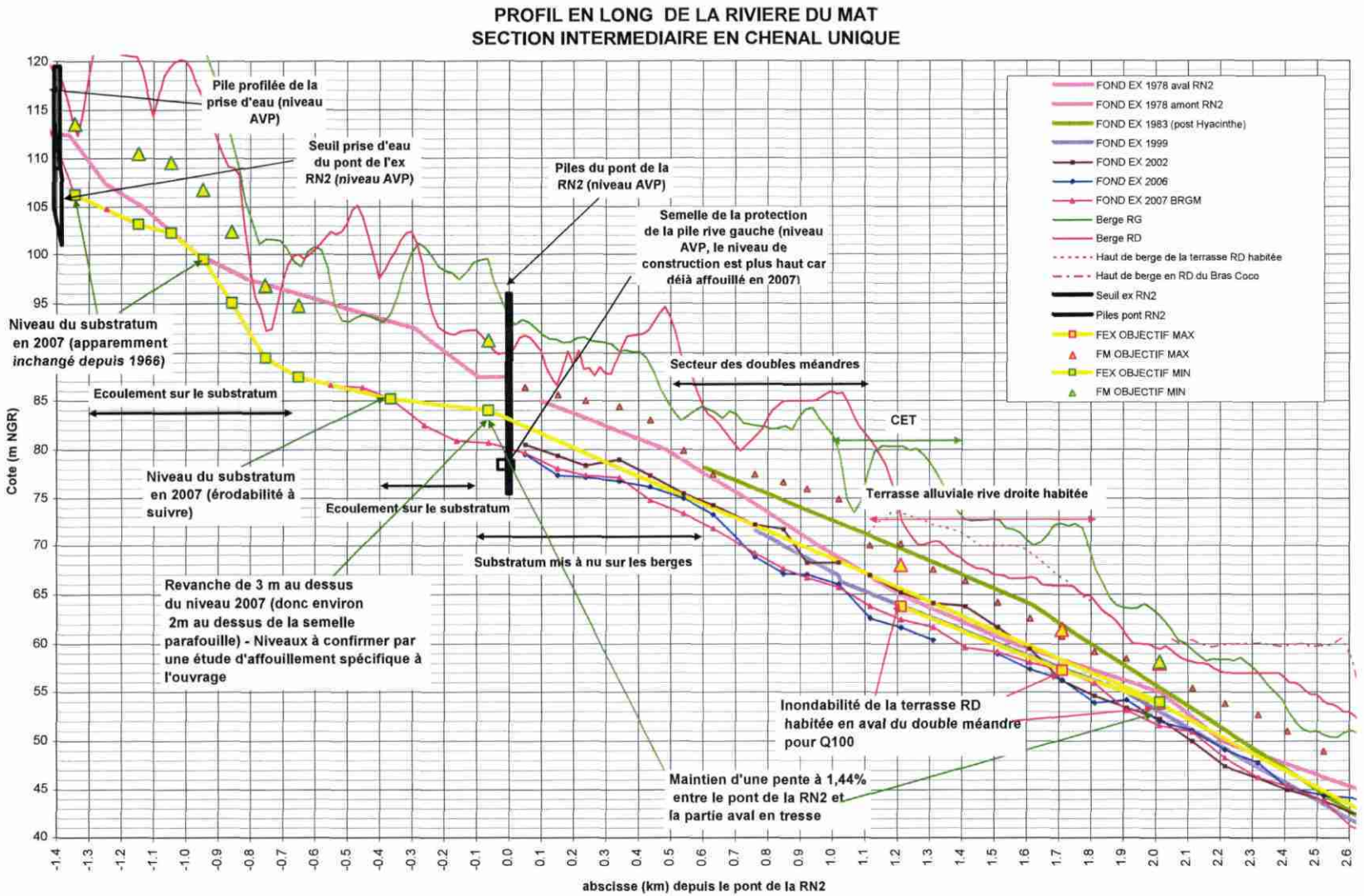


Illustration 16 - Profil en long « objectif » sur le secteur intermediaire (Pont ex RN2 au PK 2,6) (source Sogreah)

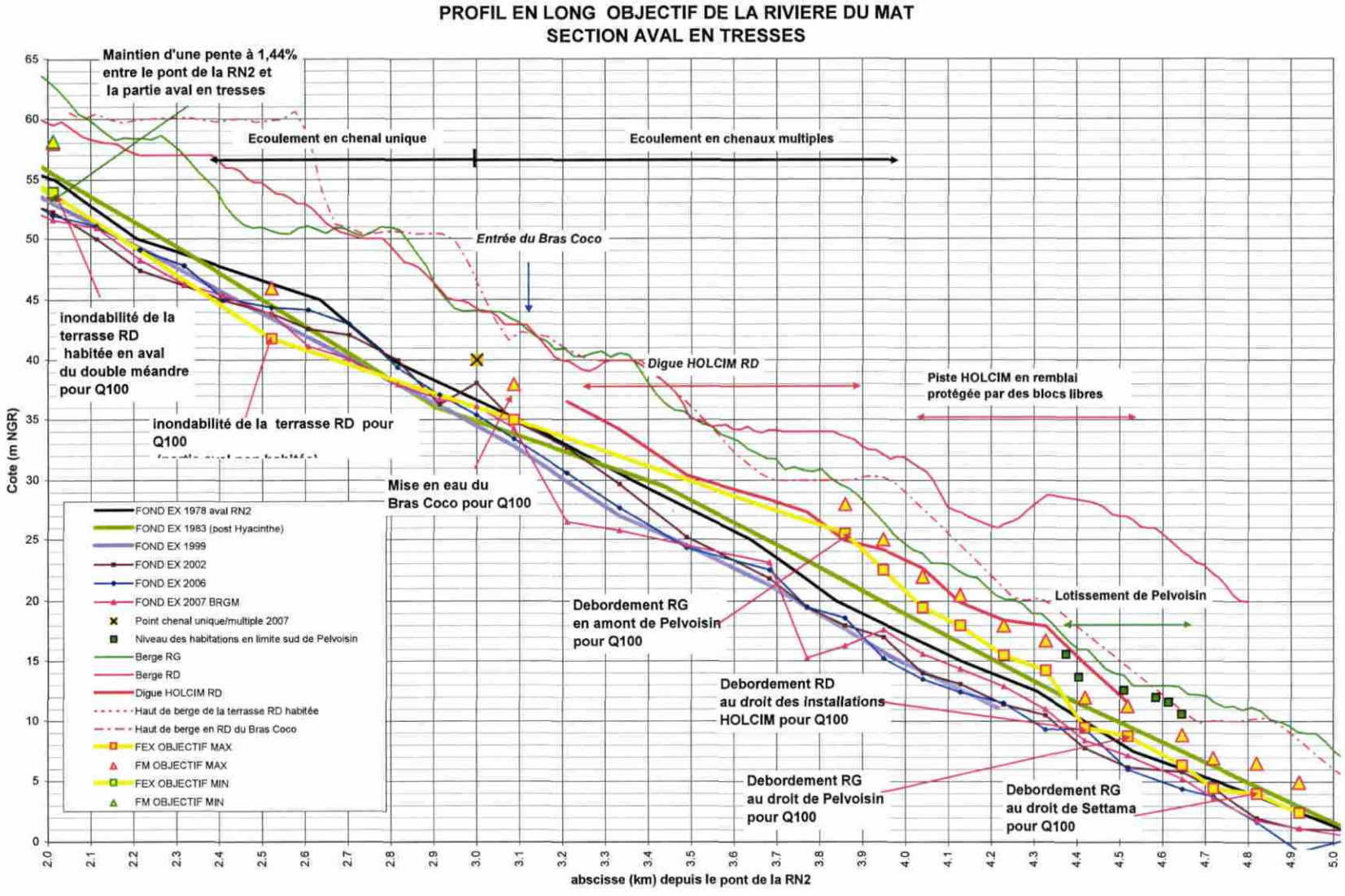


Illustration 17 - Profil en long « objectif » sur le secteur aval (PK 2,0 à l'exutoire) (source Sogreah)

4. Propositions de solutions de gestion

4.1. PRINCIPES DE LA GESTION DES RISQUES

La gestion des risques s'appuie sur ces trois principes :

Prévision	Aléa et vulnérabilité inchangés	Veille hydrométéorologique (*Systèmes d'alerte et évacuation*) et surveillance topographique du niveau du lit et des berges
Prévention	Réduction de la vulnérabilité et de l'exposition	Acquisition à l'amiable, modification documents d'urbanisme
Protection	Réduction de l'aléa	Ouvrages de protection, gestion du niveau du lit et/ou des berges (surveillance et curage préventifs)

Illustration 18 – Principes de gestion des risques

La **prévision** concerne tout d'abord les systèmes d'alerte permettant l'évacuation des personnes exposées en cas de crue torrentielle. L'alerte doit se baser sur les pluies observées par Météo-France sur le bassin-versant de la Rivière du Mât. Deux solutions se présentent :

- déterminer un seuil de précipitation au-delà duquel l'évacuation doit être effectuée (ex : principe du basculement de la route du littoral) ;
- se baser sur un modèle « pluie-débit » opérationnel en terme de prévision.

