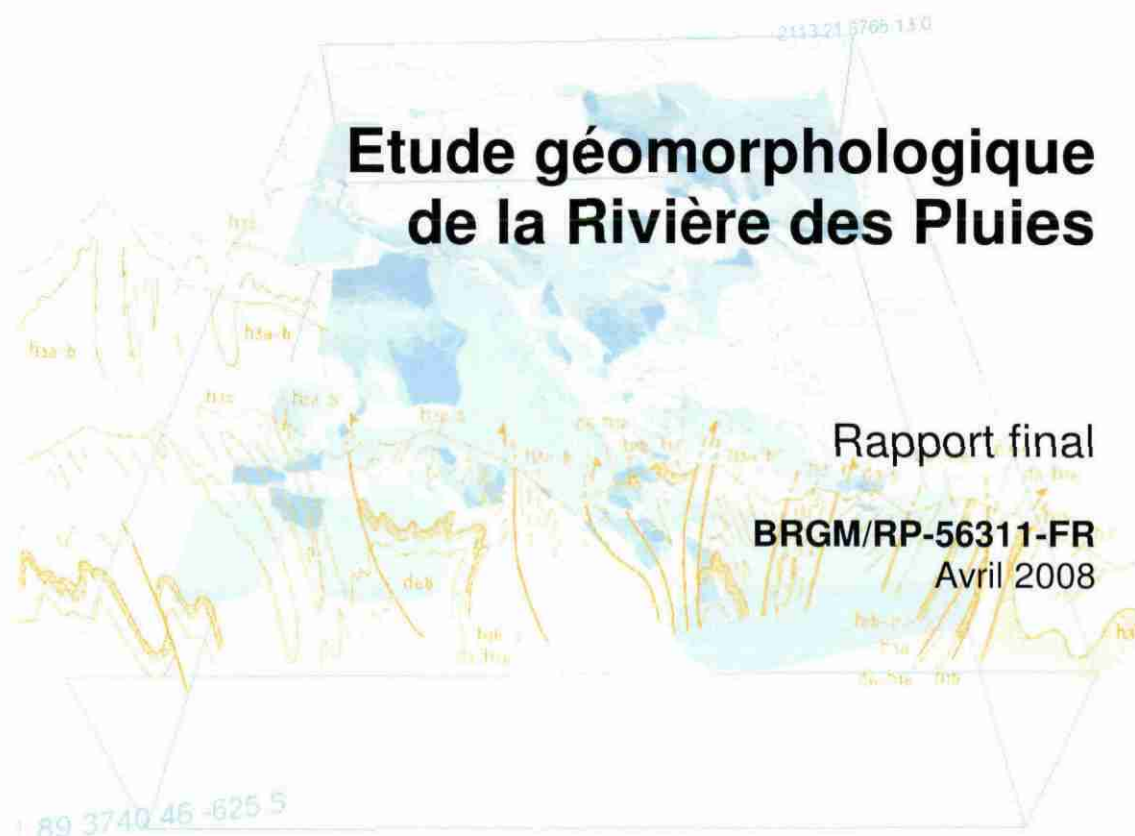




Etude géomorphologique de la Rivière des Pluies

Rapport final

BRGM/RP-56311-FR
Avril 2008

E. Lucas
Avec la collaboration de
M. Cruchet

Vérificateur :

Nom : E JAQUES

Date : 10/03/08

Signature :

Original signé

Approbateur :

Nom : JL NEDELLEC

Date : 01/03/08

Signature :

Original signé

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

Mots clés : Ile de La Réunion, Rivière des Pluies, géomorphologie, géologie, alluvions, mouvements de terrain, érosion de berges, transport solide.

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

Lucas E., collaboration Cruchet M. (2007) – Etude géomorphologique de la rivière des Pluies. Rapport BRGM/RP-56311-FR, 62p., 52 ill., 2 ann..

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

Synthèse

La rivière des Pluies, qui draine un bassin versant de 47 Km² culminant à plus de 2000 m d'altitude, est un cours d'eau au profil en long accentué avec des débits de crues considérables.

La partie amont du bassin versant, siège d'une érosion intense, peut être assujéti à des mouvements de terrain de grande ampleur (à l'échelle humaine) ; tel fut le cas en 2002 où plus de 500 000 m³ de matériaux ont obstrué la vallée au droit du Grand Eboulis. Cet apport de matériaux a engendré un bouleversement de la morphologie du lit et a entraîné une modification du mode de fonctionnement de la rivière en terme de transport solide.

Ces perturbations ont particulièrement affecté la partie aval du cours d'eau où de nombreux dégâts matériels ont été à déplorer lors des fortes crues de la rivière en février et mars 2006.

Dans ce contexte, il est apparu nécessaire de redéfinir les processus hydrogéomorphologiques régissant l'évolution actuelle de la rivière.

Dans le cadre du Plan de Gestion du Risque d'Inondation (PGRI), la Communauté Intercommunale du Nord de la Réunion (CINOR) a confié au bureau d'étude SOGREAH la réalisation d'une étude de protection contre les crues de la Rivière des Pluies. Cette étude est basée sur une approche hydraulique, géomorphologique et environnementale.

Le BRGM, agissant en tant que sous traitant de SOGREAH, a en charge les deux premières phases de l'étude qui a consisté dans un premier temps à rassembler et analyser les données existantes, et dans un second temps, à réaliser l'étude géomorphologique de la rivière. Ces deux phases ont précédé la phase 3 qui a consisté à proposer des solutions de gestion et d'aménagement de la rivière.

La réalisation de la carte géomorphologique a permis de :

1. caractériser la nature des formations géologiques (issus de phénomènes gravitaires ou de l'activité volcanique) et sédimentaires (processus fluviaux) du lit de la rivière et de ses berges jusqu'au lit majeur étendu ;
2. de localiser les secteurs en engraissement (présence de plages d'atterrissement) ou en érosion, afin de mieux comprendre les processus physiques régissant l'évolution actuelle du lit de la Rivière des Pluies.

La rivière des Pluies présente une morphologie bien marquée qui varie d'amont en aval, permettant de la diviser en 3 segments :

- segment 1 - c'est un vaste amphithéâtre de plus de 1 000 m de dénivelé (vaste proto-cirque) correspondant à une zone d'apport de matériaux et de concentration des écoulements ;
- segment 2 - ce tronçon correspond à une zone de transit des matériaux depuis le cours amont, mais également une zone de remaniement des dépôts formant des lambeaux de terrasses à la base des versants très encaissés. On y observe également des apports en provenance des remparts ;
- segment 3 - l'élargissement du lit et la diminution de la pente du profil favorisent le stockage des matériaux au niveau d'îlots et de terrasses alluviales bien développées.

Les résultats de cette étude ont été mis en relation avec les données existantes, récoltées au cours de l'étude bibliographique de la phase I, afin d'évaluer une tendance d'évolution future du bassin versant.

Le rythme des apports, qui varie dans le temps, associé à des conditions climatiques exceptionnelles récurrentes, donne lieu à un mode de transport dont dépend la morphologie de la rivière. L'apport de 500 000 m³ de matériaux issus de l'éboulement de 2002 a entraîné un engraissement du lit jusqu'au Cap Frumence jusqu'à début 2006. Suite aux fortes crues de février et mars 2006, ces matériaux ont migré vers l'aval rehaussant le niveau du lit et occasionnant des dégâts importants au niveau du cône torrentiel très urbanisé. Ainsi, la quantité de matériaux étant très supérieure à la capacité de transport de la rivière (pas de précipitations exceptionnelles), les sédiments ont été déplacés de la section amont vers la section aval entraînant un engraissement du lit.

Au cours de la prochaine crue, les zones d'atterrissement étant peu développées sur les cours amont et intermédiaire, la rivière aura tendance à se recharger en aval là où le stock de sédiment disponible pour le transport est le plus important.

Deux scénarios sont alors possibles en fonction de l'intensité et de la durée des événements climatiques à venir :

1. si la crue est suffisamment importante, les sédiments vont sortir du bassin versant à la faveur d'un seul événement (étant proche de l'embouchure) ;
2. dans le cas contraire, le stock de matériaux ne sera qu'en partie remobilisé et ne fera que migrer un peu plus en aval.

Sommaire

1. Objet de l'étude	11
2. Description du secteur d'étude	13
2.1. GENERALITES	13
2.1.1. Situation géographique.....	13
2.1.2. Contexte hydrologique.....	14
2.1.3. Contexte géologique.....	17
2.2. LE COURS D'EAU	18
2.2.1. Segment 1 : Cours amont.....	18
2.2.2. Segment 2 : Cours intermédiaire	19
2.2.3. Segment 3 : Cours aval	20
3. Etude géomorphologique	23
3.1. CARTE GEOMORPHOLOGIQUE	23
3.2. LES AMENAGEMENTS	24
3.3. NATURE DES BERGES.....	25
3.3.1. Les berges rocheuses	25
3.3.2. Les berges formées de brèches	28
3.3.3. Les berges formées d'alluvions	31
3.4. SENSIBILITE DES BERGES VIS-A-VIS DE L'EROSION.....	33
4. Transit des matériaux dans le lit de la rivière des Pluies	41
4.1. LES APPORTS DE VERSANT	41
4.2. LES APPORTS PONCTUELS PAR LES MOUVEMENTS DE TERRAIN DE GRANDE AMPLEUR DU SITE DU GRAND EBOULIS	46
4.2.1. L'éboulement de très grande ampleur du rempart	46
4.2.2. L'éboulement de mars 2002	48
4.2.3. L'érosion du relief du Grand Eboulis	49
4.3. TRANSIT DES MATERIAUX ISSUS DE L'EBOULEMENT DE MARS 2002	51
4.3.1. Etat des lieux en octobre 2003	51
4.3.2. Evolution des matériaux entre le 14 février 2006 et décembre 2007.....	53

4.4. TRANSPORT SOLIDE ET STOCK DE MATERIAUX RENOUVELABLE.....	57
5. Etat des lieux historiques et tendance d'évolution du bassin versant.....	59
5.1. LES MOUVEMENTS DE GRANDE AMPLEUR.....	59
5.1.1. Définitions	59
5.1.2. Les éboulements en masse à La Réunion et leur fréquence	60
5.2. CAS DE LA RIVIERE DES PLUIES	62
5.2.1. Recensement des mouvements de terrain historiques avérés et des indices ..	62
5.2.2. Evolution de l'amont du bassin versant	64
6. Conclusions	67
Bibliographie.....	69

Liste des illustrations

Illustration 1 : localisation de la Rivière des Pluies sur la planèze Nord.....	13
Illustration 2 : délimitation des sous-bassins versants de la Rivière des Pluies	15
Illustration 3 : carte des altitudes (MNT, IGN2003).....	16
Illustration 4: extrait de la carte géologique au 1 :100 000 de Billard (1974).....	17
Illustration 6 : localisation du segment 2 entre le Cap Frumence et la confluence Ravine Montauban	19
Illustration 7 : localisation du segment 3 de la confluence Ravine Montauban au débouché en mer...	20
Illustration 8 : terrasse habitée d'Ilet la Pluie les bas, en rive droite.....	21
Illustration 9 : berge rocheuse située en face de l'Ilet Quinquina amont	25
Illustration 10 : affleurements du substratum rocheux dans le lit mineur en aval du Pont Domenjod...	26
Illustration 11 : affleurement en rive gauche des dernières barres rocheuses sur le cours aval.....	27
Illustration 12: altération « en boules » du substratum sur le cours aval	27
Illustration 13 : dépôt d'avalanche de débris présentant une texture originelle préservée en amont du chantier du transfert des eaux.....	28
Illustration 14 : Dépôt d'avalanche de débris présentant un faciès mélangé avec apparition de matrice entre les clastes (au droit du dépôt de marinage du chantier de transfert des eaux)..	29
Illustration 15 : ilot de coulée de débris présentant un faciès à gros blocs (secteur d'Ilet Quinquina).	30
Illustration 16 : dépôts cimentés de coulées de débris au niveau du pont de Domenjod.....	30
Illustration 17: dépôt d'alluvions actuelles au niveau du forage de la Rivière des Pluies.....	31
Illustration 18: dépôt d'alluvions récentes sur le cours intermédiaire (terrasse en aval du Cap Soldat)	31

Illustration 19 : escarpement d'alluvions anciennes au droit du « Goulet de Montauban »	32
Illustration 20 : berges « résistantes » de coulées de débris cohésives au droit du Pont Domenjod ..	33
Illustration 21 : début d'affouillement à la base du pilier rive gauche du Pont Domenjod	34
Illustration 22 : sous-cavage dans des dépôts d'alluvions anciennes hétérogènes	35
Illustration 23 : dépôt de coulée de débris non-cohésive sur le cours intermédiaire	36
Illustration 24 : sapement de la base de la terrasse alluviale en face de la confluence de la ravine Montauban	37
Illustration 25 : terrasse alluviale du Lotissement Sindrama	38
Illustration 26 : érosion de la terrasse alluviale actuelle en face d'Ilet Quinquina amont	39
Illustration 27 : dépôts d'alluvions actuelles très friables	39
Illustration 28 : arrachements dans le rempart Est dominant le Grand Eboulis	43
Illustration 29 : traces d'éboulements affectant la bordure de l'Ilet Ronde	44
Illustration 30 : instabilités de versant au droit d'Ilet La Pluie	44
Illustration 31 : chaos provenant d'un éboulement à l'Ilet La Pluie	45
Illustration 32 : étude photo interprétative du site du Grand Eboulis (Y. Fèvre - 2005)	46
Illustration 33 : localisation de la niche d'arrachement sur imagerie Google	47
Illustration 34 : la niche d'arrachement supposée vue depuis la Rivière des Pluies (cliché 2007)	47
Illustration 35 : barrage naturel du grand Eboulis (cliché BRGM du 05 mars 2002)	48
Illustration 36 : évolution du relief du Grand Eboulis depuis 1966 (photos IGN)	49
Illustration 37 : érosion du flanc NE du relief du Grand Eboulis (cliché novembre 2007)	50
Illustration 38 : front du barrage en 2002	51
Illustration 39 : localisation des principales zones d'atterrissement visibles en 2003 dans la partie amont de la Rivière des Pluies (extrait de la carte géomorphologique au 1/11 500, BRGM 2006)	52
Illustration 40 : engravement du lit de la Rivière des Pluies à l'aval du barrage (cliché 2003)	53
Illustration 41 : lit de la rivière à l'aval du Grand Eboulis (cliché du 14 février 2006)	54
Illustration 42 : creusement du lit à l'aval immédiat du barrage en 2007 (cliché décembre 2007)	54
Illustration 43 : zone d'atterrissement entre les deux verrous (galets anguleux zéolités), à la confluence de la ravine la Nage et de la Ravine du Diable (cliché décembre 2007) ..	55
Illustration 44 : dépôts de matériaux fins lités (sables, graviers) à 1 km en aval du « Grand Eboulis ». (cliché décembre 2007)	55
Illustration 45 : dépôts à la sortie du verrou situé en amont du chantier du transfert des eaux en décembre 2003.	56
Illustration 46 : verrou situé en amont du chantier du transfert des eaux en décembre 2007.	56
Illustration 47 : plage d'atterrissement à l'aval de la confluence avec la Ravine Montauban	58
Illustration 48 : plage d'atterrissement en amont du canal La Mare	58

Illustration 49 : recensement des mouvements de grande ampleur ayant affecté les grandes ravines de l'île (BRGM, 2007)	61
Illustration 50 : carte des phénomènes avérés et des indices de mouvement de terrain dans le bassin versant de la Rivière des Pluies	63
Illustration 51 : vue d'ensemble de l'éboulement de Mars 2002 (cliché décembre 2007)	64
Illustration 52 : extrait du modèle numérique de terrain d'une partie du bassin versant de la Rivière des Pluies (réalisé sous Arcview)	66

Liste des annexes

- Annexe 1 (hors texte): Carte géomorphologique de la Rivière des Pluies du Grand Eboulis jusqu'à l'Îlet Quinquina Amont et du pont métallique de la RN 102 jusqu'au débouché en mer (échelle 1/6 000).
- Annexe 2 (hors texte): Carte géomorphologique de la rivière des Pluies sur le secteur à aménager allant de l'Îlet Quinquina Amont jusqu'au pont métallique de la RN 102 (échelle 1/2 000).

1. Objet de l'étude

La connaissance des processus hydrogéomorphologiques qui régissent le fonctionnement de la Rivière des Pluies constitue une étape préliminaire importante avant l'identification et la proposition de mesures de gestion et de protection adaptées.

Dans le cadre de la consultation publique de la Communauté Intercommunale du Nord de la Réunion (CINOR) pour la réalisation de l'étude de protection contre les crues de la Rivière des Pluies, le bureau d'étude SOGREAH a sollicité le BRGM pour l'assister en tant que sous-traitant au cours des deux premières phases de l'étude.

L'objet de l'appel d'offre consiste à :

- 1) mettre à disposition l'ensemble des archives (documents « papier » et numériques) du BRGM relatives à la Rivière des Pluies (rapports, comptes rendu d'expertise, cartes et photographies aériennes) et réaliser une analyse critique sur le contenu des documents existants (phase 1) ;
- 2) analyser la géomorphologie du cours d'eau sur un secteur allant du site du « grand éboulis » jusqu'au débouché en mer, soit sur un linéaire de 13 km environ (phase 2).

Au cours de cette phase 2, une classification typologique de la Rivière des Pluies a été établie avec :

- la caractérisation de la nature des formations présentes dans le lit de la rivière, du lit mineur au lit majeur étendu (nature géologique, érodabilité, granulométrie et blocométrie qualitative : méthode de Wolman simplifiée – sans essai en laboratoire) ;
- la délimitation des zones d'apport actuelles, des secteurs en engraissement (dépôts) ou en incision (érosion du lit), sur la base d'observations visuelles sur site et d'interprétation des photographies aériennes récentes.

