

ETUDE GLOBALE DU BASSIN VERSANT DE LA RIVIERE DU MAT

Phase 1 : Etat des lieux et diagnostic

Rapport du diagnostic hydromorphologique



Rivière du Mat prise depuis raval du Petit trou –
Ecoméd (O)



Indice B

	BRL ingénierie 1105 Av Pierre Mendès-France BP 94001 30001 NIMES CEDEX 5
	Hydretudes Océan indien 45 rue Luc Lorion - 97410 SAINT PIERRE
Sous-traitants	
  	

Date du document	01/09/2022
Contact	Mathilde LELEUX

Titre du document	Rapport du diagnostic hydromorphologique
Référence du document :	Rapport_RdM_hydromorpho_complet_D
Indice :	D

Date émission	Indice	Observation	Dressé par	Vérifié et Validé par
30/09/2022	B	1ere version de ce rapport relatif à l'état des lieux globa –ind B -	Florine Cazaux (Hydretudes) Laurèns Deuffic (Hydretudes) Louise Roche-Koch (Hydretudes)	Mathilde Leleux (BRLi) Sebastien Chazot (BRLi) Mathieu Collard (Hydretudes)
04/08/2023	D	Rapport associé à l'état des lieux ind D tenant compte des remarques des acteurs	Florine Cazaux (Hydretudes)	Jean-Manuel Deleuze (Hydretudes)

ÉTUDE GLOBALE DU BASSIN VERSANT RIVIÈRE DU MAT

Phase 1 : État des lieux et diagnostic — Rapport du diagnostic hydromorphologique

PREAMBULE	10
1 CONTEXTE DE L'ÉTUDE.....	11
1.1 LE BASSIN VERSANT DE LA RIVIERE DU MAT	11
1.2 L'ÉTAT DES LIEUX : OBJECTIFS ET ENJEUX	12
2 ANALYSE HYDRO-MORPHOLOGIQUE	13
2.1 DONNEES ET BIBLIOGRAPHIE UTILISEE	13
2.2 SECTORISATION HYDROMORPHOLOGIQUE	13
2.2.1 Choix des cours d'eau pris en compte dans la sectorisation	13
2.2.2 Méthodologie de sectorisation	14
2.2.3 Description des tronçons.....	16
2.2.4 Justification de la sectorisation	19
2.3 LA TRAJECTOIRE GEOMORPHOLOGIQUE DES COURS D'EAU, BASE DE NOTRE ANALYSE	19
2.4 HERITAGE DYNAMIQUE.....	20
2.4.1 Forçages climatiques	20
2.4.2 Forçages anthropiques.....	29
2.4.3 Analyse diachronique	40
2.5 FONCTIONNEMENT DYNAMIQUE	91
2.5.1 Lithologie des versants et des berges	91
2.5.2 Glissements de terrain.....	95
2.5.3 Etat de la recharge sédimentaire.....	102
2.5.4 Granulométrie du lit et des atterrissements.....	131
2.5.5 Transport solide.....	148
2.6 EVOLUTION DYNAMIQUE	206
2.7 CONCLUSION.....	211
3 EVOLUTION DU PROFIL EN LONG DANS LE SECTEUR BENGALIS-PONT DE LA RN2	212
3.1 ANALYSE DU SITE	212
3.2 MODELISATION DU FOND DE LIT REALISEE PAR L'ONF-RTM.....	214
3.2.1 Synthèse	214
3.2.2 Limites de la modélisation : les données d'entrée.....	215
3.2.3 Analyse complémentaire rapide des résultats de modélisation	216
3.3 EVOLUTION POTENTIELLE DU PROFIL EN LONG A PARTIR DES CAPACITES DE CHARRIAGE (TEMPS COURT).....	217



3.3.1	Exhaussement entre le seuil naturel et l'aval du pont de la RN2 permettant un élargissement de la bande active	217
3.3.2	Retour au profil en long 1978	219
4	EVOLUTION DU PROFIL EN LONG SUR UN TEMPS LONG (50-100 ANS)	221
4.1	HYDROLOGIE.....	221
4.2	METHODE	223
4.3	INCERTITUDES ET LIMITES	223
4.3.1	Incertitudes liées aux données d'entrées	223
4.3.2	Incertitudes liées aux formules de transport solide	223
4.3.3	Incertitudes liées à l'approche calculatoire appliquée sur un période de temps longue.....	224
4.4	RESULTATS	227
5	ESPACE DE MOBILITÉ.....	229
5.1.1	Emprise de définition de l'espace de mobilité	229
5.1.2	La méthode du guide de la DIREN (1998).....	229
5.1.3	Délimitation de l'espace de mobilité maximal (EMAX).....	230
5.1.4	Délimitation de l'espace de mobilité fonctionnel (EFONC).....	233
5.1.5	Délimitation de l'EMIN	238
ANNEXES.....	239	
ANNEXE 1.	SYNTHESE DE L'ANALYSE CRITIQUE DES DONNEES COLLECTEES RELATIVES AUX PRELEVEMENTS	240
ANNEXE 2.	DONNEES BIBLIOGRAPHIQUES A EXPLOITER DANS LE CADRE DE L'ANALYSE HYDROMORPHOLOGIQUE	242
ANNEXE 3.	TRONÇONS HYDROMORPHOLOGIQUES DU RHUM SUR LE BASSIN DE LA RIVIERE DU MAT	248
ANNEXE 4.	JUSTIFICATION DE LA SECTORISATION	249
ANNEXE 5.	BILAN SEDIMENTAIRE 1950-2017	252
ANNEXE 6.	CARTOGRAPHIE DES GLISSEMENTS RAPIDES ET DEBOULES ACTIFS EN 2022.....	253
ANNEXE 7.	MOBILITE DES STRUCTURES ALLUVIONNAIRES	259
ANNEXE 8.	VITESSE DE PROPAGATION DE LA CHARGE SOLIDE	260
ANNEXE 9.	HYDROGRAMMES Q20, Q50, Q100 ET Q500	262
ANNEXE 10.	HYDROGRAMMES HYACINTHE - 1980 (BRGM (2008) ET AJUSTE PAR BRLI POUR OBTENIR UN PIC DE CRUE A 2500 m ³)	271
ANNEXE 11.	HYDROGRAMMES DINA — 2002 — MESURES AUX STATIONS ESCALIER ET BENGALIS	272
ANNEXE 12.	HYDROGRAMMES DIWA ET GAMEDE — MARS 2006 ET FEVRIER 2007 — RECONSTITUTION MESRI AUX STATIONS ESCALIER ET BENGALIS	273
ANNEXE 13.	HYDROGRAMMES DUMILE, FELLENG, BEJISA ET HABIBA — 2013, 2014 ET 2015 —STATIONS ESCALIER ET BENGALIS.....	275
ANNEXE 14.	CAPACITES MAXIMALES DE TRANSPORT.....	283



TABLE DES ILLUSTRATIONS

Figure 1 : Bassin Versant de la Rivière du Mât.....	11
Figure 2 : Carte générale des tronçons du bassin de la Rivière du Mât	18
Figure 3 : Les trois composantes de la trajectoire géomorphologique d'un cours d'eau	20
Figure 4 : Evolution de la température moyenne entre 1968 et 2021 (source Météo France).....	21
Figure 5 : Evolution des précipitations annuelles entre 1961 et 2021 à la Réunion (source Météo France)	23
Figure 6 : Tendances de cumul annuel de pluie par décennie entre 19861 et 2021 (source Météo France).....	24
Figure 7 : Evolution de l'activité cyclonique entre 1982 et 2021 (source Météo France)	25
Figure 8 : Les scénarii d'émission globale RCP	25
Figure 9 : Evolution de la température moyenne annuelle suivant trois scénarii RCP (source Météo France)	26
Figure 10 : Evolution des températures maximales annuelles suivant trois scénarii RCP (source Météo France).....	26
Figure 11 : Evolution de la pluviométrie à la Réunion au XXI ^{ème} siècle (source Météo France)	27
Figure 12 : Comparaison du secteur de Salazie entre 1950 et 2017, l'urbanisation et les surfaces boisées ont progressé, les ravines sont désormais végétalisées et certains champs de culture sont abandonnés	30
Figure 13 : Photo du début du XX ^{ème} siècle, secteur de Mare à Poule d'eau, l'îlet contient peu de surfaces boisées.....	31
Figure 14 : Extractions d'alluvions en lit mineur (1997)	32
Figure 15 : Sites d'extractions d'alluvions de la carrière en rive droite de la Rivière du Mât.....	32
Figure 16 : Site de la carrière Holcim (2017)	33
Figure 17 : Extractions de matériaux à l'îlet Payet (1997).....	34
Figure 18 : Eboulis provenant du piton d'Anchain (2003)	34
Figure 19 : Pont D52	35
Figure 20 : Affleurement de la semelle de la pile du pont D52, signe d'incision du lit au droit du pont	36
Figure 21 : Barrage et enrochements libres sur la ravine Roche à Jacquot	36
Figure 22 : Prise d'irrigation ILO de la Rivière des Fleurs Jaunes	37
Figure 23 : Prise d'irrigation de la Rivière du Mât	38
Figure 24 : Barrage de Bengalis	38
Figure 25 : Erosion de l'éperon rocheux sur la Ravine Roche à Jacquot entre 1978 et 1989	41
Figure 26 : Création de la ravine Nourry suite au cyclone Hyacinthe (1980), recul de 150 m	42
Figure 27 : Création de la ravine de l'Eglise suite au cyclone Hyacinthe (1980), recul de 470 m	42
Figure 28 : En 1989, la confluence avec la Ravine Blanche se fait 60m en amont de la cascade Micheline	43
Figure 29 : Surface de la bande active entre 1950 et 2021 de la Ravine Roche à Jacquot (RJ1).....	43
Figure 30 : Glissements de terrain en rive gauche de la Ravine Blanche sur 150m entre 2003 et 2008.....	44
Figure 31 : Surface de la bande active entre 1950 et 2021 de la Ravine Blanche (RB1)	45
Figure 32 : Effondrement de la rive droite au niveau du tronçon FJ1 suite aux cyclones Diwa et Gamède (2006 et 2007).....	46
Figure 33 : Glissement et érosions importantes sur le tronçon FJ1 lors des pluies d'avril 2022, lit mineur en rive gauche	46
Figure 34 : Glissement de terrain sur la Rivière des Fleurs Jaunes (tronçon FJ3)	47
Figure 35 : Evolution de la bande active sur la rivière des Fleurs Jaunes (tronçon FJ2) entre 1950 et 2017	48
Figure 36 : Surface de la bande active entre 1950 et 2021 de la Rivière des Fleurs Jaunes (FJ1, FJ2 et FJ3).....	49
Figure 37 : Elargissement la bande active de Bras Sec en 2008, les impacts sont cependant très localisés, la moitié amont est inchangée	50
Figure 38 : Bande active de Bras Sec en 2008, l'amont (BS1) est peu affecté contrairement à l'aval (BS2)	51
Figure 39 : Recul de 120m d'îlet à Vidot lors du cyclone Hyacinthe (1980).....	52
Figure 40 : Réduction de la surface de la bande active de Bras Sec depuis 2008	53
Figure 41 : Surface de la bande active entre 1950 et 2021 de la partie aval Bras Sec (BS2)	53
Figure 42 : Surface de la bande active entre 1950 et 2021 de la Rivière du Mât (M2)	54
Figure 43 : Recul de 30 m de la berge entre 1950 (rouge) et 2021 (bleu) en amont du pont de l'Escalier	55
Figure 44 : Recul de 85 m de la berge entre 1950 (rouge), 2008 (vert) et 2017 (bleu) au niveau de Bras Citronnier	55
Figure 45 : Evolution de la bande active en aval de Bras Citronnier	56
Figure 46 : Evolution de la Rivière du Mât en aval du barrage	57
Figure 47 : Plan du cours de la rivière du Mât à l'île de Bourbon avec trois de ses profils et l'élévation du pont en pierre projeté par M. Partiot, ingénieur en chef à l'île de Bourbon, 1820 (Source : Archives Nationales d'Outre-Mer, FR ANOM 23DFC 0147A).....	58
Figure 48 : La Rivière du Mât s'écoule dans un chenal étroit creusé dans des coulées de boues indurées, photo prise au niveau du pont RN2.....	59
Figure 49 : Surface de la bande active entre 1950 et 2021 de la Rivière du Mât intermédiaire (M4 et M5)	59



Figure 50 : Erosions de berges de la Rivière du Mât aval	60
Figure 51 : Recul de 60 m de la rive gauche entre 1997 (bleu) et 2021 (orange).....	61
Figure 52 : Evolution de la bande active du cône alluvial (M7) de 1950 (rouge) à 2017 (bleu), le cône alluvial est décalé vers l'aval, sa surface a largement réduit.	62
Figure 53 : Surface de la bande active entre 1950 et 2021 de la Rivière du Mât (M6 et M7)	62
Figure 54 : Evolution du trait de côte entre 1950 et 2021	63
Figure 55 : Zoom sur l'évolution du trait de côte suite à Hyacinthe	63
Figure 56 : Evolutions du profil en long de la Ravine Roche à Jacquot aval entre 1999 et 2019 (source : Artelia-ETRM- (2021))	66
Figure 57 : Zone de tressage formée au printemps 2022 en aval direct d'un glissement massif	67
Figure 58 : Dépôts alluviaux très épais en amont de FJ2 et dans lesquels s'est ré-encaissé le chenal	68
Figure 59 : Profil en long 2015 du tronçon FJ2 et profils issus de l'analyse des terrasses	68
Figure 60 : Végétalisation du glissement de terrain de rive droite en aval du tronçon	70
Figure 61 : Profil en long 2007 et 2015 sur le tronçon M1	70
Figure 62 : Terrasse alluviale datant du cyclone Hyacinthe, 15 m au-dessus du fond du lit.....	71
Figure 63 : Profil en long du tronçon M2 entre 1984 et 2015.....	72
Figure 64 : Profils en long 2007 et 2015 sur le tronçon en gorges M3	72
Figure 65 : Profil en long de la Rivière du Mât (M4 et M5) entre 2007 et 2017 (source : CEREMA)	74
Figure 66 : Profil d'équilibre de la Rivière du Mât (M4 et M5)	75
Figure 67 : Signe d'incision de la Rivière du Mât en aval du barrage de Bengalis	76
Figure 68 : Evolution du profil en long entre 1978 et 2007 (source : BRLi)	77
Figure 69 : Formations relativement érodable au droit du pont RN2	78
Figure 70 : Evolution du profil en long entre 1950 et 2017	79
Figure 71 : Abandon du chenal en rive gauche actif en 1989, signe d'incision.....	80
Figure 72 : Abandon du chenal en rive gauche depuis 2003, signe d'incision.....	80
Figure 73 : Cartographie des bilans sédimentaires 2002-2006-2007 du BRGM (2008) (en rouge abaissement, en bleu exhaussement).....	83
Figure 74 : Cartographie du bilan sédimentaire 2007-2017 (en rouge abaissement, en bleu exhaussement)	84
Figure 75 : Bilan sédimentaire 2007-2017 dans l'emprise de leurs bandes actives	86
Figure 76 : Cartographie du bilan sédimentaire restreint 2007-2017 (en rouge abaissement, en bleu exhaussement)	87
Figure 77 : Sites d'extractions d'alluvions de la carrière en rive droite de la Rivière du Mât.....	88
Figure 78 : Apports sédimentaires provenant de formations bréchiques	93
Figure 79 : Limite entre le glissement et le substratum sur le front du glissement de Grand Ilet. Des sources sortent au contact de ses formations durant la saison cyclonique ou après des précipitations. Sous la limite de glissement, les matériaux sont cohérents et cohésifs, au-dessus les matériaux sont non cohérents (source : BRGM)	96
Figure 80 : Cartographie des glissements de grande ampleur	97
Figure 81 : Glissements rapides observés dans le cirque de Salazie (1 : rive droite FJ1, 2 : rive droite M2, 3 : rive droite M2, 4 : rive droite M1)	99
Figure 82 : Déboulé, ravine de l'Eglise entre 1978 et 1984	100
Figure 83 : Avalanche de débris en aval de la Ravine Roche à Jacquot lors du cyclone Bejisa (2014) – (Source : Google Earth).....	101
Figure 84 : Composantes de la recharge sédimentaire	102
Figure 85 : Progression de la végétation sur le glissement en rive droite de RJ1	104
Figure 86 : Glissements de terrains sur le bassin de la Rivière du Mât en 2022	105
Figure 87 : Légende des tableaux suivants	106
Figure 88 : Evolution de la bande active de la ravine Camp Pierrot entre 1948 et 2017 (source : Géoportail).....	109
Figure 89 : Exemple de bassin versant urbanisé et très végétalisé de la ravine Bé Cabot	109
Figure 90 : Confluences des ravines Bé Cabot et Combacal avec la rivière des Fleurs Jaunes	110
Figure 91 : Evolution de la bande active du tronçon BS1 de Bras Sec entre 1948 et 2017 (source : Géoportail)	112
Figure 92 : Zones d'érosion sur le tronçon BS1 de Bras Sec	113
Figure 93 : Evolution de la bande active de la ravine Mangin entre 1948 et 2017 (source : Géoportail).....	116
Figure 94 : Zones d'érosion sur les affluents du tronçon M1 de la rivière du Mât.....	117
Figure 95 : Confluence entre la Ravine du Piton d'Anchain et la Rivière du Mât.....	118
Figure 96 : Effondrement de berge ayant entraîné un amas de matériaux non encore remaniés probablement car l'effondrement a eu lieu hors période de crue (M5).....	119
Figure 97 : Erosion en aval du pont de la RN2 (M6) avec granoclassement des matériaux	120
Figure 98 : Erosions des terrasses alluvionnaires anciennes (1 : rive gauche tronçon M6 aval ; 2 : rive droite tronçon M6 ; 3 : rive droite tronçon M6 ; 4 : rive droite tronçon M5, sapement de pied de berge bien visible (Ilet Payet)).....	121



Figure 99 : Localisations des zones d'érosions de terrasses anciennes ayant entraîné un recul significatif de la berge.....	122
Figure 100 : Structures alluvionnaires de la Rivière du Mât	125
Figure 101 : Volume (en m ³) du stock alluvial par tronçon et par mobilité	126
Figure 102 : Volume (en m ³) du stock alluvial sans prendre en compte les structures alluvionnaires fixées	127
Figure 103 : Ratio kilométrique du stock alluvial par tronçon	127
Figure 104 : Coupe géologique recoupant le lit actuel de la Rivière du Mât (Source : OLE, 2013)	129
Figure 105 : Exemple d'un site de prélèvement : amont du tronçon M1 (à gauche décimètre matérialisant l'axe de prélèvement, à droite une photographie du substrat avec une mire de 20 cm).....	132
Figure 106 : Localisation des granulométries sur l'amont du bassin de la Rivière du Mât.....	133
Figure 107 : Localisation des granulométries sur l'aval du bassin de la Rivière du Mât	134
Figure 108 : Diamètres caractéristiques du bassin amont de la Rivière du Mât (en mm).....	135
Figure 109 : Diamètres caractéristiques de la Rivière des Fleurs Jaunes et de la Ravine Roche à Jacquot aval (en mm).....	136
Figure 110 : Diamètres caractéristiques de la Rivière du Mât entre l'aval de la confluence avec la Rivière des Fleurs Jaunes et le seuil de Bengalis (en mm)	137
Figure 111 : Diamètres caractéristiques de la Rivière du Mât entre le seuil de Bengalis et l'océan	138
Figure 112 : Matériaux sur la Ravine Roche à Jacquot en 2022 (à gauche : zone pavée en aval du pont de Mare à Martin (RJ1), au centre : secteur grossier entre le barrage et la cascade Micheline (RJ1) ; à droite : matériaux mixtes en aval de la ravine à proximité d'une zone de glissement, mire de 20 cm (RJ2).	140
Figure 113 : Morphologie du tronçon FJ2 indiquant des apports récents en matériaux fins en cours de déstockage : structures latérales très fines aux bordures verticalisées entre lesquelles s'encaisse le cours d'eau (à gauche FJ2 en amont de l'ancienne gravière, à droite FJ2 en aval du pont de la RD52).....	141
Figure 114 : Variabilité de la granulométrie sur FJ3	142
Figure 115 : Granulométrie en amont de la prise ILO.....	142
Figure 116 : Granulométrie sur le tronçon M1 (mires de 20 cm)	143
Figure 117 : Granulométrie grossière du Bras Sec sur BS2 (à gauche) et granulométrie de la ravine l'alimentant (RAV1).....	143
Figure 118 : Variation spatio-temporelle de la granulométrie entre 2002 et 2017 dans le secteur aval de M2.....	144
Figure 119 : Zoom sur la granulométrie en amont du seuil (mire 20 cm)	145
Figure 120 : Variabilité granulométrique d'un méandre sur M5 – L'intrados est très grossier, il semble pavé. En aval des dépôts plus fins sont présents.	146
Figure 121 : Substrat du lit (armure ou pavage) et couche interne.....	148
Figure 122 : Glissement de terrain et apparition d'un tressage en aval sur l'amont de FJ1 lors des événements basse fréquence du printemps 2022	154
Figure 123 : Déstockage des matériaux commencé en fin de crue puis avec les débits courants et risquant de s'accentuer au fil des mois (voire années) à venir jusqu'au prochain événement basse fréquence (FJ2).....	154
Figure 124 : Terrasses étroites et hautes témoignant d'un exhaussement récent du fond du lit (flèches rouges), chenal s'étant réencaissé entre ses alluvions et affleurement de la roche mère (flèche bleue), tronçon M3 dans la traversée de Salazie	155
Figure 125 : La balance des crues : construction versus ébauche	156
Figure 126 : Formules d'estimation du Shields de mobilité (Source : Recking, 2019)	163
Figure 127 : Etendue granulométrique dans la formule Lefort 2017	164
Figure 128 : Courbe des débits classés de la Rivière du Mât.....	167
Figure 129 : Tronçons et calcul du transport solide	168
Figure 130 : Absence d'armure et granulométrie hétérogène sur FJ2 (vue drone – HYDETUDES 2022)	172
Figure 131 : Hétérogénéité de la granulométrie et possible début de pavage sur l'aval de RJ2 (vue drone – HYDETUDES 2022).....	172
Figure 132 : Hétérogénéité de l'amont du tronçon FJ3 – A gauche : zone armurée avec affleurement de gros blocs ; à droite : matériaux fins à moyens, armure localisées et affleurements de gros blocs.	172
Figure 133 : Capacités de charriage maximales annuelles – Volume apparent	183
Figure 134 : Capacités de charriage maximales pour une crue Q20 – Volume apparent.....	184
Figure 135 : Capacités de charriage maximales pour une crue Q50 – Volume apparent.....	185
Figure 136 : Capacités de charriage maximales pour une crue Q100 – Volume apparent.....	186
Figure 137 : Capacités de charriage maximales pour une crue Q500 – Volume apparent.....	187
Figure 138 : Schéma synthétique d'analyse dynamique de la trajectoire géomorphologique du bassin de la Rivière du Mât.....	209
Figure 139 : Coupe transversale selon l'axe du barrage (Source : BRGM).....	213
Figure 140 : Résultat de la modélisation ONF-RTM sous EVOFOND – Scénario S1	214
Figure 141 : Résultat de la modélisation ONF-RTM sous EVOFOND – Scénario S2	215