Dans les deux cas, une veille hydrométéorologique doit être opérée (cf. Services de prévision des crues du SCHAPI en métropole[5]). Dans le cas particulier d'un cyclone, c'est l'alerte cyclonique qui reste prépondérante.

Un suivi du niveau du lit et des berges peut également être conduit afin de prévoir et anticiper les débordements liés à un exhaussement du lit. Un levé topographique à intervalle régulier et/ou après un évènement majeur peut être réalisé à cette fin.

La **prévention** s'attache à réduire l'exposition soit en déplaçant les enjeux présents exposés par une acquisition à l'amiable (rachat des terrains privés) soit en évitant que les enjeux s'y implante par modification des documents d'urbanisme (secteur devenant inconstructible).

[5] SCHAPI : Service Central d'Hydrométéorologie et d'Appui à la Prévision des Inondations (http://www.ecologie.gouv.fr/Le-SCHAPI-Service-Central-d.html)

La **protection** concerne la réduction de l'aléa par la gestion du niveau du lit ou l'implantation d'ouvrage de protection. La gestion du niveau du lit s'appuie sur un suivi topographique (voir ci-dessus) afin de prévoir des curages préventifs si le niveau dépasse le seuil proposé par le profil en long « objectif » maximum (cf. § 3). La surveillance du niveau du lit permet également de prévenir la déstabilisation des ouvrages implantés dans la rivière (seuil, piles de pont, digues) en fonction du seuil proposé par le profil en long « objectif » minimum.

Les mesures de protection et en particulier les ouvrages sont détaillés dans le chapitre suivant.

4.2. TYPES DE PROTECTION

Ce sous-chapitre reprend les éléments apportés par Sogreah dans le cadre de cette étude (Sogreah, 2008 – réf. en introduction).

Les protections ou actions qui peuvent être envisagées à priori sont de plusieurs types et dépendent du contexte d'évolution morphologique considéré (++ action adaptée, - - action peu adaptée voire nuisible, 0 neutre) :

Contexte d'évolution morphologique	Erosion des berges	Abaissement du lit	Contrôle du réengravement d'un lit abaissé
Enjeu à priori concerné	Court terme : - Terrasses agricoles au niveau du double méandre - Centre d'enfouissement technique - Installations HOLCIM Long terme : - Ensemble des terrasses érodables	Pont de la RN2 (Rive gauche)	- Quartier Pelvoisin - Installations HOLCIM - Terrasse habitée de rive droite
ACTIONS ADAPTEES			
Chenal curé	+ +	0	+
Ouverture de terrasses basses, arasement de bancs figés et remodelage du lit vif	+ +	+ +	+ +
Apport mécanique	0	+ +	+
Seuils en U ou en V	+	+ (amont du seuil - (aval du seuil)	0
Promotion des érosions de berge	- -	+ +	+
Epis	+ +	- -	- -
Protection longitudinale	+ +	- -	- -

Illustration 19 - Types de protections envisageables en fonction du contexte morphologique

Les paragraphes qui suivent s'attachent à voir si ces différentes actions sont adaptées au contexte de la Rivière du Mât.

4.2.1. Chenal curé

La création d'un chenal artificiel par curage pourrait dans l'absolu permettre d'éloigner les écoulements des berges érodables et ainsi les protéger.

Toutefois :

- **Sur le secteur à chenal unique (de l'amont au PK 2,5 environ)**, l'analyse en plan du chenal principal au cours des dernières décennies indique une forte mobilité naturelle de la position du lit que la rivière chercherait indéniablement à recréer.

  Le lit est par ailleurs relativement étroit sur ce secteur et en crue moyenne à forte, l'écoulement se fait sur la quasi-totalité de la largeur.

  Etant donné les courbures de la rivière, un tel chenal serait rapidement détruit.

  Enfin et surtout, cette solution ne peut être retenue du fait du processus d'abaissement du lit que présente actuellement la Rivière du Mât. La sensibilité du pont de la RN2 et particulièrement de la pile rive gauche en sont la conséquence.

  Or l'élaboration d'un chenal tend toujours à accentuer les phénomènes d'incision par augmentation de la capacité de transport solide, notamment pour les petites crues.

- **Sur le secteur de divagation (PK 2,5 à l'exutoire)**, la Rivière du Mât s'écoule en tresses.

  Même la réalisation d'un chenal ne pourrait empêcher ce type d'écoulement intrinsèque aux caractéristiques de la rivière (granulométrie, pente, débit).

  Pour les faibles crues, il accentuerait, de même qu'en amont, les phénomènes d'incision sur un lit déjà abaissé en cours de rehaussement.

Ce type d'aménagement n'est donc pas retenu.

4.2.2. Ouverture de terrasses basses, arasement de bancs et remodelage du lit vif

L'analyse des photographies aériennes passées permet d'identifier plusieurs terrasses dans lesquelles se produisaient des écoulements en crue et qui sont aujourd'hui végétalisées et « perchées » du fait de l'abaissement du niveau du lit.

La végétalisation et la déconnection de ces terrasses comme secteur d'expansion de crue accentue les phénomènes de chenalisation et d'incision du lit.

Le tableau ci-après les recense :

N° sur carte	PK amont	PK aval	Rive	Evolution	Altitude
1	0,18 (PT2)	0,9 (PT10)	Gauche	Secteur d'écoulement lors de HYACINTHE (1980), totalement végétalisée à partir de 1997	Chenal de la terrasse 4 à 8 m au dessus du fond extrême 2007
2	0,18 (PT2)	0,65 (PT7)	Droite	Secteur d'écoulement lors de HYACINTHE (1980), en cours de végétalisation	Chenal de la terrasse 3,5 à 5 m au dessus du fond extrême 2007
3	1,1 (PT12)	2,75 (PT29)	Droite	Secteur d'écoulement en 1966 et résiduel en 1978. Végétalisation et installation d'habitations dès la fin des années 70.	Pas de données topo, estimation à 5 m au dessus du fond extrême 2007 (d'après IGN 1978)
4	2,1 (PT22)	4 (PT40)	Gauche	Secteur d'écoulement ancien et jusqu'en 2003. Végétalisation récente	Chenal principal perché 2 à 5 m au dessus du fond extrême

Illustration 20 - Terrasses végétalisées ou en cours de végétalisation

La carte ci-après (Illustration 22) indique leur emplacement ainsi que les positions anciennes des berges.

Selon les secteurs où se trouvent ces terrasses, on peut envisager :

- Un remodelage du lit par arasement des terrasses 1 et 2 et dépôt dans le lit actif. Cette action permettrait d'une part de diminuer la capacité de transport solide sur ce secteur et donc de limiter l'incision du lit que l'on observe. D'autre part, elle permettrait de s'affranchir en rive gauche (PT3 à PT7) des formations dures mises à nu qui donnent une direction préférentielle aux écoulements favorisant les attaques de la berge opposée. La formation progressive des méandres situés juste en aval découle directement de cette chenalisation due à la nature des berges incisées.