Cette étude a abouti à la réalisation d'une carte géomorphologique à l'échelle du 1/ 2 000 du pont métallique de la RN 102 jusqu'à l'Ilet Quinquina Amont et à l'échelle du 1/6 000 sur le reste du linéaire.

Cet « état des lieux » permettra de mieux comprendre les processus physiques ayant modifié la morphologie du lit de la Rivière des Pluies au cours de ces dernières années (y compris l'impact de l'éboulement de 2002) et déterminer ainsi des tendances d'évolution à venir.

Ce rapport sera en partie repris dans le rendu de phase 2 du bureau d'étude SOGREAH : « Etude hydrogéomorphologique de la Rivière-Caractérisation des processus physiques », rapport N°4700492 R2.

2. Description du secteur d'étude

2.1. GENERALITES

2.1.1. Situation géographique

La Rivière des Pluies, d'une longueur totale de 18.5 km, se situe à la limite communale de Saint-Denis et de Sainte-Marie (illustration 1). Elle prend naissance au pied de la Caverne Soldat (2000 m d'altitude) et entaille profondément le flanc Nord du Piton des Neiges dominé par la Roche Ecrite, entre la Plaine des Chicots à l'Ouest et la Plaine des Fougères à l'Est.

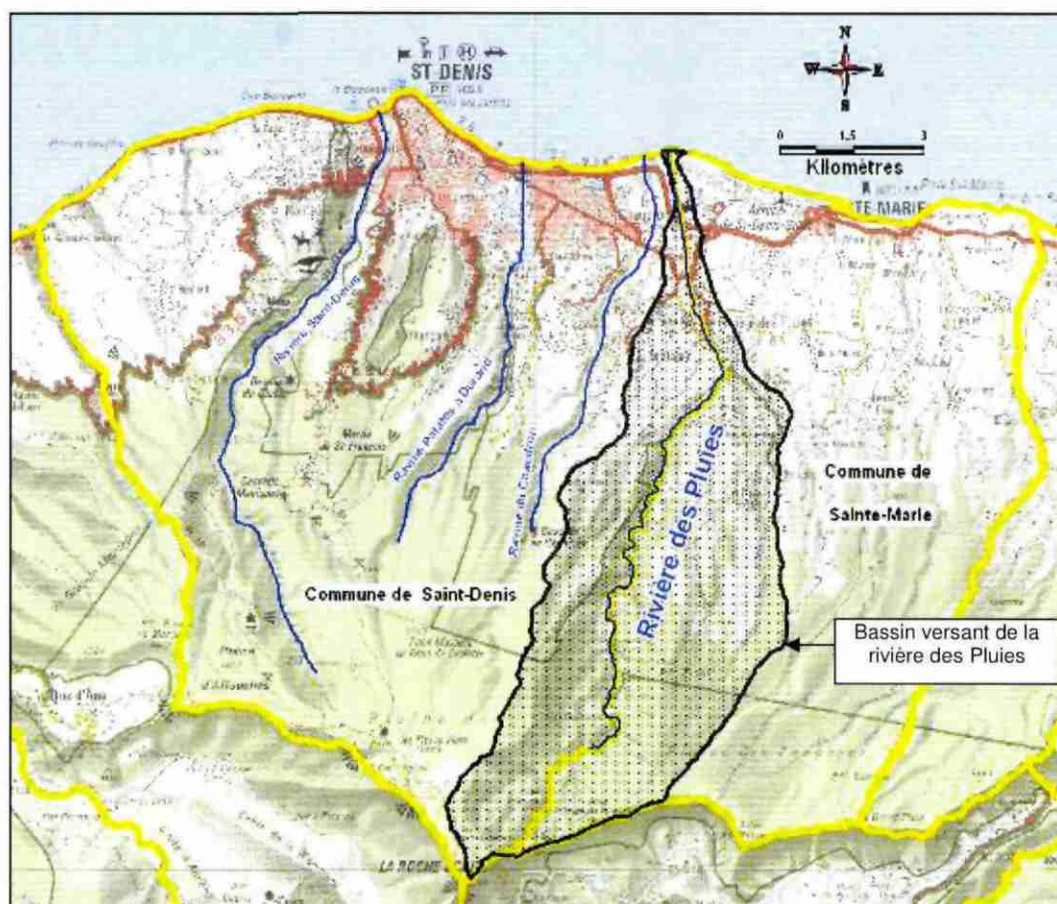


Illustration 1 : localisation de la Rivière des Pluies sur la planète Nord

2.1.2. Contexte hydrologique

La Rivière des Pluies fait partie des grandes rivières pérennes de La Réunion.

Son bassin versant, d'une superficie de 46 Km², est constitué de 5 sous-bassins (illustration 2) qui sont :

- le bassin de la Rivière des Pluies « amont », vaste amphithéâtre drainé par de nombreuses ravines perchées (Grande Ravine, Ravine du Grand Bénoune, Ravine La Nage, etc....) ;
- le bassin de la Ravine Montauban, affluent en rive gauche dont la confluence se situe à l'amont d'Ilet Quinquina ;
- le bassin de la Ravine Kiwi qui rejoint la rivière des Pluies en rive droite, à hauteur de l'Ilet Quinquina ;
- les bassins de la Ravine Bachelier et la Ravine Sèche, affluents en rive droite qui se rejoignent avant leur confluence avec la Rivière des Pluies en rive droite, à l'amont du village de la Rivière des Pluies ;
- le bassin de la Ravine Cadet, affluent en rive gauche, qui rejoint la Rivière des Pluies entre le pont de Domenjod et le pont métallique.

Ces ravines secondaires sont légèrement encaissées sur la planèze (faible dénivelé et berges peu abruptes).

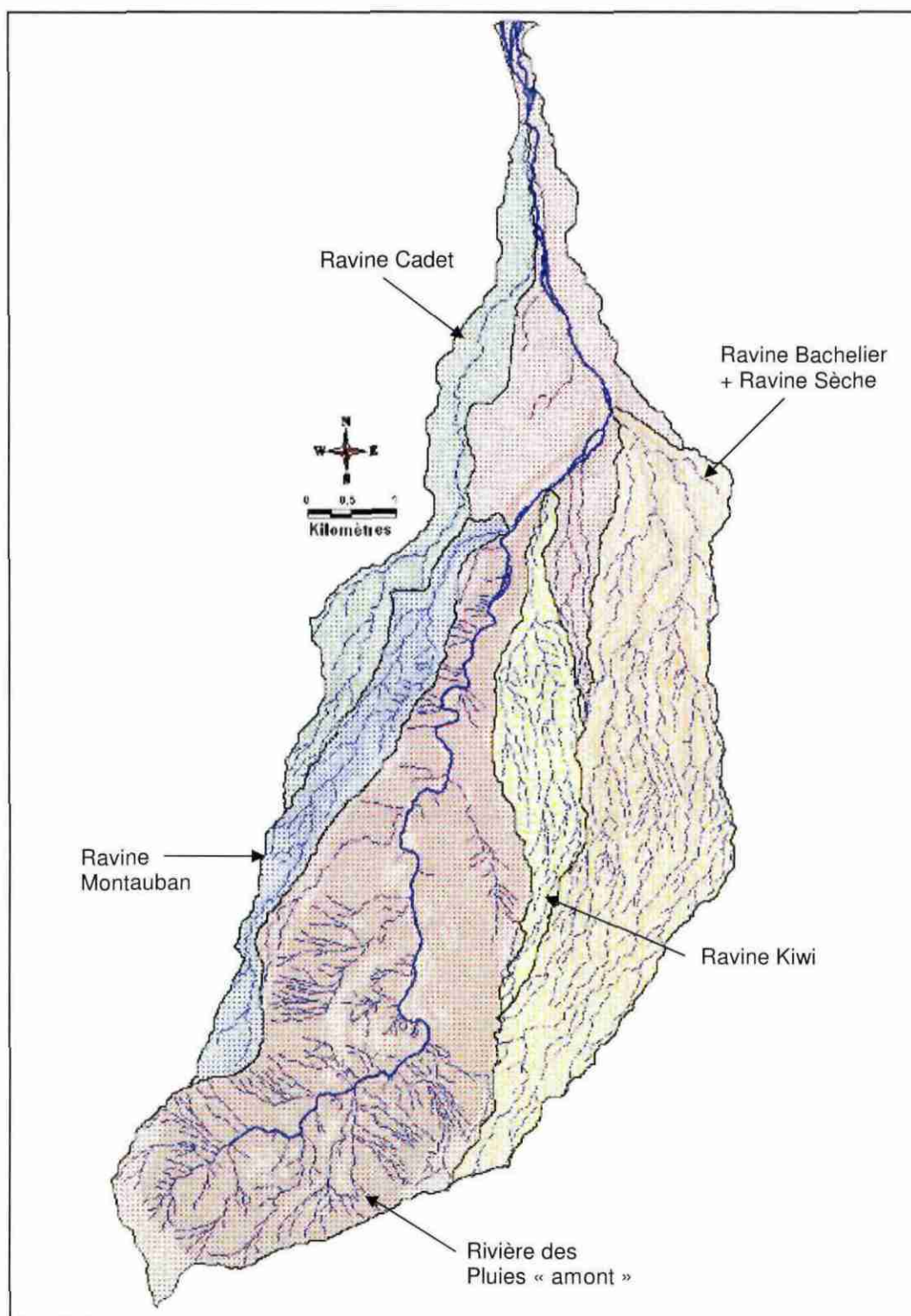


Illustration 2 : délimitation des sous bassins versants de la Rivière des Pluies

Le bassin versant de la Rivière des Pluies est très arrosé. Environ 50% de son territoire se situe à des altitudes supérieures à 1000 m (illustration 3). Les maxima de précipitations se manifestent entre 800 et 1500 m d'altitude (Humbert, 1985). Les précipitations moyennes annuelles sont importantes, entre 2000 et 2500 mm par an (Quételard et Chantrelle, 1999).

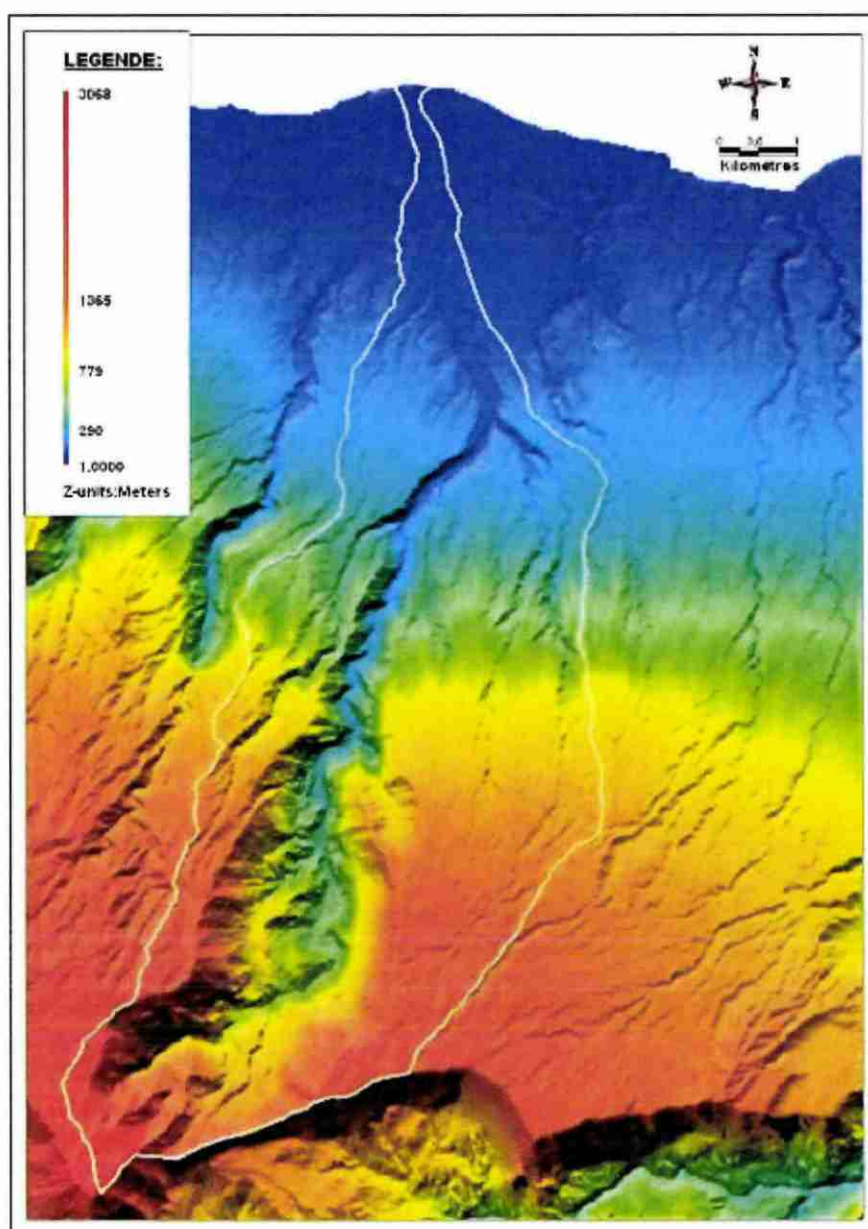


Illustration 3 : carte des altitudes (MNT, IGN2003)

Les débits d'étiage mesurés par l'ORE (de 1998 à 2002) sont très faibles avec une valeur médiane de l'ordre de $0,4 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$.

Les débits de crues estimés par l'ORE au cours de trois événements cycloniques majeurs (Jenny 1977, Hyacinthe 1980, Anacelle 1998) depuis 30 ans, sont supérieurs à $600 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$.

2.1.3. Contexte géologique

La rivière des Pluies incise les formations volcaniques du Massif du Piton des Neiges sur plus de 1000 m de profondeur, mettant à jour les séries les plus anciennes d'âge supérieur à 2,1 Ma (illustration 4). Les formations de la Phase I (d'après Billard, 1974) sont constituées de brèches basaltiques et d'« agglomérats » plus ou moins cimentés. Généralement très altérée, et zéolitisée, ces roches s'observent essentiellement au fond des cirques ; elles affleurent dans le lit de la rivière sur son cours amont.

Les remparts sont constitués par un empilement de coulées laviques et de niveaux scoriacés interstratifiés issus des phases d'activité II et III du Piton des Neiges. Sur un plan lithologique, les laves de la phase II sont formées par des basaltes à olivine et des océanites, alors que celles de la phase III sont constituées de laves différenciées à phénocristaux de feldspath dominants (Hawaïte, Mugéarite, etc.).

Les coulées de phase IV, les plus récentes qui affleurent au sommet des remparts, structurent les pentes de la planèze du bassin versant.

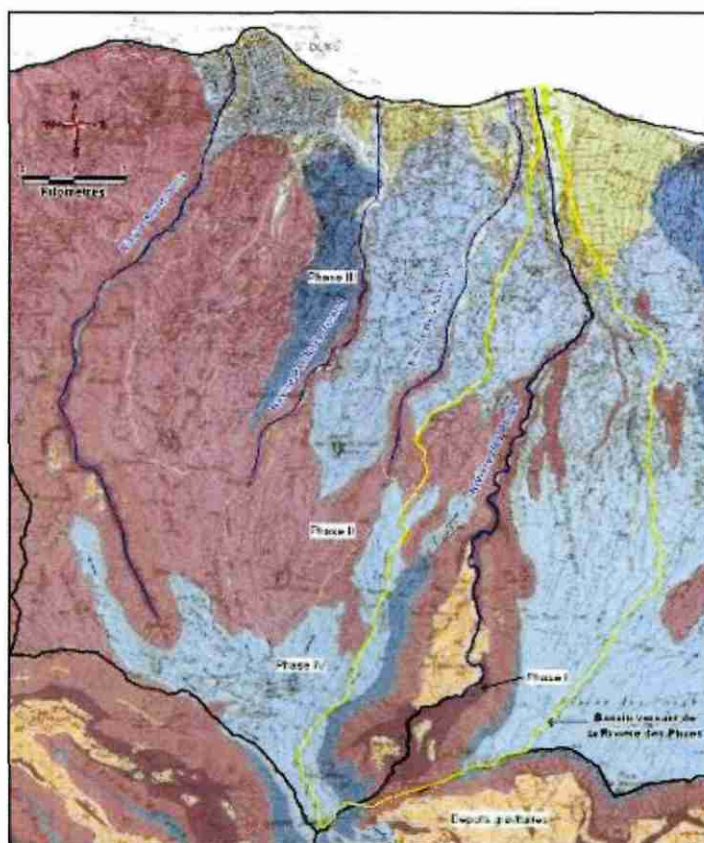


Illustration 4: extrait de la carte géologique au 1/100 000 de Billard (1974)

La carte géologique représente deux types de formations superficielles : les dépôts alluviaux (récents et anciens) dans la partie aval de la rivière et les dépôts gravitaires issus d'anciens glissements de terrain en masse et d'éboulement dans sa partie amont.

2.2. LE COURS D'EAU

D'un point de vue géomorphologique, le cours de la Rivière des Pluies peut être divisé en trois segments distincts.

2.2.1. Segment 1 : cours amont

Sur son cours amont, la Rivière des Pluies draine un vaste amphithéâtre dont les remparts dominent le fond de la rivière de plus de 1000 m. Son extension latérale maximale est de 2,5 Km pour une longueur de 7 Km de long.