Figure 142 : Profils d'exhaussement étudiés	220
Figure 143 : Six étapes d'encaissement de la rivière dans son cône alluvial (CETE Méditerranée, 2011)	230
Figure 144 : Exemple d'avulsion sur le cône de déjection résiduel du Gave de Cauterets lors de la crue de 2013 (Hautes-Pyrénées)	231
Figure 145 : EMAX et espace de divagation historique (1950-2022).....	232
Figure 146 : Secteur 1 – Bras Citronnier-Bengalis	234
Figure 147 : Secteur 2 : Seuil naturel-Pont de la RN2	234
Figure 148 : Secteur 3 – Fin du tronçon M6	235
Figure 149 : Secteur 4 - Carrière Holcim	235
Figure 150 : Localisation des secteurs en érosions.....	237



LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Caractéristiques des tronçons morphodynamiques de la Rivière du Mât et de ses affluents	17
Tableau 2 : Bilans sédimentaires du pont de la RN2 à l'océan entre 2002 et 2017	82
Tableau 3 : Formations géologiques du bassin versant de la Rivière du Mât.....	92
Tableau 4 : Détail de la géologie des versants pour chacun des tronçons du bassin versant de la Rivière du Mât.....	94
Tableau 5 : Surfaces et linéaires occupées par les glissements rapides en 2022	104
Tableau 6 : Items caractérisant les apports sédimentaires d'un affluent	106
Tableau 7 : Analyse des apports sédimentaires pour Fleurs Jaunes par les affluents	107
Tableau 8 : Analyse des apports sédimentaires pour Bras Sec par les affluents	111
Tableau 9 : Analyse des apports sédimentaires pour la Rivière du Mât par les affluents	114
Tableau 10 : Linéaires d'érosion de berge	121
Tableau 11 : Caractéristiques des érosions les plus actives	123
Tableau 12 : Plages de validité de la formule Sogreah-Lefort (1991).....	158
Tableau 13 : Evaluation par tronçon de la capacité maximale de transport de la Rivière du Mât suivant la formule de Sogreah Lefort (pente 2006)	159
Tableau 14 : Capacités de charriage de la Ravine Roche à Jacquot (Artelia-ETRM, 2021)	161
Tableau 15 : Plages de validité des formules de Recking (2013) et Lefort (2017).....	164
Tableau 16 : Tronçons retenus pour les calculs de transport solide	165
Tableau 17 : Capacité de charriage en crue sur le tronçon M2 – Lefort 2017	170
Tableau 18 : Capacité de charriage en crue sur les tronçons FJ2, RJ2 et FJ3 – Lefort 2017	173
Tableau 19 : Volume maximum pouvant être transporté en crue dans les gorges amont	174
Tableau 20 : Volumes de matériaux pouvant atteindre l'aval des gorges.....	175
Tableau 21 : Capacités de charriage maximales annuelles et en crue du tronçon M5 avant arasement (formules Recking 2013 et Lefort 2017)	177
Tableau 22 : Capacités de charriage maximales annuelles et en crue du tronçon M5 après arasement (formules Recking 2013 et Lefort 2017)	178
Tableau 23 : Capacités de charriage maximales annuelles et en crue du tronçon M5 aval avant et après arasement ainsi que sur le tronçon M6 (formules Recking 2013 et Lefort 2017)	180
Tableau 24 : Capacités de charriage maximales annuelles et en crue du tronçon M7 (formules Recking 2013 et Lefort 2017).....	182
Tableau 25 : Capacités de charriage maximales lors du cyclone Hyacinthe comparées à celles d'une Q500 (formules Recking 2013 et Lefort 2017)	189
Tableau 26 : Capacités de charriage maximales lors du cyclone Dina comparées à celles d'une Q20 (formules Recking 2013 et Lefort 2017)	192
Tableau 27 : Somme des capacités de charriage maximales lors des cyclones Dina, Diwa et Gamède (formules Recking 2013 et Lefort 2017)	196
Tableau 28 : Somme des capacités de charriage maximales lors des cyclones Dumile, Bejisa et Habiba comparées à celles d'une Q20 (formules Recking 2013 et Lefort 2017).....	201
Tableau 29 : Impact de chaque item sur la trajectoire géomorphologique du bassin de la Rivière du Mât, permettant de déterminer les tendances lourdes d'évolution dynamique.....	207
Tableau 30 : Evolution du fond du lit sur un temps long – approche calculatoire	227
Tableau 31 : Vitesses de déplacement de la charge solide sur l'Argent-Double	261



PREAMBULE

L'étude globale du bassin de la Rivière du Mât vise à établir un diagnostic exhaustif du bassin versant afin de mieux comprendre le fonctionnement hydraulique, hydrologique, hydromorphologique et écologique du cours d'eau.

Ce diagnostic permettra alors d'établir un Programme d'Action et de Prévention des Inondations (PAPI) ainsi qu'un Programme Pluriannuel de Gestion (PPG) de la Rivière du Mât et de ses affluents.



1 CONTEXTE DE L'ÉTUDE

1.1 LE BASSIN VERSANT DE LA RIVIÈRE DU MÂT

La Rivière du Mât, une des 13 rivières pérennes de l'île de La Réunion, prend sa source à une altitude de 3 069 m dans le cirque de Salazie, situé au centre de l'île, au nord-est du Piton des Neiges. Trois communes se recoupent avec le bassin versant : Salazie, en amont et Saint-André et Bras-Panon sur sa partie aval.

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, creusées dans la roche imperméable. Elle reçoit sur sa rive gauche la rivière des Fleurs Jaunes en aval de la commune de Salazie. Après la confluence de ces deux rivières, la rivière du Mât rencontre deux autres affluents rive droite, le bras des Caverne et le bras des Lianes, dont les ramifications ne sont pas pérennes.

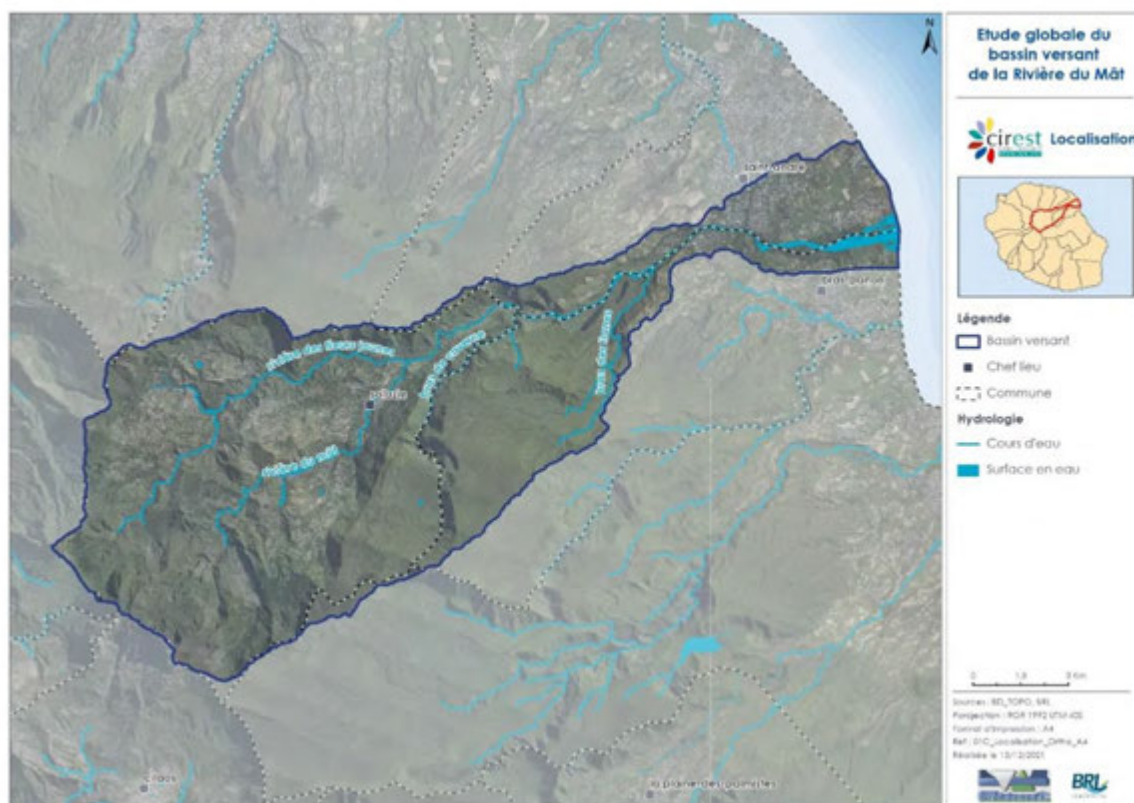


Figure 1 : Bassin Versant de la Rivière du Mât

Entre la chaîne des Salazie et l'océan, la rivière du Mât s'écoule sur **36 km** et draine un bassin versant total de **144 km²**. **La pente moyenne de la rivière est de 8,4%**. La pente est très forte dans le cours amont (34%) et se stabilise entre 2 et 3% avant de rejoindre la mer en formant un delta.



1.2 L'ÉTAT DES LIEUX : OBJECTIFS ET ENJEUX

L'objectif de l'étude est d'établir un diagnostic exhaustif du bassin versant de la Rivière du Mât en prenant en compte les usages et enjeux présents sur le territoire. Ce diagnostic permettra de mieux comprendre le fonctionnement hydraulique, hydrologique et morpho dynamique des réseaux hydrographiques, de caractériser l'état des milieux naturels et ses besoins, afin de pouvoir, après une concertation avec l'ensemble des acteurs, définir une politique globale de gestion, conformément aux objectifs de bon état des eaux fixés par la Directive Cadre Européenne sur l'Eau (DCE).

D'après l'état des lieux 2019 du SDAGE Réunion, quatre masses d'eau superficielles concernent le bassin versant :

- FRLR05 : Rivière du Mât Amont (Cirque de Salazie) ;
- FRLR06 : Bras de Caverne ;
- FRLR07 : Bras des Lianes ;
- FRLR08 : Rivière du Mât Aval.

Sur le volet masse d'eau souterraines, la rivière du Mât est principalement située sur la masse d'eau des formations volcano-détritiques de cirque mais recoupe également les masses d'eau suivantes :

- FRLG125 : Formations volcano-détritiques du Cirque de Salazie ;
- FRLG101 : Formations volcaniques du littoral Nord - Secteur Sainte-Suzanne/Saint-André ;
- FRLG102 : Formations volcaniques du littoral Nord Bras Panon - Saint Benoit ;
- FRLG114 : Formations volcaniques de la Roche Ecrite - Plaine des Fougères ;
- FRLG115 : Formations volcaniques de Bébou-Bélouve - Plaine des Lianes.

L'état chimique du cours d'eau est globalement bon, à l'exception de la portion médiane (entre les confluences avec le Bras de Caverne et le Bras des Lianes) qui présente un état chimique mauvais, déclassé par la présence de Tributylétain cation. L'état écologique est moyen en amont et médiocre en aval, en effet de nombreux enjeux écologiques de pêche et de rupture de la continuité sont présents. Les masses d'eau souterraines sont toutes classées en bon état.

Dans ce contexte, l'objectif de l'étude est d'établir un diagnostic exhaustif du bassin-versant de la Rivière du Mât en prenant en compte les enjeux et usages présents sur le territoire, afin de définir une politique globale de gestion conforme aux objectifs de bon état des eaux.

Sur la base de l'état des lieux et du diagnostic sera définie une stratégie de gestion. Il s'agira alors de hiérarchiser les enjeux du territoire puis définir un espace de gestion et les règles qui pourront s'y appliquer. Enfin, un plan de gestion sera élaboré et mis en œuvre au sein de cet espace.

L'objectif final de la présente étude consiste, au regard des enjeux du territoire, à établir un programme global de restauration des cours d'eau et de lutte contre les inondations. Il devra permettre d'atteindre le bon état des masses d'eau du bassin versant, favoriser la biodiversité des cours d'eau et milieux aquatiques, améliorer la gestion des ressources en eaux disponibles tout en limitant la sensibilité du territoire au risque d'inondation.



2 ANALYSE HYDRO-MORPHOLOGIQUE

2.1 DONNEES ET BIBLIOGRAPHIE UTILISEE

La bibliographie disponible sur le bassin de la Rivière du Mât est relativement riche.

En 2008, le BRGM a ainsi réalisé une étude hydrogéomorphologique très complète qui intègre un volet analyse diachronique du bassin et un volet transport solide.

Des études plus récentes ont également abordé plus partiellement le fonctionnement hydromorphologique du bassin, ces dernières se concentrent généralement sur le cône alluvial, ainsi que sur la ravine Roche à Jacquot.

Notre rôle consistera donc à synthétiser les éléments bibliographiques, à les confirmer, à les mettre à jour (en fonction des données disponibles) et à développer certains sujets pas ou peu abordés dans la bibliographie (ex : production sédimentaire des versants, recharge par érosion de berge, stock alluvial sur la partie amont du bassin, etc.).

Par ailleurs, certaines études ont abordé des thématiques spécifiques telles que l'aléa érosion ou les glissements de terrain. Ces thématiques seront reliées au fonctionnement hydromorphologique des cours d'eau du bassin. Elles nous permettront notamment de mieux appréhender la production et la recharge sédimentaire.

Deux tableaux sont présentés en Annexe 1 et Annexe 2, ils présentent respectivement :

- Le bilan de cette analyse des données et de l'état des connaissances sur ce chapitre selon la grille d'évaluation présentée dans le rapport d'hypothèses ;
- Les principaux documents que nous utiliserons dans le cadre de l'analyse hydromorphologique du bassin.

2.2 SECTORISATION HYDROMORPHOLOGIQUE

2.2.1 Choix des cours d'eau pris en compte dans la sectorisation

L'analyse hydromorphologique se concentrera sur les cours d'eau du cirque de Salazie (masse d'eau FRLR05) et sur la Rivière du Mât. En effet, ce sont sur ces cours d'eau que la majorité de la production sédimentaire et du transport solide du bassin s'opèrent.

D'après l'étude hydromorphologique de la Rivière du Mât, réalisée par le BRGM en 2008, les phénomènes d'érosion les plus intenses, se concentrent au cœur du cirque autour des villages de Grand-Ilet et Hell-Bourg. Selon l'intensité de l'évènement hydrologique, ces érosions sont capables de fournir aux cours d'eau du cirque plusieurs centaines de milliers voire quelques millions de mètres cubes de matériaux. Ces cours d'eau remobilisent ensuite tout ou partie de ces matériaux et les transfèrent jusqu'à l'aval du bassin. Sur les cours d'eau amont, la capacité annuelle moyenne de transport solide¹ a été estimée à 130 000 m³ pour la rivière du Mât amont et 97 000 m³ pour la rivière des Fleurs Jaunes.

Certains cours d'eau ou tronçons de cours d'eau inclus dans le RHUM ne font pas partie de notre sectorisation car ils ont un **rôle négligeable en termes d'apports sédimentaires** et ont par conséquent un impact limité sur la morphologie des tronçons aval. **C'est le cas de**

¹ La capacité annuelle moyenne de transport solide est une capacité potentielle/maximale puisqu'elle dépend de la disponibilité en matériaux provenant de l'amont et des versants.



nombreuses ravines situées au cœur du cirque dont la capacité d'apports sédimentaire est relativement faible à l'échelle du bassin.

D'autres cours d'eau ont été intégrés à la sectorisation car ils sont des contributeurs hydrauliques majeurs. **Toutefois, ils n'ont pas fait l'objet d'une campagne de terrain** ciblée car leur rôle en tant que contributeur sédimentaire est actuellement très limité. Ces tronçons seront présentés en pointillés sur la carte de sectorisation.

Ainsi, les bassins du Bras de Caverne et du Bras des Lianes sont sectorisés mais n'ont pas été parcourus dans le cadre du terrain hydromorphologique. En effet, leur capacité de production sédimentaire et leur stock alluvial sont très faibles (bassins très végétalisés, absence de connexion versant-lit, bande active étroite, absence de structures alluvionnaires, absence de cône de déjection à la confluence). Ces deux cours d'eau avaient d'ailleurs été écartés de l'analyse hydromorphologique du BRGM (2008) pour ces raisons-là.

L'amont de la rivière de Bras Sec a également été écarté de la phase de terrain car la bande active actuelle est très fermée et végétalisée. Bien que les débits proviennent essentiellement de l'amont du cours d'eau, **les apports solides semblent provenir principalement d'une ravine située en rive gauche.** Il semble ainsi y avoir une **déconnexion sédimentaire entre l'amont du Bras Sec et le tronçon BS_2.** Nous avons donc choisi de concentrer notre analyse sur l'aval du Bras Sec et sur la ravine qui l'alimente en matériaux (tronçons BS_2 et RAV_1).

☞ Bien que ces cours d'eau ne fassent pas partie de la sectorisation hydromorphologique, leurs rôles en tant que contributeurs sédimentaires sera analysé plus en détail dans le cadre du rapport final (analyse des zones de connexion versant-lit, du stock alluvial des différents cours d'eau et de leur confluence avec les cours d'eau sectorisés).



Conclusion : cours d'eau sectorisés

La sectorisation hydromorphologique concerne donc les cours d'eau suivant : la rivière du Mât, la rivière des Fleurs Jaunes, la ravine Roche à Jacquot, la ravine Blanche, l'aval du Bras Sec et une de ses ravines de rive gauche.

2.2.2 Méthodologie de sectorisation

La **sectorisation morphodynamique** consiste à découper les cours d'eau étudiés en **tronçons morphologiquement homogènes**. Ces tronçons représentent ainsi l'entité spatiale la plus pertinente pour décrire et gérer un cours d'eau (Malavoi & Adam, 2007).

Les tronçons retenus pour analyser le bassin de la Rivière du Mât sont **basés sur ceux proposés par le RHUM** (Référentiel Hydromorphologique UltraMarin), cf. Encart 1 en page suivante. Actuellement, il y a 120 tronçons RHUM sur le bassin versant de la Rivière du Mât (cf. carte en Annexe 3).



Le RHUM

Le RHUM est le Référentiel Hydromorphologique Ultramarin. Il a été déployé en 2017 à la Réunion.

Il est adapté du SYRAH-CE, le Système Relationnel d'Audit de l'Hydromorphologie des Cours d'Eau utilisé en métropole et datant de 2006.

Le RHUM et le SYRAH constituent un socle commun d'évaluation de l'état et du risque d'altération des cours d'eau.

Leur découpage se base sur des caractéristiques hydromorphologiques, hydrologiques et écologiques (dynamique du cours d'eau, continuité longitudinale, substrat, etc.) ainsi que sur des caractéristiques anthropiques (occupation du sol, aménagements, usages, etc.).

Ils permettent d'apprécier pour chaque tronçon l'impact des activités humaines sur l'hydromorphologie (impact sur les écoulements liquides et solides et impact sur la morphologie du cours d'eau), Valette et al., 2012.

Le découpage RHUM intègre donc le risque d'impact sur la trajectoire géomorphologique du cours d'eau.

Une sélection des cours d'eau et des tronçons les plus pertinents d'un point de vue hydromorphologique a été réalisée. Cela permettra de mieux cibler le diagnostic hydromorphologique.

Les limites des tronçons issus du RHUM ont parfois été modifiées afin de mieux respecter les variations du cours d'eau, qu'elles soient d'ordre morphologique (style fluvial...), topographique, géologique, écologique ou anthropique (aménagements, occupation du sol).

Certains tronçons RHUM ont également été fusionnés lorsqu'ils avaient un style morphologique proche ou lorsqu'ils étaient trop courts.

En effet, le nombre final de tronçons doit faciliter l'interprétation des données à l'échelle du bassin, tout en conservant une logique et une cohérence hydromorphologiques.

L'adaptation des tronçons RHUM s'est basée sur l'analyse des photographies aériennes, de

Encart 1 : Le RHUM

la topographie et de la bibliographie (notamment la sectorisation BRGM réalisée en 2008).

La sectorisation proposée dans le cadre de cette note pourra être amenée à évoluer légèrement au fil de l'étude en fonction des nouvelles données acquises (relevés de terrains, nouvelles données hydrogéologiques, écologiques, etc.).

En termes de rendu, chaque tronçon est désigné par la ou les première(s) lettre(s) du cours d'eau suivie(s) du numéro de tronçon donné de l'amont vers l'aval. A cet élément viendra se rajouter un code couleur.

Nous avons restitué ce découpage, qui va nous servir de fil conducteur tout au long de l'étude, sous la forme de deux tableaux :

- Un tableau présentant les principales caractéristiques des différents tronçons (cf. Tableau 1) ;
- Un tableau justifiant les limites des différents tronçons (cf.

	Confluence avec le Bras des Lianes	Oui	Confluence
--	---------------------------------------	-----	------------

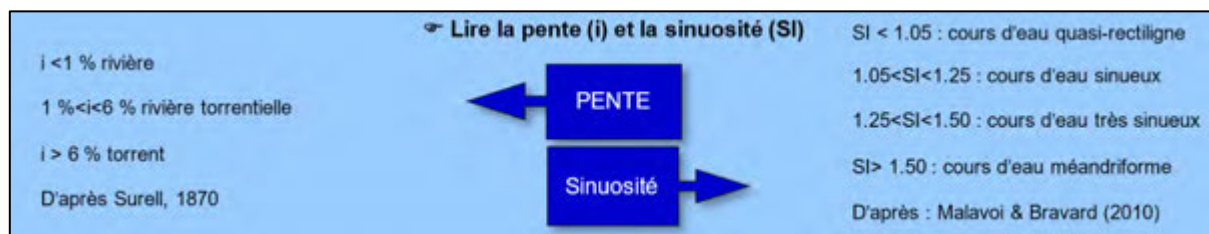
- Annexe 4).

Une carte de la sectorisation des cours d'eau retenus a également été réalisée (cf. Figure 2).



2.2.3 Description des tronçons

Les principales caractéristiques de chacun des tronçons du bassin de la Rivière du Mât sont présentées dans le tableau en page suivante. Les tronçons de couleur unie (trait continu sur la carte) ont fait l'objet d'une campagne de terrain dédiée contrairement aux tronçons de couleur hachurée (trait pointillé sur la carte).