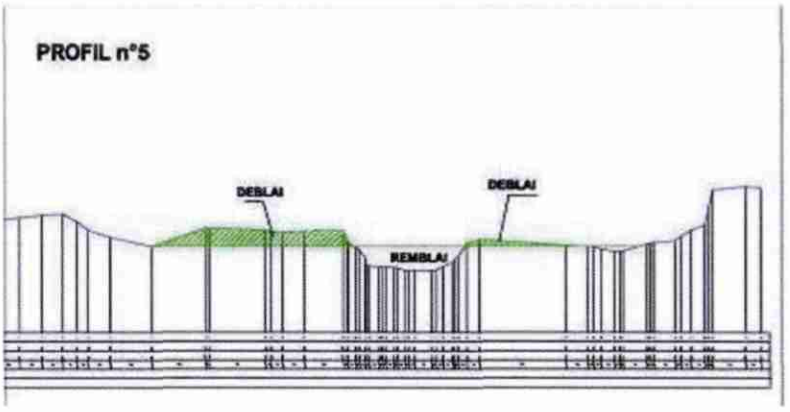


Illustration 21 - Exemple de remodelage du lit sur le profil P5

Toutefois un tel remodelage nécessiterait la mise en place d'un seuil ancré profondément en aval du secteur remodelé, pour maintenir le niveau du chenal remblayé.

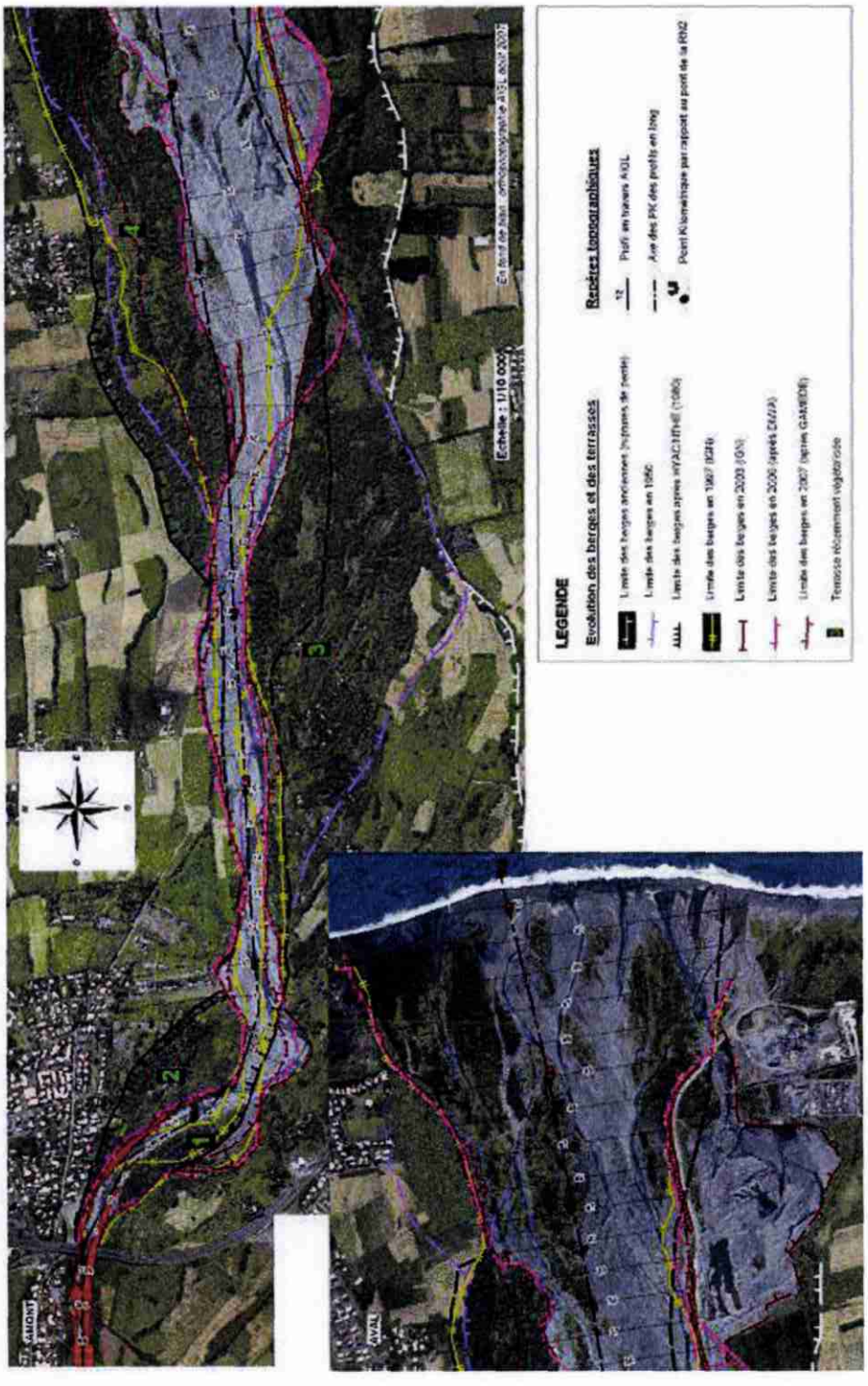


Illustration 22 - Position des berges et des terrasses végétalisées (source Sogreah)

- En aval du double méandre, l'arasement de la terrasse 3 en rive droite n'est pas envisageable car cette terrasse est habitée malgré tous les risques que cela comporte ;

- La terrasse 4 en rive gauche nécessiterait des travaux vraisemblablement trop importants pour envisager un remodelage. Toutefois le retour du lit au niveau de 1978 devrait naturellement la mobiliser à nouveau. A condition toutefois que les extractions qui ont cours dans le lit de la rivière (installation HOLCIM) n'aient plus d'influence sur le lit (soit parce que le secteur d'extractions serait déconnecté du lit actif par la mise en place d'une protection qui empêcherait toute capture des écoulements, soit parce que les extractions seraient totalement arrêtées).

- La mobilisation de cette terrasse permettrait de favoriser le réengravement du lit mais ne suffirait toutefois très certainement pas à protéger les installations HOLCIM contre les érosions de berge. En effet la tendance de migration vers le *sud, sud-est* de la rivière qui a pu s'observer ces dernières années à l'exutoire semble plus liée à l'implantation des anciennes extractions qu'à la végétalisation de cette terrasse. Il sera toutefois nécessaire, si la terrasse est remobilisée, de protéger le point aval pour éviter les attaques de berges en amont du secteur de Pelvoisin.

Notons toutefois d'une manière générale que cette solution d'arasement et de déboisement de terrasses pose du point de vue environnemental le problème de la modification du milieu aquatique et de l'évacuation des déchets de végétaux (arbres) ou de leur possible valorisation.

4.2.3. Apport extérieur mécanique de matériaux

Un apport extérieur de matériaux est exclu car :

- les quantités d'apport nécessaires pour le réengravement du lit incisé représentent des quantités trop importantes ;

- les matériaux seraient charriés en crue sans que le niveau du lit ait pu retrouver son état d'équilibre.

Cette solution d'apports mécaniques de matériaux n'est donc pas retenue.

4.2.4. Seuils en U et en V

Cette protection n'est envisageable que sur des secteurs relativement étroits (typiquement secteur de chenal unique en aval du pont de la RN2).

Un seul ou plusieurs seuils permettraient un réhaussement général du lit sur la partie aval et une stabilisation des fonds en amont des seuils mais provoquerait des incisions importantes au pied des seuils.

Les nombreux aménagements testés sur le modèle réduit physique de la Rivière des Galets ont mis en évidence pour ce type d'aménagement :

- une tendance à l'exhaussement des fonds moyens ;

- un abaissement de la pente d'équilibre relativement important (- 0,7 %) ;
- un affouillement central dans l'axe de la largeur déversante du fait de la concentration des écoulements (13 m de profondeur maximum en pied de seuil) ;
- des affouillements le long des berges du fait de la formation de zone de dépôts occasionnant un renvoi latéral des écoulements en aval de l'affouillement central.

Ainsi si des seuils étaient mis en place, ils nécessiteraient d'être ancrés très profondément (13 m environ ou jusqu'au substratum) et d'être accompagnés de digues.

La mise en place du seuil en aval du pont de l'ex RN2, ancré sur le substratum permet de penser que ce type d'aménagement peut fonctionner :

- si les risques de contournement de l'ouvrage sont totalement écartés (mise en place de digues ou présence de berges résistantes) ;
- si le problème d'usure des seuils peut être résolu.

En effet, le seuil de l'ex RN2 est très fortement usé et nécessite régulièrement d'être conforté sur sa partie aval.