Le réseau hydrographique se caractérise par une ramification dense en éventail du fait des nombreuses ravines perchées qui entaillent les versants. A la base des remparts, ces dernières sont récoltées par la rivière qui présente une pente forte et irrégulière, avec une succession de cascades jusqu'au Grand Eboulis.

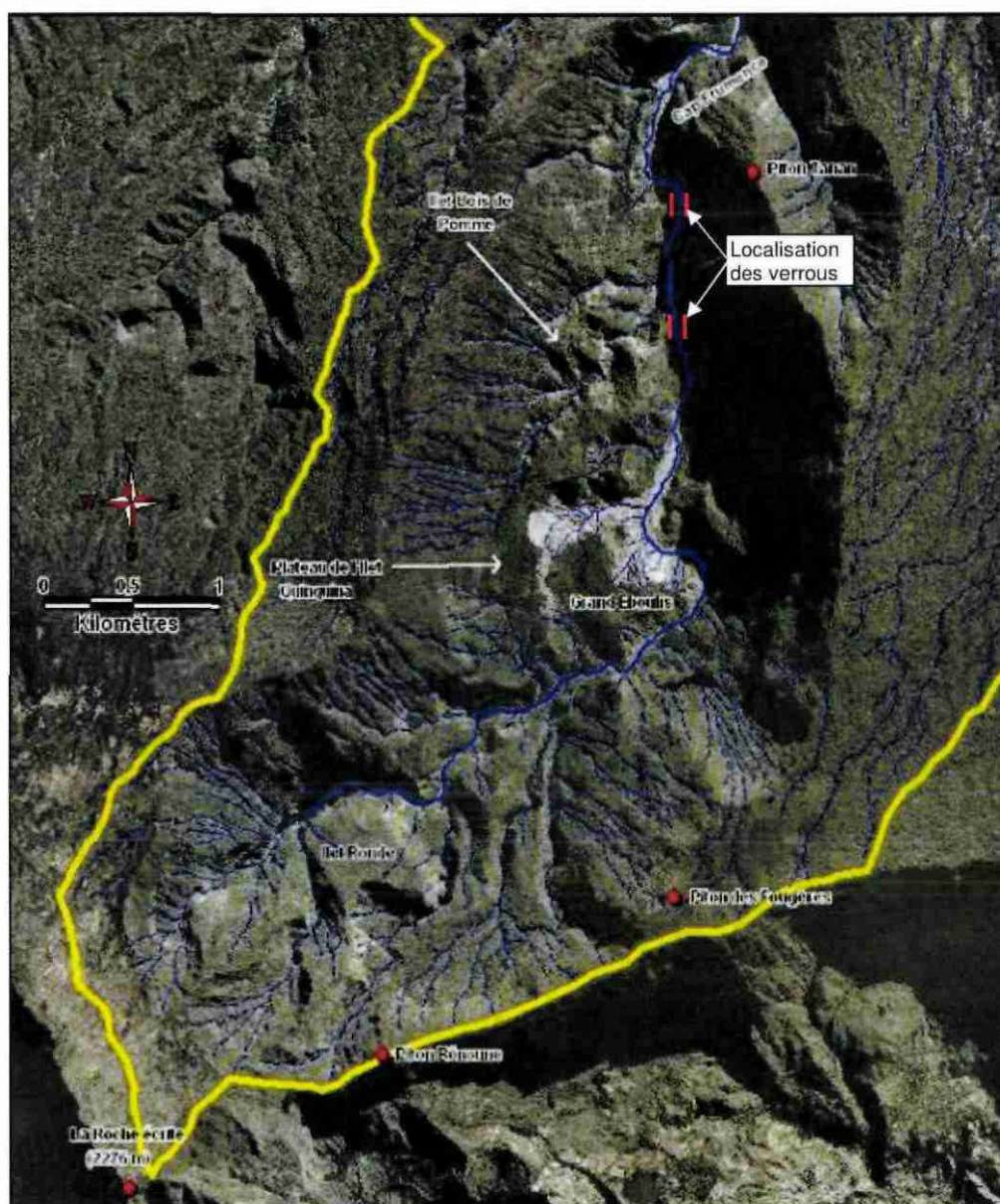


Illustration 5: localisation du Segment 1 de la Roche Ecrée au Cap Frumence

2.2.2. Segment 2 : cours intermédiaire

Dans sa partie intermédiaire, allant du Cap Frumence (fermeture du mini-cirque amont) à la confluence de la Ravine Montauban, le lit de la rivière est fortement encaissé et présente un tracé relativement rectiligne en dehors de quelques méandres bien prononcés. Les versants encaissants dont la hauteur décroît d'amont en aval (de 500m à 150m), sont formés essentiellement par des successions laves/scories de la phase II et III. La rivière coule dans des gorges étroites larges d'une cinquantaine de mètres.

Ce segment se termine par un verrou rocheux (le goulet de Montauban).



Illustration 6 : localisation du segment 2 entre le Cap Frumence et la confluence Ravine Montauban

2.2.3. Segment 3 : cours aval

Sur le cours aval qui s'étend sur 5 km de la confluence avec la ravine Montauban au débouché en mer, la rivière prend un faciès en tresse. Le lit s'élargit peu à peu puis se rétrécit en amont du Pont Domenjod (diminution de la section d'écoulement) avant de s'élargir de nouveau.

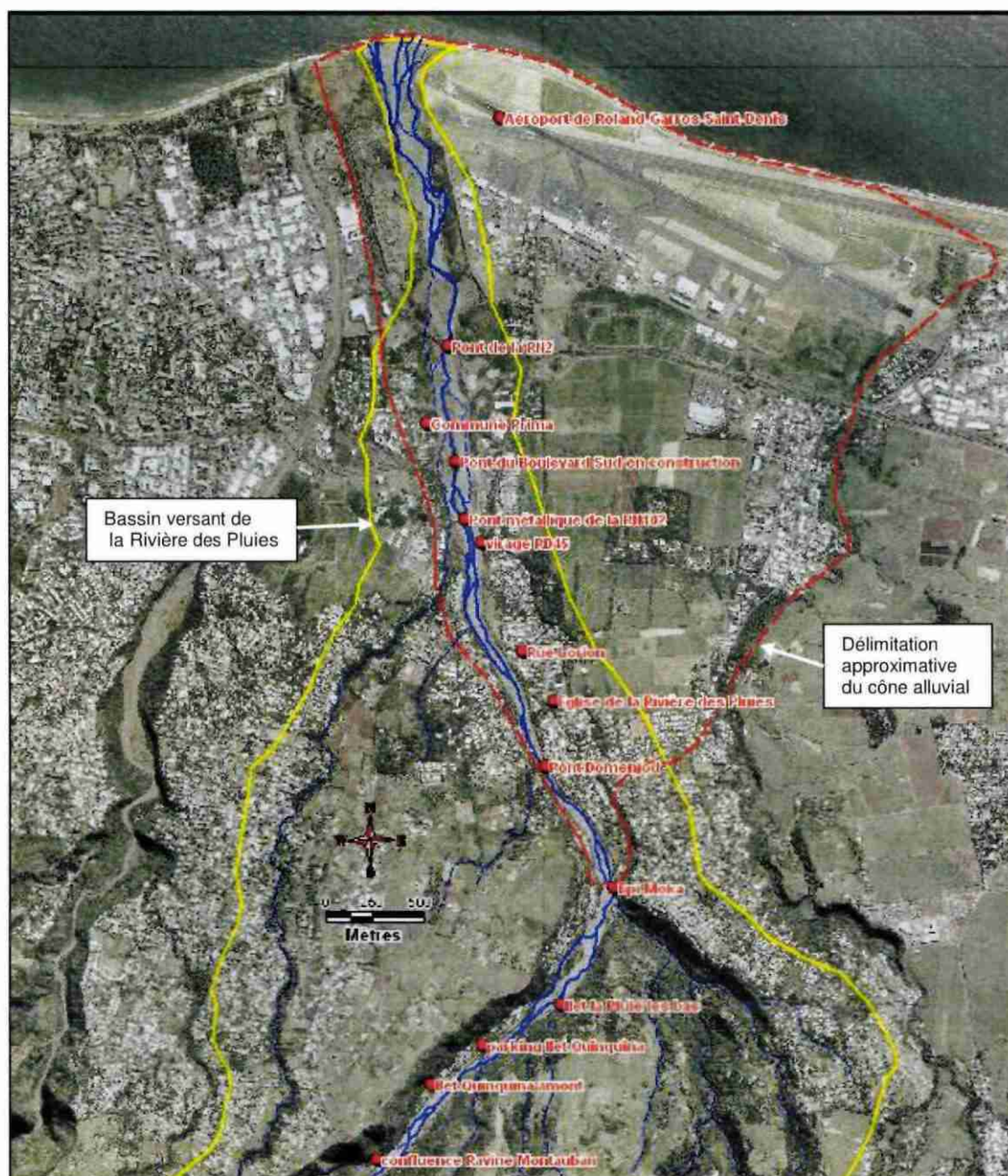


Illustration 7 : localisation du segment 3 de la confluence Ravine Montauban au débouché en mer

Ce segment aval peut être scindé en 2 tronçons :

- **De la confluence avec la ravine Montauban à l'épi Moka**, le lit majeur de la rivière est encore restreint de part et d'autre de son cours par des berges rocheuses d'une centaine de mètres de hauteur. Des terrasses habitées et/ou cultivées se sont développées au pied de ces versants (Ilet Quinquina, Ilet la Pluie les bas).



Illustration 8 : terrasse habitée d'Ilet la Pluie les bas, en rive droite.

- **A partir de l'épi Moka**, débute la plaine alluviale de la rivière des Pluies qui coule à l'extrémité occidentale de son ancien cône de déjection sur lequel est installé le village de la Rivière des Pluies. Dans ce secteur le substratum rocheux n'apparaît plus que sous forme de quelques pointements épars, localisés en rive gauche au niveau du quartier Domenjod, et en rive droite en aval du pont.

Sur le cours aval de la Rivière des Pluies de nombreux ouvrages de protection des berges ont été construits : digues, épis, enrochements libres.

Par le passé, le lit de la Rivière des Pluies a été le siège d'extraction de matériaux alluvionnaires entre le pont métallique de la RN102 et celui de la route nationale.

3. Etude géomorphologique

3.1. CARTE GEOMORPHOLOGIQUE

La carte géomorphologique de la Rivière des Pluies a été réalisée à partir de levés de terrain (report cartographique à l'aide de points GPS dans les secteurs les moins encaissés) couplés aux données topographiques disponibles (photographies aériennes, fonds topographiques).

Sur la carte géomorphologique, sont distingués :

- les ouvrages de protection : endiguements, enrochements cimentés et enrochements libres ;
- les formations présentes dans les lits mineur et majeur, de nature sédimentaire ou volcanique ;
- les principaux traits morphologiques et hydrologiques : fil d'eau actuel, zones en engraissement (atterrissements marqués), berges en érosion, zones de rétrécissement (verrous), arrachements issus de phénomènes récents.

La carte géomorphologique est présentée au format A0 en annexe sous forme de deux planches : la première à l'échelle 1/6 000 du Grand Eboulis jusqu'à l'Îlet Quinquina et du pont métallique jusqu'au débouché en mer, la seconde à l'échelle 1/2 000 du pont métallique de la RN102 à l'Îlet Quinquina Amont.

3.2. LES AMENAGEMENTS

Ces aménagements, reportés sur les cartes annexées au présent rapport consistent principalement en :

- des épis sur le cours aval, entre le pont de la RN2 et l'embouchure ;
- des endiguements en rive droite au droit du village de la Rivière des Pluies jusqu'à l'épi Moka ;
- des enrochements vers llet Quinquina et le lotissement Sindrama.

Ces grands aménagements ont été réalisés sur le cours aval de la Rivière des Pluies au cours des dernières décennies, généralement à des phénomènes climatiques majeurs ayant engendré des érosions de berges et des inondations importantes.

A la suite du passage de la dépression tropicale Hyacinthe en janvier 1980, la berge droite située en amont du pont Domenjod a été la plus touchée. La rivière a été sur le point de sortir de son lit et de contourner le village de la Rivière des Pluies. C'est pourquoi en 1981, un épi plongeant a été construit (épi Moka) afin de canaliser l'écoulement dans l'axe de la rivière. Un endiguement de la rive droite a également été réalisé afin de protéger les berges (de l'aval de l'épi jusqu'en amont du pont Domenjod).

De même, d'importants dégâts ont été occasionnés par les crues de la Rivière des Pluies durant les mois de février et mars 2006 (tempête tropicale Diwa) :

- en amont du pont métallique le parking situé en bordure de la RD45 a reculé d'une quinzaine de mètres ;
- en aval du pont Domenjod, trois habitations ont été détruites et emportées au droit du lotissement de la rue Lorion (rive droite) suite au sapement de la berge sur 35 à 40 m de profondeur ;
- en rive gauche la terrasse haute située en face de la confluence avec la ravine Bachelier a reculé de 5 à 8 m emportant le chemin d'accès aux habitations situé en sommet de berge ;
- les habitations construites sur les terrasses alluviales situées dans le secteur de l'let Quinquina ont également été menacées : une maison a été emportée en bordure de terrasse en face de l'let Quinquina. Celui-ci a également été touché.

Suite à ces fortes précipitations un certain nombre de principes généraux et de recommandations ont été proposés afin de mettre en sécurité les biens et les personnes dans les secteurs les plus touchés. La majorité de ces travaux de mise en protection des berges (essentiellement des enrochements libres ou cimentés accompagnés d'un curage modéré) ont été réalisés.

3.3. NATURE DES BERGES

3.3.1. Les berges rocheuses

Les berges rocheuses sont formées par un empilement de coulées de laves et de niveaux scoriacés. Elles affleurent largement dans les gorges du Cap Frumence à la confluence avec la ravine Montauban, là où la rivière est la plus encaissée.

Dans le secteur de l'Ilet Quinquina, les berges rocheuses affleurent principalement en rive droite (illustration 9), de l'« éperon rocheux » jusqu'au forage de la Rivière des Pluies et au niveau de la falaise située en arrière de l'épi Moka. En rive gauche, le substratum rocheux affleure au PK 3 800¹, en amont de l'Ilet Quinquina sous la forme d'un pointement rocheux et à l'entrée de l'Ilet Quinquina aval (sous la première maison de l'Ilet en contrebas d'une portion de la route).



**Illustration 9 : berge rocheuse située en face de l'Ilet Quinquina amont
(formation d'un point dur et déviation de l'écoulement)**

De l'épi Moka jusqu'au pont métallique le substratum rocheux est beaucoup plus rare : il affleure soit sous forme de talus rocheux (de 3 à 5 m de hauteur) (illustration 11) formant quatre épis naturels au niveau des berges de la rive gauche (PK1530, PK740, du PK500 au PK600 et du au PK350 au PK450), soit de façon ponctuelle dans le lit mineur en aval du pont Domenjod (aux PK1100 et PK1300).

¹ Les PK (points kilométriques) expriment la distance par rapport au pont de la RN2

Les coulées dans le lit mineur sont peu épaisses (illustration 10) et présentent une altération en « boules » bien marquée (illustration 12). Elles ont récemment été mises à nu par la crue engendrée par le cyclone Gamède.

Un écoulement superficiel apparaît en rive droite à 250 m environ en aval du pont Domenjod, ce qui confirme le fait que la rivière coule sur son substratum rocheux imperméable dans ce secteur.



Illustration 10 : affleurements du substratum rocheux dans le lit mineur en aval du pont Domenjod



Illustration 11 : affleurement en rive gauche des dernières barres rocheuses sur le cours aval



Illustration 12: altération « en boules » du substratum sur le cours aval

3.3.2. Les berges formées de brèches

Les brèches rencontrées dans la Rivière des Pluies sont des dépôts issus d'écoulements gravitaires.

Ces brèches se répartissent en deux catégories :

a) les dépôts d'avalanches de débris² résultant d'un écoulement « à sec ». Ces derniers montrent des faciès très variés. On retrouve des dépôts d'avalanche de débris depuis le Grand Eboulis jusqu'au Cap Frumence, avec le passage progressif d'un pôle « préservé » (illustration 13) à un pôle « mélangé » (illustration 14).

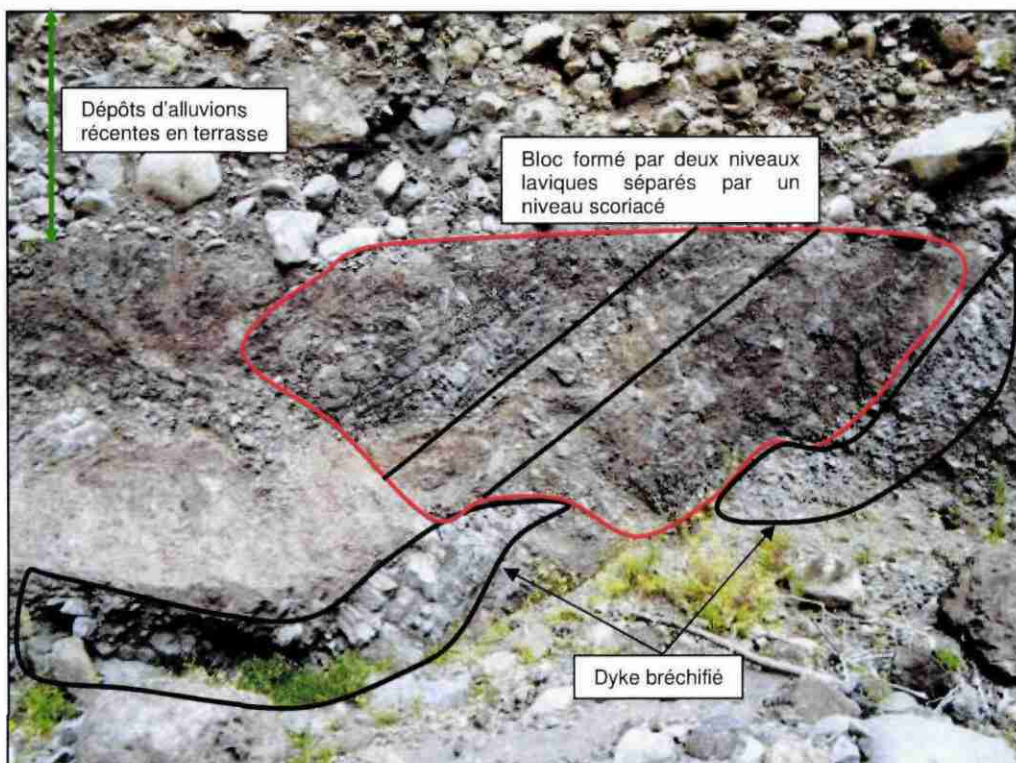


Illustration 13 : dépôt d'avalanche de débris présentant une texture préservée en amont du chantier du transfert des eaux.