CARACTÉRISTIQUES DES TRONÇONS MORPHODYNAMIQUES DU BASSIN DE LA RIVIERE DU MAT									
Cours d'eau	Identifiant + couleur	Localisation	Distance de l'amont du tronçon à l'océan (km)	Altitude max (m NGF)	Altitude min (m NGF)	Longueur [km]	Pente [%]	Sinuosité	Morphologie fluviale
Rivière du Mât	M_1	Passerelle suspendue → Confluence avec le Bras Sec	28.2	665.5	559.5	2.4	4.5	1.05	Sinueux contraint/Gorges
	M_2	Confluence avec le Bras Sec → début des gorges (350 m en amont du pont de la Savane)	25.8	559.5	495.4	1.9	3.3	1.10	Tressage
	M_3	Début des gorges → Confluence avec la Rivière des Fleurs Jaunes	23.9	495.4	321.3	4.7	3.7	1.01	Gorges
	M_4	Confluence avec la Rivière des Fleurs Jaunes → aval du pont de l'Escalier	19.2	321.3	239.4	4.1	2.0	1.06	Gorges
	M_5	Aval du pont de l'Escalier → Seuil naturel de Bengalis (affleurement de basalte)	15.0	239.4	101.4	8.5	1.6	1.10	Sinueux
	M_6	Seuil naturel de Bengalis → Début de la zone multichenalisée	6.6	101.4	47.9	3.4	1.6	1,10	Sinueux méandriforme
	M_7	Début zone multichenalisée → océan	3.2	47.9	0	3.2	1,5	1,07	Cône de déjection multichenalisé
Bras Sec	BS_1	Confluence Ravine Trois Cascades → Confluence avec Ravine « sans nom »	28.5	862	678	2.1	11,5	1.23	Très sinueux
	BS_2	Confluence avec Ravine « sans nom » → Confluence avec la Rivière du Mât	26.9	678	559	1.1	10,7	1.13	Sinueux, zones de multichenalisation en hautes eaux
Ravine sans nom	RAV_1	Impasse des Grenadines, Ilet à Vidot → Confluence avec Bras Sec	27.4	787.4	678	0.4	24,7	1.01	Ravine rectiligne
Rivière des Fleurs Jaunes	FJ_1	Lieu-dit Le Grand Sable → Confluence avec la Ravine Camp Pierrot	32.1	981.5	747.0	2.4	9.7	1.03	Sinueux contraint
	FJ_2	Confluence avec la Ravine Camp Pierrot → Lieu-dit Le Mathurin	29.6	747.0	624.9	2.5	5.0	1.11	Sinueux contraint
	FJ_3	Lieu-dit Le Mathurin → Lieu-dit Le Grand Bord	27.2	624.9	564.6	1.8	3.4	1.10	Sinueux contraint/Gorges
	FJ_4	Lieu-dit Le Grand Bord → Confluence avec la Rivière du Mât	25.4	564.6	321.3	6.2	3.9	1.04	Sinueux contraint/Gorges
Ravine Roche à Jacquot	RJ_1	Pont Îlet Roche à Jacquot → Cascade Micheline / Confluence avec la Ravine Blanche	30.3	1030.0	880.0	1.1	13.2*	1.04	Rectiligne *Pente calculée sans prise en compte de la cascade de 95 m en aval du tronçon
	RJ_2	Confluence avec la Ravine Blanche → Confluence avec la Rivière des Fleurs Jaunes	29.1	784.7	625.0	2.0	8.2*	1.16	Sinueux contraint avec petite zone de tressage contraint en aval *Pente calculée sans prise en compte de la cascade de 95 m en amont du tronçon
Ravine Blanche	RB_1	Îlet Roche à Jacquot → Cascade Micheline / Confluence avec la Ravine Roche à Jacquot	29.9	972.8	878.9	0.8	12.3*	1.18	Sinueux contraint *Pente calculée sans prise en compte de la cascade de 94 m en aval du tronçon
Bras Caverne	BC_1	Confluence ravine Mazerin → amont Ilet du Bras de Caverne	20.4	562.5	432.5	2.0	6.4*	1.04	Sinueux contraint/Gorges
	BC_2	Amont Ilet du Bras de Caverne → Confluence avec la Rivière du Mât	18.4	432.5	223.2	4.1	5.1	1.03	Sinueux contraint/Gorges
Bras des Lianes	BL_1	Bassin lieu-dit Grand Rein → Cascade du Chien	16.6	783.3	618.8	2.7	6.0*	1.06	*Pente calculée sans prise en compte de la cascade de X m en aval du tronçon
	BL_2	Cascade du Chien → Confluence avec la Rivière du Mât	13.8	506.5	145.8	4.7	7.6*	1.05	*Pente calculée sans prise en compte de la cascade de X m en amont du tronçon
Bras Piton	BP_1	Succession de 3 cascades → Cascade Bras Piton	15.5	718.7	620.5	1.2	8.2*	1.04	*Pente calculée sans prise en compte de la cascade de X m en aval du tronçon
	BP_2	Cascade Bras Piton → Confluence avec le Bras des Lianes	14.3	449.1	358.9	1.1	7.9*	1.06	*Pente calculée sans prise en compte de la cascade de X m en amont du tronçon

Tableau 1 : Caractéristiques des tronçons morphodynamiques de la Rivière du Mât et de ses affluents

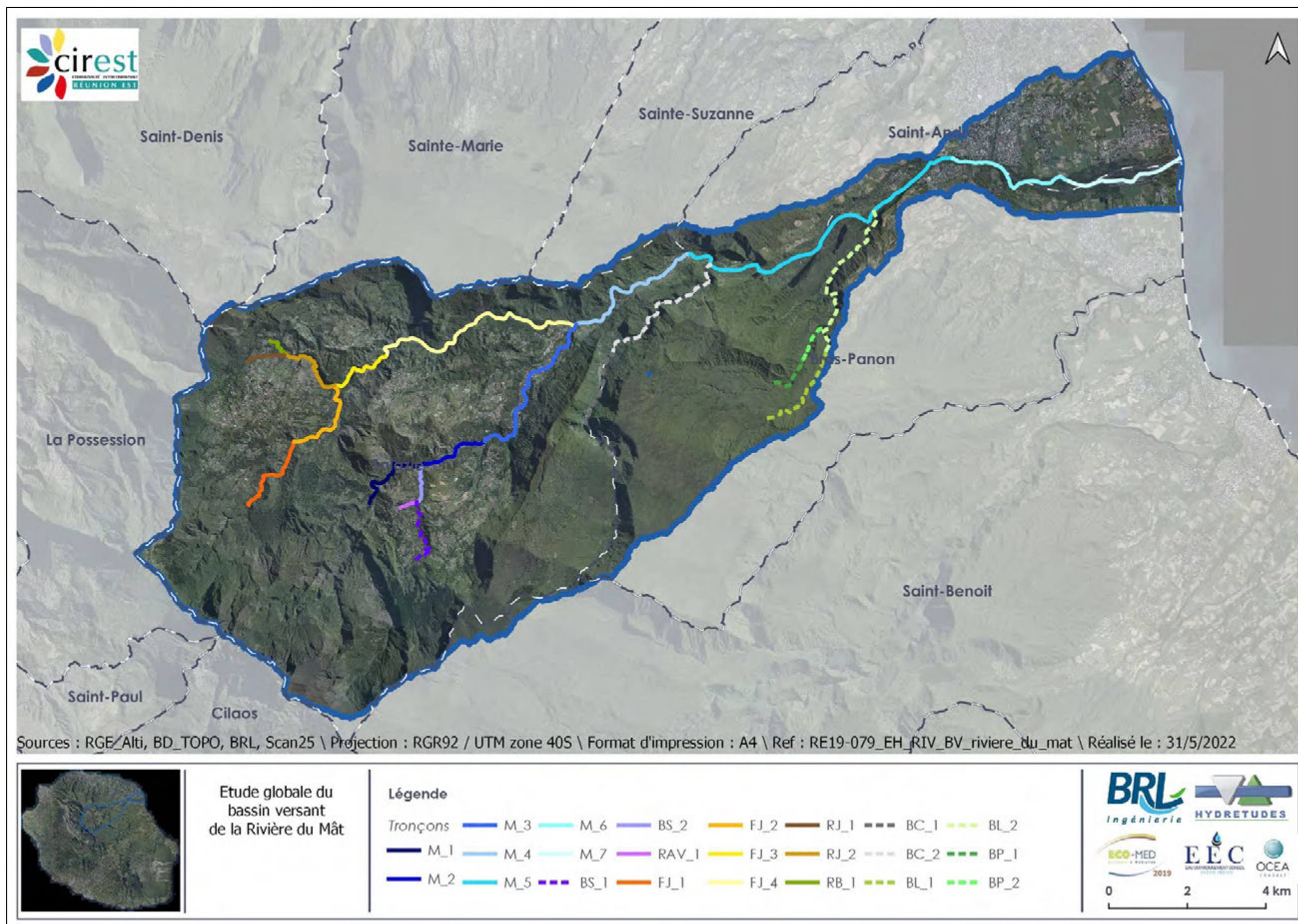


Figure 2 : Carte générale des tronçons du bassin de la Rivière du Mât



2.2.4 Justification de la sectorisation

La sectorisation RHUM a parfois été modifiée : tous les cours d'eau inclus dans le RHUM n'ont pas été pris en compte (cf. partie 2.2.1), certains tronçons ont été fusionnés, rajoutés ou ont vu leurs limites modifiées. Le choix des limites de tronçons est justifié dans le tableau en Annexe 4.

2.3 LA TRAJECTOIRE GEOMORPHOLOGIQUE DES COURS D'EAU, BASE DE NOTRE ANALYSE

Pour comprendre le fonctionnement dynamique des cours d'eau étudiés, il est absolument essentiel de les replacer dans leur contexte dynamique. Cette mise en contexte dynamique doit apporter une nouvelle dimension à la fois dans la compréhension de l'héritage, du diagnostic fonctionnel et des solutions préconisées pour s'adapter au mieux au fonctionnement et à l'évolution dynamiques de la rivière du Mât et de ses affluents.

Il s'agit donc de remonter le passé récent pour analyser l'héritage de ce passé et son impact sur le fonctionnement actuel et pouvoir ainsi se projeter dans l'évolution des cours d'eau et anticiper la gestion future.

Cette démarche permettant de replacer la rivière du Mât et ses affluents dans leur contexte dynamique **s'appuie sur le concept de la trajectoire géomorphologique** (au sens de Wiederkehr *et al.*, 2008).

En effet, un cours d'eau est une entité dynamique qui présente une trajectoire caractérisée par des évolutions multi-scalaires.

Cette trajectoire intègre ainsi le passé, le présent et le futur et exprime la dynamique du cours d'eau en fonction de son évolution géomorphologique.

Ainsi, la trajectoire géomorphologique d'un cours d'eau se caractérise par trois composantes en interrelation :

- **L'héritage géomorphologique** 📖, c'est-à-dire le vécu (passé) du cours d'eau, dont les derniers siècles, et particulièrement les dernières décennies, sont très importants (réchauffement climatique, interventions anthropiques) étant donné qu'ils influencent directement le présent ;
- Le **fonctionnement dynamique** 📖, qui correspond au fonctionnement actuel du cours d'eau et qui pourrait évoluer très vite sous l'effet d'une crue morphogène ou de modifications anthropiques ;
- **L'évolution dynamique** 📖 qui est sous influence de l'héritage géomorphologique et qui reflètera les crues morphogènes subies et les aménagements et/ou modes de gestion générés par l'Homme.

Ainsi, le diagnostic hydromorphologique, première étape essentielle à l'élaboration du plan de gestion, repose sur l'analyse de chacune des composantes de la trajectoire géomorphologique de la rivière du Mât et de ses affluents.

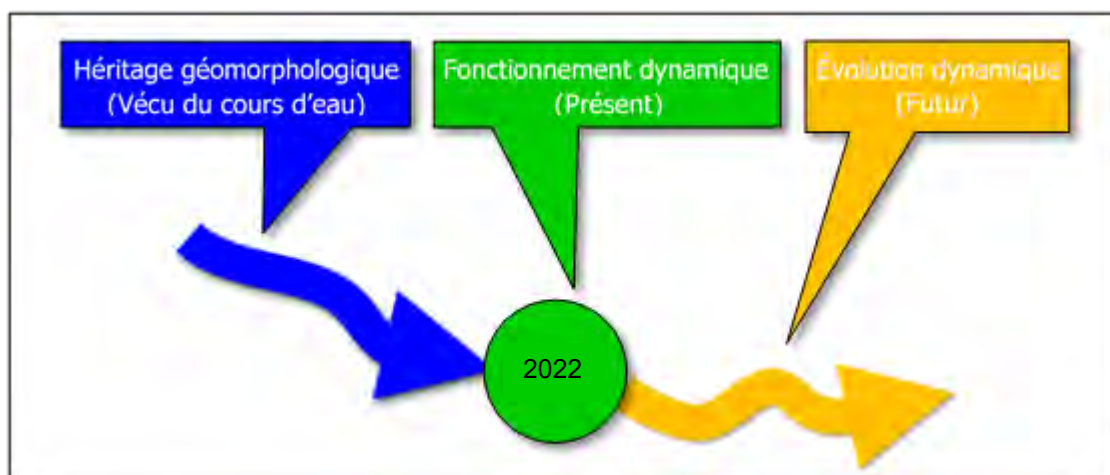


Figure 3 : Les trois composantes de la trajectoire géomorphologique d'un cours d'eau

2.4 HERITAGE DYNAMIQUE

2.4.1 Forçages climatiques

2.4.1.1 Éléments généraux, évolution du climat

Le climat de La Réunion est **tropical humide**. Mais il se singularise surtout par de grandes variabilités liées à la géographie de l'île. L'influence du relief est tout aussi fondamentale que les effets de l'insularité.

Il existe **deux saisons marquées** à La Réunion :

- La saison des pluies qui peut être définie entre janvier et mars,
- La saison sèche, plus longue, qui débute au mois de mai pour s'achever au mois de novembre. Même en saison sèche, les précipitations restent importantes sur la partie Est de l'île et notamment sur les flancs du Volcan,
- Avril et décembre sont des mois de transition, parfois très pluvieux mais pouvant également être très secs.

Si la pluviométrie moyenne annuelle montre une grande dissymétrie entre la saison des pluies et la saison sèche, elle existe également d'un point de vue géographique, **entre l'Est et l'Ouest** de la Réunion, du fait de l'existence de hauts reliefs de l'île : les massifs du Piton des Neiges et du Piton de la Fournaise.

Si à l'Ouest, les précipitations sont peu abondantes, à l'Est, les cumuls de pluie atteignent des valeurs dépassant 10 mètres par an, ce qui est tout à fait exceptionnel à l'échelle mondiale. La disponibilité de la ressource en eau, majeure dans l'Est, est plus contrainte dans le Nord, l'Ouest et le Sud de l'île.



2.4.1.2 Evolution du climat du cirque de Salazie

Nota Bene : Les données disponibles (données Météo France) démarrent à la deuxième moitié du XX^{ème} siècle (1961). Une vision très locale (à l'échelle du cirque de Salazie) n'est pas disponible compte-tenu de la finesse nécessaire.

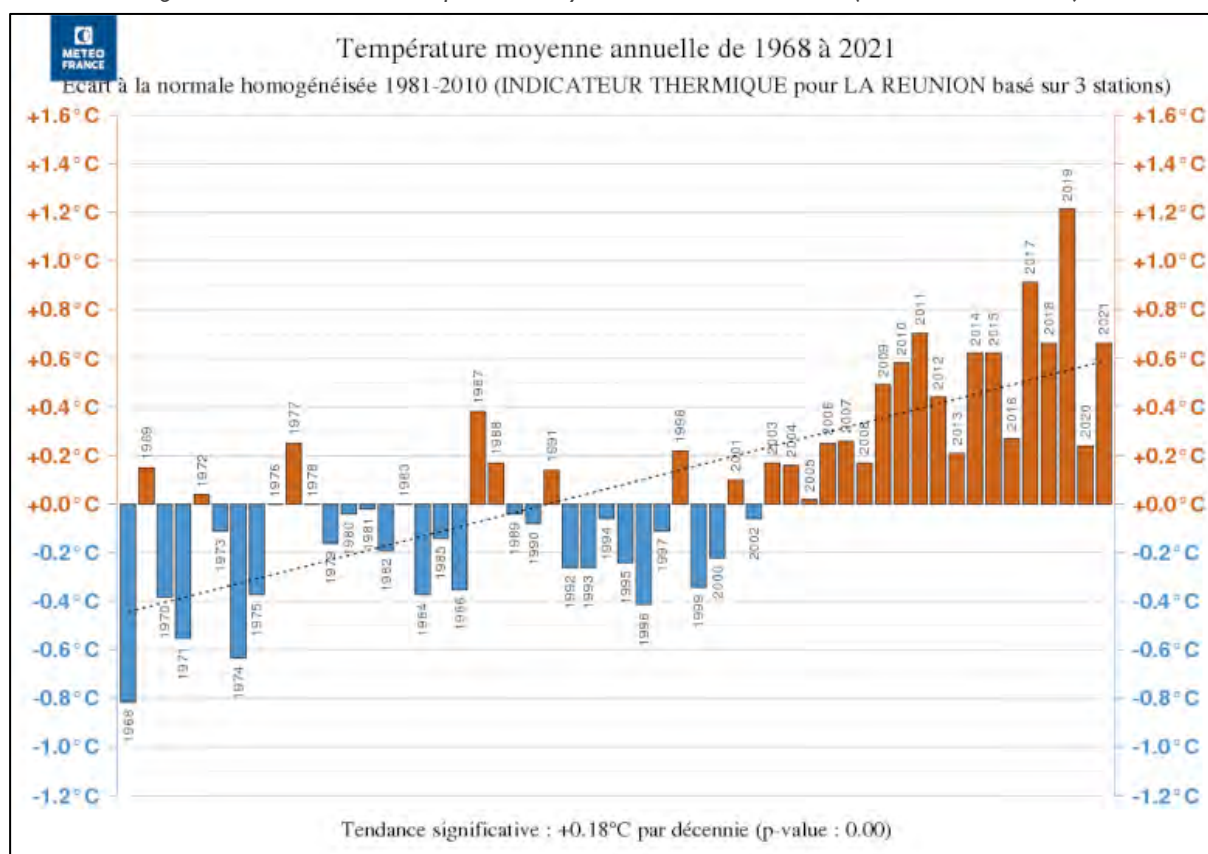
En revanche, les données plus globales concernant l'île de la Réunion englobent notre territoire et permettent ainsi de dégager des tendances d'évolution intéressantes.

2.4.1.2.1 Evolution des températures

À la Réunion, l'évolution de la température est calculée depuis 1968 à partir de données homogénéisées issues de trois sites de mesure que sont Gillot-Aéroport, Pierrefonds-Aéroport et Plaine des Cafres. L'augmentation des températures constitue le signe le plus visible du changement climatique. À la Réunion, ses effets se traduisent principalement par la hausse des températures moyennes, surtout depuis les années 2000.

Le graphique ci-après présente l'anomalie annuelle de température entre 1968 et 2021 par rapport à la normale calculée sur la période 1981-2010.

Figure 4 : Evolution de la température moyenne entre 1968 et 2021 (source Météo France)



L'évolution des températures moyennes à La Réunion montre un réchauffement de l'ordre de 1°C depuis 1970. Cette hausse des températures est assez homogène spatialement. En revanche elle est plus importante pour les températures maximales que pour les températures minimales.



En température moyenne annuelle, les années 1971 et 1974 sont particulièrement fraîches alors que la décennie des années 2010 est de loin la plus chaude à La Réunion depuis 1970, notamment l'année 2019 qui est exceptionnelle.

L'année 2019 est l'année la plus chaude jamais enregistrée depuis le début des mesures à la Réunion. La température moyenne annuelle y a été supérieure de 1,2 °C à la normale de la période 1981-2010. Cette anomalie positive est nettement au-dessus du précédent record de 2017, année où l'on était 0,9 °C au-dessus de la normale.

Cette anomalie chaude, qui concerne à la fois les températures minimales et maximales, s'explique d'une part par le **réchauffement à long terme lié au changement climatique global**, mais également par la **variabilité interannuelle du climat régional**, avec cette année un dipôle de l'océan Indien (oscillation des températures de la surface de la mer) dont l'intensité de la phase positive a atteint un niveau record durant le dernier trimestre de l'année 2019, légèrement au-dessus de l'épisode de 1997.

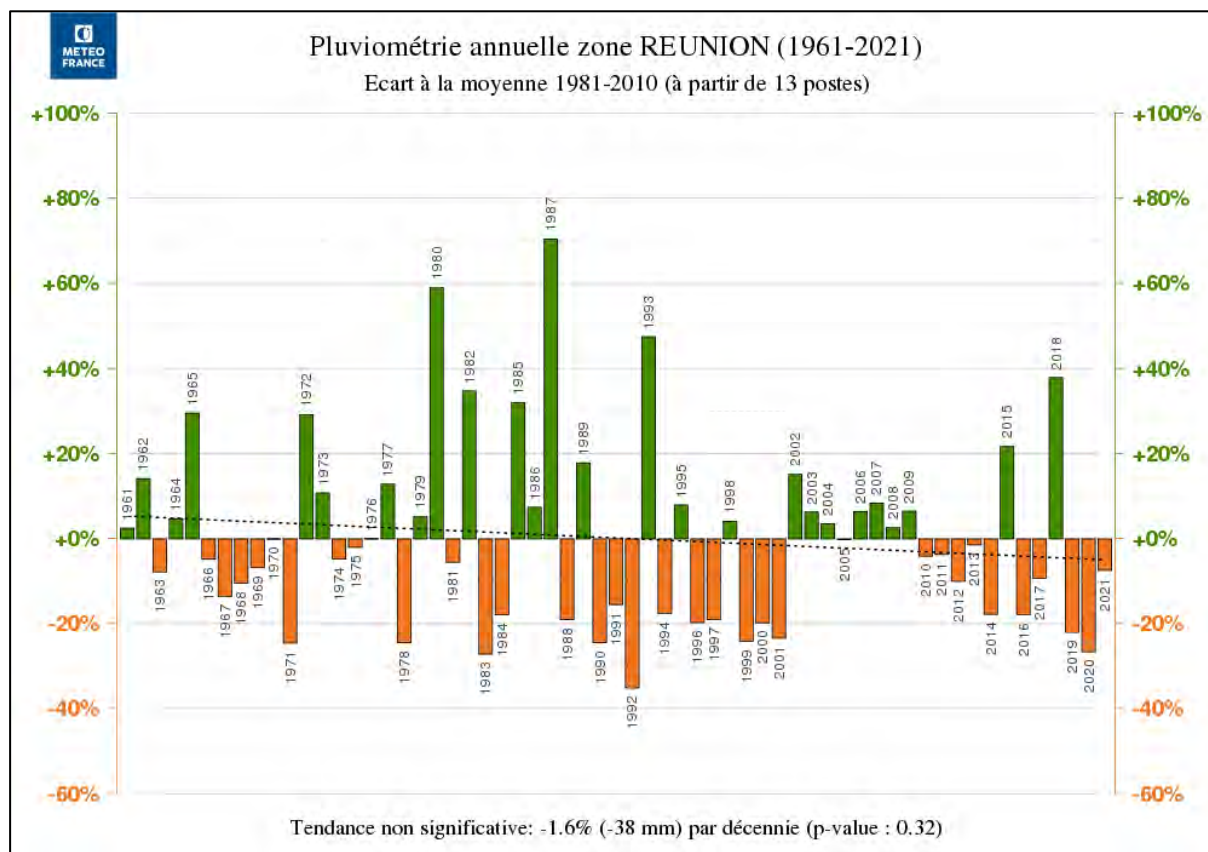
Cette phase positive se traduit par des températures et des précipitations plus élevées dans la partie Ouest du bassin océan Indien (donc à la Réunion), et un refroidissement et moins de précipitations dans la partie Est du bassin qui a tendance à provoquer des sécheresses dans les régions proches de l'Indonésie et de l'Australie, qui a notamment été touchée par une vague d'incendies sans précédents.