De fait, le fonctionnement d'un seuil implique nécessairement un affouillement important en aval de la partie déversante comme l'explique le schéma suivant.

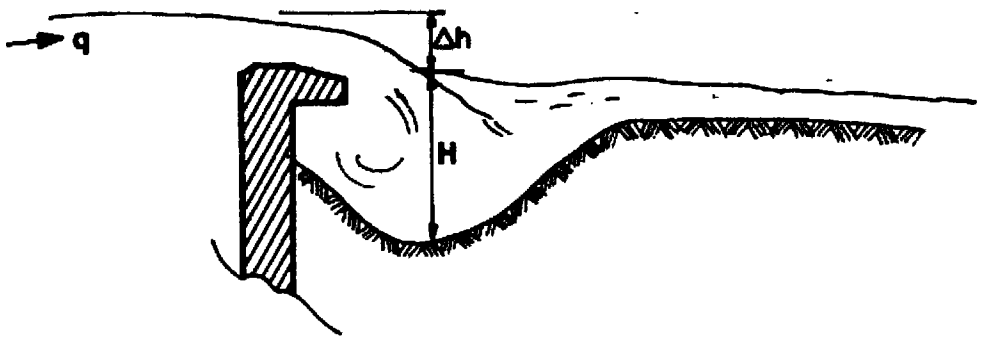


Illustration 23 - Principe d'affouillement en aval d'un seuil

Cette partie logiquement affouillée par la présence d'un seuil est en général confortée mais dans le cas de la Rivière du Mât, ce confortement nécessite une attention toute particulière (forts débits, granulométrie élevée). La mise en place de tétrapodes TM ou l'acceptation du développement d'une fosse en pied de seuil pourrait être étudiée par modèle réduit physique.

Des seuils pourraient être envisagés en aval immédiat du pont de la RN2 pour stabiliser le niveau du lit et dans le secteur à lit unique à condition que les problèmes d'usure et de contournement soient finement étudiés. Sur le secteur d'écoulement en tresses, la largeur du lit rend peu réalisable des seuils.

4.2.5. Promotion des érosions de berges

L'augmentation de la largeur de divagation d'une rivière permet à la rivière de retrouver un espace de liberté, d'augmenter la pente du chenal et de réengraisser un lit abaissé. En effet, l'énergie du cours d'eau est dissipée dans les berges et non pas par incision du lit s'il y a déficit de matériaux.

Dans la Rivière du Mât, la plupart des berges présentent des enjeux et on ne peut donc pas chercher à promouvoir leur érosion (sauf les basses terrasses boisées).

4.2.6. Protection longitudinale

Les doubles endiguements ont été étudiés pour un certain nombre de rivières de la Réunion sur modèle physique :

- Rivière des Galets ;
- Rivières des Pluies ;

Ils peuvent prendre plusieurs formes et comporter différents matériaux :

- Verticale : mur ou paroi (maçonnerie, béton armé) ;
- Incliné : perré (maçonnerie, béton, enrochements libres naturels, libres artificiels ou liés, gabions.

Tous les modèles physiques et l'observation en vrai grandeur ont montré, sur une rivière à forte dynamique sédimentaire, une tendance nette à la fixation des chenaux sur un linéaire important de la protection. Cette fixation entraine des affouillements locaux et un rabaissement du profil en long général du lit.

Illustration 24 – Exemple de protection longitudinale (rive gauche de la Rivièredes Galets)

Les études sur modèle réduit du projet d'endiguement de la Rivière des Galets ont permis de tester de multiples types de protections longitudinales. Il ressort de ces expérimentations les éléments suivants :

- les enrochements naturels libres, même de poids important (4 t) constituent la protection la moins sûre, avec des arrachements constatés en cas d'attaque défavorable des chenaux ;
- les enrochements artificiels libres (blocs cubiques rainurés ou AccropodesTM) résistent mieux, notamment avec des blocs rangés ;
- le principe d'une semelle en pied de mur ou de perré est retenu pour limiter les affouillements, qui peuvent atteindre entre 8 et 16 m sous le niveau du fond moyen du lit.

La section type finalement retenue sur la Rivière des Galets est un perré en enrochements liés, avec une pente de 3H/2V, sur une hauteur de 12 à 16 m, complété en pied par une semelle également en enrochements liés, de 6 m de largeur.

Une telle protection nécessiterait sur la Rivière du Mât un ancrage important dans les berges avec la difficulté qu'elles sont très érodables et très hautes.

Cette protection pourrait être envisagée sur le secteur aval (PK 2,5 à l'exutoire).

4.2.7. Protection par épis

Le principe d'une protection par épis est de limiter la divagation naturelle d'un lit en tresses en créant des points durs réguliers s'avançant dans le lit.

Ce type de protection possède un intérêt économique sur ces rivières. En effet, la largeur disponible étant en général importante, il est possible, sans inconvénients importants, de disposer des obstacles de longueur notable. Or l'espacement entre épis est conditionné par la longueur de l'épi : il dépend de la profondeur des anses d'érosion pouvant se développer entre deux épis successifs.

C'est également l'intérêt de ce système de protection : conserver un méandrement des chenaux proches de la situation initiale, contribuant à modérer l'impact de l'aménagement sur l'abaissement du profil en long de la rivière.

Une grande variété de formes peut être imaginée, en distinguant :

- la tête de l'épi, qui supporte l'attaque des bras vifs et subit des déchaussements par le pied ;
- le corps de l'épi, qui ancre la tête de l'épi à la berge et empêche le contournement par l'arrière de cette tête.

Sur les rivières torrentielles réunionnaises, ce principe de protection a été mis en œuvre sur la Rivière des Pluies et la Rivière des Galets (partie amont) sous la forme d'épis marteaux.

Illustration 25 - Epis marteaux en rive droite de la Riviere des Pluies

Illustration 26 - Epi marteau en rive droite de la Rivière des Galets

Ces épis sont constitués :

- d'une tête constituée d'un mur poids en maçonnerie (Rivière des Pluies) ou en béton reposant sur une semelle ;
- d'un corps en remblai, protégé aux endroits les plus sollicités par des gabions (Rivière des Pluies) ou une carapace en enrochements liés (Rivière des Galets) ;
- d'une digue en terre longitudinale destinée à la protection contre les submersions.

Ces dispositions sont issues des études sur modèle réduit de la protection contre les crues de la Rivière des Pluies en 1966 où furent testées d'autres configurations, notamment des épis terminés par des moles en enrochements libres et en blocs artificiels. Ces premières solutions nécessitaient des blocs très lourds et en très grande quantité, elles furent abandonnées au profit de murs pour diminuer les quantités à mettre en œuvre. **Ces séries d'épis pourraient être utilisées pour la partie aval, en tresses, de la rivière**.

4.2.8. Importance des dimensions de la protection et impact sur le profil en long de la rivière

En fonction des objectifs énoncés de l'aménagement, la protection peut être implantée plus ou moins dans le lit de la Rivière du Mât.

Une implantation de la protection dans le lit actif de la rivière va réduire sa capacité à divaguer et augmenter sa capacité de transport. Cette modification entraîne un abaissement du lit, c'est-à-dire qu'au sein de la partie protégée, la pente moyenne du profil en long va diminuer, ce qui entraîne un approfondissement d'autant plus marqué du lit qu'on se situe en amont, et qui peut, par érosion régressive, se propager loin en amont.

Lors des études sur modèle réduit de l'aménagement de la Rivière des Galets, plusieurs largeurs d'endiguement ont été testées. Les effets de la largeur de l'endiguement sur l'équilibre du profil en long ont été synthétisés lors des travaux du programme de recherche DYNTOR (Programme de recherche sur l'érosion, les transports solides et la dynamique torrentielle des rivières de la Réunion) du BRGM.

Le tableau ci-après propose une synthèse des résultats des essais portant sur l'évaluation des effets de la largeur des aménagements et de la mise en place de seuils.