² Les avalanches de débris sont des phénomènes rapides (phase de déclenchement) qui résultent d'un mouvement en masse (glissement de plusieurs km³) d'une partie du flanc d'un volcan. Le matériel destabilisé se désintègre, les particules les plus fines formant la matrice qui porteront les plus gros blocs. Le degré de bréchification augmente en fonction de la distance parcourue depuis la zone source. On distingue ainsi, lorsque l'écoulement est canalisé dans une vallée, une multitude de faciès différents d'amont en aval allant d'un pôle préservé (riche en blocs) à un pôle mélangé (riche en matrice).



Illustration 14 : dépôt d'avalanche de débris présentant un faciès mélangé matriciel (au droit du dépôt de marinage du chantier de transfert des eaux).

b) Les dépôts de coulées de débris sont caractérisés par une saturation en eau de leur écoulement. Ils sont constitués de brèches cimentées à éléments anguleux (de taille centimétrique à décimétrique) (illustrations 15 et 16) et d'une matrice indurée plus ou moins abondante. Ces dépôts sont largement représentés sur tout le linéaire du cours d'eau depuis le Grand Eboulis jusqu'au pont de la RN 2. Au cours de leur mise en place, ces coulées de débris ont remobilisé et incorporé des matériaux de taille métrique présents dans le lit de la Rivière des Pluies (alluvions anciennes, éboulis, ...). En effet, en s'éloignant progressivement de la zone source, la proportion de matrice augmente et les blocs se raréfient. Le volume de matériel originel diminue au profit des matériaux secondaires incorporés du lit de la rivière.



Illustration 15 : ilot de coulée de débris présentant un faciès à gros blocs (secteur d'Ilet Quinquina).



Illustration 16 : dépôts cimentés de coulées de débris au niveau du pont de Domenjod.

3.3.3. Les berges formées d'alluvions

Ce sont les berges formées par l'incision des terrasses bordant le lit vif de part et d'autre de la rivière.

Les alluvions actuelles, de même nature que les sédiments présents dans le lit vif, apparaissent légèrement surélevées par rapport au lit actuel sous-forme d'ilots ou de terrasses (illustration 17).



Illustration 17: dépôt d'alluvions actuelles au niveau du forage de la Rivière des Pluies.

Les terrasses d'alluvions récentes sont surélevées de 3 à 5 m seulement par rapport au lit vif (illustration 18). Elles se situent majoritairement au niveau du cours intermédiaire (Ilet La Pluie) et aval (Ilet Quinquina et Ilet La Pluie les Bas). Les alluvions présentent une granulométrie qui varie de 0 à 500 mm ($\varnothing$ moyen 150 mm). Elles sont emballées dans une matrice généralement sablo-graveleuse, voir sablo-limoneuse localement.

Ces alluvions récentes en terrasse reposent sur des dépôts de coulées de débris qui constituent l'embase de ces terrasses.



Illustration 18: dépôt d'alluvions récentes sur le cours intermédiaire (terrasse en aval du Cap Soldat)

Les terrasses d'alluvions anciennes forment des berges abruptes qui dominent le lit actuel de 5-10 m (illustration 19). Elles reposent en général sur le substratum volcanique. Elles montrent une granulométrie qui varie de 0 à 1000 mm ($\varnothing$ moyen 200 mm) et peuvent présenter un litage gravelo-sableux (alluvions anciennes de la RD45) ou des intercalations de lentilles sableuses. Souvent très altérées (circulations d'eau météoritiques), elles présentent une matrice jaunâtre sablo-limoneuse.

Elles sont le plus représentées dans le cours aval où elles forment des terrasses hautes habitées (lotissement aval pont Domenjod en rive gauche).

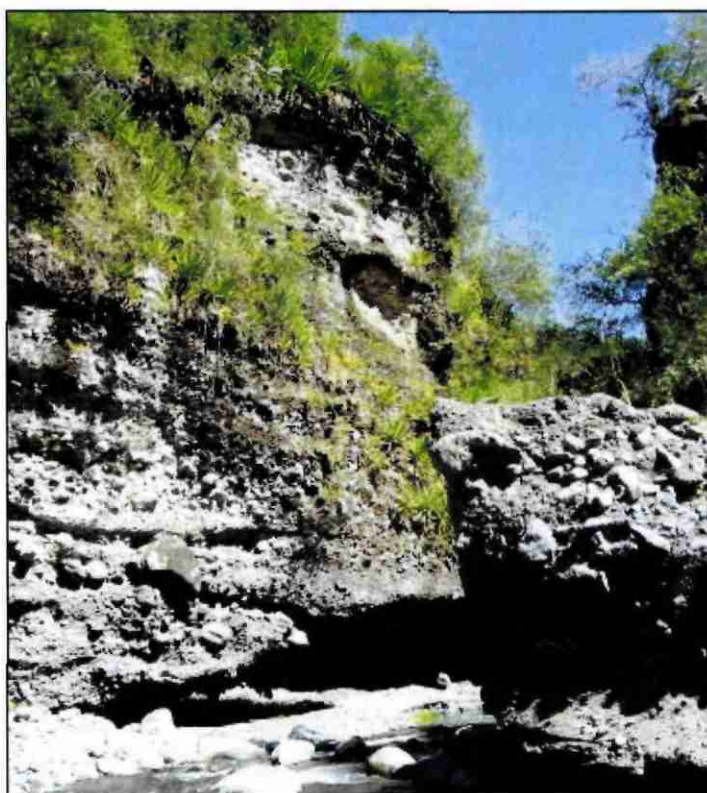


Illustration 19 : escarpement d'alluvions anciennes au droit du « Goulet de Montauban ».

3.4. SENSIBILITE DES BERGES VIS-A-VIS DE L'EROSION

La sensibilité vis-à-vis de l'érosion dépend de la nature des berges qui peuvent être rocheuses, constituées de matériaux cimentés ou meubles.

- **Les berges rocheuses**

Les berges rocheuses de la Rivière des Pluies correspondent :

- soit au pied des remparts délimitant la rivière sur les tronçons amont et intermédiaires ;
- soit au pied des versants rencontrés sur le tronçon aval.

Ces berges sont résistantes et présentent plusieurs types de morphologies : elles peuvent être rectilignes et verticales, sous-cavées, ou en relief formant des éperons ou pointements rocheux comme ceux rencontrés en rive gauche de part et d'autre du pont de Domenjod.

- **Les berges formées par des dépôts cimentés (brèches et alluvions)**

En fonction de la proportion des particules fines (silts, limons et argiles) les coulées de débris peuvent être subdivisées en coulées de débris cohésives et en coulées de débris non-cohésives (ou granulaires).

Les coulées de débris cohésives (avec une quantité importante de fines) ont une forte résistance à l'érosion sur le court terme. Caractérisées par une matrice indurée rosée, elles présentent un relief positif sur une hauteur maximale de 2 m. On les retrouve essentiellement sur le cours aval où elles affleurent en face du lotissement Lorion, au droit du Pont Domenjod (illustration 20) et du Canal la Mare.



*Illustration 20 : berges
« résistantes » de
coulées de débris
cohésives au droit du
Pont Domenjod*

Lors des crues de février et mars 2006, ces formations ont bien résisté au phénomène d'affouillement. La résistance de ces matériaux peut être assimilée à celle d'un béton maigre. Sur le moyen et le long terme, le recul des berges formées par ces dépôts peut être significatif, d'ampleur métrique (illustration 21).

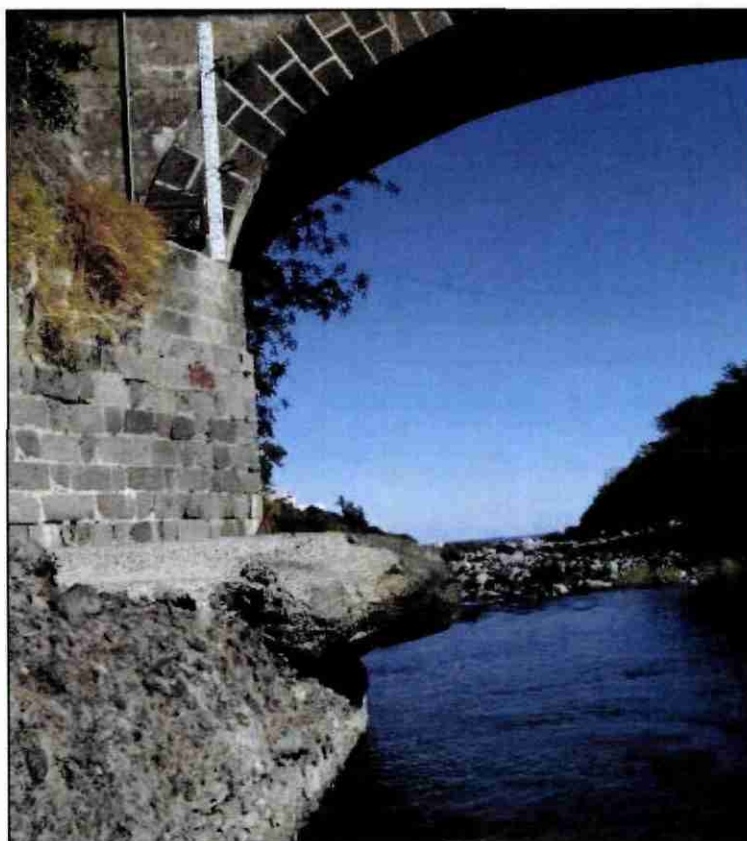


Illustration 21 : début d'affouillement à la base du pilier rive gauche du pont Domenjod

Les alluvions anciennes cimentées affleurent principalement en rive gauche sur le cours aval de la rivière sous forme de terrasses hautes. D'un point de vue mécanique, leur résistance vis-à-vis de l'érosion dépend de l'agencement des dépôts, de leur degré d'altération (circulation des eaux de ruissellement) et de l'interstratification ou non de dépôts de coulées de débris.

Les alluvions anciennes les plus cimentées peuvent former des escarpements abrupts d'une dizaine de mètres de haut ; tel est le cas au droit du Goulet de Montauban et en face de l'Illet la Pluie les Bas.

Lors des crues de 2006, des affouillements se sont produits dans les alluvions anciennes plus ou moins cimentées avec un recul significatif de la tête du talus de 5 à 10 m (parking de la RD 45). Cette fragilité des alluvions anciennes vis-à-vis de l'érosion peut s'expliquer par une hétérogénéité des dépôts à l'échelle du talus ou au sein d'un même horizon. En effet, les alluvions anciennes peuvent présenter des intercalations de lentilles sableuses plus facilement affouillables (illustration 22). Ces dernières représentent des fragilités mécaniques d'autant plus vulnérables lorsqu'elles sont situées en pied de berge. Ainsi leur érosion par les eaux en crue peut engendrer un « éboulement » en surplomb ce qui explique le recul rapide de la tête de talus.

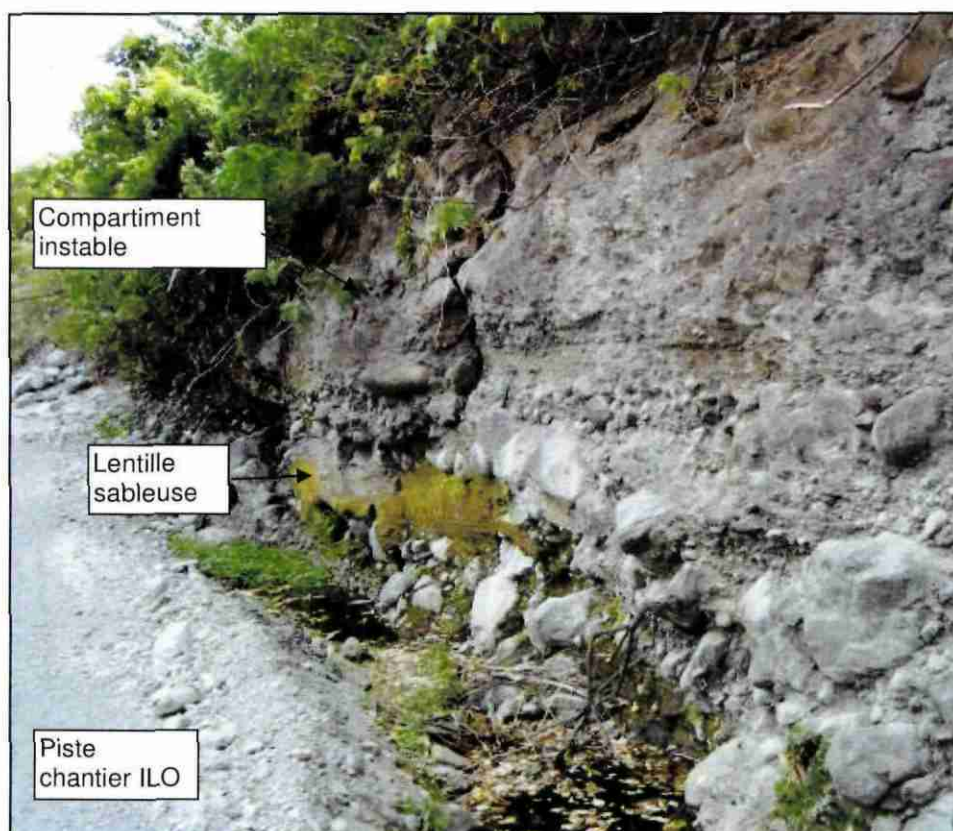


Illustration 22 : sous-cavage dans des dépôts d'alluvions anciennes hétérogènes

- **Les berges formées par des dépôts meubles ou faiblement cimentées**

Certains faciès bréchiques des dépôts d'avalanche de débris ont une très faible cohésion (brèche meuble non soudée). **Les faciès constitués de fragments rocheux (roche broyée) avec une faible proportion de matrice sont facilement érodables par les eaux en crue.** A l'opposé les dépôts du pôle mélangé ont une meilleure résistance par l'apparition d'une matrice argileuse qui enveloppe les fragments rocheux. Néanmoins l'injection de cette matrice n'est pas homogène, c'est pourquoi ces dépôts peuvent présenter un aspect « en gruyère » suite à l'érosion des parties les plus friables (illustration 14).

Les coulées de débris présentent parfois une matrice moins indurée donc plus vulnérables aux crues. On retrouve localement sur le cours intermédiaire ces brèches recouvertes par des alluvions récentes en terrasses.

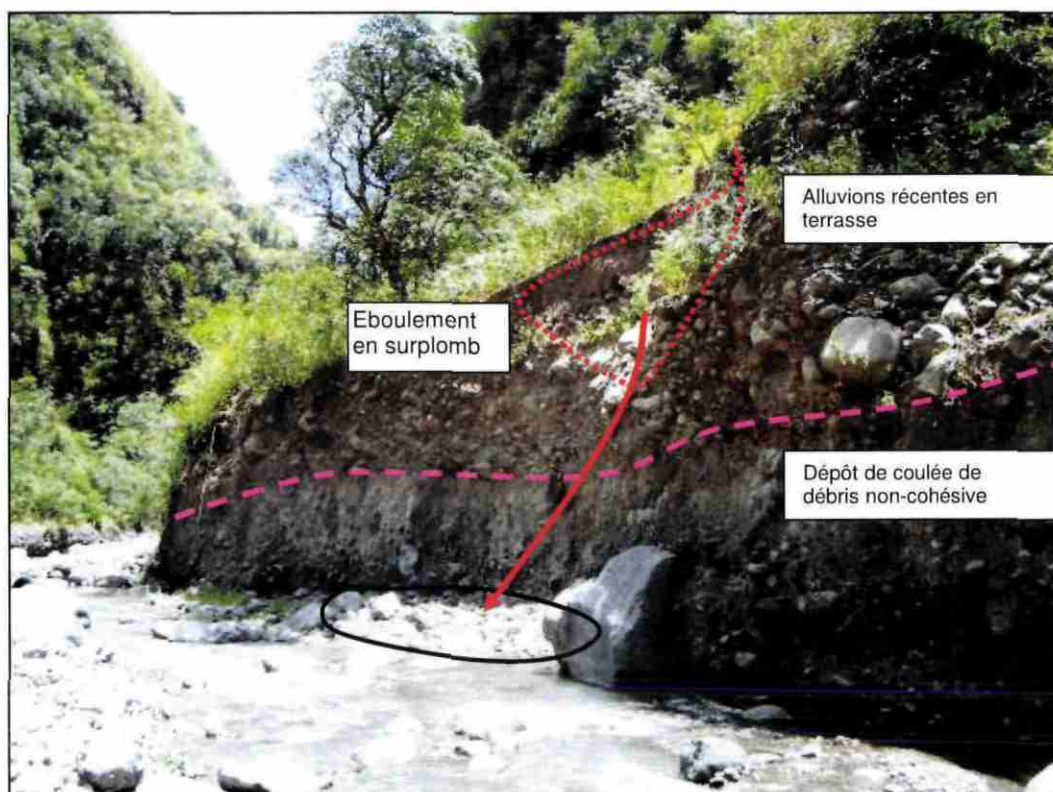


Illustration 23 : dépôt de coulée de débris non-cohésive sur le cours intermédiaire

Au cours des crues de 2006, toutes les terrasses formées d'alluvions récentes ont été « attaquées » et ont reculé.