2.4.1.2.2 Evolution des précipitations

La pluviométrie à La Réunion est fortement influencée par les événements extrêmes et notamment par les **épisodes cycloniques**. La **forte variabilité interannuelle** sur la fréquence d'apparition de ces phénomènes module fortement la pluviométrie de l'île d'une année à l'autre. En conséquence, les tendances de long terme sur la pluviométrie moyenne de l'île depuis plus de 50 ans ne sont pas significatives.

Sur la plupart des secteurs de La Réunion, l'année 1987 reste la plus pluvieuse, sous l'influence du cyclone tropical CLOTILDA, sauf dans l'Est où c'est 1993 qui reste l'année la plus mémorable. Dans l'ensemble, la période 1990-2001 est la plus sèche depuis 1961.

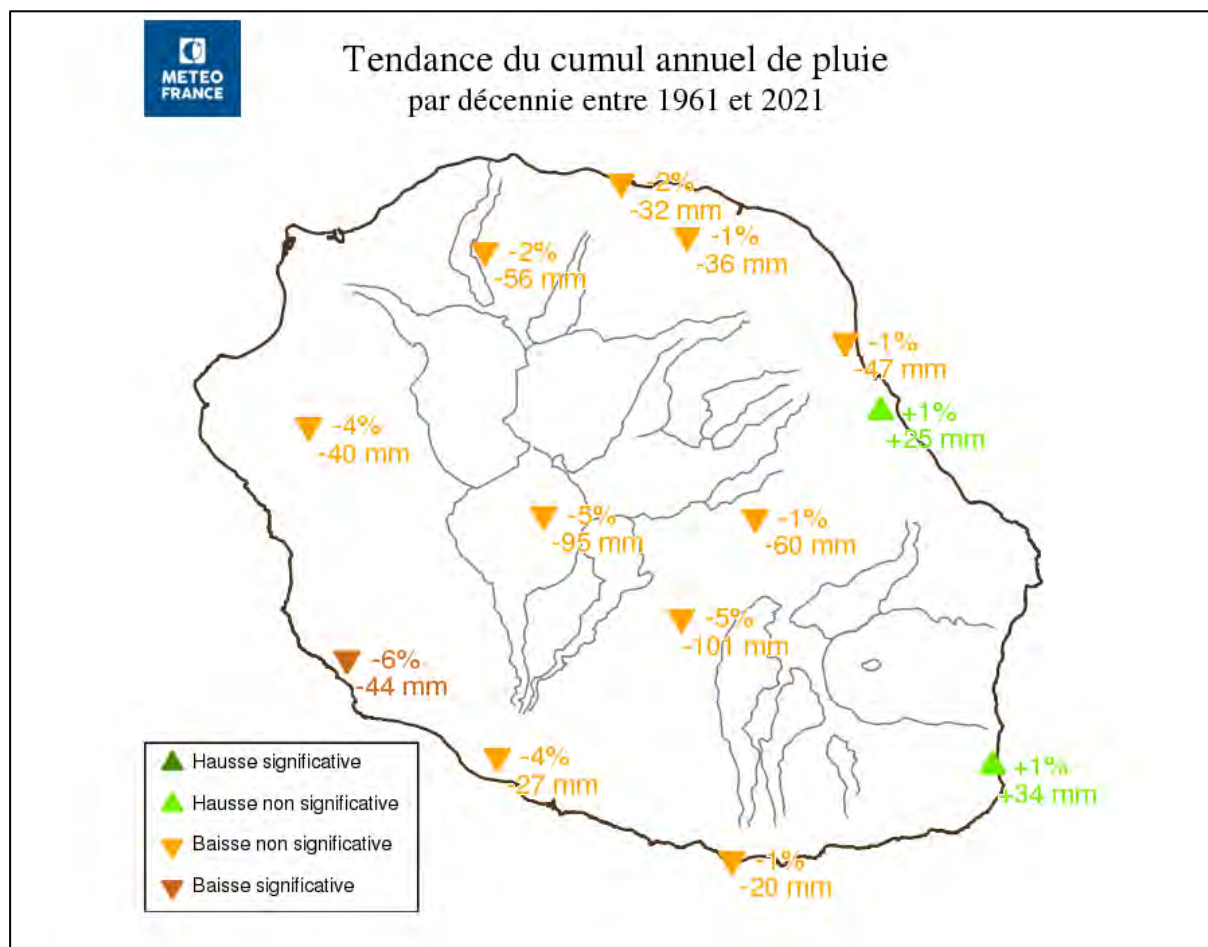
Figure 5 : Evolution des précipitations annuelles entre 1961 et 2021 à la Réunion (source Météo France)



Aucune tendance marquée ne se dégage pour l'évolution de la pluviométrie annuelle sur l'île. Néanmoins, l'évolution non significative à l'échelle de l'île de la pluviométrie annuelle cache quelques disparités spatiales.

Sur la carte suivante présentant les tendances par décennie sur 13 stations de référence, on peut noter une tendance de long terme à la baisse plus marquée sur la moitié sud-ouest de l'île.

Figure 6 : Tendance de cumul annuel de pluie par décennie entre 1961 et 2021 (source Météo France)



2.4.1.2.3 Evolution de l'activité cyclonique

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 :

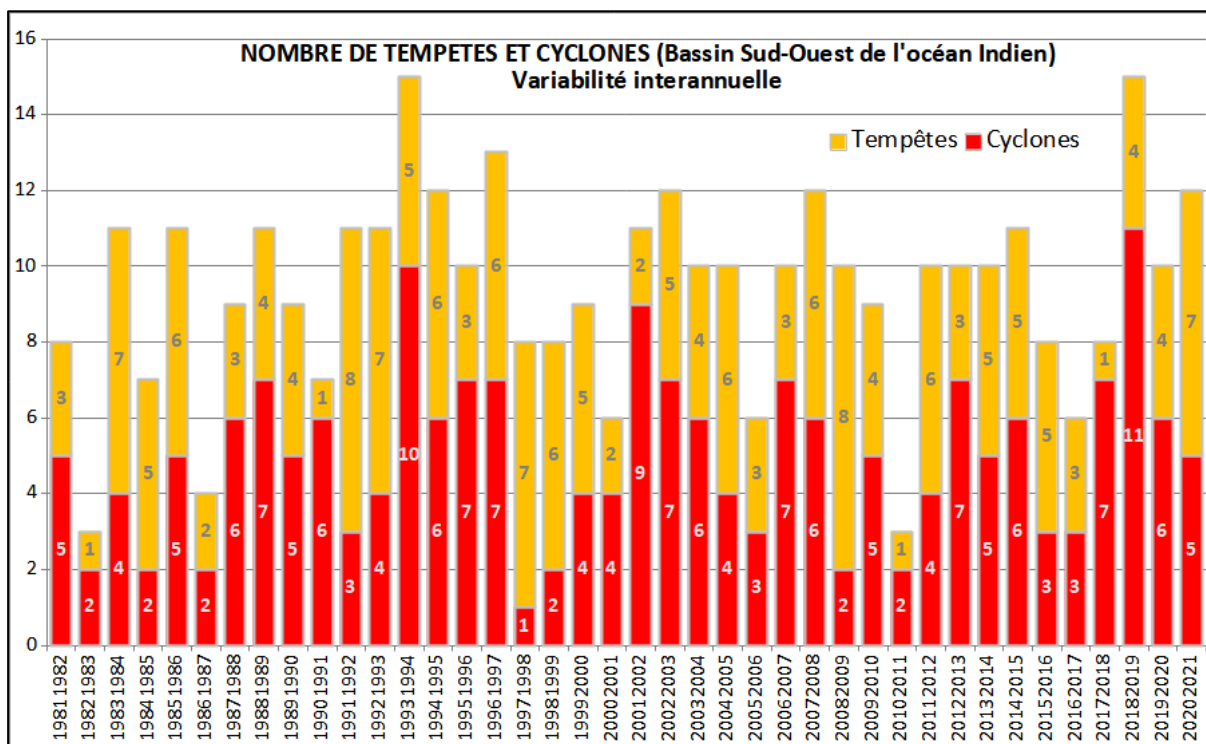
- Inférieure ou égale à 62 km/h pour une dépression,
- Comprise entre 63 et 117 km/h pour une tempête,
- Supérieure ou égale à 118 km/h pour un ouragan.

Cette activité cyclonique se situe généralement entre mi-novembre et fin avril. Elle comporte en moyenne 11 événements : 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).

A l'échelle du bassin cyclonique du Sud-Ouest de l'océan Indien, on n'observe pas de tendance notable sur la fréquence des tempêtes et cyclones tropicaux. Ces phénomènes sont soumis à une variabilité annuelle ou décennale très élevée et la détection de tendances de long terme nécessiterait une profondeur d'observation homogène plus importante (plus de 50 ans).



Figure 7 : Evolution de l'activité cyclonique entre 1982 et 2021 (source Météo France)

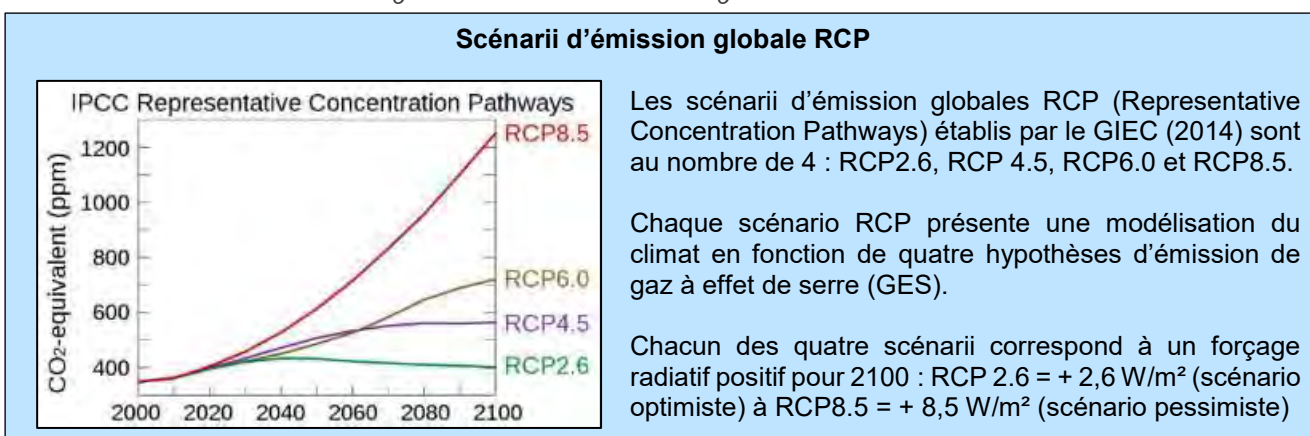


Il est très difficile de calculer une tendance sur le nombre et l'intensité des tempêtes et cyclones touchant la Réunion, car non seulement l'activité cyclonique du bassin Sud-Ouest de l'Océan Indien fluctue fortement d'une année à l'autre, mais surtout la part des tempêtes et cyclones du bassin qui affecte la Réunion est faible.

2.4.1.3 Éléments de futurisation du climat

Nota Bene : Le néologisme « futurisation » peut être littéralement traduite par « se représenter ». La futurisation est donc une démarche qui vise à anticiper l'évolution climatique par divers moyens (analyses, modélisation, suivi, ...).

Figure 8 : Les scénarii d'émission globale RCP





2.4.1.3.1 Evolution des températures moyennes au XXI^{ème} siècle

A La Réunion, les projections climatiques montrent une **poursuite du réchauffement annuel** jusqu'aux années 2050 au moins, quel que soit le scénario.

Figure 9 : Evolution de la température moyenne annuelle suivant trois scénarii RCP (source Météo France)

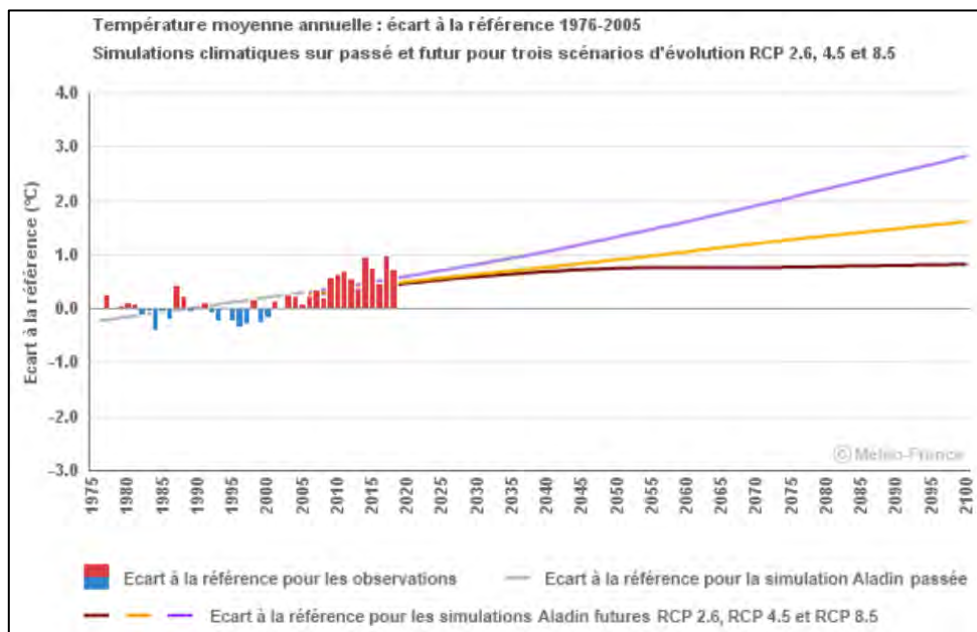
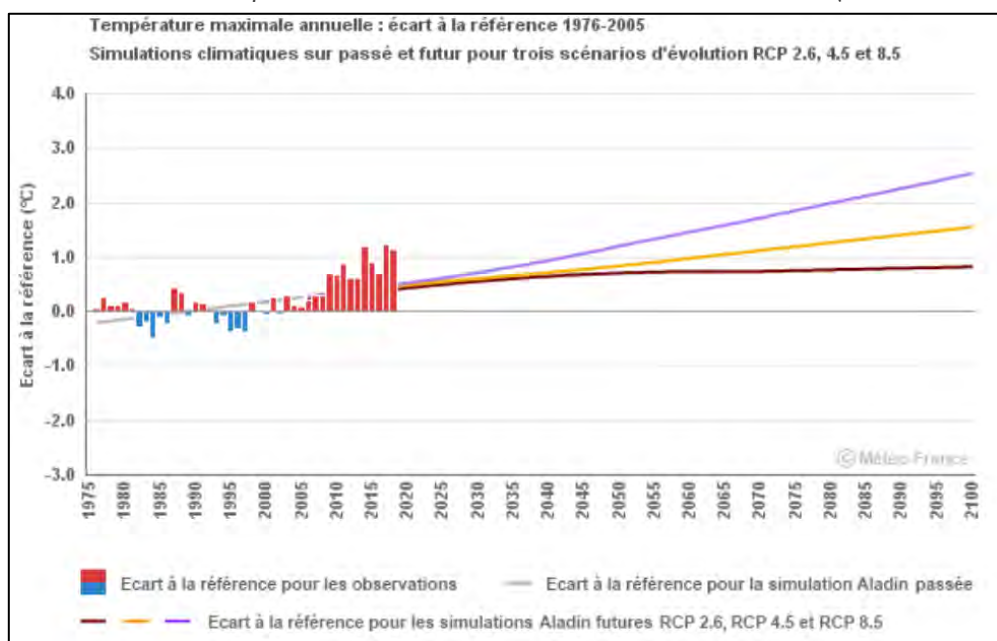


Figure 10 : Evolution des températures maximales annuelles suivant trois scénarii RCP (source Météo France)



Sur la seconde moitié du XXI^{ème} siècle, l'évolution de la température moyenne annuelle diffère significativement selon le scénario considéré. Le seul qui stabilise le réchauffement est le scénario RCP2.6 (lequel intègre une politique climatique visant à faire baisser les concentrations en CO₂), avec une augmentation qui reste inférieure à 1°C.

Selon le RCP8.5 (scénario sans politique climatique), le réchauffement moyen annuel pourrait atteindre 3°C, et le réchauffement maximal annuel pourrait atteindre 2,5°C à l'horizon 2100.

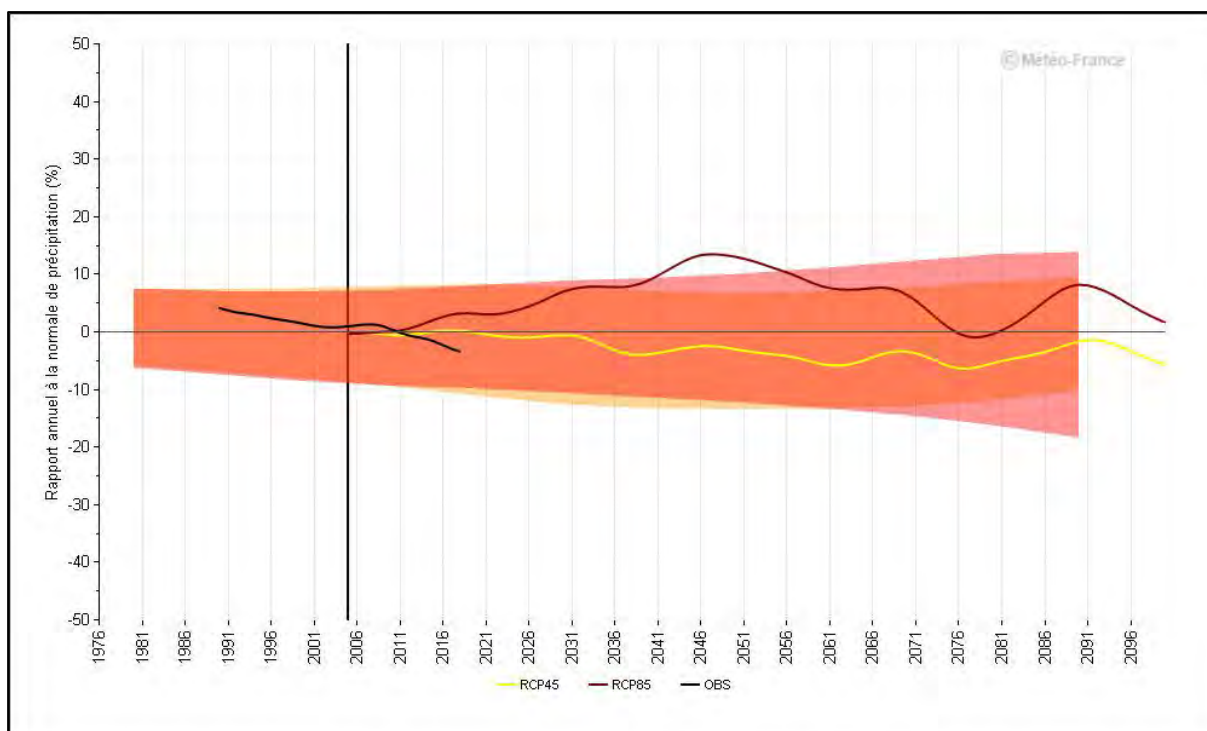
2.4.1.3.2 Evolution de la pluviométrie au XXI^{ème} siècle

Contrairement à l'évolution des températures, l'évolution des précipitations, rattachée au modèle régional Aladin-Climat (seul modèle climatique régional utilisé), est entachée d'une **forte incertitude** car :

- La forte variabilité d'une année à l'autre masque de possibles contrastes régionaux et saisonniers,
- Pour l'évolution des précipitations, l'incertitude liée à la modélisation physique – donc le choix du modèle régional de climat – est plus importante que le choix de scénario RCP (2.6, 4.5 ou 8.5),
- Des décennies tantôt humides, tantôt sèches, bien simulées par le modèle peuvent perturber les tendances selon la période où elles sont placées.

Le graphique ci-dessous présente les simulations régionales d'Aladin-Climat RCP4.5 et RCP8.5 sur la Réunion et le panache du point de grille « Réunion » des modèles globaux. Il permet de mettre en lumière ces trois points conduisant à une forte incertitude :

Figure 11 : Evolution de la pluviométrie à la Réunion au XXI^{ème} siècle (source Météo France)



Les séries de données présentées sur le graphique sont les suivantes :

- Série 1 / courbe noire : rapport entre le cumul annuel des précipitations observées et la référence (moyenne 1976-2005) des précipitations simulées par le modèle régional Aladin-Climat (Météo-France), moyenné sur les 30 dernières années.
- Série 2 / courbe jaune : rapport entre le cumul annuel des précipitations simulées par le modèle régional Aladin-Climat (Météo-France) pour le scénario RCP 4.5 sur la période 1976-2100 et la référence simulée (moyenne 1976-2005), moyenné sur les 30 dernières années.
- Série 3 / courbe rouge : rapport entre le cumul annuel des précipitations simulées par le modèle régional Aladin-Climat (Météo-France) pour le scénario RCP 8.5 sur la période 1976-2100 et la référence simulée (moyenne 1976-2005), moyenné sur les 30 dernières années.

- Série 4 / enveloppe jaune : panache de plus grande probabilité du rapport entre le cumul annuel des précipitations simulées par les différents modèles globaux issus de l'expérience multi-modèles CMIP5 pour le scénario RCP 4.5 sur la période 1971-2100 et la référence simulée (moyenne 1971-2000).
- Série 5 / enveloppe rouge : panache de plus grande probabilité du rapport entre le cumul annuel des précipitations simulées par les différents modèles globaux issus de l'expérience multi-modèles CMIP5 pour le scénario RCP 8.5 sur la période 1971-2100 et la référence simulée (moyenne 1971-2000).

Le graphique ci-dessus montre que pour la Réunion :

- Une légère baisse des précipitations est observée sur le climat passé (série 1).
- Les courbes des séries 2 et 3, qui sont moyennées sur 30 ans, fluctuent en raison de variations décennales simulées par le modèle Aladin-Climat. Il ne faut donc pas conclure, par exemple pour la courbe 3, que les précipitations augmenteront significativement vers 2050 et redeviendront normales vers 2080.
- Compte tenu du point précédent, les séries 2 et 3 ne sont pas significativement différentes. Le choix du scénario RCP a donc peu d'influence sur la tendance des précipitations futures.
- Les deux panaches associés aux scénarios RCP4.5 (série 4) et RCP8.5 (série 5) des modèles globaux CMIP5 montrent peu d'évolution des précipitations mais une incertitude qui augmente pour le RCP8.5 puisque l'enveloppe s'élargit.
- Le scénario RCP8.5 du modèle régional Aladin-Climat se situe dans la partie supérieure du panache des modèles globaux CMIP5, tandis que le scénario RCP4.5 est plutôt dans la moyenne du panache.