Type d'endiguement	Pente obtenue après essais secteur aval (entre P55 et P101)	Commentaires
ETAT INITIAL		
Sans aménagement spécifique (largeur naturelle estimée à environ 630 m)	Pente de 2,2 %	☞ stabilité du profil en long : pente de 2,2 % en 1983 et de 2,15 % en 1966.
APRES AMENAGEMENTS		
Effets de la largeur		
Endiguement longitudinal large de 450 m sans fosse de piégeage	Pente de l'ordre de 2%	☞ Tendance à l'enfoncement
Endiguement longitudinal large de 450 m avec fosse de piégeage	Pente globale de l'ordre de 1,7 % en fin d'essai	☞ Enfoncement du profil très prononcé en entrée d'endiguement ☞ Enfoncement plus limité en aval
Endiguement longitudinal étroit de 220 m sans fosse de piégeage	Pente de l'ordre de 2%	☞ Tendance à l'enfoncement
Endiguement longitudinal étroit de 250 m avec protection + épis marteaux amont	Pente de l'ordre de 2% (voire de 1,9% après passage d'une très forte crue ≈ 3 000 m³/s)	☞ Tendance à l'enfoncement
Endiguement longitudinal étroit de 250 m avec reprofilage et épis plongeants + épis marteaux amont	Pente de l'ordre de 1,9%	☞ Tendance à l'exhaussement (pente de dérasement initiale de 1,8%)
Endiguement longitudinal étroit de 150 m avec murs épis + épis marteaux amont	Pente de l'ordre de 1,9%	☞ Tendance à l'enfoncement
Mise en place de seuils		
Endiguement longitudinal de 180 m avec seuils de fixation	Pente d'équilibre de chaque bief (entre deux seuils) de 1,5 à 1,6 %	☞ Tendance à l'exhaussement en amont ☞Tendance à l'enfoncement sur les biefs

Illustration 27 - Synthèse des résultats sur l'évaluation des effets de la largeur et de la mise en place de seuils sur la Rivière des Galets

Cette synthèse est représentée graphiquement sur l'illustration suivante, en fonction du pourcentage de la largeur naturelle. Ce pourcentage est calculé en moyenne le long de l'endiguement, celui-ci étant de largeur constante alors que le lit actif naturel s'évase vers l'aval.

Apparaît également une pente théorique. Il s'agit d'une approche purement géométrique, en considérant une simplification de l'implantation des chenaux :

- chenal naturel zigzaguant sur l'ensemble de la largeur du lit naturel ;
- zigzag « tronqué » selon la largeur de l'endiguement ;

- calcul de la nouvelle pente en fonction de la diminution de la longueur du chenal.

Cette approche donne des résultats cohérents avec les valeurs expérimentales pour un angle moyen des chenaux par rapport à l'axe général du lit de l'ordre de 36°. Cette valeur est cohérente avec l'implantation observée des chenaux, naturelle ou sur modèle réduit.

Une approche par la formule de Meyer – Peter n'est possible que pour des endiguements très étroits, la largeur cumulée moyenne des chenaux n'excédant pas 250 m pour le débit le plus fort (3 000 m³/s). Elle a été réalisée pour des endiguements de 100 et 150 m de largeur, par ajustement de la pente pour conservation des valeurs de débit solide.

Est également porté l'incidence, sur le profil en long de la rivière, de la réalisation de l'endiguement de la Rivière des Pluies (Etude sur modèle réduit SOGREAH de 1966). Il est dommage à ce propos que le seul modèle réduit réalisé sur la Rivière Saint-Etienne (étude SOGREAH de 1969) ne comporte pas d'informations exploitables concernant l'impact des aménagements sur le profil en long.

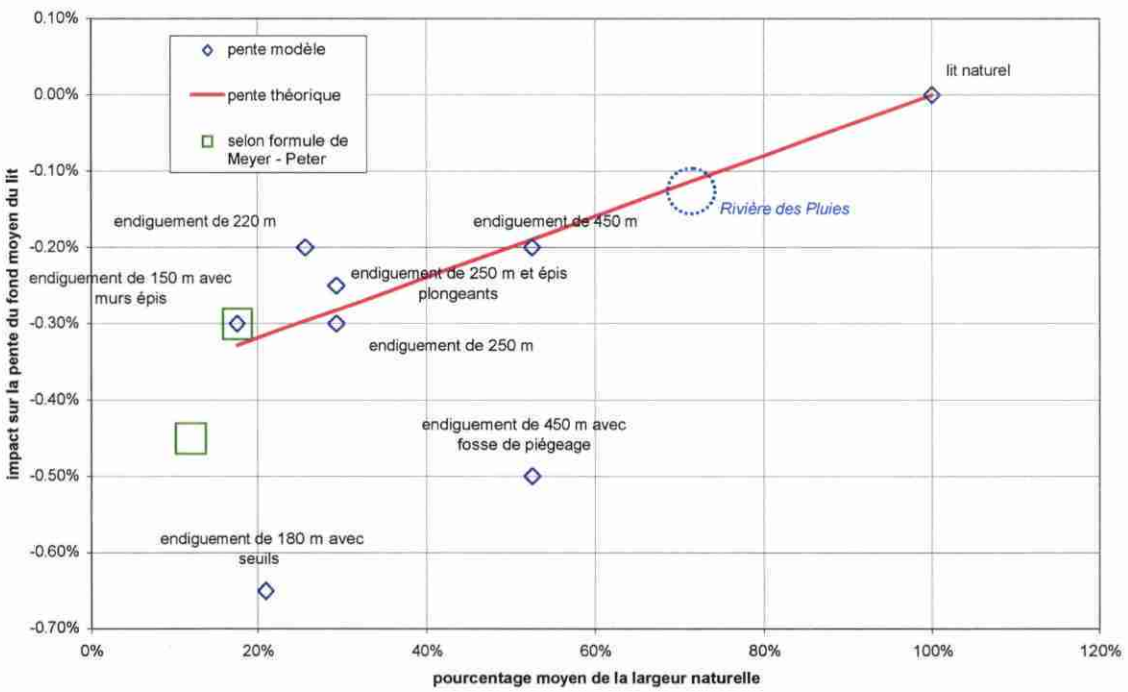


Illustration 28 - Variation de la pente du fond moyen du lit en fonction de la largeur de l'endiguement

On notera sur ce graphique :

- la même valeur expérimentale de pente du fond moyen du lit pour des endiguements de largeur variant de 220 m à 450 m, ce qui peut paraître incohérent ;
- la valeur très basse de la pente du fond moyen du lit d'un endiguement avec seuil, en comparaison d'un endiguement de même largeur sans seuil ;
- la validité, par rapport aux résultats expérimentaux, d'une approche selon la formule de Meyer – Peter corrigée pour une largeur de 150 m ;
- la cohérence avec les éléments disponibles sur la Rivière des Pluies.

Le linéaire concerné par la protection envisagée de la rive droite de la Rivière du Mât est de 2 000 ml environ (de l'entrée du Bras Coco à l'exutoire). Sur ce linéaire, une variation de **la pente de 0,2 % (réduction de la largeur du lit de 50 %) entraîne une variation du niveau du lit à l'amont de 4 m.**

Compte tenu du contexte déficitaire du lit et de la sensibilité de l'appui RG du pont de la RN2, ce point est donc particulièrement sensible.

4.3. PROPOSITIONS DE SOLUTIONS DE GESTION

En fonction des risques présentés précédemment, il est possible de déterminer quel type de gestion adopter (Illustration 29, Illustration 30).

Type d'enjeu	Zones exposées	Exposition aléas	Risque	Justification risque	Type de gestion
Zones urbaines actuelle (y compris urbanisation future)	St André - aval pont RN2 [1a]*	Inondation Erosion	FORT	Secteur habité inondable et érodable	Protection et/ou Prévention
	Lotissement Pelvoisin [1b]	Inondation Erosion	FORT	Secteur habité inondable et érodable	Protection et/ou Prévention
	St André – rive gauche aval [1c]	Inondation Erosion	FORT	Secteur habité inondable et érodable	Protection et/ou Prévention
	Rivière du Mât les hauts [1d]	Inondation	FORT	Secteur habité inondable	Protection et/ou Prévention
	Terrasse RD Bras Panon [1e]	Inondation Erosion	FORT	Secteur habitat « spontané » inondable et érodable	Prévention et/ou Prévision
Infrastructures routières	Pont RN2 [2a]	Erosion	FORT	Infrastructure d'intérêt régional / affouillement	Protection
	RN2 à Paniandy [2b]	Erosion	Moyen	Infrastructure d'intérêt régional / érosion future potentielle	Protection

Type d'enjeu	Zones exposées	Exposition aléas	Risque	Justification risque	Type de gestion
Zone agricole	Différentes zones sur St André et Bras Panon [3]	Inondation Erosion	Faible	Bien agricole inondable	Prévision
Zone naturelle (y compris d'intérêt économique et touristique)	Carrière HOLCIM + unité de préfabrication GTOI [4a]	Inondation Erosion	Moyen	Activité économique d'intérêt régional érodable et inondable	Prévention et/ou Prévision
	Lieu dit « Rivière du Mât » [4b]	Inondation	Faible	Zone d'intérêt touristique inondable	Prévision
	Différentes zones sur St André et Bras Panon [4c]	Inondation Erosion	Faible	Zone d'intérêt écologique inondable	Prévision

Illustration 29 – Synthèse du risque et des principe de gestion à adopter

Les zones urbaines actuelles et futures [1a/b/c/d] présentant un risque fort (risque humain) doivent faire l'objet soit d'une protection pérenne au moyen d'un ouvrage longitudinal soit de prévention (acquisition à l'amiable, modification des documents d'urbanisme) si le coût de la protection excède la valeur économique des secteurs en question.