La terrasse située en rive droite en face de la confluence avec la ravine Montauban a été la plus touchée : une habitation a été emportée à la suite d'un recul de la berge sur près de 20 m. Aucune mesure de confortement de berges n'a été réalisée suite aux crues de 2006 ce qui a eu pour conséquence un nouvel affouillement de la terrasse au même endroit, avec un recul de près de 10 m et la destruction d'une nouvelle habitation suite au passage du cyclone Gamède en 2007.

La grande vulnérabilité de cette terrasse s'explique par :

- la nature de ces dépôts : alluvions grossières emballées dans une matrice sablo-limoneuse ouverte meuble ;
- sa position dans le lit de la rivière : en période de crue, l'écoulement est dévié vers la terrasse par le substratum rocheux qui affleure en amont en rive gauche et par le flux de la ravine Montauban.

Actuellement, ces terrasses présentent des talus de 3 à 5 m de haut qui sont en situation d'équilibre précaire et donne lieu à des éboulements fréquents (illustration 24).



Illustration 24 : sapement de la base de la terrasse alluviale en face de la confluence de la ravine Montauban

Dans le cas de la terrasse haute sur laquelle s'est installée le Lotissement Sindrama, la vulnérabilité de ses dépôts résulte d'une hétérogénéité à plus grande échelle avec une superposition d'horizons de natures diverses et dont le comportement vis-à-vis de l'érosion est très variable. Elle est composée de trois horizons de 2 à 3 m d'épaisseur avec des alluvions de pied sablo-graveleuses lâches qui ont été très facilement érodées par les eaux en crues. Seuls les deux premiers horizons plus cohésifs sont visibles de nos jours ; la base du talus a été protégée par un enrochement en partie cimenté (illustration 25).



Illustration 25 : terrasse alluviale du Lotissement Sindrama

Il est important de préciser que le talus actuel en limite de stabilité fait l'objet de déchaussements des plus gros blocs (de taille métrique) et peut donner lieu à des petits éboulements. Ces phénomènes naturels contribuent à diminuer la pente du talus jusqu'à atteindre une pente d'équilibre de 45° environ.

Sur le cours intermédiaire, entre le Cap Frumence et la Ravine Montauban, le cours d'eau étant fortement encaissé dans des gorges d'une cinquantaine de mètres de large, les bordures des terrasses d'alluvions récentes sont mobilisables à chaque crue importante.

Globalement les alluvions récentes, qui présentant une granulométrie variant de 0 à 600 mm ($\emptyset$ moyen 150mm) peuvent être remobilisées au cours de crues décennales.

Les terrasses constituées par les alluvions actuelles se situent soit dans des zones « maîtrisées » (terrasse basse de l'ilet Quinquina), soit dans des zones délaissées protégées par des berges rocheuses (terrasse boisée au droit de la confluence avec la Ravine Montauban). Ainsi en fonction de l'importance de la crue (hauteur d'eau et vitesse d'écoulement), certaines terrasses vont être recouvertes par des dépôts d'alluvions dans les secteurs d'élargissement du lit (et former des plages d'atterrissements) ou être en érosion (illustration 26).



Illustration 26 : érosion de la terrasse alluviale actuelle en face d'Ilet Quinquina amont

Les bordures des terrasses constituées d'alluvions actuelles sont très vulnérables étant situées au même niveau que le lit actuel. Les alluvions grossières (0-500mm, Ø moyen 100mm) sont emballées dans une matrice ouverte sableuse meuble (illustration 27). Un recul important de la bordure des terrasses formées d'alluvions actuelles peut être enregistrée à chaque crue importante.



Illustration 27 : dépôts d'alluvions actuelles très friables

4. Transit des matériaux dans le lit de la Rivière des Pluies

Les matériaux présents dans le lit de la Rivière des Pluies sont issus de deux types d'érosion : l'érosion de versant et l'érosion fluviale.

L'érosion de versant est soit diffuse à l'échelle de l'ensemble du bassin versant (chutes de blocs, glissements de terrain, ravinement des sols par les eaux...) soit localisée (éboulements de remparts, glissement de terrain,...). Ces matériaux rejoignent dans un premier temps le fond de talweg par des processus essentiellement gravitaires (propagation sur des pentes fortes, souvent supérieures à 40 °). Ils vont ensuite atterrir en pied de rempart et éventuellement former un cône d'éboulis, ou se propager dans le lit de la rivière. Si le volume mobilisé est important, ces dépôts peuvent obstruer partiellement ou totalement le lit (embâcle).

Dans un deuxième temps, les matériaux ayant rejoint le lit de la rivière sont repris par les eaux et migrent vers l'embouchure du cours d'eau à la faveur de crues, plus ou moins rapidement selon l'importance et la fréquence de celles-ci.

Le transport dans le lit de la rivière se fait selon deux processus dynamiques différents en fonction, d'une part, de l'intensité et de la durée de la crue et, d'autre part, de la taille des matériaux disponibles. On distingue ainsi :

- le charriage de fond : c'est un transport sur le lit des alluvions les plus grossières qui roulent les unes sur les autres ;
- le transport en suspension : c'est le transport des matériaux les plus fins en suspension dans l'eau (argiles, limons, parfois sables dans les rivières les plus rapides).

L'érosion fluviale concerne uniquement le lit de la rivière et contribue à évacuer les produits de démantèlement du versant ou du remaniement des terrasses alluvionnaires au niveau du cours intermédiaire.

4.1. LES APPORTS DE VERSANT

L'érosion diffuse correspond au décapage de la couverture superficielle de sols recouvrant les zones de planèze, les pentes d'encaissement des ravines et des remparts. Ils constituent le "bruit de fond" de l'érosion.

L'érosion des planèzes

Une grande partie du bassin versant présente un couvert végétal dense qui joue le rôle de stabilisateur pour l'érosion des sols, en particulier sur les planèzes peu pentues.

Les matériaux issus des planèzes, de nature argileuse, sont évacués directement vers la mer (eau boueuse de couleur marron). Les dépôts argileux et limoneux sont quasiment absents dans le lit de la Rivière des Pluies : ils ne participent pratiquement pas à la recharge du lit des ravines tributaires et du cours d'eau principal.

Parmi les affluents de la Rivière des Pluies, seules les ravines Montauban et Bachelier présentent des bassins versants pentus. Toutefois n'ayant que très peu incisé les planèzes, ces ravines ne font pas l'objet d'une érosion intense. Ce faible potentiel d'apport par les ravines affluentes est confirmé par les stocks limités de matériaux visibles dans leurs lits et à leurs confluences avec la Rivière des Pluies.

L'érosion des remparts

Les pentes du bassin versant de la Rivière des Pluies sont très abruptes. Elles sont structurées par des remparts (pentes moyennes supérieures à 50°) bordant la rivière sur plus de 9 km. Ces versants sont fortement ravinés par les nombreuses ravines perchées qui sont alimentées à chaque forte pluie. De nombreuses traces d'arrachements sont alors visibles le long des versants laissant de grandes traînées marron dans le paysage (illustration 28).

Ces apports annuels en provenance des remparts ont été estimés à 47 000 m³ pour la partie du bassin versant de la Rivière des Pluies située à l'amont du pont Domenjod (38 Km²). Il s'agit d'une valeur estimée moyenne donnant un ordre de grandeur des volumes mobilisés par l'érosion diffuse au niveau des remparts chaque année (DYNTOR-BRGM 2006). Cette estimation a été effectuée à partir des volumes de matériaux extraits par la DDE des fosses de la route du littoral (entre 1990 et 2000). Le long de cette route, l'érosion entraîne un recul de la falaise de 1 à 4 mm par an.



Illustration 28 : arrachements dans le rempart Est dominant le Grand Eboulis

Les versants rocheux les plus abrupts (illustration 29) sont le siège de chutes de blocs/éboulements qui alimente la rivière en gros blocs pouvant atteindre plusieurs m³.

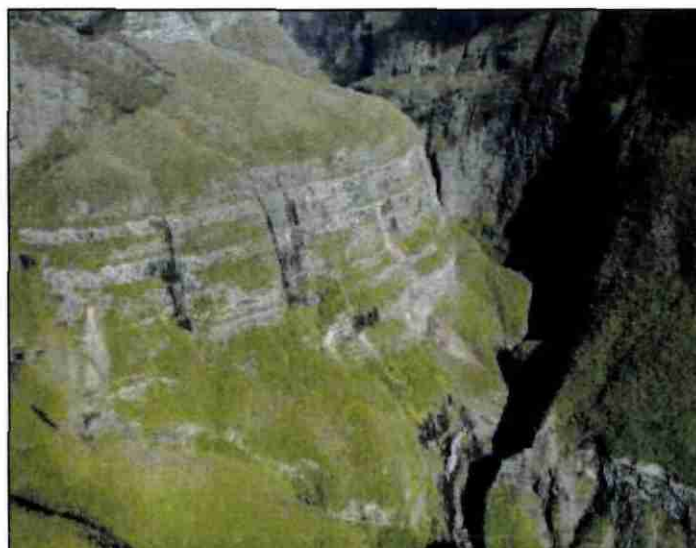


Illustration 29 : traces d'éboulements affectant la bordure de l'ilet Ronde

Lorsque les volumes mobilisés sont importants (plusieurs centaines à plusieurs milliers de m³), il se forme un cône d'éboulis en pied de rempart (illustrations 30 et 31). Un chaos de blocs recouvre alors la partie amont de l'ilet.

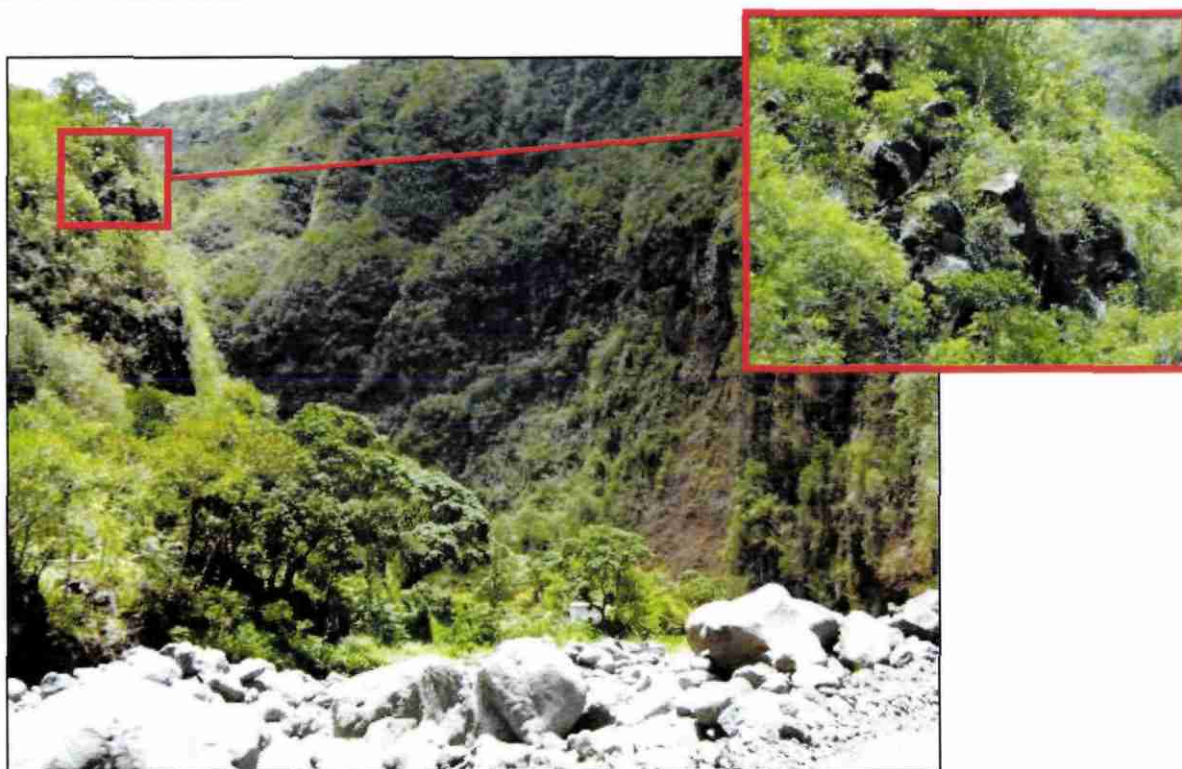


Illustration 30 : instabilités de versant au droit d'ilet La Pluie

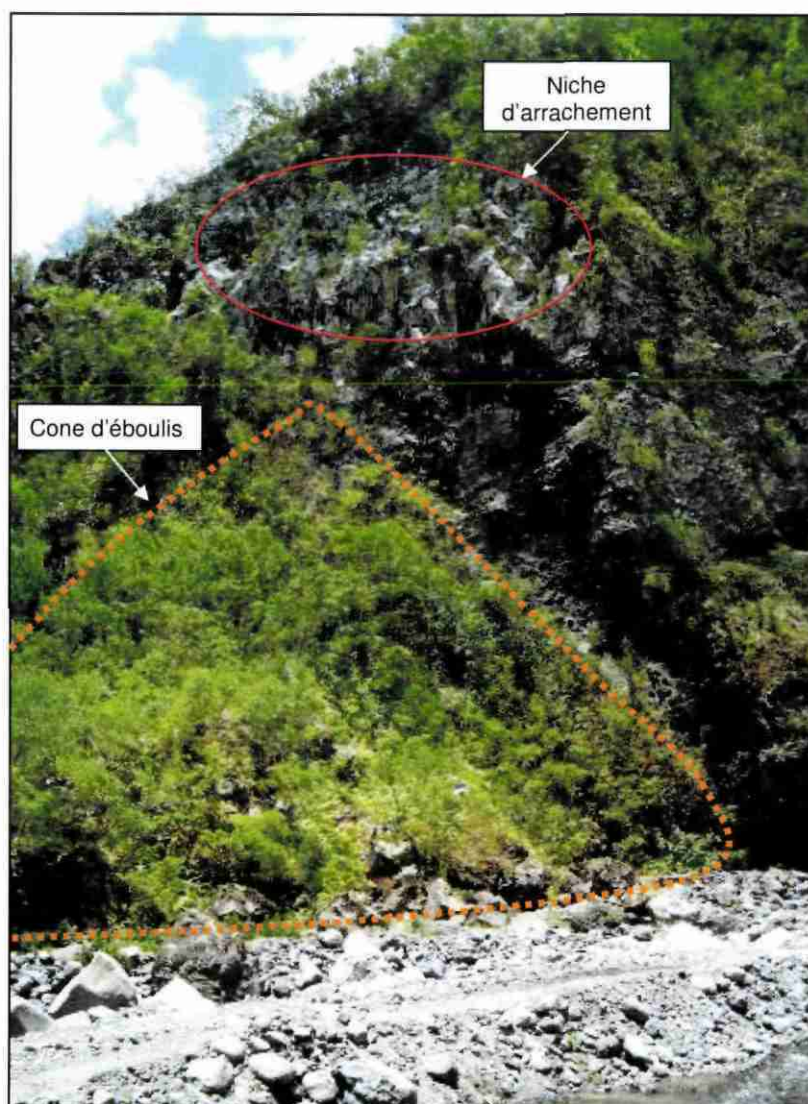


Illustration 31: chaos provenant d'un éboulement à l'ilet La Pluie

4.2. LES APPORTS PONCTUELS PAR LES MOUVEMENTS DE TERRAIN DE GRANDE AMPLEUR DU SITE DU GRAND EBOULIS

Les mouvements de terrain en grande masse connus dans le bassin versant de la rivière des Pluies sont localisés dans le secteur du Grand Eboulis.

Trois types de mouvement peuvent être distingués dans ce secteur. Il s'agit, par ordre d'importance de :

- l'**avalanche de débris** ayant affecté le versant Est (illustration 32) ;
- l'éboulement de grande ampleur du Grand Eboulis survenu en **mars 2002** ;
- les **phénomènes d'érosion** du site du Grand Eboulis.

4.2.1. L'avalanche de débris

Ce mouvement, non daté, se serait produit il y a plusieurs milliers d'années. Il est à l'origine des dépôts d'avalanche de débris à méga-blocs observés dans la vallée depuis le Grand Eboulis jusqu'au Cap Frumence. Ces matériaux proviendraient de l'effondrement du rempart SE, situé en rive droite (Y. Fèvre - 2005 / Dyntor BRGM 2006).