On retiendra donc qu'à la Réunion, quel que soit le scénario considéré, les projections climatiques montrent **peu d'évolution des précipitations annuelles d'ici la fin du XXI^{ème} siècle, cette tendance étant toutefois associée à une forte incertitude.**

Si l'on regarde au niveau saisonnier :

- En période humide, l'évolution des précipitations estivales, principales contributrices des précipitations annuelles, est peu marquée,
- En période sèche, on note une baisse sensible des précipitations hivernales.

2.4.1.3.3 Evolution de l'activité cyclonique au XXI^{ème} siècle

D'après les scientifiques du GIEC, l'évolution des cyclones, à la fois en fréquence et en intensité, est **incertaine**. Les experts s'accordent toutefois sur une **augmentation des précipitations associées à un système tropical** et la possibilité que les cyclones les plus intenses puissent évoluer à des **latitudes plus australes**.

Les travaux en cours à Météo-France Réunion confirment cette analyse localement (bassin du Sud-Ouest de l'Océan Indien) à partir des analyses réalisées sur les 30 dernières années.

2.4.1.4 Forçage climatique sur la trajectoire de la Rivière du Mât

Les éléments présentés ci-dessous synthétisent les évolutions climatiques prévues qui auront un impact sur la trajectoire géomorphologique de la Rivière du Mât, le forçage climatique s'accroissant :

- **L'évolution des températures maximales**, combinée à une **baisse sensible des précipitations hivernales**, devrait conduire à des **étiages plus sévères** durant la période sèche.



- **L'accentuation de l'intensité des cyclones sans augmentation des précipitations courantes annuelles** (voire avec une diminution des précipitations courantes annuelles) pourrait entraîner une **augmentation des taux d'érosion**. En effet, la variabilité temporelle des précipitations impacte fortement les taux d'érosion (Source : Gayet *et al*, 2019). Les bassins de l'île caractérisés par un fort écart entre les précipitations courantes et les événements de précipitations extrêmes sont ceux qui présentent les taux d'érosion les plus forts. Les trois bassins présentant les taux d'érosion les plus importants à la Réunion sont dans l'ordre Cilaos, Salazie et Mafate. Cilaos présente un taux d'érosion légèrement plus élevé que Salazie du fait de cette variabilité temporelle des précipitations.



Conclusion : forçages climatiques

La Réunion est caractérisée par un **climat tropical humide à cyclones**. Ce climat présente une **dissymétrie** saisonnière (saison des pluies/saison sèche) et spatiale (Est/Ouest) des précipitations.

Le changement climatique impacte déjà les températures de l'île mais il est difficile de dégager une tendance en ce qui concerne les précipitations. Toutefois, les experts s'accordent sur le fait que **les cyclones pourraient s'intensifier** dans la région. Cela pourrait donc accentuer le contraste entre précipitations courantes et extrêmes, ce qui entraînerait une **augmentation des taux d'érosion**.

2.4.2 Forçages anthropiques

2.4.2.1 Défrichement à partir du 17^e siècle et évolution du couvert végétal aujourd'hui

Le département de la Réunion est sujet à une érosion massive due aux phénomènes météorologiques intenses (cyclones), combinée à un relief tourmenté constitué de fortes pentes et des forçages anthropiques importants.

Découverte en 1665, l'île de la Réunion était **originellement recouverte de forêts primaires**. Les **premiers déboisements ont eu lieu dès le 17^{ème} siècle** dans les zones côtières inférieures à 300m d'altitude pour les cultures vivrières. Au 18^{ème} et début du 19^{ème} la forte production du café entraînera le défrichement systématique des forêts des basses pentes de l'île (environ 500m). Suite à des violents cyclones en 1806 et 1807, la culture de la canne à sucre pris le pas sur le café et devint de très loin la monoculture principale de l'île. La culture de la canne à sucre conjuguée à une croissance démographique forte eut pour conséquence un déboisement encore plus important (jusqu'à 650m d'altitude). Le besoin en bois de chauffage et de construction empire progressivement la situation et la bande forestière située au-dessus de la bande sucrière disparaît également. Le **peuplement des cirques** a été plus tardif (**milieu du 19^{ème}**), les **défrichements sont surtout dus aux cultures vivrières sur les îlets**. Cette activité a pour conséquence une érosion des sols importantes dans une zone déjà naturellement sensibles aux glissements et donc un apport massif de matériaux dans le réseau hydrographique. **En 1872, le conseil général interdit les défrichements illégaux**. Depuis, **les îlets se reboisent progressivement** avec l'abandon de parcelles agricoles, malgré une plus forte urbanisation.

A partir des années 1950, les îlets se sont progressivement reboisés avec l'abandon de parcelles agricoles (exode rural). Aujourd'hui la surface boisée représente 45% du territoire (120 000 hectares), elle tend à se stabiliser avec la création du Parc National de la Réunion et avec la stabilisation récente des surfaces agricoles du cirque.



Figure 12 : Comparaison du secteur de Salazie entre 1950 et 2017, l'urbanisation et les surfaces boisées ont progressé, les ravines sont désormais végétalisées et certains champs de culture sont abandonnés



Figure 13 : Photo du début du XXème siècle, secteur de Mare à Poule d'eau, l'îlet contient peu de surfaces boisées

2.4.2.2 Extractions

Du fait de la géologie volcanique de la Réunion, **les extractions d'alluvions sont rares en amont des bassins versants et se situent plutôt au niveau des grands cônes alluviaux** (rivière du Mât, rivière de l'Est, rivière Saint-Etienne et rivière des Galets). La carte géologique de la Réunion montre que le paléo-cône alluvial de la Rivière du Mât s'étend sur une largeur d'environ 10 km entre le lieu-dit Cambuston à Saint-André et le nord de Saint-Benoît.

La **carrière Holcim** (EC 02-01 du schéma départemental des carrières), située en rive droite du cône alluvionnaire actuel est le principal site d'extractions d'alluvions sur le bassin versant. **De 1980 à 2000 les extractions se faisaient en lit mineur**, on estime jusqu'à 5Mm3 d'alluvions prélevés en lit mineur sur cette période (Source : BRGM, 2008 avec extrapolation sur certains données). Depuis 1994, les prélèvements en lit mineur sont interdits, cependant ils se sont poursuivis jusqu'en 2001, date de modification de l'arrêté. Cette modification a clarifié la notion de lit mineur.

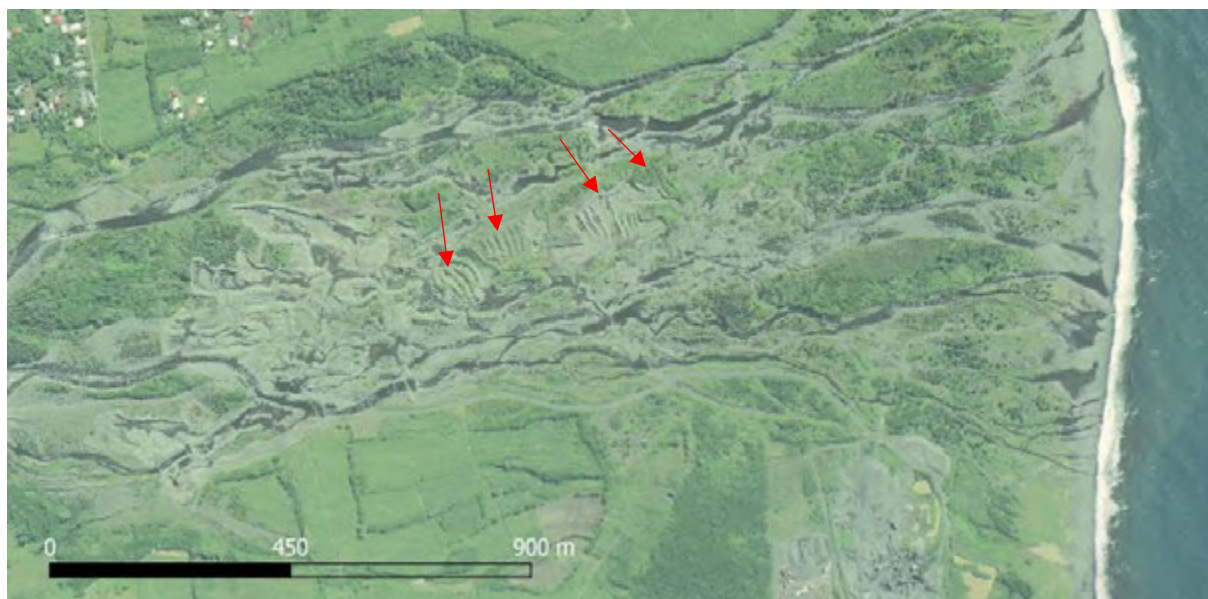


Figure 14 : Extractions d'alluvions en lit mineur (1997)

Depuis 2001, les extractions se font dans les terrasses alluviales du lit moyen. Les installations sont protégées par une digue en enrochements. L'extraction d'alluvions est répartie sur 4 sites. Les sites 1 et 2, en fin d'exploitation, sont remplacés par des grands bassins. Le site 3 a été remblayé. Le site 4, actuellement en cours d'exploitation, sera remblayé en fin d'exploitation (mis à part sur une surface de 5000 m² pour faire place à des bassins ostréicoles). Le volume total de sédiments prélevés dans le lit moyen est estimé à 6,3 Mm³ (respectivement 3 Mm³, 1,5 Mm³, 0,85 Mm³ et 0,9 Mm³ pour chacun des sites).



Figure 15 : Sites d'extractions d'alluvions de la carrière en rive droite de la Rivière du Mât

En cas de crue majeure, il existe des **risques de rupture de digues**. Cela pourrait entraîner une **capture**, c'est-à-dire un changement de lit, de la Rivière du Mât dans les bassins dont le fond est plus bas topographiquement que le fond du cours d'eau. Cela engendrerait alors un piégeage massif des alluvions dans les différents bassins. De plus, certains terrains se trouvant sous le niveau de la mer, un risque d'invasion marine existe également.

Lors du cyclone Gamède en 2007, la digue protégeant les bassins a d'ailleurs déjà cédé provoquant l'inondation d'une partie de la carrière et des installations de concassage.



Figure 16 : Site de la carrière Holcim (2017)

En rive gauche du cône alluvionnaire, à l'est du lotissement Pelvoisin, une carrière active entre 1975 et 2011 a prélevé des alluvions sur un site de 8 hectares. Elle est désormais fermée.

Un site d'exploitation de granulats (EC 02-03 du schéma départemental des carrières) est également répertorié sur la terrasse alluviale de l'îlet Payet, en aval de la passerelle. Actif dans les années 90, on estime un volume retiré de 100 000 à 200 000 m³ d'alluvions anciens. On remarque aussi des extractions en lit mineur au nord du site.



Figure 17 : Extractions de matériaux à l'ilet Payet (1997)

Entre 2000 et 2012, un éboulis de 20 000 m² et plusieurs mètres de hauteur a été exploité illégalement en amont du Pont des Fleurs Jaunes. Cet éboulis provenant directement du pignon d'Anchain a atteint le lit mineur de la rivière des Fleurs Jaunes. On estime que le volume de matériau prélevé sur le lieu de l'éboulis est compris entre 100 000 à 200 000 m³ (en partie en lit mineur). L'exploitation de cet éboulis a été définitivement clôturée en 2012 par arrêté préfectoral.



Figure 18 : Eboulis provenant du pignon d'Anchain (2003)

2.4.2.3 Perturbateurs

Les perturbateurs hydromorphologiques regroupent l'ensemble des **ouvrages transversaux** présent dans le lit d'un cours d'eau (barrages, seuils anthropiques ou naturels, ponts, etc.). Ils affectent durablement le profil en long en compartimentant le lit fluvial, créant ainsi des tronçons à dynamique propre et altérant la continuité hydraulique, sédimentaire et/ou écologique.

Les perturbateurs anthropiques sont peu nombreux sur ce bassin puisqu'on recense **4 barrages** : 1 sur la Ravine Roche à Jacquot 1 sur la Rivière des Fleurs Jaunes et 2 sur la Rivière du Mât. Ils ont tous un **impact majeur sur le transit sédimentaire** puisqu'ils modifient la pente du profil en long et piègent une partie des matériaux dans leur retenue amont.

Les ouvrages de franchissement ont un **impact relativement faible**. A l'exception du pont de Fleurs Jaunes ils n'ont pas de piles en lit mineur, sont souvent surdimensionnés et ne réduisent pas la section hydraulique

Le pont de la Rivière des Fleurs Jaunes (D52) a été conçu lorsque que la bande active était beaucoup plus large. Il dispose d'une pile posée en rive droite dans le lit moyen. Cette pile peut provoquer des embâcles, influencer les écoulements et les dépôts. La semelle de la pile affleure ce qui est le signe d'un phénomène d'incision, confirmé par la réduction de la bande active et l'affleurement de la roche mère.



Figure 19 : Pont D52



Figure 20 : Affleurement de la semelle de la pile du pont D52, signe d'incision du lit au droit du pont

A contrario, les perturbateurs naturels sont très nombreux en amont du bassin et sont liés à la géologie locale (cascades, seuils naturels...). La cascade Micheline sur la ravine Roche à Jacquot et la ravine Blanche est par exemple liée à une série de failles.

36

2.4.2.3.1 Ravine Roche à Jacquot

Un barrage de 3 m de hauteur précédé d'un radier enrochements libres est présent sur la Ravine Roche à Jacquot (tronçon RJ1). Ces deux ouvrages de correction torrentielle ont pour but la stabilisation du lit et la non-déviations du cours d'eau lors des crues. Ils diminuent localement la pente du profil en long et favorisent l'accumulation des sédiments en amont proche. Sur la Ravine Roche à Jacquot, cet effet est recherché afin de limiter les phénomènes d'incision du lit.



Figure 21 : Barrage et enrochements libres sur la ravine Roche à Jacquot

2.4.2.3.2 Rivière des Fleurs Jaunes

La prise d'irrigation ILO (Irrigation Littoral Ouest) de la rivière des Fleurs Jaunes (tronçon FJ4), d'une hauteur de 9,5 m perturbe le transit sédimentaire en sortie de gorges. En effet, l'ouvrage est totalement atterri, c'est à dire que sa retenue s'est entièrement comblée par piégeage des alluvions. Le volume de matériaux bloqués est estimé à 80 000 m³. Bien que le barrage soit totalement atterri et qu'il ne puisse donc plus piéger de nouveaux matériaux, il impacte toujours le transit sédimentaire car entraîne un aplanissement du profil en long sur environ 700 m en amont de l'ouvrage. Cette diminution de la pente est à l'origine d'une série de bancs alternés en amont du barrage.

Le piégeage des matériaux en amont du barrage a pu entraîner un déficit sédimentaire temporaire en aval. Toutefois, le barrage a dû être rapidement comblé puisque la capacité de transit annuelle de la Rivière des Fleurs Jaunes a été estimée à environ 120 000 m³ par le BRGM en 2008. A l'heure actuel, l'impact sur le transit sédimentaire est donc plus limité et la majeure partie du transport solide peut franchir le barrage lors des épisodes de crue.



Figure 22 : Prise d'irrigation ILO de la Rivière des Fleurs Jaunes

2.4.2.3.3 Rivière du Mât

La prise d'irrigation ILO (Irrigation Littoral Ouest) de la Rivière du Mât (tronçon M3), d'une hauteur de 9,4 m perturbe le transit sédimentaire en sortie de gorges. Cet ouvrage est une copie conforme de l'ouvrage présent sur la rivière des Fleurs Jaunes. Il est lui aussi totalement atterri par des sédiments. Le volume de matériaux bloqués est estimé à 65 000 m³. Il impacte la pente du profil en long sur environ 700 m. Comme sur la prise ILO des Fleurs Jaunes, une série de bancs alternés est présente en amont du barrage. Le barrage étant aujourd'hui totalement atterri, l'impact sur le



transit sédimentaire est donc limité et la majeure partie du transport solide peut franchir le barrage lors des épisodes de crue.



Figure 23 : Prise d'irrigation de la Rivière du Mât

Le barrage de Bengalis situé plus en aval (tronçon M5) constitue un seuil d'une hauteur de 9,5 m. Il a été mis en service en 1974-75.

D'après BRLi, le seuil a bloqué temporairement les sédiments provenant de l'amont. Il s'est toutefois rapidement atterri et les volumes piégés en amont de l'ouvrage sont estimés entre 150 000 et 250 000 m³ de matériaux. L'incision à l'oeuvre entre le seuil de Bengalis et le pont de la RN2 semblait déjà avoir commencé 10 ans avant la construction du seuil. La mise en place du seuil a donc accéléré temporairement l'incision du tronçon aval, le temps que le barrage soit totalement atterri par piégeage des alluvions.



Figure 24 : Barrage de Bengalis



2.4.2.4 Corsetage

Le corsetage des berges est un phénomène naturel ou anthropique empêchant la mobilité latérale et la recharge sédimentaire du cours d'eau par érosion de berge. Il peut être la conséquence de berges indurées peu érodable ou alors d'ouvrages de protection de berges (digues, gabions, enrochements...).

Le bassin versant de la Rivière du Mât contient de nombreuses zones de corsetage naturel dans les zones de gorges (tronçons RJ2, M1, M3, FJ3, FJ4 et M4). Ces gorges se sont formées dans des couches dures à dominante basaltiques.

Les corsetages anthropiques sont quasiment inexistant mis à part les enrochements protégeant la carrière Holcim et les entonnements à proximité de certains ouvrages d'art (ex : gabions en amont du pont de la RN2).

Les routes peuvent parfois limiter la production sédimentaire à la manière des corsetages en déconnectant certains versants. Sur le bassin de la Rivière du Mât, les routes en bord de cours d'eau longent généralement des versants basaltiques, les apports sédimentaires sont donc de base quasi-nuls. Seule la route en amont rive droite du pont de Savane déconnecte localement la partie haute du versant du cours d'eau. Un glissement a récemment eu lieu et des gabions ont été installés pour bloquer les matériaux et limiter les impacts au niveau de la route.



Conclusion : forçages anthropiques

Différents forçages anthropiques ont marqué et marquent encore le fonctionnement de bassin de la Rivière du Mât.

Du XVII^{ème} siècle à la fin du XIX^{ème} siècle, le bassin a progressivement été **défriché**, ce qui a dû favoriser les phénomènes d'érosion, de glissement et de ravinement et par conséquent la production et la recharge sédimentaires. A partir de la fin du XIX^{ème} siècle, la tendance s'inverse et les versants et îlets se reboisent progressivement jusqu'à atteindre les niveaux actuels de boisements. Ce reboisement permet de mieux fixer les versants et les berges, la production et la recharge sédimentaires ont donc également dû reculer.

Tout au long du XX^{ème} siècle et jusqu'à aujourd'hui, des **extractions** ont eu lieu sur le bassin. Elles se sont principalement concentrées sur le cône alluvial mais certains sites d'extraction sont également situés plus en amont. Jusqu'en 2001, des extractions avaient lieu en lit mineur, ce qui impactait directement le fonctionnement des cours d'eau. Cela a également pu favoriser les phénomènes d'incision régressive visible depuis les années 60-70 sur l'aval de la Rivière du Mât.

Plusieurs barrages perturbent actuellement le transport solide sur le bassin en bloquant des matériaux et en modifiant le profil en long. Seul le barrage de correction torrentielle de la Ravine Roche à Jacquot a pour objectif principal de modifier le profil en long pour limiter l'incision. A noter que le barrage de Bengalis sera prochainement arasé à la cote de 107 m NGF.

Les **corsetages** d'origine anthropique sont **très peu nombreux** sur le bassin, ils sont concentrés au niveau des ouvrages de franchissement et au droit de la carrière Holcim. Leur **impact** sur la mobilité du cours d'eau et la recharge est donc **limité**.



2.4.3 Analyse diachronique

2.4.3.1 En plan

L'objectif de la diachronie en plan est de définir la **mobilité de la bande active au cours du temps**.

La bande active correspond à la bande dans laquelle s'écoule un cours d'eau et où se concentre l'activité morphogène (chenaux d'écoulements et dépôts sédimentaires). Elle contient les chenaux et les structures alluvionnaires (plages de dépôts) non végétalisées et donc facilement remobilisables.

La bande active évolue naturellement au fil des crues et des intercrues : elle se réactive/s'élargie plus ou moins lors de **crues morphogènes** puis se rétracte lentement par végétalisation et/ou enfoncement du lit lors des périodes d'**intercrues**.

L'incision des lits fluviaux s'accompagne généralement d'une réduction de la surface de la bande active liée aux phénomènes progressifs d'encaissement et de monochenalisation du lit.

Les longues périodes d'intercru augmentent le risque d'embâcles et d'avulsion du cours d'eau car la bande active est fortement végétalisée et réduite. Cette dernière ne permet donc plus le passage des crues morphogènes.

Sur ce bassin versant, la diachronie en plan s'est basée sur les photos satellites historiques suivantes : 1950, 1961, 1966, 1973 (aval du BV), 1979, 1984, 1989, 1997. La BD ortho de l'IGN a été utilisé pour les photos récentes : 2003, 2008, 2011 et 2017. Les images satellites de 2021 proviennent de Bing Virtual Earth et Google Satellite.

A noter que plus l'image est ancienne, plus la précision sur le calage et la résolution sont faibles, d'autant plus dans les zones à fort relief.

Certaines photographies interviennent après un événement cyclonique majeur, c'est le cas pour 1950 (cyclone de 1948), 1966 (Denise, la même année), 1984 (Hyacinthe, 1980), 1989 (Firinga, 1989), 2003 (Dina, 2002), 2008 (Diwa et Gamède, 2006 et 2007).

A contrario, les périodes 1950-1966, 1989-1997, 2008-2021 sont relativement calmes.

Les diachronies en plan sont réalisées sur les tronçons les plus larges et les plus mobiles. Elles concernent les tronçons M2, M4, M5, M6, M7, FJ1, FJ2, FJ3, RJ1, RB1 et BS2).

Les secteurs en gorges ou très encaissés (M1, M3, FJ4, RJ2) n'ont pas été analysés car leur bande active est beaucoup plus stable ou ses évolutions sont limitées.

Sur le tronçon BS1 (Bras Sec en amont de la ravine actuellement active), la bande active s'est fortement rétractée depuis 1950. Toutefois, nous n'avons pas cartographié l'évolution de la bande active au fil du temps car l'ombre du versant masque une large partie de la bande active en amont du tronçon. De plus, en amont du tronçon la bande active récente est parfois difficile à identifier à travers la végétation. Une analyse de la diachronie de ce tronçon est malgré tout présentée dans la partie diachronie du Bras Sec.