A noter : le dimensionnement et le chiffrage des mesures de protection ne sont pas prévues dans le cadre de cette étude et nécessitent d'être détaillées ultérieurement une fois ces propositions validées.

La RN2 est jugée comme une voie de communication majeure devant faire l'objet de protection pérenne afin d'éviter un endommagement lié au surcreusement du lit au niveau des appuis du pont [2a] ou à une érosion des berges importantes en rive droite à proximité du secteur de Paniandy [2b].

Pour la stabilité du pont, deux méthodes de protection sont possibles, à savoir le renforcement des protections des appuis ou l'implantation d'un seuil pour le réengravement du lit, la première solution est préférée afin de limiter les effets à l'aval.

Pour le secteur de Paniandy, deux solutions sont également proposées pour réduire l'érosion de la berge : ancrage de seuils et remodelage du lit ou digue longitudinale implantée en retrait de la berge.

Enfin, les **zones agricoles** [3] **et naturelles** [4a/b/c] doivent faire l'objet d'une surveillance du niveau du lit et d'une mise en place d'un système d'alerte et d'évacuation, en particulier pour les secteurs très fréquentés comme l'exploitation HOLCIM.

La surveillance du lit permettra en fonction de la définition du profil d'équilibre de procéder à des opérations de remodelage visant à recentrer l'écoulement principal et à abaisser le niveau du lit afin de prévenir les inondations et les érosions de berge.

Concernant spécifiquement la carrière HOLCIM, il est rappelé que l'analyse du fonctionnement de la rivière ne permet pas d'établir une relation de cause à effet entre les extractions et les problèmes d'érosion/inondations connus (en amont), si ce n'est pour elle-même. En dehors de la destruction des installations de la carrière, le risque est davantage une salinisation des nappes souterraines soit par une brèche dans le cordon littoral en période de crue soit pas surcreusement au-dessus des nappes (remontée du niveau salé). C'est pourquoi un système d'alerte et une gestion raisonnée des extractions (zone et profondeur des prélèvements) sont proposés.

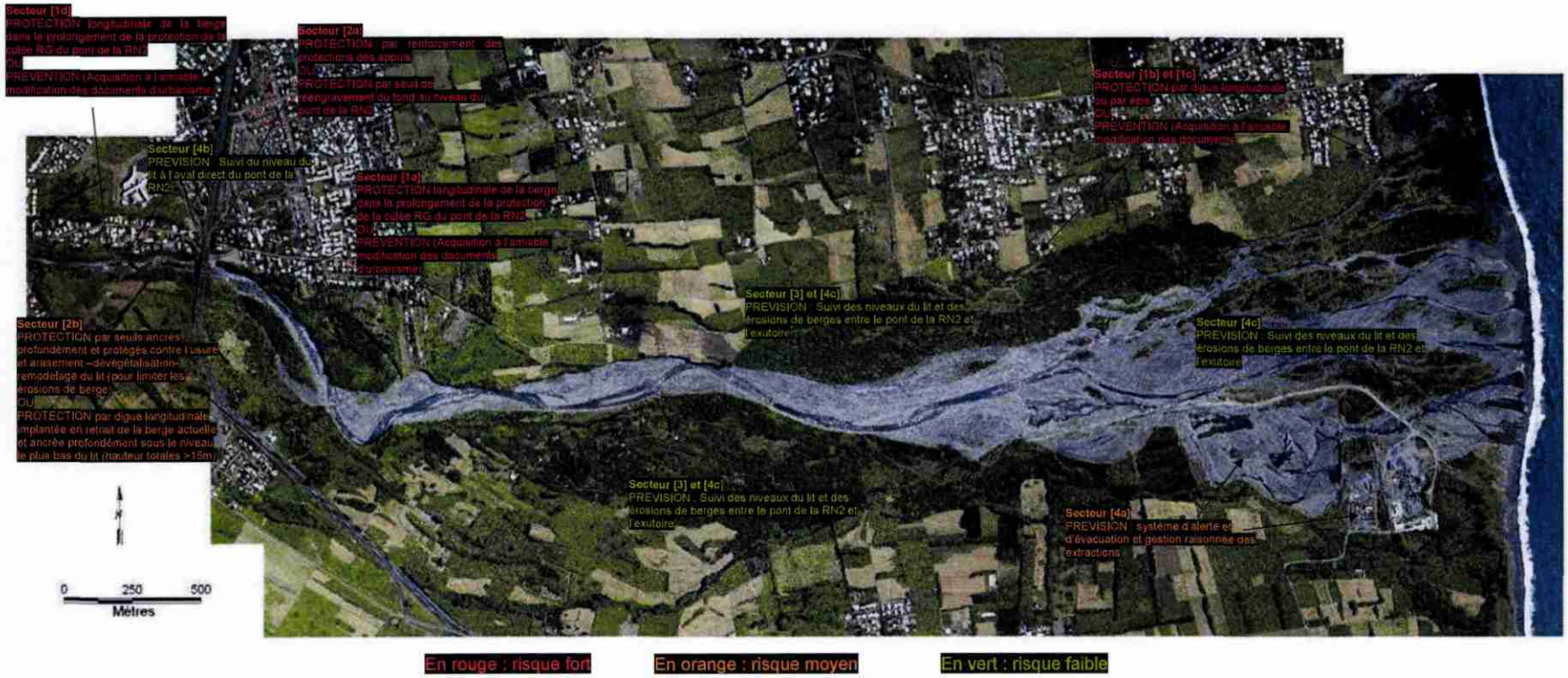


Illustration 30 – Proposition de solutions de gestion retenues à partir des scénarios Sogreah

5. Conclusion

Cette étude a tout d'abord permis de conduire une analyse de risque sur la partie aval de la Rivière du Mât. Les enjeux présents sont de 4 types principaux (cartographie issue des PLU). Leur croisement avec le zonage des aléas (PPRI pour les inondations) permet d'identifier les zones exposées par type d'enjeux :

- Diverses **zones urbaines** et d'urbanisation future de St-André et Bras-Panon ;
- **Infrastructure routière** majeure de la RN2 (pont et secteur de Paniandy) ;
- Diverses **zones agricoles** sur les deux rives ;
- Diverses **zones naturelles** y compris celles d'intérêt économique (carrière Holcim) et touristique (Lieu dit Rivière du Mât).

Le croisement des zones exposées avec les types d'enjeux permet en outre de distinguer plusieurs niveaux de risques, à savoir :

- un **risque fort** pour les secteurs habités des zones urbaines et le pont de la RN2 ;
- un **risque moyen** pour les secteurs non habités mais présentant des infrastructures importantes et/ou fortement fréquentés (RN2 à Paniandy et carrière Holcim) ;
- un **risque faible** pour les secteurs agricoles et naturels.

En outre, un profil en long « objectif » est évalué afin de servir à la gestion du niveau du lit avec un profil maximal pour prévenir les inondations liées à un exhaussement du lit (curages préventifs) et un profil minimal pour prévenir le déchaussement des ouvrages (pont de la RN2, seuil-barrage).