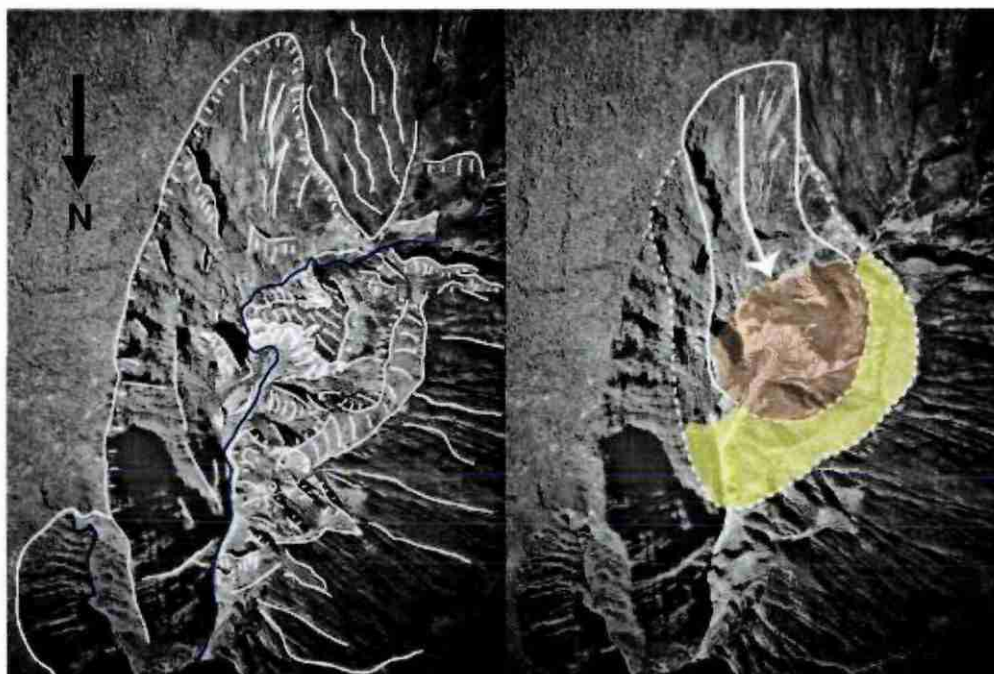


Illustration 32 : étude photo-interpétative du site du Grand Eboulis (Y. Fèvre - 2005)

Le volume en jeu est supérieur à la centaine de millions de m³ (estimation de 0,77 km³ Fèvre et al 2001).

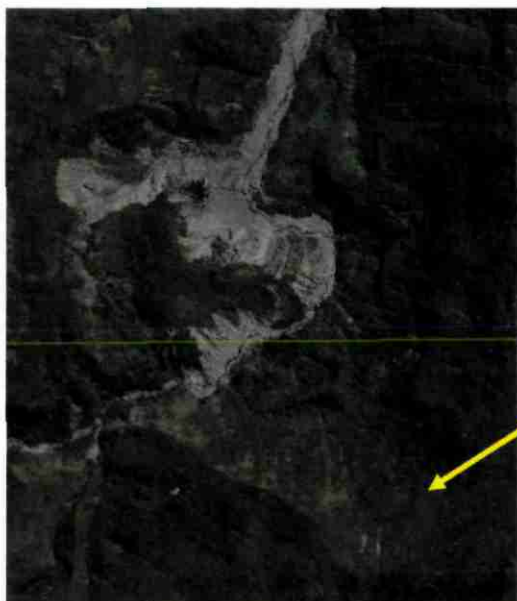


Illustration 33 : localisation de la niche d'arrachement sur imagerie Google

Niche d'arrachement



Niche d'arrachement de
500 m de largeur

Illustration 34 : la niche d'arrachement supposée vue depuis la rivière des Pluies (cliché 2007)

Ces dépôts d'avalanche ont été largement remaniés depuis leur mise en place. Les différentes coulées de débris rencontrées dans le lit de la rivière des Pluies jusqu'à l'embouchure proviennent en partie du remaniement de ces dépôts. Deux datations effectuées sur des bois contenus dans les coulées de débris par le Laboratoire des Sciences de la Terre de l'Université de la Réunion (LSTUR) ont donné les âges suivants : 7758 ans et 5823 ans (Y. Fèvre ; 2005).

4.2.2. L'éboulement de mars 2002

En 2002, un éboulement s'est déclenché un mois après le passage du cyclone Dina à 2 km en amont du chantier du transfert des eaux (au lieu-dit « Grand Eboulis »). La niche d'arrachement est localisée sur la bordure Est du plateau d'Ilet Quinquina. Les matériaux ont glissé depuis la bordure du plateau puis se sont propagés jusqu'à la Rivière des Pluies, formant un barrage naturel et une retenue d'eau sur un hectare de surface (volume d'eau estimé à 70 000m³).

La propagation entre la niche et la rivière relève à la fois de l'éboulement dans la partie haute sous la niche d'arrachement et du glissement dans la partie aval. Ceci explique la morphologie en bourrelet de la masse qui est venue obstruer la rivière (illustration 35). Les matériaux de la semelle du glissement sont constitués d'argiles plastiques noires. Dans un premier temps, l'éboulis est venu recouvrir des formations de pentes argileuses. Dans un deuxième temps, la surcharge générée par le poids des matériaux a déclenché, un glissement lent vers la Rivière des Pluies.



Illustration 35 : barrage naturel du Grand Eboulis (cliché BRGM du 05 mars 2002)

Le volume éboulé a été estimé à 500 000 m³. Ce phénomène constitue l'événement historique de référence dans cette rivière depuis que l'île est habitée.

Le 08 mars 2002, la retenue s'est remplie lors de fortes pluies et a débordé formant une brèche dans le barrage.

La vitesse atteinte par la lame d'eau a été estimée au droit de l'îlet La Pluie entre 25 et 30 km/h.

Le débordement a provoqué une montée soudaine du niveau de la rivière. La lame d'eau a atteint 2 m de hauteur au niveau du chantier du transfert des eaux. Les eaux étaient boueuses, chargées en matières solides. Trois personnes, se rendant sur le site malgré les interdictions, ont trouvé la mort, emportées par les eaux.

4.2.3. L'érosion du relief du Grand Eboulis

L'étude des photographies aériennes prises à différentes époques (1966, 1978, 1997 et 2003) permet de confirmer que le principal lieu de production sédimentaire du bassin versant de la Rivière des Pluies se situe dans le secteur du Grand Eboulis dont le relief tourmenté évolue rapidement.

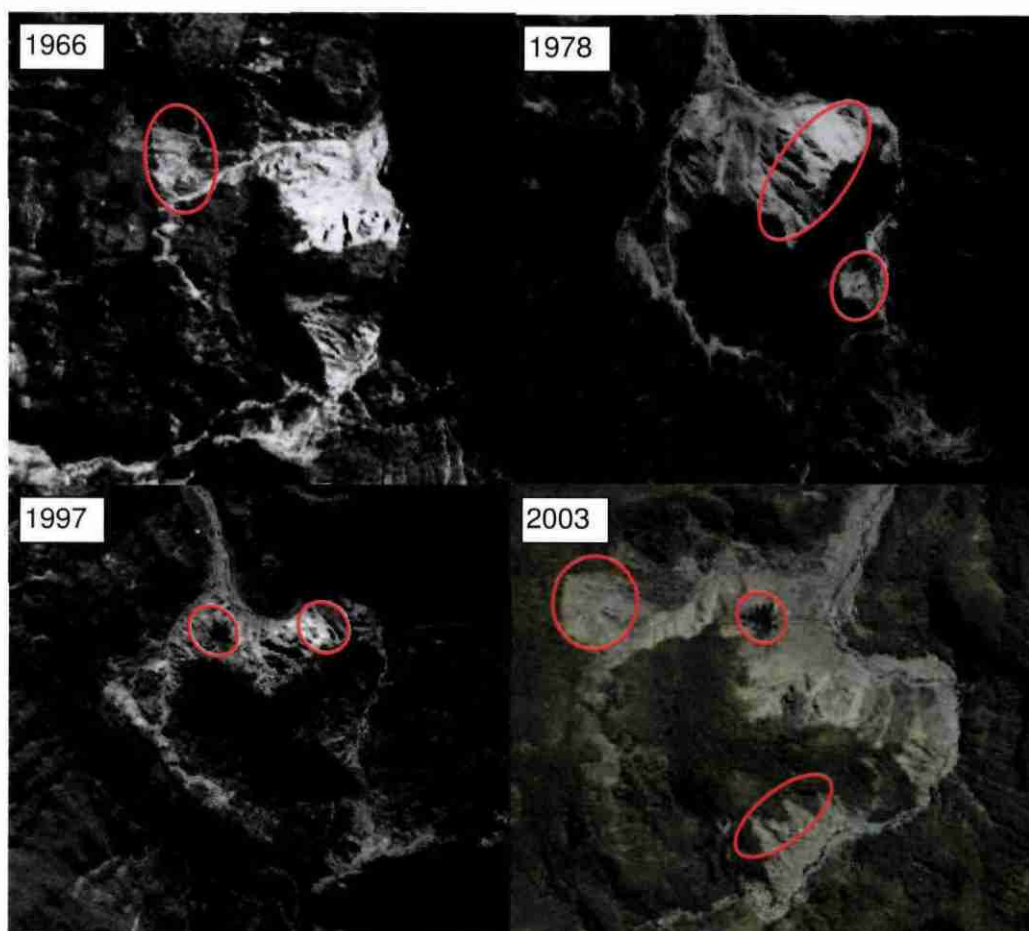


Illustration 36 : évolution du relief du Grand Eboulis depuis 1966 (Photos IGN)

En 1966, deux principales niches d'arrachements sont visibles : une première affecte la totalité du versant Nord-est du relief du « Grand Eboulis » et une seconde, de plus faible extension, affecte le versant Sud-est.

Entre 1966 et 1978, on note l'apparition de traces d'instabilités (éboulis de faible ampleur et arrachements) à la jonction entre le relief du « Grand Eboulis » et du plateau de l'Ilet Quinquina.

Entre 1978 et 1997, le flanc Sud-est semble s'être plus ou moins stabilisé (début de végétalisation de la partie sommitale de la niche d'arrachement) alors que le flanc Nord-est est toujours le siège d'une érosion intense avec des petits compartiments qui semblent glisser vers le lit de la rivière. L'érosion de la jonction entre les deux reliefs continue, avec un stockage des matériaux dans le talweg situé au Nord du « Grand Eboulis ».

En 2003, apparaît la niche d'arrachement parallèle à la bordure du plateau de l'Ilet Quinquina, témoin de l'éboulement de 2002.

De nos jours le flanc Nord-est du Grand Eboulis est toujours le siège d'une érosion intense et présente un paysage en « bad lands » sans cesse entretenu par les eaux de ruissellement qui empêche toute revégétalisation (illustration 37).

La sensibilité du relief du Grand Eboulis à l'érosion s'explique principalement par la nature de ses matériaux. Ce relief est composé de formations volcaniques disloquées intensément fracturées provenant de l'éboulement de très grande ampleur (type avalanche de débris) qui s'est déclenché dans le rempart Sud-est.

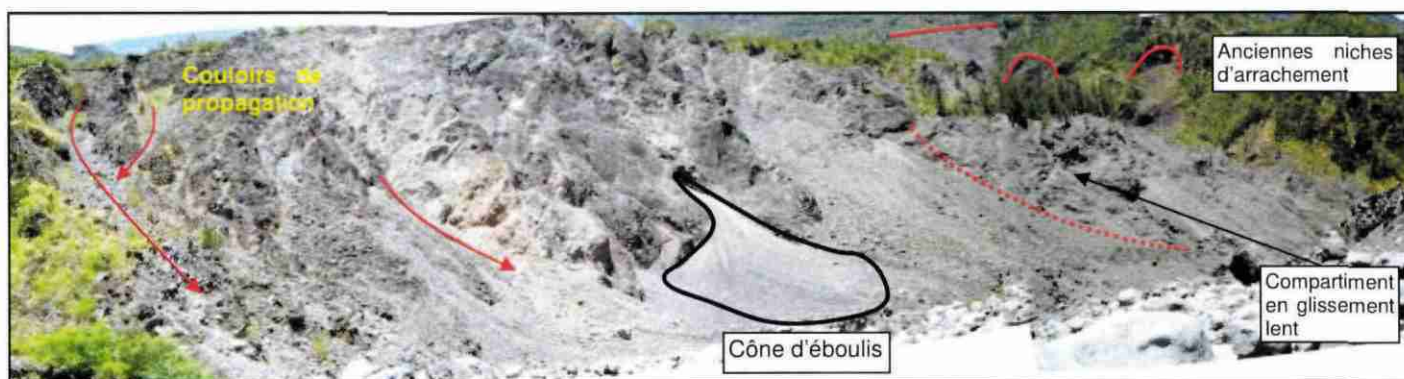


Illustration 37 : érosion du flanc Nord-est du relief du Grand Eboulis (cliché novembre 2007)

4.3. TRANSIT DES MATERIAUX ISSUS DE L'ÉBOULEMENT DE MARS 2002

4.3.1. Etat des lieux en octobre 2003

L'éboulement de mars 2002 a amené un surplus brutal et conséquent de matériaux dans le lit de la rivière. En 2003, un an après la formation du barrage, cinq zones d'atterrissement principales se distinguaient à l'aval du barrage, entre le Grand Eboulis et le Cap Frumence, sur une distance de 2 km environ (illustration 39) :

- trois zones d'atterrissement se trouvent sur le premier kilomètre à l'aval de l'ancien barrage. Sur cette section le tracé de la rivière est rectiligne et ne présente pas de resserrlements ;
- une zone d'atterrissement est située à 1 250 m du barrage du Grand Eboulis à la sortie des premières gorges, au niveau de la confluence entre la Ravine La Nage et la Ravine du Diable ;
- la dernière zone d'atterrissement est située au débouché du verrou à l'amont du chantier de basculement des eaux, à 1 800 m environ du barrage.

Les zones d'atterrissement où les matériaux sont stockés provisoirement, correspondent à des zones élargies du lit séparées par des segments rétrécis (verrous rocheux).

Les matériaux de l'éboulement de février de 2002 sont presque exclusivement constitués de laves zéolitisées friables (altération hydrothermale). Ce caractère pétrographique est un bon critère de reconnaissance pour les dépôts en provenance de l'éboulement.



Illustration 38 : front du barrage en 2002.

Noter la granulométrie fine des matériaux de l'éboulement par rapport aux alluvions de la Rivière des Pluies

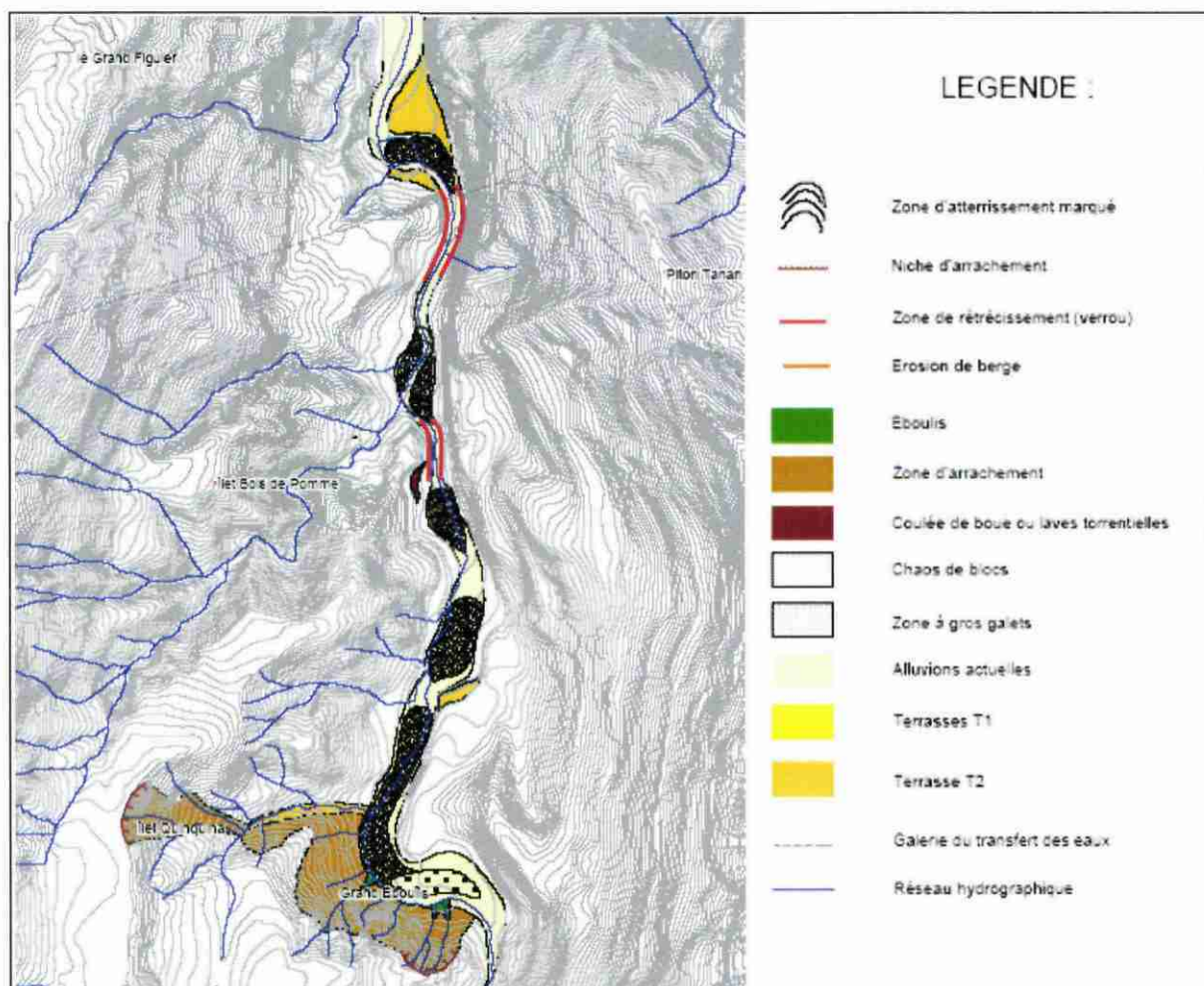


Illustration 39 : localisation des principales zones d'atterrissement visibles en 2003 dans la partie amont de la Rivière des Pluies (extrait de la carte géomorphologique au 1/11500, BRGM 2003).