Des planches cartographiques ont été réalisées pour chacun des secteurs sur les années suivantes :

- 1950 – 1961 – 1966
- 1973 – 1978 – 1984
- 1989 – 1997 – 2003
- 2011 – 2017 – 2021
- 1950 – 1984 – 2021

Ces planches sont présentées dans l'atlas cartographique que l'étude.



2.4.3.1.1 Ravine Roche à Jacquot

Le tronçon étudié, d'une longueur de 1100 m commence au niveau du pont de la Ravine Roche à Jacquot jusqu'à la cascade Micheline. Sur la période 1950-2021, l'évènement majeur est la disparition de l'éperon rocheux qui formait un méandre vers le nord. Celui-ci a reculé de 75 m entre 1978 et 1984 (cyclone Hyacinthe en 1980), puis 25 m entre 1984 et 1989 pour obtenir le tracé actuel du cours d'eau.



Figure 25 : Erosion de l'éperon rocheux sur la Ravine Roche à Jacquot entre 1978 et 1989

Le cyclone Hyacinthe a causé à l'apparition des ravines Nourry et de l'Eglise en rive droite de la Ravine Roche à Jacquot (recul de respectivement 150 m et 470 m du fond de la ravine).



Figure 26 : Création de la ravine Nourry suite au cyclone Hyacinthe (1980), recul de 150 m



Figure 27 : Création de la ravine de l'Eglise suite au cyclone Hyacinthe (1980), recul de 470 m

Mis à part lors du cyclone Hyacinthe, la ravine Roche à Jacquot a globalement gardé sa trajectoire, seule sa largeur évolue au gré des crues (notamment 1989 et 2008). Ce tronçon est de taille modeste mais la surface de la bande active peut doubler voire tripler après une crue.

En 1950, la largeur de la bande active est de l'ordre de 50 m contre 15 m en moyenne en 2021.

Malgré les intenses précipitations du cyclone Hyacinthe en 1980, la surface de la bande active a diminué puisque le cours d'eau a court-circuité le trajet d'origine.



En 1989, suite à Firinga, une confluence se crée avec la Ravine Blanche 60 m en amont de la cascade Micheline alors que les deux ravines confluent historiquement après la cascade. La surface de la bande active triple.



Figure 28 : En 1989, la confluence avec la Ravine Blanche se fait 60m en amont de la cascade Micheline

En 2006 puis 2007, deux cyclones importants se succèdent : Diwa puis Gamède. La bande active de la Ravine Roche à Jacquot se réactive de façon significative. Depuis 2007, la bande active se rétracte. En effet, les cyclones ayant impacté l'île depuis 2006 sont de moindre importance et ont entraîné des débits plus faibles sur le bassin.

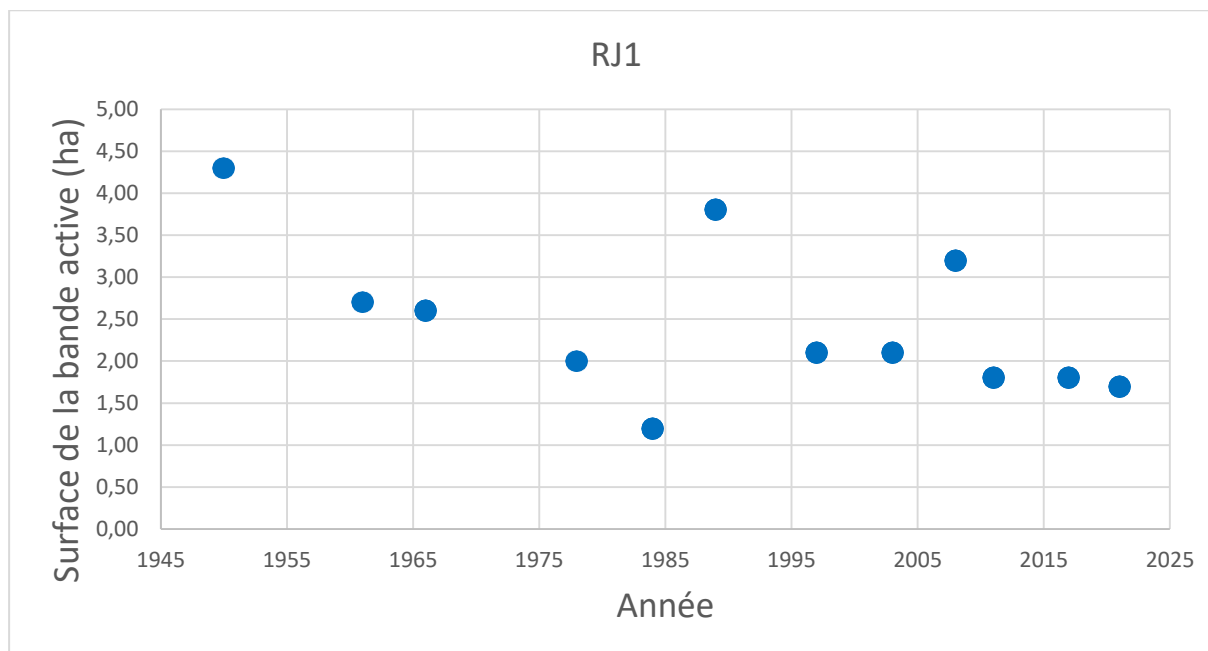


Figure 29 : Surface de la bande active entre 1950 et 2021 de la Ravine Roche à Jacquot (RJ1)

2.4.3.1.2 Ravine Blanche (RB1)

La Ravine Blanche est un affluent de la Ravine Roche à Jacquot, pouvant être très actif lors d'une crue. Toute la rive gauche est concernée par des glissements de terrain.

Le tronçon étudié commence 600 m en amont de la cascade Micheline et termine par cette même cascade.

Tout comme la Ravine Roche à Jacquot, la bande active de la Ravine Blanche peut doubler en surface lors d'événements majeurs (Firinga (1989) et Gamède/Diwa (2006/2007)).

Depuis 1950, la Ravine Blanche semble s'orienter vers le nord-est. Elle évolue en pied de glissement en rive gauche.

En 1989, le cyclone Firinga fait doubler la surface de la bande active par rapport à 1984.

Les cyclones Dina (2003), Gamède (2006) et Diwa (2007) ont largement augmenté la bande active de la Ravine Blanche. Suite à la combinaison de Gamède et Diwa, une ravine s'est créée en rive gauche avec un recul de 150 m de l'îlet (cf. image ci-dessous)

De plus, toujours suite à ces deux cyclones, la ravine qui était historiquement subrectiligne, a adopté un tracé plus sinueux. Cela peut s'expliquer par les apports massifs en provenance des glissements de versant de rive gauche. Ces apports ont ainsi contribué à diminuer localement la pente du lit. La ravine s'est ainsi créée un tracé plus sinueux en s'encaissant dans ces nouveaux matériaux. La bande active s'est ensuite rétractée par végétalisation en conservant ce tracé. Lors de futures crues, la ravine pourrait toutefois retrouver un tracé plus rectiligne en recoupant ses méandres, comme ce fut le cas en 1980 sur la Ravine Roche à Jacquot.



Figure 30 : Glissements de terrain en rive gauche de la Ravine Blanche sur 150m entre 2003 et 2008

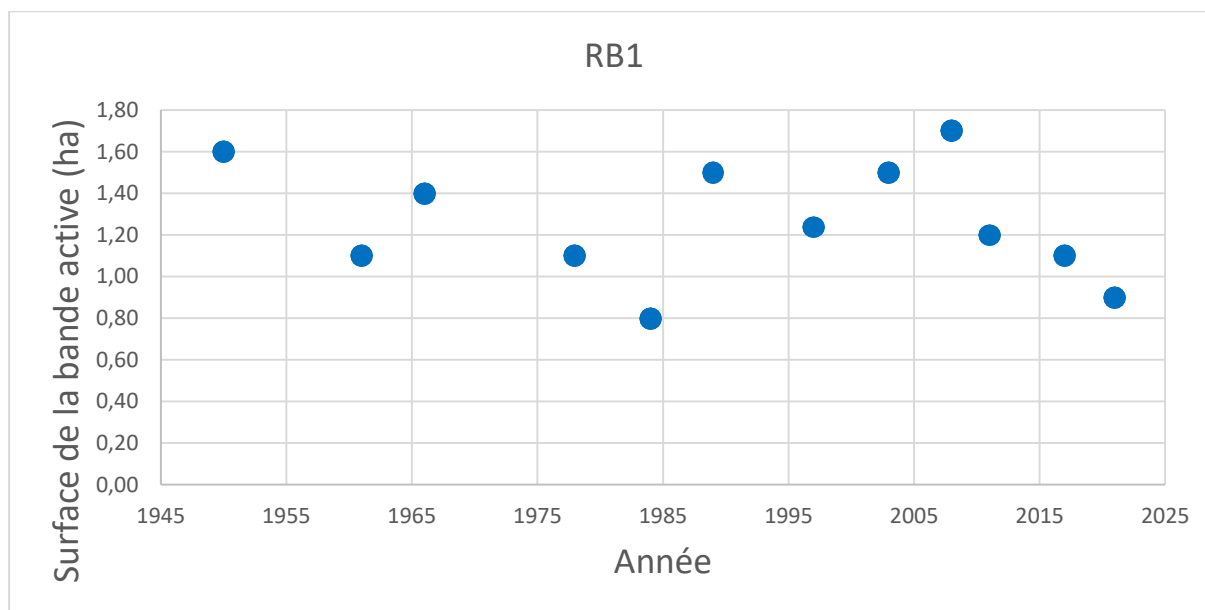


Figure 31 : Surface de la bande active entre 1950 et 2021 de la Ravine Blanche (RB1)

2.4.3.1.3 Rivière des Fleurs Jaunes (FJ1, FJ2 et FJ3)

La rivière des Fleurs Jaunes est un affluent de la Rivière du Mât. Le tronçon étudié par l'analyse diachronique concerne un linéaire de 6 km du pied de l'îlet Camp Pierrot jusqu'à 1700 m en aval de la confluence avec la Ravine Roche à Jacquot. Ce secteur concerne les tronçons FJ1, FJ2 et FJ3.

La partie amont (tronçon FJ1) est très sensible aux glissements que ce soit en rive gauche ou rive droite de telle sorte que le cours d'eau s'écoule sur les matériaux issus des versants. La quasi-totalité des versants du tronçon est marquée par des phénomènes de ravinement ou glissements anciens ou récents (végétalisés/non végétalisés). L'encaissement du cours d'eau induit une bande active généralement assez réduite. Toutefois après des événements violents ou successifs, cette bande active peut atteindre localement une centaine de mètres. Cela s'explique par des apports massifs des versants qui entraînent un exhaussement et un élargissement de la bande active.

Sur l'orthophoto 2008, un glissement de 40 000 m² apporte une quantité considérable de matériaux au tronçon FJ1.

Ce même tronçon a fortement été affecté par les pluies de début avril 2022. Il en résulte un glissement de terrain massif (4 hectares) en rive gauche, d'autres glissements plus localisés et un élargissement de la bande active au pied et en aval du glissement principal. Une zone de tressage s'est d'ailleurs formée en aval du fait de l'abondance de la charge solide (cf. Figure 33). Ce tressage devrait progressivement se déstocker lors des crues courantes et/ou se végétaliser si aucun événement majeur ne vient réactiver l'intégralité de la bande active actuelle.



Figure 32 : Effondrement de la rive droite au niveau du tronçon FJ1 suite aux cyclones Diwa et Gamède (2006 et 2007)



Figure 33 : Glissement et érosions importantes sur le tronçon FJ1 lors des pluies d'avril 2022, lit mineur en rive gauche

La partie intermédiaire (tronçon FJ2) est moins encaissée et constitue une zone de dépôt et d'élargissement de la bande active lors de crues majeures.

La bande active a considérablement réduit depuis 1950. En 1950 la bande active est comprise entre 80 et 150 m de largeur, contre 15 à 50 m en 2021. La surface de la bande active a été divisée par 2 en 70 ans.

En 1950 le passage du cyclone de 1948 est très visible, le lit est très large et les surfaces végétalisées sont totalement absentes.

En 1984, les effets du cyclone Hyacinthe (1980) sont encore bien présents, le pont de la D48 a été détruit. Il est reconstruit 40 m en amont.

De 1989 à 2003 la bande active se réduit de 30% en prend sa forme actuelle. Dès 1989, un glissement de terrain provenant du Piton d'Anchain apparaît en rive droite et atteint le lit mineur. Ce glissement empire en 2003, il sera ensuite exploité jusqu'en 2012 (cf. Figure 35).



En 2006-2007 les passages successifs de Diwa et Gamède emportent toutes les surfaces végétalisées réactivant ainsi la bande active.

La situation est stable depuis 2008, la bande active se rétrécit lentement. Sur tout le tronçon FJ2, le lit du cours d'eau semble s'encaisser dans ses alluvions. Au droit du pont de la D48, le lit s'est encaissé jusqu'à se stabiliser sur une couche de basalte (probablement un sill, une intrusion magmatique subhorizontale).

Ces phénomènes d'incision (encaissement récent du lit et rétraction de la bande active) semblent assez constants depuis 1980, bien que les cyclones de 1989 puis de 2006-2007 aient réussi à réactiver la bande active. Il semblerait que seul un évènement exceptionnel similaire au cyclone de 1948 ou à Hyacinthe (1980) puissent réactiver totalement la bande active sur FJ2.

La partie intermédiaire aval (tronçon FJ3) est bien plus encaissée, le lit prend tout l'espace disponible, la rivière évolue sur une largeur de 50 m entre des gorges peu soumises à l'érosion. Depuis 1950 la bande active est inchangée, mis à part au niveau de la confluence avec la Ravine Roche à Jacquot où la largeur atteint 150 m en 1984 contre 50 m en 2017. Entre 2003 et 2008, un glissement de terrain de 17 000 m² apparaît, faisant dévier le cours d'eau en rive droite. Ce glissement provient d'un îlet surplombant de 150 m le cours d'eau en rive gauche.



Figure 34 : Glissement de terrain sur la Rivière des Fleurs Jaunes (tronçon FJ3)

Le tronçon aval FJ4 n'a pas évolué de façon significative puisque ce tronçon est très encaissé et contraint (style en gorges).

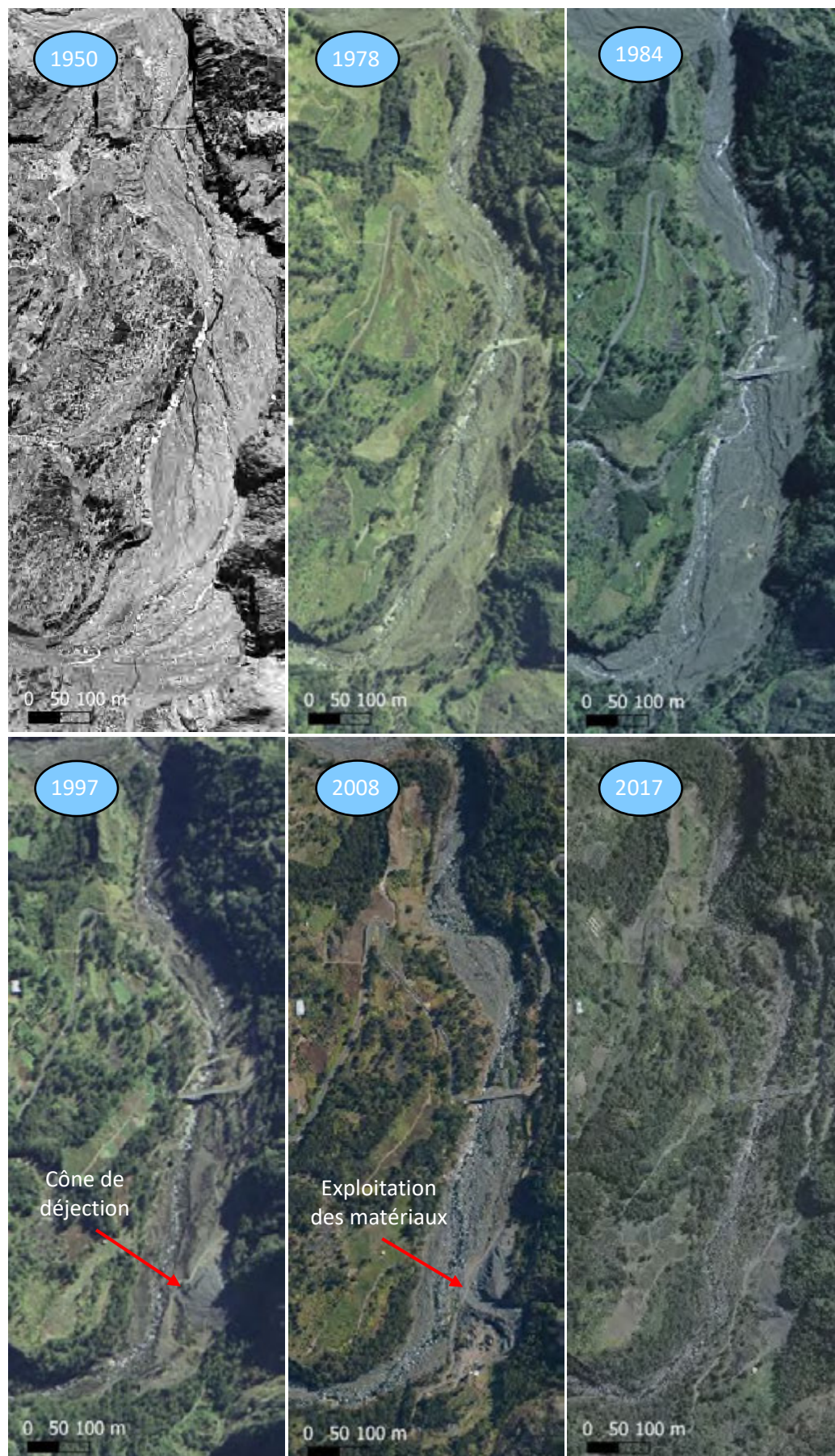


Figure 35 : Evolution de la bande active sur la rivière des Fleurs Jaunes (tronçon FJ2) entre 1950 et 2017

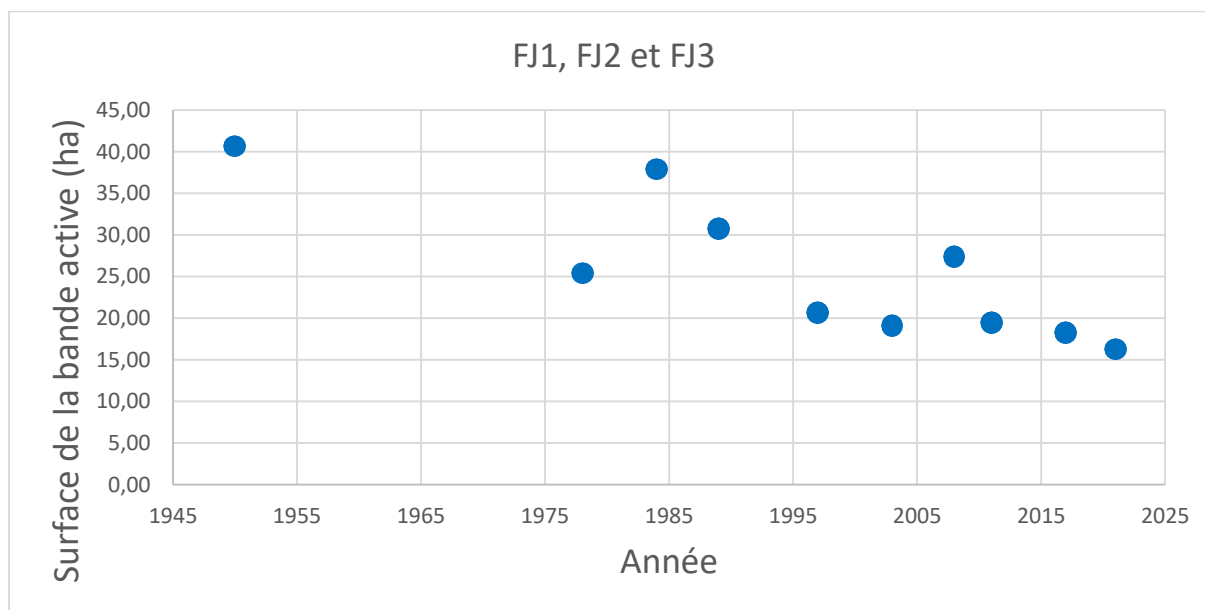


Figure 36 : Surface de la bande active entre 1950 et 2021 de la Rivière des Fleurs Jaunes (FJ1, FJ2 et FJ3)

2.4.3.1.4 Bras Sec

Le Bras Sec est un affluent de la Rivière du Mât, le tronçon étudié mesure 3 km de linéaire.

Cet affluent présente deux morphologies distinctes, un lit étroit et encaissé sur les deux premiers kilomètres (tronçon BS1), puis un lit plus large sur le dernier kilomètre (tronçon BS2) à partir de la confluence avec une ravine en rive gauche et jusqu'à la confluence avec la Rivière du Mât.

Contrairement à l'aval de Bras Sec (BS2), l'analyse diachronique de BS1 ne permet pas de mettre en évidence de façon claire les évolutions du tracé et de la surface de la bande active (ombre portée des versants sur les orthophotographies, végétalisation importante pouvant masquer le lit).

Actuellement, la partie amont de Bras Sec (BS1) est complètement végétalisée, la largeur du lit évolue entre 10 et 30 m.

Depuis 1950, la bande active s'est rétractée. Elle ne semble pas avoir retrouvé de largeur proche de 1950, même à la suite du cyclone Hyacinthe en 1980. En 2008 à la suite des cyclones Diwa et Gamède, seules quelques zones d'ouvertures étaient visibles, principalement en aval du tronçon.

Ce tronçon reste malgré tout encadré de versants instables et sensibles à l'érosion. En 2006-2007, un glissement et quelques ravines s'étaient réactivés sur le Bras Sec au nord-ouest d'Hell-Bourg au-dessus du cimetière. Ces phénomènes avaient permis l'élargissement de la bande active sur la partie aval du tronçon BS1. Un événement extrême type « 1948 » pourrait donc former ou réactiver des ravines et/ou des glissements majeurs, ce qui pourrait entraîner un élargissement de la bande active plus important qu'en 1980 ou 2006-2007.

La réactivation de glissements ou ravine en rive droite pourrait également menacer le village de Hell Bourg car plusieurs bâtiments ou habitations sont situées à proximité d'anciens glissements ou ravines.