Enfin, sur la base de ces éléments et d'une analyse des types et des scenarios de protections possibles, des solutions de gestion sont choisies et proposées :

- pour les zones urbaines (risque humain), protection par digue longitudinale ou prévention par acquisition des terrains à l'amiable ou modification des documents d'urbanisme (la solution dépend notamment du coût relatif des ouvrages et de la valeur économique des secteurs concernés) ;
- pour la RN2, une protection des fondations du pont par renforcement des appuis ou ancrage d'un seuil de réengravement et protection du secteur de Paniandy par implantation d'une digue ou d'un seuil en arrière de la berge ;

- pour les zones agricoles et naturelles, un suivi des niveaux du lit (et remodelage en fonction du profil « objectif ») et des berges, la mise en place d'un système d'alerte et d'évacuation, notamment pour les secteurs très fréquentés comme la carrière HOLCIM, et gestion raisonnée des extractions (profondeur, zones d'extraction) pour éviter la salinisation des eaux souterraines.

Ces propositions sont des principes de gestion et d'aménagement. Le chiffrage de ces mesures et les dimensions des ouvrages devant être validées ultérieurement.

Enfin, comme indiqué dans les conclusions du vol. 4 de l'étude, les connaissances scientifiques sur la dynamique torrentielle de l'île pourraient être améliorées en réalisant des bassin-versants expérimentaux (celui de la Rivière du Mât et/ou de Patates à Durand) mieux équipés en stations hydrométriques et pluviométriques et faisant l'objet d'un suivi topographique.

Annexe 1

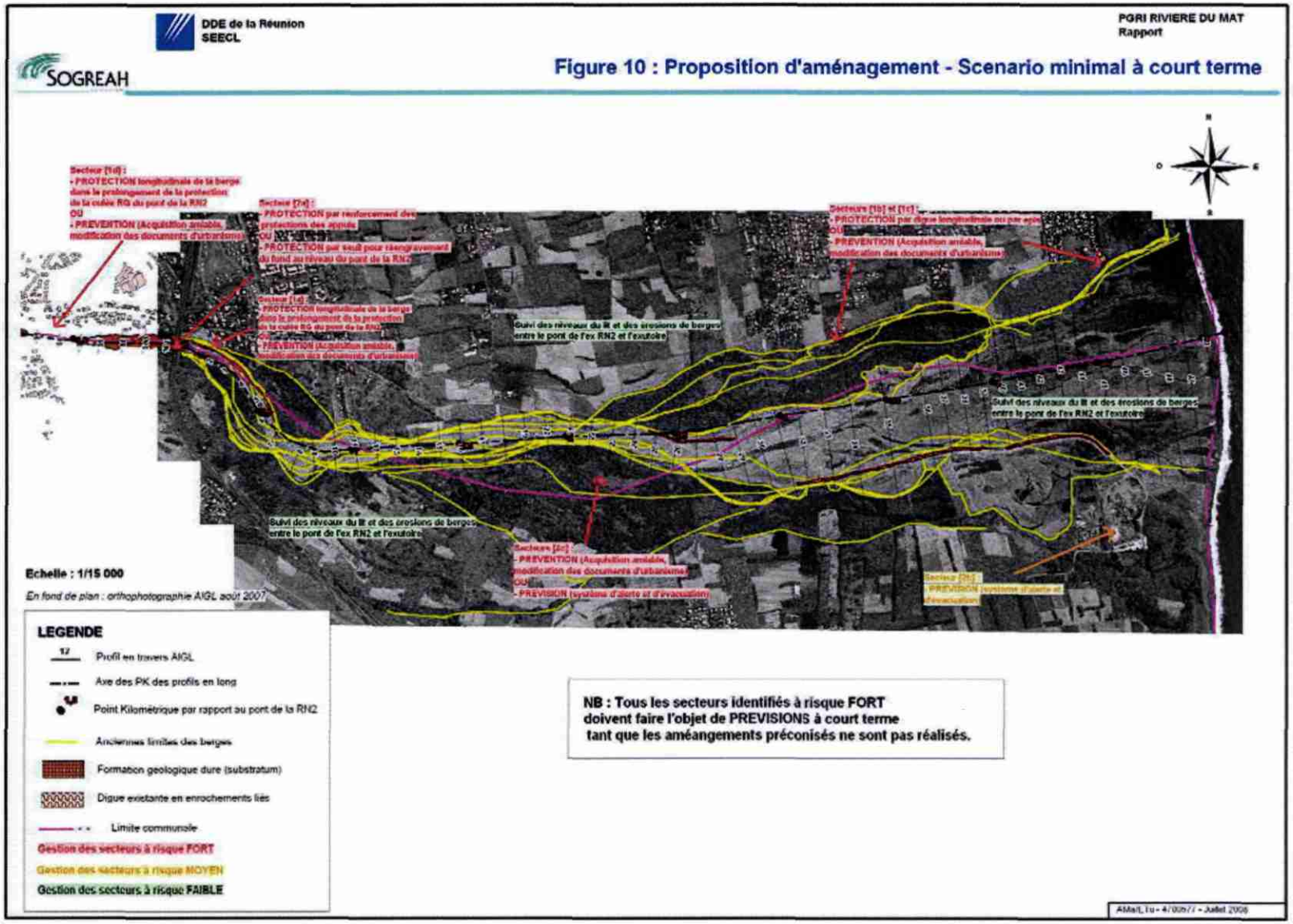
Scenarios d'aménagement proposés par Sogreah