4.3.2. Evolution des matériaux entre le 14 février 2006 et décembre 2007

Dans le cadre du projet DYNTOR, une visite de terrain a été réalisée le 14 février 2006, avant la crue survenue quelques jours plus tard (fortes pluies du 17 et 18 février).

Les restes du barrage et les restes de l'éboulement stockés dans la pente avaient été en grande partie ravinés entre 2002 et 2006. Les atterrissements de matériaux observés en 2003 dans le lit mineur étaient toujours présents mais avaient été en partie érodés en surface : les éléments les plus fins (diamètre inférieur à 200 mm environ) avaient été emportés tandis que les éléments les plus grossiers étaient restés sur place (pavage).

De même, la rivière commençait à inciser les dépôts, mettant à jour dans le lit « vif » de gros blocs arrondis de taille métrique (lave à feldspath) appartenant à l'ancien lit de la rivière (ante 2002).

Entre octobre 2003 et le 14 février 2006, les matériaux issus de l'éboulement de mars 2002 n'avaient encore franchi que partiellement le Cap Frumence.

Entre le 14 février 2006 et décembre 2007, on note une nette incision du lit dans les dépôts de 2002. Cette tendance à l'incision est plus marquée sur le cours amont de la Rivière des Pluies. Ce phénomène est confirmé par la comparaison des photographies de 2006 et de 2007 (illustration 41 et 42).



Illustration 40 : engravement du lit de la Rivière des Pluies à l'aval du barrage (cliché 2003)



Illustration 41 : lit de la rivière à l'aval du Grand Eboulis (cliché du 14 février 2006)



Illustration 42 : creusement du lit à l'aval immédiat du barrage en 2007 (cliché décembre 2007)

Les alluvions grossières masquées en 2003 sous les dépôts issus de l'éboulement réapparaissent suite à l'érosion et au transport des matériaux les plus fins vers l'aval.

En 2007, la majorité des zones de dépôts situées entre le « Grand Eboulis » et le Cap Frumence ont été remobilisées. Deux principales zones de stockage subsistent encore en amont des deux verrous rocheux.



Illustration 43 : zone d'atterrissement entre les deux verrous (galets anguleux zéolités), à la confluence de la ravine la Nage et de la Ravine du Diable (cliché décembre 2007)

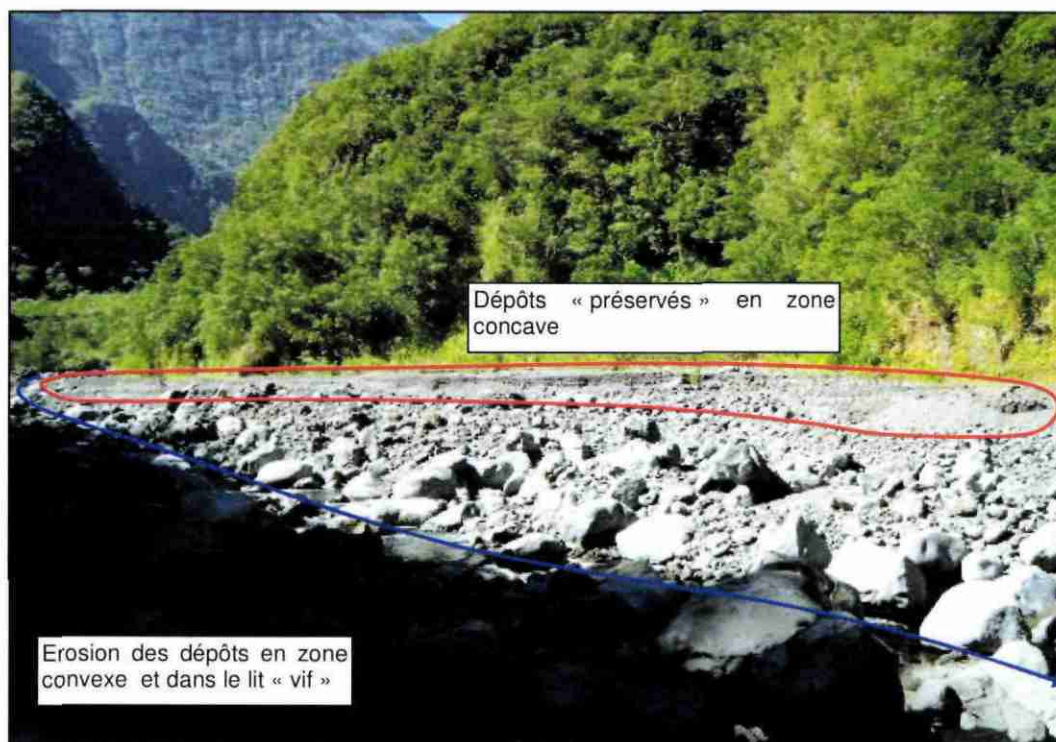


Illustration 44 : dépôts de matériaux fins lités (sables et graviers) à 1 km en aval du « Grand Eboulis ». (cliché décembre 2007)

Cette incision a mis à jour des dépôts d'avalanche de débris qui affleurent à l'aval immédiat du Grand Eboulis, et au débouché du goulet à l'amont du chantier du transfert des eaux. Au niveau de ce débouché l'incision du lit est également très marquée (apparition d'une chute d'eau).



Illustration 45 : dépôts à la sortie du verrou situé en amont du chantier du transfert des eaux en décembre 2003.



Illustration 46 : verrou situé en amont du chantier du transfert des eaux en décembre 2007.

4.4. TRANSPORT SOLIDE ET STOCK DE MATERIAUX RENOUVELABLE

Le transport solide total de la Rivière des Pluies a été évalué à 3 300 t/km²/an, soit 43 000 m³/an pour un bassin versant de 26,5 km² (Schéma d'extraction de la Rivière des Pluies ; SOGREAH, LCHF ; 1988). Cette valeur est considérée comme une approche par excès du transport solide total engendré par la Rivière des Pluies.

Cette capacité de transport est proche de l'apport annuel des versants par l'« érosion diffuse » qui a été estimé à 47 000 m³ (Projet DYNTOR- Etude du transit des matériaux issus du Grand Eboulis en mars 2002, BRGM, 2006). En ne tenant compte que de ces deux estimations le bilan sédimentaire de la Rivière des Pluies serait équilibré.

Le fonctionnement de ce type de rivière est contrôlé par deux types d'érosion dont la combinaison contrôle la dynamique sédimentaire.

L'érosion de versant (continue) et les éboulements en masse (événements ponctuels) fournissent à la rivière des sédiments en plus ou moins grande quantité. Cette production sédimentaire va par la suite être remobilisée par l'érosion fluviale de façon plus ou moins importante en fonction de l'intensité et de la durée des précipitations accompagnant les phénomènes climatiques majeurs.

L'érosion du relief du grand éboulis est à l'origine des sédiments fins (sables, graviers et galets) qui se déposent sous forme de plages d'atterrissement dans la partie intermédiaire et aval. En revanche, l'érosion des remparts va fournir les sédiments les plus grossiers.

La comparaison de la carte géomorphologique de 2003 avec celle réalisée au cours de cette étude a permis de suivre le transit des matériaux issus de l'éboulement de 2002. Ce transit, mis en relation avec les grandes crues (liées aux conditions climatiques), permet de mieux comprendre le fonctionnement de la rivière.

En 2006 la majorité des matériaux potentiellement mobilisables, d'un volume estimé à 250 000 m³, était stockée en amont du chantier du transfert des eaux.

La réalisation de la carte géomorphologique de décembre 2007 a permis de réaliser une nouvelle estimation du volume de ce stock sédimentaire. Ainsi la surface et l'épaisseur moyenne des différentes zones d'atterrissement ont été notées.

Du Grand Eboulis jusqu'au Cap Frumence, le stock de matériaux disponible est estimé à environ 76 000 m³. Ce stock est bloqué par les verrous rocheux situés en amont du chantier du transfert des eaux.

Sur le cours intermédiaire les plages d'atterrissement sont peu représentées et de faible extension avec un stock estimé à 15 000 m³.

L'essentiel des matériaux disponibles est stocké dans la partie aval (volume estimé à 140 000 m³), avec deux principales zones d'atterrissement :

- l'une entre la confluence de la Ravine Montauban et la Passerelle du canal La Mare (illustration 47 et 48) ;
- l'autre en aval du Pont Domenjod.



Illustration 47 : plage d'atterrissement à l'aval de la confluence avec la Ravine Montauban



Illustration 48 : plage d'atterrissement en amont du canal La Mare

Le volume de matériaux mobilisable par des crues dans le lit de la Rivière est actuellement de l'ordre de 230 000 m³. Cette nouvelle estimation est assez proche de celle effectuée en 2006.

Entre ces deux périodes d'observation, la Rivière des Pluies a connu trois crues importantes dont deux sont liées aux passages de phénomènes climatiques importants : la tempête tropicale Diwa en mars 2006 et le cyclone Gamède en février 2007.

En 2006, la rivière a été affectée par une crue importante suite à de fortes précipitations avant le passage de la tempête tropicale Diwa. Cette crue a pu transporter une quantité importante de matériaux rehaussant le niveau du lit vers l'aval. Par la suite ce transport solide a été accentué par le passage de Diwa qui a entraîné, suite au rehaussement du lit, une divagation du cours d'eau qui est venu saper les berges et a entraîné de nombreux dégâts.

En 2007, les pluies associées au cyclone Gamède étant de plus faible intensité (cyclone de vent) la rivière a essentiellement incisé les dépôts apportés par Diwa en 2006. De même, les sédiments les plus fins qui recouvraient les plages d'atterrissement ont été emportés laissant apparaître en surface les alluvions les plus grossières ; ce qui explique le « pavage » actuel du lit.

5. Etat des lieux historiques et tendance d'évolution du bassin-versant

L'évolution morphologique des grandes ravines de La Réunion est guidée par deux types de processus d'érosions :

- l'érosion issue des processus de versant qui comprend l'érosion diffuse des remparts formant les cours intermédiaire et amont, et la déstabilisation en masse de la bordure des remparts en tête de bassin versant contribuant à l'évolution à grande échelle de la rivière ;
- l'érosion et le transport torrentiel qui ne concernent que le lit de la rivière.

5.1. LES MOUVEMENTS DE GRANDE AMPLEUR

5.1.1. Définitions

Les chutes de blocs et éboulements sont des phénomènes rapides, mobilisant des masses rocheuses plus ou moins homogènes à partir d'une paroi verticale ou fortement pentue (supérieur à 45°). Ils consistent en la libération par gravité, de blocs issus de masses rocheuses fracturées.

Le volume total de matériaux mobilisés permet de différencier les phénomènes entre eux. Ainsi on peut distinguer :

- les chutes de pierres ou de blocs (volume maximal de quelques m³ ne concernant que quelques éléments isolés) ;
- les éboulements (volume total inférieur à 10 000m³) ;
- les éboulements en masse (10 000m³ < V < 1 000 000m³) ;
- les écroulements (volume total supérieur à 1 000 000 m³ pouvant atteindre plusieurs dizaines de millions de m³) : avalanche de débris.

Les facteurs naturels favorables au déclenchement de ces mouvements sont :

- l'apparition d'un contraste de compétence induit par l'intercalation de niveaux scoriacés plus facilement érodables, dans les séquences laviques massives ;
- la présence de discontinuités structurales (diaclasses, dykes, sills ou ancienne surface d'érosion) qui fragilise l'ossature du relief ;
- l'action mécanique de l'eau (pressions hydrostatiques dues à l'infiltration des eaux météoritiques dans les interstices ou fissures de la roche).

5.1.2. Les éboulements en masse à La Réunion et leur fréquence

Dans le cadre du projet de recherche MVTerre, le BRGM a établi une base de données regroupant les mouvements de terrain survenus à La Réunion depuis 1849 (glissements, éboulements/écroulements, coulées de débris...). Certains sites, sièges de mouvements de grande ampleur, font l'objet d'un suivi régulier de leur évolution (stations GPS permanentes, extensomètres) afin de mieux comprendre leur mode de fonctionnement.

Pratiquement tous les reliefs abrupts de l'île produisent des chutes de blocs et des éboulements en particulier à la suite d'événements pluvieux importants. Néanmoins, certains reliefs sont plus propices à la survenance d'éboulements en masse ou d'écroulements : les remparts des cirques (exemple du Rempart du Maïdo), les berges des grandes ravines (exemple du Bras de Mahavel) ou encore les falaises littorales (exemple de la route en corniche).

Ces événements ne sont pas rares à La Réunion et représentent 12% des éboulements recensés. Sur 100 ans, on recense 27 événements de plus de 10 000 m³, soit une fréquence d'un éboulement en grande masse tous les 3 à 4 ans. Cependant pour les phénomènes associés aux grandes ravines (qui représentent 33% de l'ensemble des événements) la fréquence est d'un événement tous les 10 ans, éboulements en masse et écroulements confondus.

Néanmoins ces résultats ne sont pas exhaustifs, ils ne donnent qu'un ordre d'idée de la fréquence d'occurrence des éboulements de grande ampleur, plus ou moins biaisée en fonction du volume mobilisable.

En effet, tous les mouvements de terrain ne font pas l'objet d'un recensement systématique suite au passage de cyclone ou tempête tropicale ; certains éboulements en masse (ceux localisés dans des zones naturelles reculées) peuvent donc passer inaperçus car évacués rapidement par les rivières. De plus, un grand nombre d'événements ont été répertoriés sans indication de volume.

Les écroulements, de par leur ampleur et de par le danger qu'ils représentent pour les populations installées en aval, ont fait l'objet d'études plus poussées. Cependant, le faible nombre d'écroulements connus et l'état actuel des connaissances, ne permettent pas d'établir une fréquence significative. En effet, l'écroulement du Bras de Mahavel en 1965 reste l'unique événement de référence historique ayant mobilisé le volume de matériaux le plus important connu à ce jour (estimé à 50 millions de m³).

Des éboulements en masse ont eu lieu récemment (décembre 2006 et février 2007) au Bras de la Plaine mais d'ampleur limitée ayant mobilisé des volumes inférieurs à 1 millions de m³.

SOURCE	LIEU DIT	DATE DE SURVENUE	AMPLEUR	VOLUME GLOBAL en m3
12700936	BRAS DE MAHAVAL	06/05/1965	kilométrique	50 000 000
12701210	BRAS DE MAHAVAL	09/01/1996	kilométrique	5 000 000
12701209	REMPART DE MAHAVAL	18/01/2001	kilométrique	1 000 000
appui	RIVIERE DES PLUIES - GRAND EBOULIS	01/03/2002	hectométrique	500 000
appui	ROCHES NOIRES - BRAS DE LA PLAINE	XX/12/2006	hectométrique	>150 000
12701211	ILET MORIN	13/09/1998	hectométrique	50 000
12700658	BRAS CABOT	01/06/1983	hectométrique	50 000
appui	ROCHES NOIRES - BRAS DE LA PLAINE	30/02/2007	hectométrique	50 000
appui	ROCHES NOIRES - BRAS DE LA PLAINE	30/02/2007	hectométrique	40 000
MVTerre	BRAS TABAC - FORET DE BEBOUR	XX/XX/1983	hectométrique	>10 000

Illustration 49 : recensement des mouvements de grande ampleur ayant affecté les grandes ravines de l'île (BRGM, 2007)

5.2. CAS DE LA RIVIERE DES PLUIES

5.2.1. Recensement des mouvements de terrain historiques avérés et des indices

Sept mouvements de terrains avérés, ont été recensés dans le bassin versant de la Rivière des Pluies depuis un siècle (illustration 50). Cinq d'entre eux ont affecté directement les berges de la Rivière ; les deux autres ayant eu lieu sur la zone de planèze au niveau de Montauban.

Parmi eux, on ne retrouve que deux événements notables :

- une coulée boueuse qui a formé deux brèches dans le radier de Gillot en février 1987 ;
- l'éboulement de mars 2002 qui a entraîné une lave torrentielle, suite à la vidange de la retenue du barrage formée dans le lit de la rivière.

De nombreux indices de glissements de terrain sont visibles en bordure de planèze ou dans les remparts. Dans ce dernier cas, il s'agit de traces d'arrachements formées par la déstabilisation de la couche superficielle de sols, mélange de blocs pris dans une matrice terreuse. Au cours de leur propagation, les matériaux déstabilisés arrachent la végétation, laissant une traînée marron visible le long des versants. Ces événements de faible ampleur ($v < 1\,000\text{ m}^3$), mais de fréquence annuelle, participent à l'érosion diffuse des versants.

Des éboulis de faible ampleur prennent naissance au niveau des remparts et viennent recouvrir le plus souvent les lambeaux de terrasses. La déstabilisation des coulées massives apporte des gros blocs à la rivière.