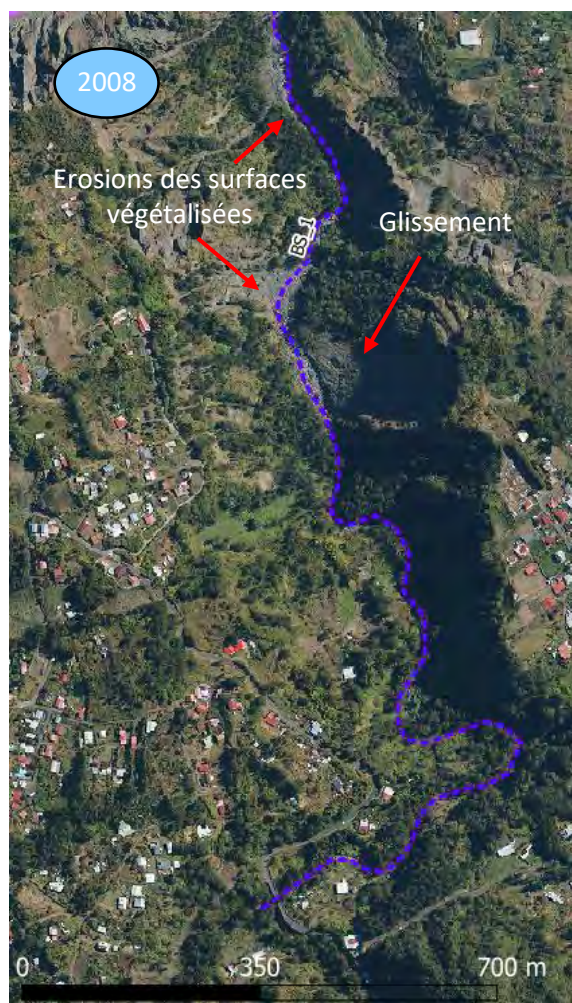


Figure 37 : Elargissement la bande active de Bras Sec en 2008, les impacts sont cependant très localisés, la moitié amont est inchangée

Depuis 1950, les évolutions majeures de la bande active se concentrent à partir de la confluence avec la ravine en rive gauche (début de BS2).



Figure 38 : Bande active de Bras Sec en 2008, l'amont (BS1) est peu affecté contrairement à l'aval (BS2)

A partir de ce secteur, la morphologie du Bras Sec est particulièrement influencée par les phénomènes de ravinement, de glissements de terrain et de laves torrentielles provenant des versants.

Depuis 1950, la bande active de BS2 est régulièrement réactivée par les phénomènes de crues qui érodent totalement les surfaces végétalisées et élargissant ainsi fortement la bande active. C'est le cas sur les photos de 1950, 1984, 1989, 2003 et 2008. Ces années-là, la largeur de la bande active atteint 100m contre 20 à 50 m en période d'intercrues (1978, 1997, 2011, 2017, 2021).

En 1980, lors du cyclone Hyacinthe, un des ravines de rive gauche recule fortement (phénomène de débris-flow), elle constitue le tronçon dénommé RAV1. Cette coulée de débris a presque séparé l'îlet à Vidot en deux morceaux (recul de 120 m du bord de l'îlet sur les 180 m d'origine). Cette séparation est totale en 1997 même si une piste est créée pour accéder au nord de l'îlet. Les matériaux apportés par le recul de la ravine ont permis à la bande active de BS2 de s'élargir et même de dépasser la surface qu'elle occupait en 1950.



Figure 39 : Recul de 120m d'îlet à Vidot lors du cyclone Hyacinthe (1980)

Depuis 2008, en l'absence de crue et cyclone majeur, la bande active de BS2 s'est réduite, les surfaces végétalisées sont importantes. Un pavage est également visible en lit (imbrication de matériaux plurimétrique fixant le fond du lit) et fixe probablement la cote du fond du lit de façon temporaire (cf. Partie pavage 2.5.5.1).

La saison cyclonique 2022 a réouvert partiellement la bande active de BS2, notamment la moitié amont. D'après les images Sentinel Hub, en janvier 2022 la bande active était plus étroite qu'en 2017. En juillet 2022, la bande active avait retrouvé une surface assez similaire à 2017.

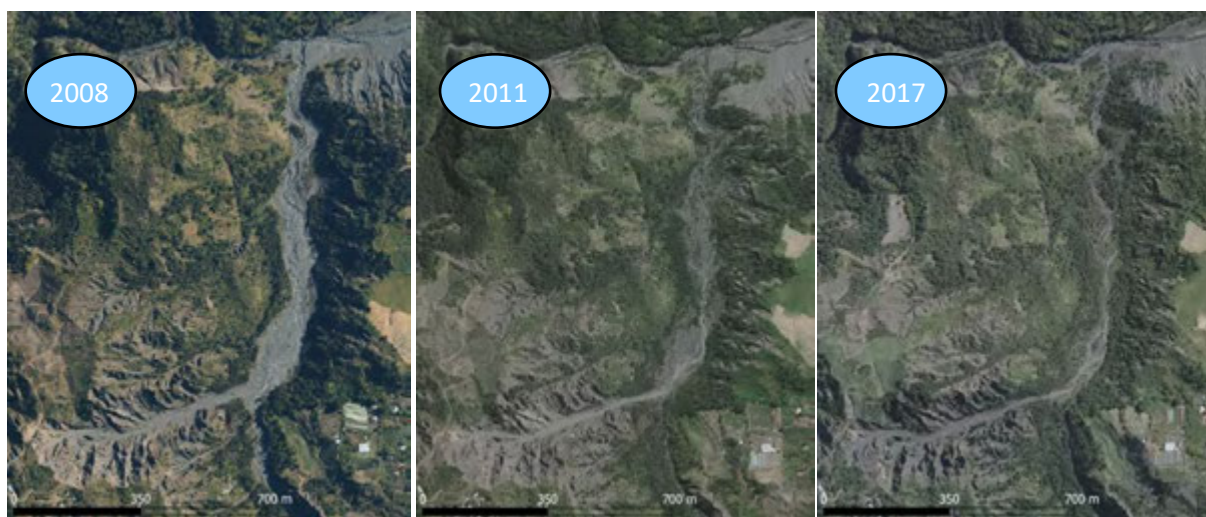


Figure 40 : Réduction de la surface de la bande active de Bras Sec depuis 2008

La surface de la bande active est ainsi très soumise aux crues, elle alterne entre 3 et 10 hectares de façon cyclique. Les crues de 2006-2007 ont permis de restaurer un bande active similaire à 1950 et proche de celle post-Hyacinthe.

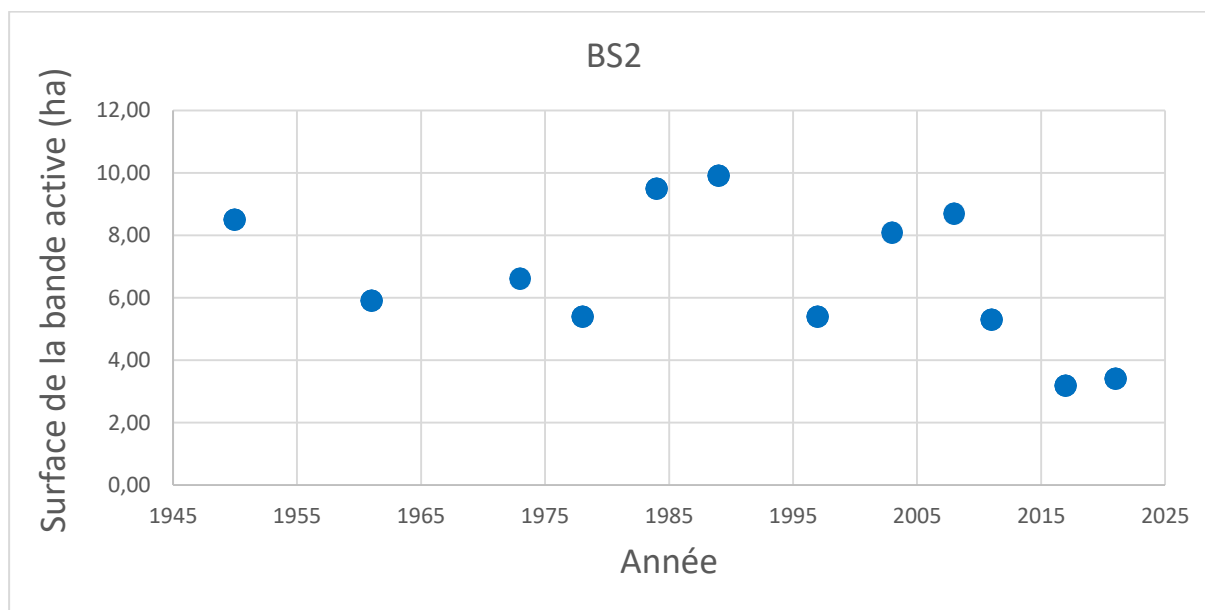


Figure 41 : Surface de la bande active entre 1950 et 2021 de la partie avale Bras Sec (BS2)

2.4.3.1.5 Rivière du Mât amont (M2)

La Rivière du Mât est le principal cours d'eau du cirque de Salazie. Le tronçon amont M1, encaissé dans des gorges présente une bande active relativement stable, bien qu'il y ait quelques zones de glissements de versants.

A partir de la confluence avec le Bras Sec, la Rivière du Mât (tronçon M2) s'élargit sur un linéaire de 1700 m jusqu'au pont de la Savane où le cours d'eau retrouve des gorges. La bande active présente une largeur de 100 à 150 m et un style fluvial multichenalisé en tresses. Cette morphologie est liée à deux éléments :



- Une baisse locale de la pente du cours d'eau qui favorise le dépôt de matériaux ;
- Une fourniture sédimentaire supérieure à la capacité de charriage et soutenue par les apports du Bras Sec et des versants, notamment le glissement d'Hell Bourg en rive droite.

Ce tronçon constitue ainsi une zone de stockage intermédiaire des sédiments sur le bassin ainsi qu'une zone de recharge sédimentaire (apports du Bras Sec et des versants).

Depuis 1950, la surface de la bande active reste relativement stable même lors des intercrues longues. Elle semble se réactiver relativement facilement.

Depuis 2006-2007, le bassin connaît une période de calme hydrologique et cyclonique, ce qui explique la rétraction des bandes actives. Sur M2, cette rétraction s'accompagne d'un encaissement dans les alluvions récentes mais la bande active reste large et multichenalisée (cf. Diachronie verticale). Récemment, la bande active en partie aval du tronçon M2 semble avoir tendance à se déplacer vers la rive gauche en érodant les versants déjà fragilisés.

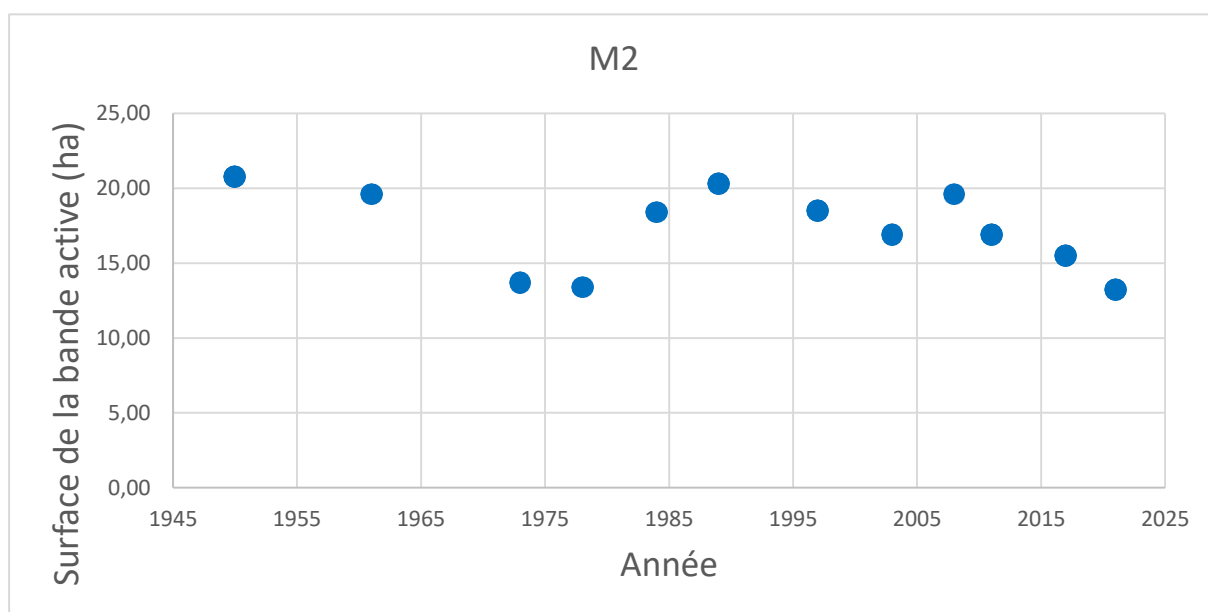


Figure 42 : Surface de la bande active entre 1950 et 2021 de la Rivière du Mât (M2)

2.4.3.1.6 Rivière du Mât intermédiaire (M4 et M5)

En amont, les glissements de terrain sont les phénomènes majeurs influençant la bande active. A partir de la confluence avec la Rivière des Fleurs Jaunes, ils sont remplacés par les érosions de berges. En effet, à partir de l'Ilet Morin la rivière du Mât s'écoule dans des gorges moins profondes puis dans ses alluvions anciennes et récentes.

Les tronçons étudiés dans cette partie concernent un linéaire de 10,5 km, il commence à Ilet Morin et se termine au barrage-seuil de Bengalis.

D'un point de vue général ce secteur peut paraître stable mais localement les érosions de berges peuvent être conséquentes et la bande active peut avoir évolué de manière significative.

D'amont en aval les évolutions principales sont les suivantes :

- 300 m en amont du pont de l'Escalier, la berge en rive gauche a reculé de 30 m depuis 1950 ;



Figure 43 : Recul de 30 m de la berge entre 1950 (rouge) et 2021 (bleu) en amont du pont de l'Escalier

- L'amont de l'îlet Payet a été érodé sur environ 250 m de long et 60 m de large depuis 1950 ;
- Abandon d'un chenal creusé dans la terrasse alluviale d'îlet Payet, située au pied de Cap Argile dès 1961.
- Entre 1950 et 2008, migration du méandre en amont de Bras Citronnier d'environ 80 m, l'extrados du méandre s'est végétalisé depuis 2008.



Figure 44 : Recul de 85 m de la berge entre 1950 (rouge), 2008 (vert) et 2017 (bleu) au niveau de Bras Citronnier

- 700 m en aval de Bras citronnier, la bande active est passée de multichenalisée à méandrique. Un large dépôt d'intrados s'est formé puis végétalisé progressivement depuis 1973. Un bras secondaire recoupe toujours l'arrière du méandre (cf. Figure 45). La terrasse en rive droite s'est quant à elle érodée jusqu'au versant.



Figure 45 : Evolution de la bande active en aval de Bras Citronnier

Après le méandre de Bras Citronnier et jusqu'en amont du barrage-seuil, la bande active est inchangée depuis 1950 sur 1800 m de linéaire. La rivière du Mât a un tracé très rectiligne orienté vers le nord-est.

Le barrage construit en 1975 impacte le cours d'eau en modifiant la pente en amont ce qui y favorise les dépôts. Les évolutions en amont restent toutefois limitées. Le barrage a également accéléré les phénomènes d'incision présents dans le secteur aval en provoquant un déficit sédimentaire temporaire, le temps que sa retenue se comble de matériaux, ce qui fût relativement rapide. Les phénomènes d'incision étaient toutefois déjà présents avant la construction du barrage (cf. partie perturbateurs 2.4.2.3 p.35, source : BRLi, 2018).

En aval du barrage, les alluvions qui recouvraient la Rivière du Mât ont ainsi progressivement été évacuées mettant à nu le substratum (coulée basaltiques ou coulées de boues indurées). En rive droite et en aval direct du barrage, une zone d'atterrissement visible en 1973 se végétalise progressivement, elle forme aujourd'hui une terrasse difficilement remobilisable.

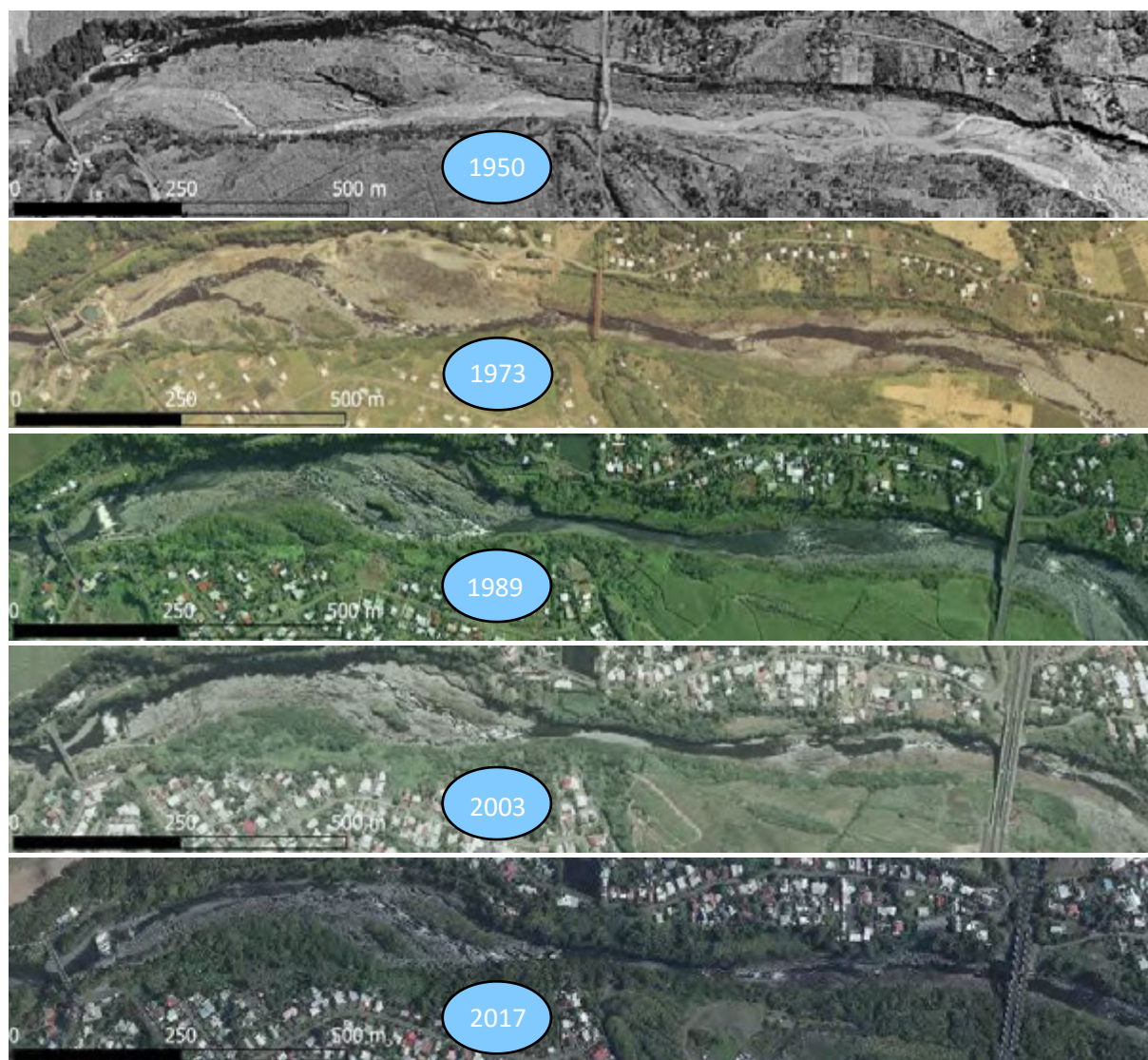


Figure 46 : Evolution de la Rivière du Mât en aval du barrage

Le secteur entre l'amont de Bengalis et le pont de la RN2 est le seul secteur sur lequel nous disposons de données antérieures à 1950. Il s'agit d'un plan et de 3 profils en travers datant de 1820. On voit que la bande active semblait encaissée mais encore multichenalisée en amont du pont de l'actuelle RD48. Un profil en travers est présent au droit de ce pont. Il indique une bande active d'environ 30 m de large, ce qui correspond à la largeur actuelle de la bande active dans ce secteur qui est contraint par des formations basaltiques. On devine ensuite l'affleurement de la coulée basaltique en lit en aval de l'actuel barrage. Le dessin laisse penser qu'elle affleurerait un peu plus qu'en 1950 mais la bande active reste large. Enfin, en aval de la coulée basaltique, deux autres profils en travers indiquent que la bande active est comprise entre 40 et 45 m. Le fil d'eau était situé environ 6.5 m sous le niveau du bord de la terrasse de rive gauche. Aujourd'hui la bande active mesure environ 24 m de large et le fil d'eau est situé à 85.3 m NGR, soit 17 m sous le niveau du bord de la terrasse de rive gauche. Le niveau du lit dans ce secteur semblait ainsi assez proche du niveau du 1978.