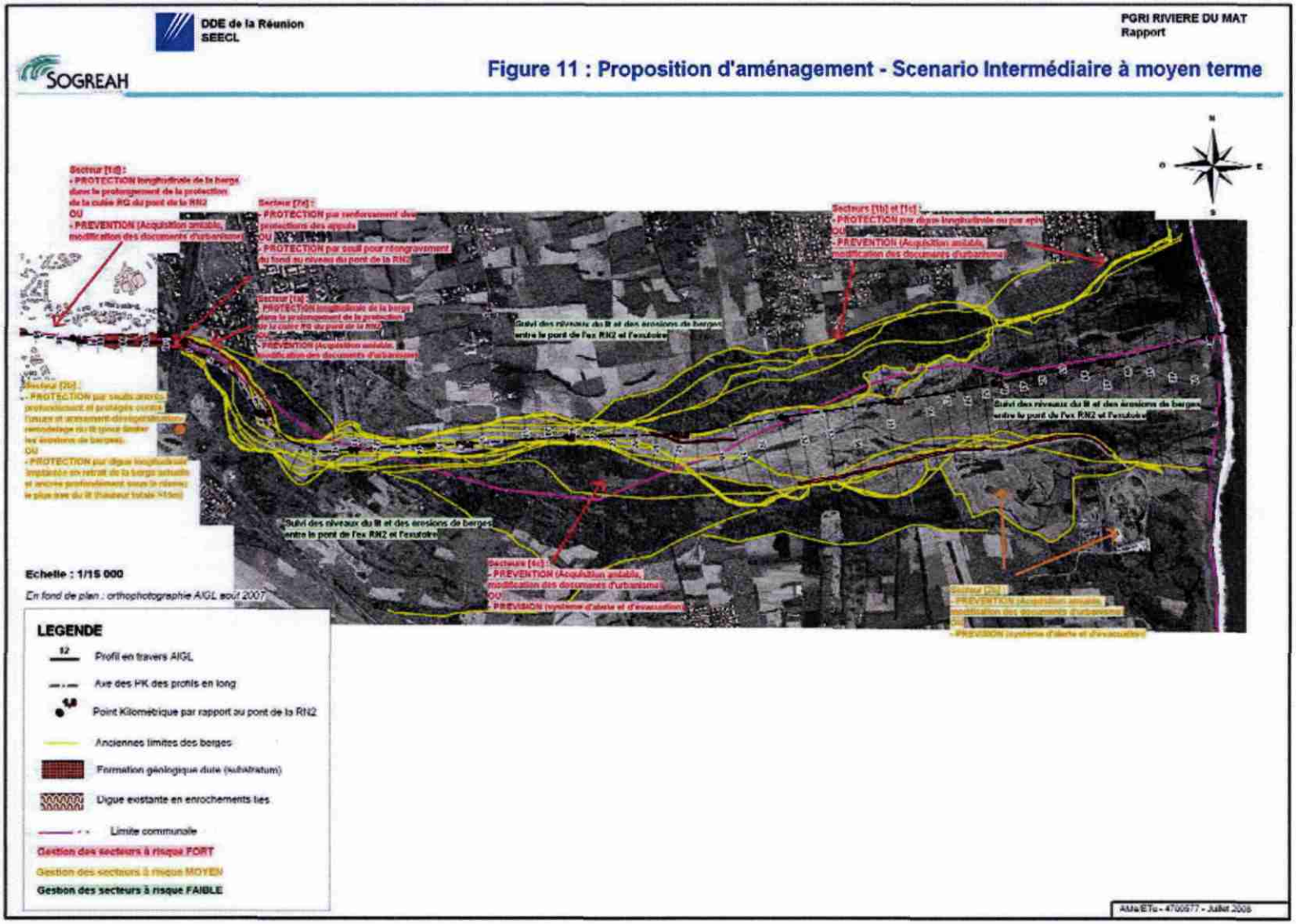
DDE de la Réunion
SEECL

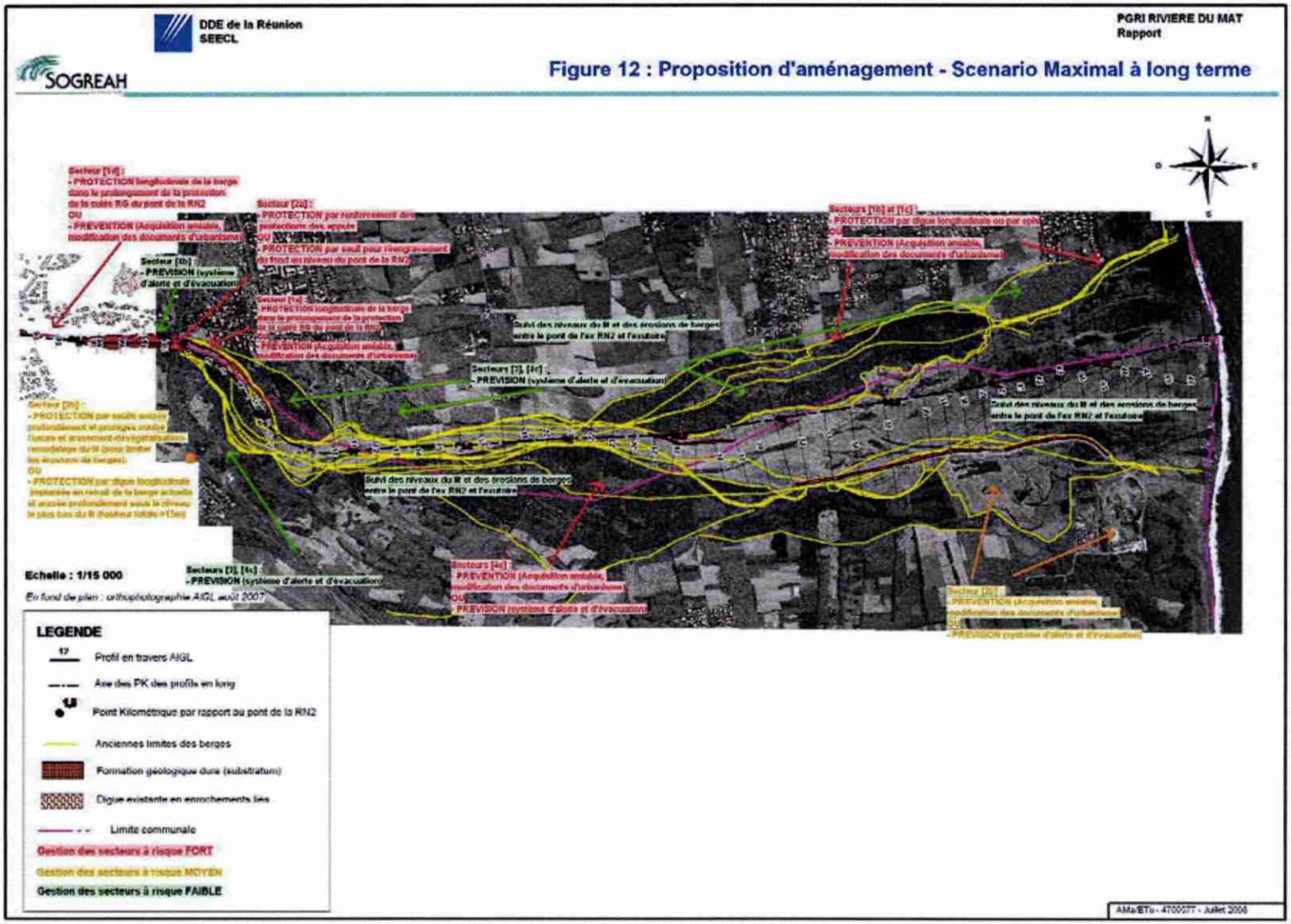
SOGREAH

PGRI RIVIERE DU MAT
Rapport

Figure 10 : Proposition d'aménagement - Scenario minimal à court terme




DDE de la Réunion
SEECL
SOGREAH
PGRI RIVIERE DU MAT
Rapport
Figure 11 : Proposition d'aménagement - Scenario Intermédiaire à moyen terme
Echelle : 1/15 000
En fond de plan : orthophotographie AIGL août 2007
LEGENDE
Profil en travers AIGL
Axe des PK des profils en long
Point Kilométrique par rapport au pont de la RN2
Anciennes limites des berges
Formation géologique dure (substratum)
Digue existante en enrochements liés
Limite communale
Gestion des secteurs à risque FORT
Gestion des secteurs à risque MOYEN
Gestion des secteurs à risque FAIBLE
Suivi des niveaux du lit et des érosions de berges entre le pont de l'ex RN2 et l'exutoire
Suivi des niveaux du lit et des érosions de berges entre le pont de l'ex RN2 et l'exutoire
Suivi des niveaux du lit et des érosions de berges entre le pont de l'ex RN2 et l'exutoire
Secteur [1d] :
- PROTECTION longitudinale de la berge dans le prolongement de la protection de la culée RG du pont de la RN2
OU
- PREVENTION (Acquisition amiable, modification des documents d'urbanisme)
Secteur [7a] :
- PROTECTION par renforcement des protections des appuis
OU
- PROTECTION par seuil pour réengravement du fond au niveau du pont de la RN2
Secteur [1a] :
- PROTECTION longitudinale de la berge dans le prolongement de la protection de la culée RG du pont de la RN2
OU
- PREVENTION (Acquisition amiable, modification des documents d'urbanisme)
Secteurs [1b] et [1c] :
- PROTECTION par digue longitudinale ou par épis
OU
- PREVENTION (Acquisition amiable, modification des documents d'urbanisme)
Secteur [2b] :
- PROTECTION par seuils arrivés profondément et protégés contre l'usure et arrivement des opérations remodelage du lit (pour limiter les érosions de berges).
OU
- PROTECTION par digue longitudinale implantée en retrait de la berge actuelle et ancrée profondément sous le niveau le plus bas du lit (hauteur totale >15m)
Secteurs [4c] :
- PREVENTION (Acquisition amiable, modification des documents d'urbanisme)
OU
- PREVISION (système d'alerte et d'évacuation)
Secteur [2c] :
- PREVENTION (Acquisition amiable, modification des documents d'urbanisme)
OU
- PREVISION (système d'alerte et d'évacuation)
AMa/ETu - 4700577 - Juillet 2008


DDE de la Réunion
SEECL
SOGREAH
PGRI RIVIERE DU MAT
Rapport
Figure 12 : Proposition d'aménagement - Scenario Maximal à long terme
Echelle : 1/15 000
En fond de plan : orthophotographie AIGL août 2007
LEGENDE
Profil en travers AIGL
Axe des PK des profils en long
Point Kilométrique par rapport au pont de la RN2
Anciennes limites des berges
Formation géologique dure (substratum)
Digue existante en enrochements liés
Limite communale
Gestion des secteurs à risque FORT
Gestion des secteurs à risque MOYEN
Gestion des secteurs à risque FAIBLE
AMa/ETu - 4700077 - Juillet 2008

Centre scientifique et technique
3, avenue Claude-Guillemin
BP 36009
45060 – Orléans Cedex 2 – France
Tél. : 02 38 64 34 34

Service géologique régional Réunion
5, rue Ste Anne BP 906
97478 – St Denis Cedex
France
Tél. : 02 62 21 22 14