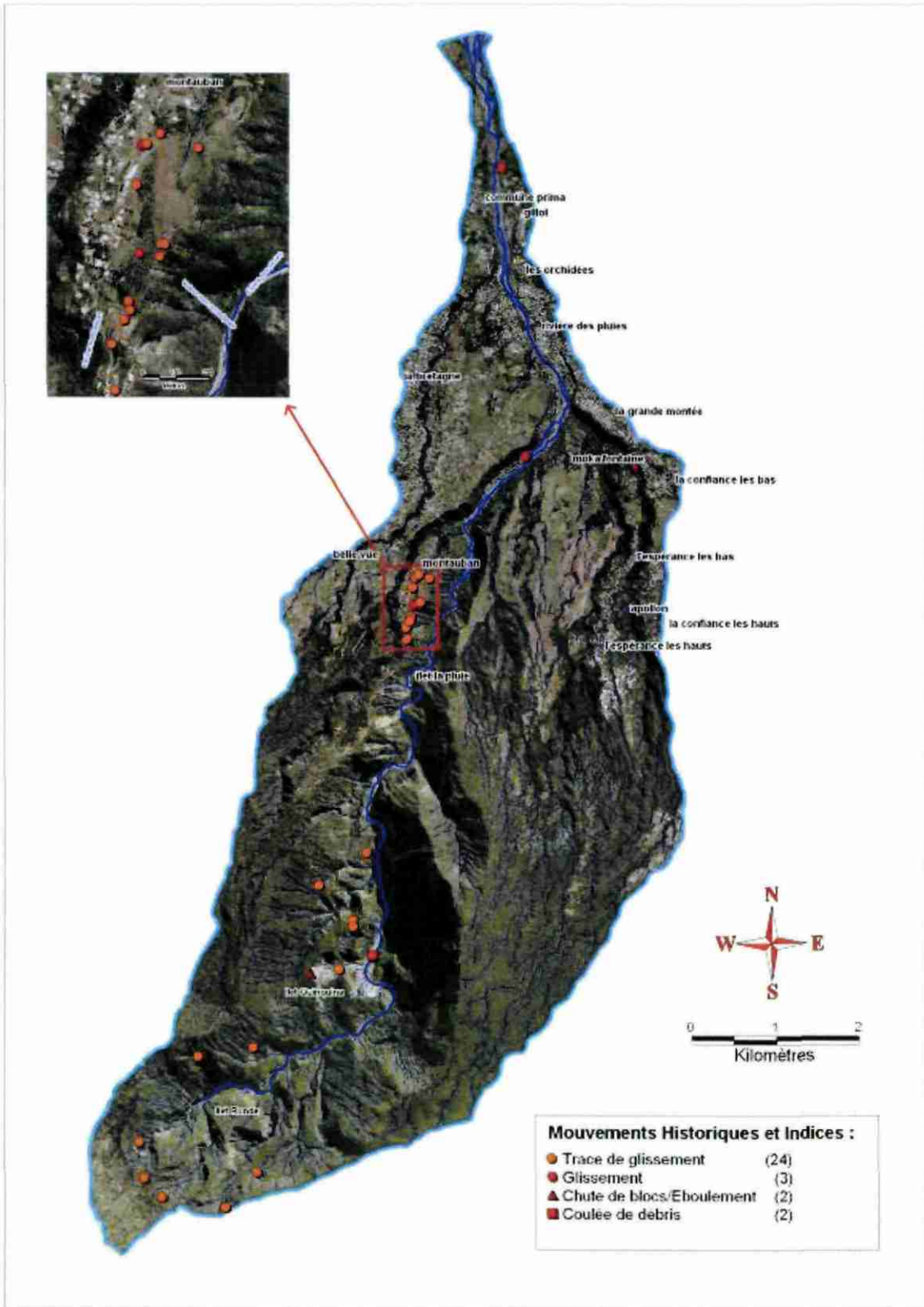


Illustration 50 : carte des phénomènes avérés et des indices de mouvement de terrain dans le bassin versant de la rivière des Pluies

5.2.2. Evolution de l'amont du bassin versant

L'essentiel des apports de la rivière provient du démantèlement des reliefs présents en fond de vallon dans la partie amont du bassin versant. L'érosion du relief du Grand Eboulis apporte en continu des matériaux à la rivière. Ponctuellement des éboulements alimentent brutalement la rivière en quantité considérable de matériaux entraînant un engravement important du lit.

L'éboulement de 2002 restant l'unique phénomène de référence, il n'est pas possible d'établir avec exactitude une période de retour d'un tel événement. De même, une étude plus détaillée du secteur du Grand Eboulis serait nécessaire afin de déterminer les mécanismes à l'origine du déclenchement de ce phénomène. A l'échelle du bassin versant de la Rivière des Pluies, en tenant compte de la survenance d'un événement connu depuis trois siècles, on peut considérer que le type d'événement mobilisant de l'ordre du million du m^3 se produit tous les siècles en moyenne. Il est important de noter que le volume de matériaux mobilisés au cours de l'éboulement de 2002 reste très inférieur à celui de Mahavel (50 millions de m^3). Ce volume a été rapidement assimilé par la Rivière des Pluies.

La bordure du plateau d' Illet Quinquina (au dessus du Grand Eboulis) reste encore très abrupte (pente proche de 60°). Il est donc probable que d'autres éboulements viennent déstabiliser l'escarpement. Les observations réalisées depuis le lit de la rivière ne nous a pas permis de relever des indices laissant présager une déstabilisation a court ou moyen terme de la bordure du Plateau d'Illet Quinquina.

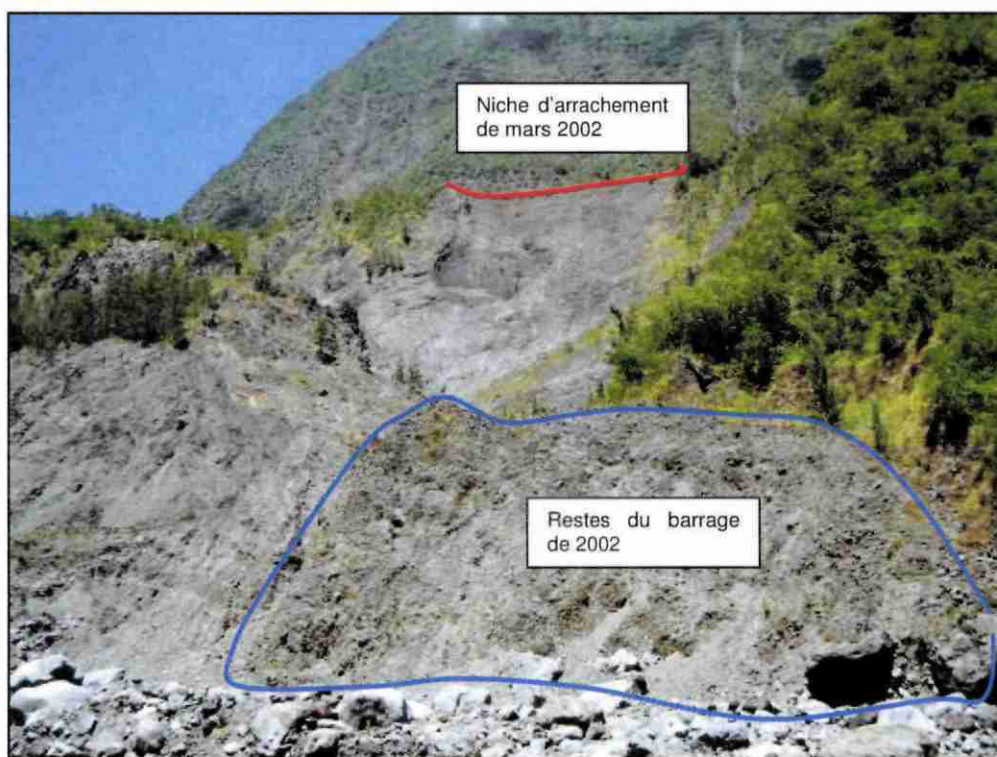


Illustration 51 : vue d'ensemble de l'éboulement de Mars 2002 (cliché décembre 2007)

La section de la rivière située en amont du Grand Eboulis n'a pas été explorée. Néanmoins les pentes les plus abruptes situées en tête de ravine montrent encore des traces d'anciennes niches d'arrachement. La grande dimension de ces niches témoigne de l'ampleur des mouvements de terrain qui s'y sont déroulés et qui sont à l'origine du vaste encaissement en amphithéâtre de l'amont du bassin versant (proto-cirque). Ce sont les bordures du Plateau de la Roche Ecrite qui sont les plus susceptibles d'être déstabilisées sur le long terme (voir très long terme) et donner lieu à des mouvements de grande ampleur par érosion régressive qui contribue à agrandir le bassin versant. Le volume de ces éboulements dans les remparts de plusieurs centaines de mètres de hauteur, atteint ou dépasse fréquemment le million de m^3 . Soulignons que l'éboulement du grand Eboulis en 2002, ne s'est pas produit dans un rempart et que ses dimensions restent modestes au vu de la hauteur des remparts ceinturant le site.

Sur la figure 52, sont reportées les anciennes niches d'arrachement d'extension plurihectométrique qui ont donné des mouvements de très grande ampleur, exceptionnels, tel celui à l'origine de la formation du grand Eboulis. Ces mouvements affectent le rempart sur toute sa hauteur. La fréquence de ces événements mobilisant des volumes de l'ordre de 100 millions de m^3 est très faible, avec une période de retour millénaire. Le seul événement historique connu à La Réunion est celui de Mahavel avec un volume de 50 millions de m^3 .

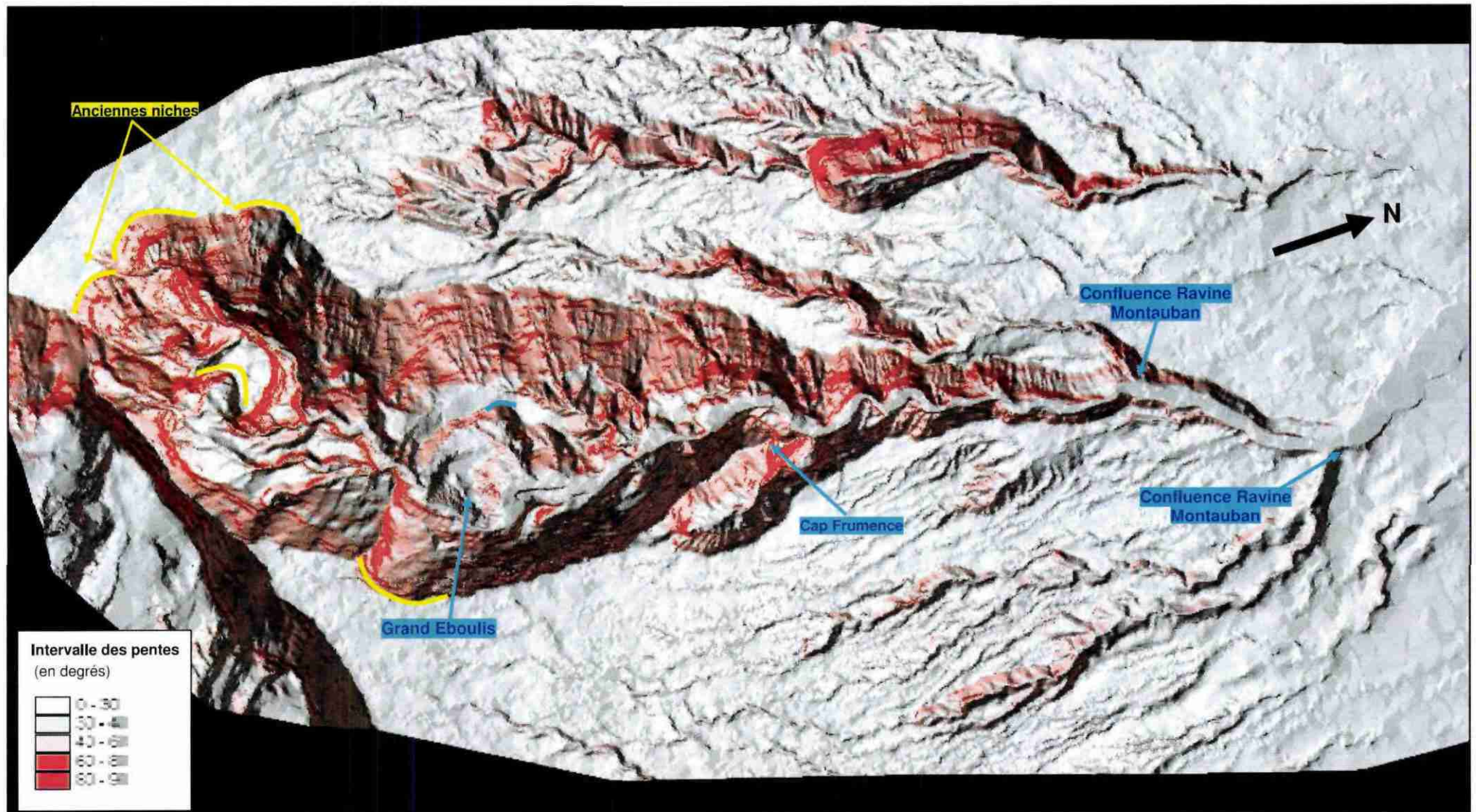


Illustration 52 : extrait du modèle numérique de terrain d'une partie du bassin versant de la Rivière des Pluies (réalisé sous Arcview)

6. Conclusions

Le bassin versant de la Rivière des Pluies se divise en 3 segments :

- segment 1 : c'est une zone d'apport continu de matériaux fins, associé au démantèlement du relief du Grand Eboulis. Mais ce secteur est également le siège de mouvements en grande masse dont les apports exceptionnels viennent grossir le flux de sédiments de la rivière, modifiant son mode de fonctionnement ;
- segment 2 : c'est une zone où alternent transfert et dépôt des matériaux issus de l'amont (sables, graviers et galets) et en moindre proportion des versants (gros blocs). Il s'y développe des terrasses alluviales qui sont remobilisées à l'occasion d'événements climatiques importants ;
- segment 3 : c'est une zone d'élargissement du lit où se dépose l'essentiel du stock sédimentaire.

Entre le 14 février 2006 et le mois de décembre 2007, les matériaux issus de l'éboulement de mars 2002 ont été en grande partie évacués de la partie amont du bassin versant. Les matériaux mobilisés se sont déposés essentiellement en aval de la confluence avec la Ravine Montauban. Les plages d'atterrissement sont restées rares et de faible extension dans la partie intermédiaire. Cette migration résulte des fortes précipitations de début 2006 (17 et 18 Février) qui ont précédé le passage du cyclone Diwa (5 et 6 mars). Ces deux événements ont été à l'origine de crues importantes qui ont affecté la rivière.

La migration de ces matériaux a entraîné des modifications du comportement hydraulique du cours d'eau et à augmenter le pouvoir érosif des eaux sur son cours aval, en rehaussant le niveau du lit au niveau des zones de sédimentation.

La majorité du stock de matériaux potentiellement mobilisables (estimé à 230 000 m³), pourrait être évacué du bassin versant lors d'une prochaine grosse crue.

L'éboulement de mars 2002 est un phénomène de référence à l'échelle du bassin versant de la Rivière des Pluies. Un phénomène d'une telle ampleur reste difficilement prévisible (aucune trace d'instabilité n'ayant été observé avant 2002). De même, étant le seul événement de ce type observé par l'homme, il est impossible d'établir avec exactitude une période de retour significative. Néanmoins les mouvements de grande ampleur connus étant localisés dans le secteur du Grand Eboulis, une surveillance régulière (après chaque événement climatique majeur) de ce secteur permettrait de prendre des mesures de prévention et de protection nécessaires pour la sécurité de la population installée vers l'aval.

Bibliographie

Humbert M., coll. Alliez V. et Stieltjes L. – Les systèmes érosifs des grandes ravines "au vent" à l'île de La Réunion. Leurs conséquences sur l'aménagement du littoral et des Hauts. Volume 1. Rapport BRGM 85 SGN 121 GEG.

Garcin M. et Pouget R. (2003) – Etude diagnostic du transport solide et de l'évolution du fond du lit de la rivière des Pluies, Ile de La Réunion. Rapport BRGM/RP-52841-FR, 48 p., 18 fig., 6 tab., 1 ann. Hors texte.

Pouget R. et Jossot O. (2004) – Projet de recherche sur l'érosion, le transport solide et la dynamique torrentielle des rivières de La Réunion. Etat d'équilibre, évolution du lit des cours d'eau. Rapport BRGM/RP-53233-FR, 48 p., 18 fig., 6 tab., 1 ann. Hors texte.

Mathon C. (2004) – Proposition d'un dispositif de surveillance destiné à anticiper les crues de la rivière des Pluies et observer l'évolution du site du "Grand Eboulis. Rapport BRGM 04REU06, 42p., 25 ill., 1 ann.

Bonnier J., Cruchet M. (2006) – Projet DYNTOR. Carte géomorphologique de la rivière des Pluies – Etude du transit de matériaux issus du Grand Eboulis en mars 2002. Rapport BRGM/RP-54597-FR, 42p., 25 ill., 1 ann.

Cruchet M. (2006) – Comptes rendu de visite du BRGM suite aux dégâts occasionnés par les crues de la Rivière des Pluies de février et mars 2006 sur la Commune de Saint-Denis et de Sainte-Marie.

SOGREAH, BCEOM, BRGM (mai 2006) – Travaux d'urgence suite aux Pluies de février et mars 2006. Propositions de principes généraux et de recommandations. Rapport SOGREAH N° 4700343, 32p., 23 ill.

Fèvre Y. – Thèses présentée à l'université de La Réunion – Mécanismes et vitesses d'érosion à l'échelle géologique sur une île volcanique jeune à relief élevé – La Réunion (Océan Indien)

Arnaud N. – Rappels sur les écoulements gravitaires. Laboratoire des Sciences de la Terre de l'Université de la Réunion (L.S.T.U.R) et BRGM.



Géosciences pour une Terre durable

brgm

Centre scientifique et technique

3, avenue Claude-Guillemain

BP 6009

45060 – Orléans Cedex 2 – France

Tél. : 02 38 64 34 34

Service géologique régional "Réunion"

5, rue Sainte Anne

97400 – Saint-Denis - France

Tél. : 02 62 21 22 14