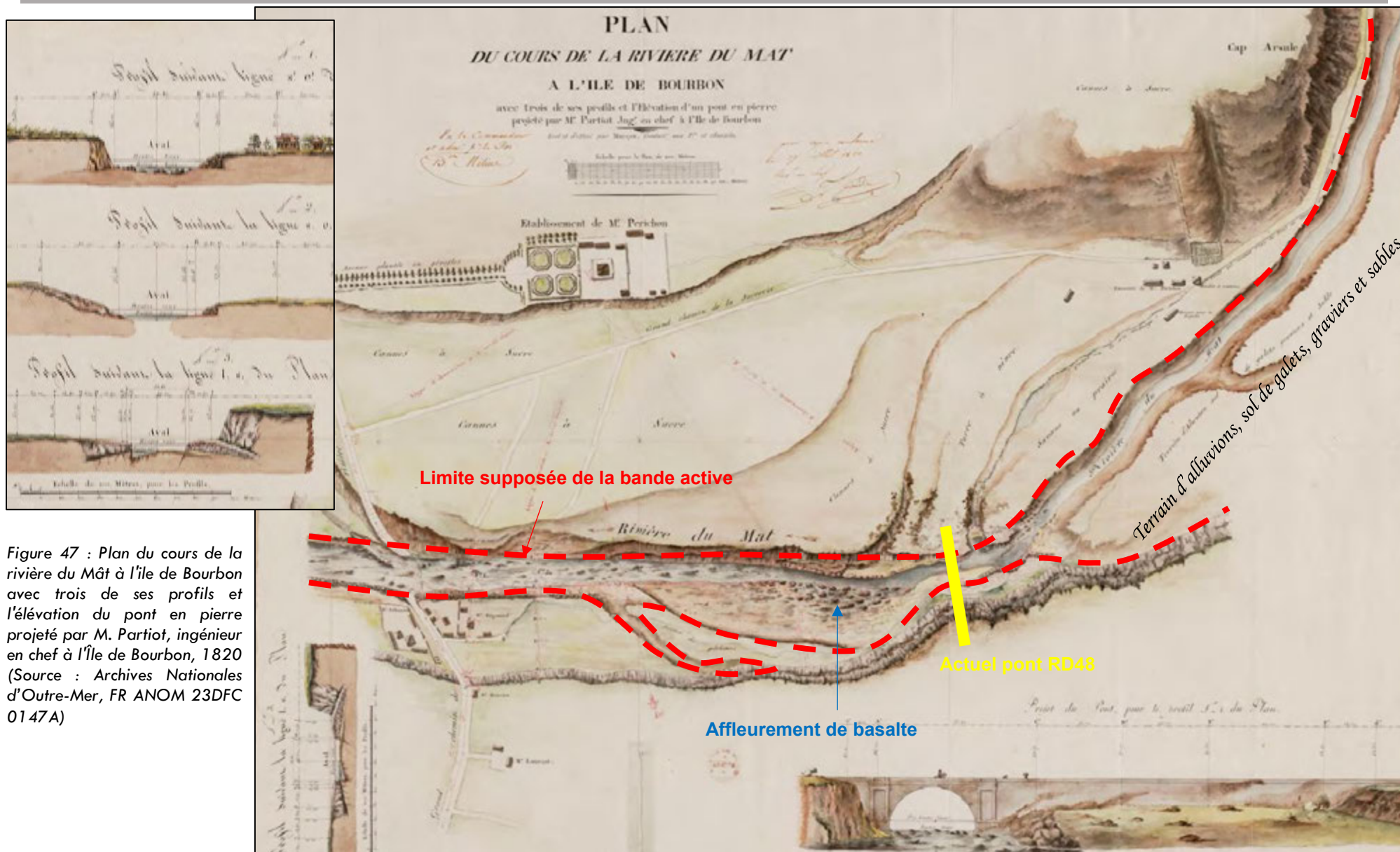


Figure 47 : Plan du cours de la rivière du Mât à l'île de Bourbon avec trois de ses profils et l'élévation du pont en pierre projeté par M. Partiot, ingénieur en chef à l'île de Bourbon, 1820 (Source : Archives Nationales d'Outre-Mer, FR ANOM 23DFC 0147A)



Au droit de l'actuel pont de la RN2, la bande active s'est réduite et les écoulements se sont concentrés dans un chenal très étroit. Les alluvions qui recouvraient le fond de la Rivière du Mât à ce niveau ont laissé place à des laves torrentielles indurées (substratum) dans lesquelles se trouve le chenal d'écoulement actuel.



Figure 48 : La Rivière du Mât s'écoule dans un chenal étroit creusé dans des coulées de boues indurées, photo prise au niveau du pont RN2

Depuis 1950 la bande active des tronçons M4 et M5 diminue de façon constante. Cette évolution est cohérente avec l'incision observée sur le tronçon M5 et semble indiquer un déficit sédimentaire durable sur ces tronçons.

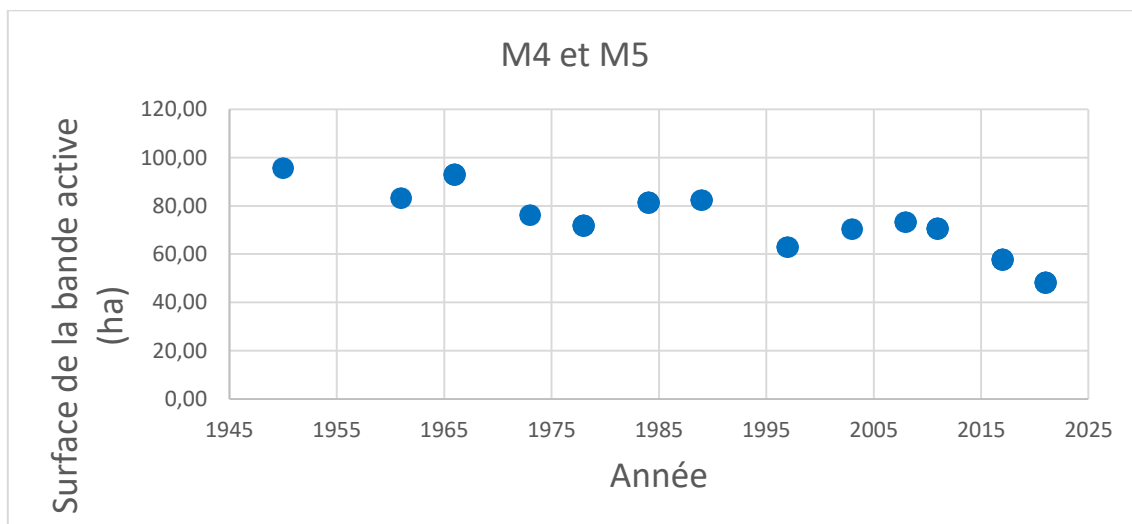


Figure 49 : Surface de la bande active entre 1950 et 2021 de la Rivière du Mât intermédiaire (M4 et M5)



2.4.3.1.7 Rivière du Mât aval (M6 et M7)

L'aval de la Rivière du Mât est caractérisé par une zone de méandres suivie d'un cône alluvial. Ce tronçon est totalement recouvert d'alluvions.

Le cône alluvial s'est considérablement réduit depuis 1950. La largeur de la bande active est passée de 600 à 100 m en moyenne et sa pointe amont (apex) s'est déplacée vers l'aval.

Les érosions de berges sont localisées dans les extrados de méandre (berges concaves) de Paniandy et du centre d'enfouissement. De 1997 à 2008 la rive droite a reculé par érosion de 150 m et la rive gauche du centre d'enfouissement de 50 m. Il n'y a pas eu d'évolutions depuis 2008.

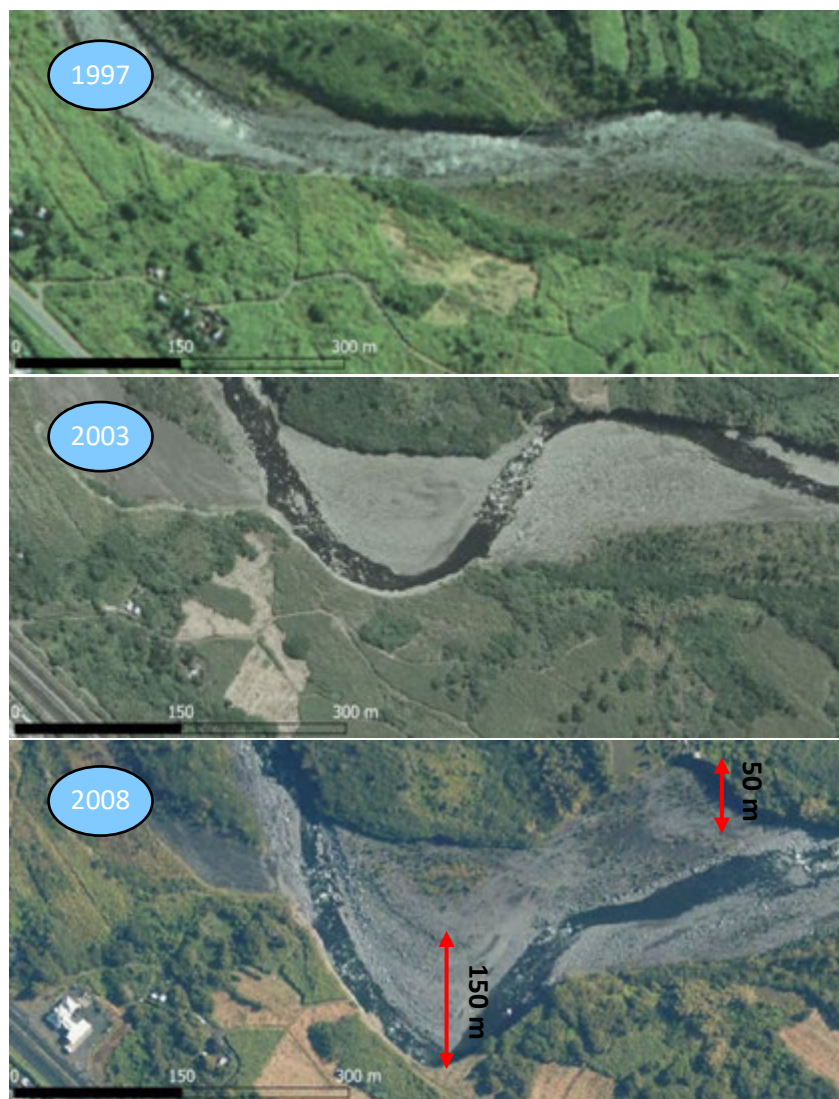


Figure 50 : Erosions de berges de la Rivière du Mât aval

De la même façon la rive gauche s'est érodée 60 m entre 1997 et 2021.



Figure 51 : Recul de 60 m de la rive gauche entre 1997 (bleu) et 2021 (orange)

Entre 1950 et aujourd'hui, le cône alluvial s'est rétréci et son apex s'est décalé de 1800 m vers l'aval. L'ancienne partie amont s'est monochenalisée et a adopté un style à méandres. Par rapport à 1950, le cône alluvial est beaucoup plus végétalisé, il présente également moins de chenaux et une bande active plus étroite.

A noter que la carrière Holcim située en rive droite du cône actuel est située entre deux anciens bras du cône de 1950. Elle est aujourd'hui protégée par des enrochements en rive droite.

La surface de la bande active de la Rivière du Mât sur les tronçons M6-M7 a diminué de 75% depuis 1950.

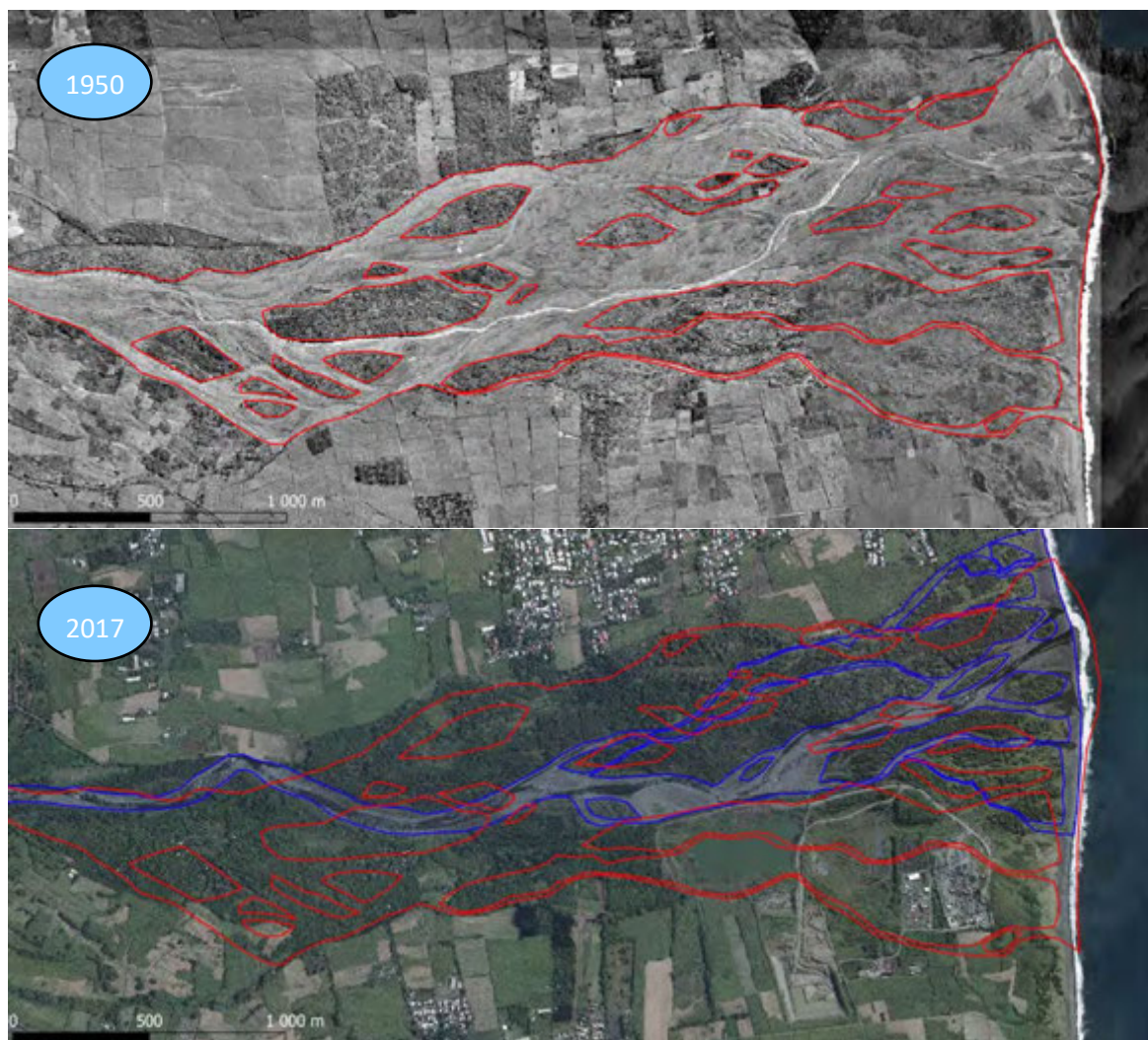


Figure 52 : Evolution de la bande active du cône alluvial (M7) de 1950 (rouge) à 2017 (bleu), le cône alluvial est décalé vers l'aval, sa surface a largement réduit.

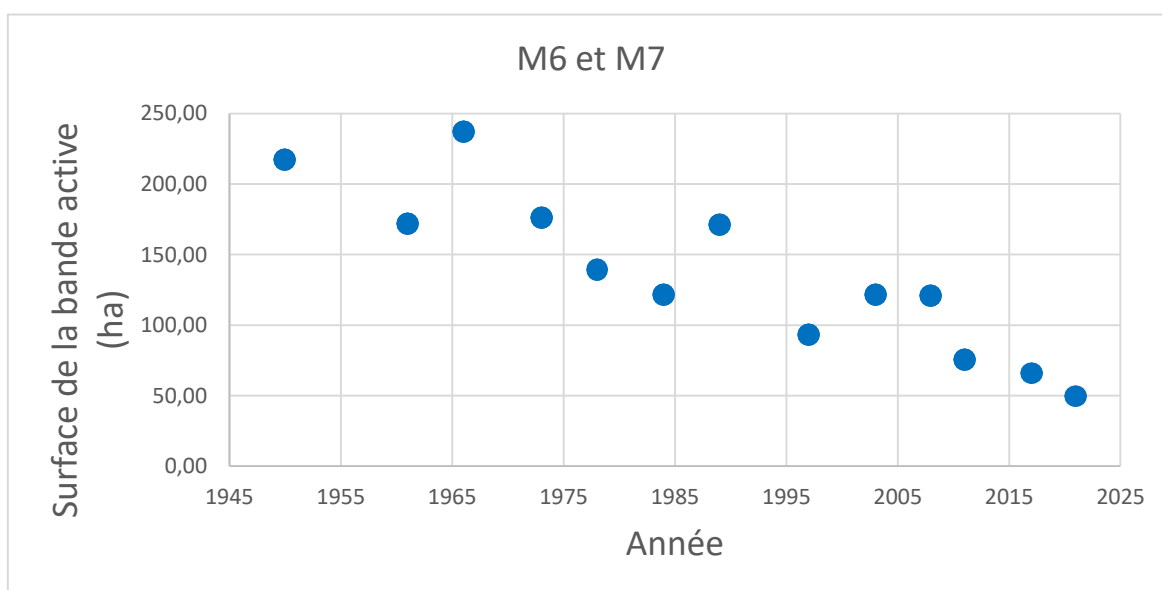


Figure 53 : Surface de la bande active entre 1950 et 2021 de la Rivière du Mât (M6 et M7)

2.4.3.1.8 Evolution du trait de côte

Entre 1950 et 2021, le trait de côte du cône alluvial a reculé de façon significative. Au maximum, le recul du trait est de 75 m.

A la suite du cyclone Hyacinthe, le trait de côte a légèrement reculé, notamment sur la moitié de rive gauche (cf. illustration ci-dessous). A cette période des extractions importantes ont lieu dans le lit mineur du cône alluvial. Ainsi, même si des apports sédimentaires importants ont pu avoir lieu, ils n'ont peut-être pas suffi à inverser la tendance.

Entre 2002 et 2010, le cône alluvial recule en rive gauche mais progresse au droit de la carrière Holcim. En effet, lors de la crue de 2006, la digue de la carrière Holcim a rompu et la Rivière du Mât a traversé l'exploitation, rejoignant alors l'océan côté rive droite. C'est ce secteur qui s'est aggradé d'environ 40 m grâce aux apports de la rivière.

Entre 2010 et 2021, le trait de côte est assez stable au droit des chenaux actifs. Un légère progression est même visible au niveau du chenal principal. Par contre, en rive droite, le secteur qui s'était aggradé entre 2002 et 2010 a reculé d'une vingtaine de mètres. Ce secteur ne reçoit plus de matériaux directement lors des crues car la digue a été remise en place.



Figure 54 : Evolution du trait de côte entre 1950 et 2021



Figure 55 : Zoom sur l'évolution du trait de côte suite à Hyacinthe



Conclusion : diachronie en plan

De manière générale, la **surface des bandes active varie fortement entre période post-crue et période d'intercrue**. Ainsi, sur la plupart des tronçons les bandes actives sont larges et actifs après les cyclones de 1948, 1980 et 2006-2007. Entre ces périodes, les bandes actives se rétractent progressivement par végétalisation.

A l'échelle du bassin l'**évolution** des bandes actives depuis 1950 est **différente dans le cœur du cirque et sur la partie aval du bassin**.

En amont, les bandes actives se sont **fortement réactivées lors des événements de 1980 et 2006-2007**. Sur certains tronçons, les surfaces réactivées en 1980 ou 2006-2007 sont parfois même supérieures à la bande active de 1950. L'élargissement important des bandes actives lors de ces crues extrêmes est notamment permis par **la morphologie et la géologie du cirque**. En effet, dans le cirque, les reliefs sont abrupts et des formations bréchiques facilement érodables affleurent dans de nombreux secteurs. Lors d'événements extrêmes, **les versants peuvent donc fournir aux cours d'eau des volumes très importants de matériaux** entraînant alors un élargissement des bandes actives. C'est ce type de phénomène qui s'est produit localement sur le tronçon FJ1 au printemps 2022 (glissement de versant de 4ha et apparition d'une zone de tressage en aval).

En aval (M4 à M7), la surface des bandes actives est en **diminution constante depuis 1950**. Les cyclones de 1980 et 2006-2007 n'ont pas recréés de bande active aussi larges qu'en 1950. Il y a plusieurs causes à cette évolution :

- (1) La Rivière du Mât s'écoule à distance des versants qui sont en plus composés de basalte, la production sédimentaire des versants est donc nulle ;
- (2) Les matériaux produits en amont mettent du temps à transiter jusqu'à l'aval du bassin (capacité de charriage de chaque tronçon limitée)
- (3) La Rivière du Mât érode latéralement ses alluvions anciennes, toutefois, cela ne permet pas au cours d'eau d'élargir significativement sa bande active par rapport à 1950 ;
- (4) Les tronçons aval (M4 à M7) présentent depuis les années 60 une dynamique en incision, les matériaux en lit se déstockent progressivement, la bande active se réduit et s'encaisse devenant ainsi plus difficile à réactiver. La **dynamique en incision** de ces tronçons est développée dans la partie suivante abordant la diachronie verticale.

Sur les tronçons M6 et M7, la **surface active du cône alluvial** de la Rivière du Mât s'est **réduite de 75 % depuis 1950**. A la suite des cyclones de 1980 et 2006-2007, la surface réactivée correspondait respectivement à 80 % de la bande active de 1950 puis 56 %.



2.4.3.2 Verticale

L'analyse diachronique verticale vise à étudier l'évolution verticale du lit du cours d'eau afin d'identifier les secteurs en incision, en stabilité et/ou en exhaussement. Pour se faire plusieurs approches peuvent être mise en place :

- La comparaison de profils en long réalisés à différentes époques ;
- La comparaison de MNT ou de levés LiDAR réalisés à différentes époques (particulièrement intéressante dans les zones multichenalisées et tressantes comme le cône alluvial) ;
- L'analyse des terrasses anciennes dont l'objectif est de dater les terrasses puis de comparer leur altitude à l'altitude actuelle du lit ;
- L'analyse des signaux faibles d'incision (ex : présence d'ouvrages parafouille, ouvrages sous cavés, roche mère affleurante, etc.).

2.4.3.2.1 Ravine Roche à Jacquot

L'étude menée par Artelia sur la Ravine Roche à Jacquot en 2021 met en évidence un profil en long atypique sur ce cours d'eau. 4 secteurs peuvent être définis :

- **Du pont à 150 m en aval**, la pente est de 15%, le cours d'eau est pavé, les apports des versants sont faibles et le lit peu encaissé. Ce tronçon est pavé et semble relativement **stable** (Artelia-ETRM, 2021) ;
- **Sur les 450 m suivants**, la pente atteint 20% (80m de dénivelé) sans que les blocs soient plus gros qu'en amont. Les gros blocs sont isolés et peinent à trouver un appui sur d'autres blocs. Les berges sont constituées de brèches indurées, peu résistantes à long terme. La recharge en gros blocs provenant des berges semble marginale. La combinaison de ces facteurs cause une **forte incision depuis 50 ans**. Artelia-ETRM estime un encaissement du lit de **10 mètres depuis 1990 et 15 à 20 mètres depuis 1980**. La comparaison des données topographiques indique un abaissement de **7 m entre 1999 et 2011** (source : Artelia-ETRM (2021)) ;
- **En amont du barrage la pente se réduit fortement** à 6,4% ce qui favorise les dépôts alluvionnaires. Le barrage et le radier sont d'ailleurs atterris. Ce secteur aménagé correspond à la zone où se trouvait l'éperon détruit par Hyacinthe. Dans ce secteur, **le lit s'est abaissé d'une quinzaine de mètres** depuis cet épisode. La rive droite correspond par ailleurs au front du glissement de grande ampleur de Grand Ilet et le versant présente d'importantes zones de ravinement. Les **travaux réalisés** dans le lit de la Ravine Roche à Jacquot avaient donc **pour objectif de limiter l'incision régressive du fond du lit** et d'éviter les divagations potentielles du cours d'eau vers la rive droite. Depuis la mise en place radier et du barrage, **le lit semble s'être stabilisé**. Cependant, aucune crue majeure n'a eu lieu sur la ravine et **les ouvrages sont déjà fragilisés**. Le secteur pourrait donc se réinciser si les ouvrages venaient à céder.
- **En aval et jusqu'à la cascade Micheline**, la ravine retrouve une allure semblable à l'aval du pont avec un pavage important et un lit peu encaissé. La pente est de 12%. Le **lit est relativement stable depuis des décennies, notamment grâce à la cascade qui constitue un point fixe, au pavage et à la présence d'un substratum rocheux** juste en amont de la cascade.



Les profils en long et leurs évolutions entre 1999 et 2019 sont présentés dans le graphique ci-dessous.

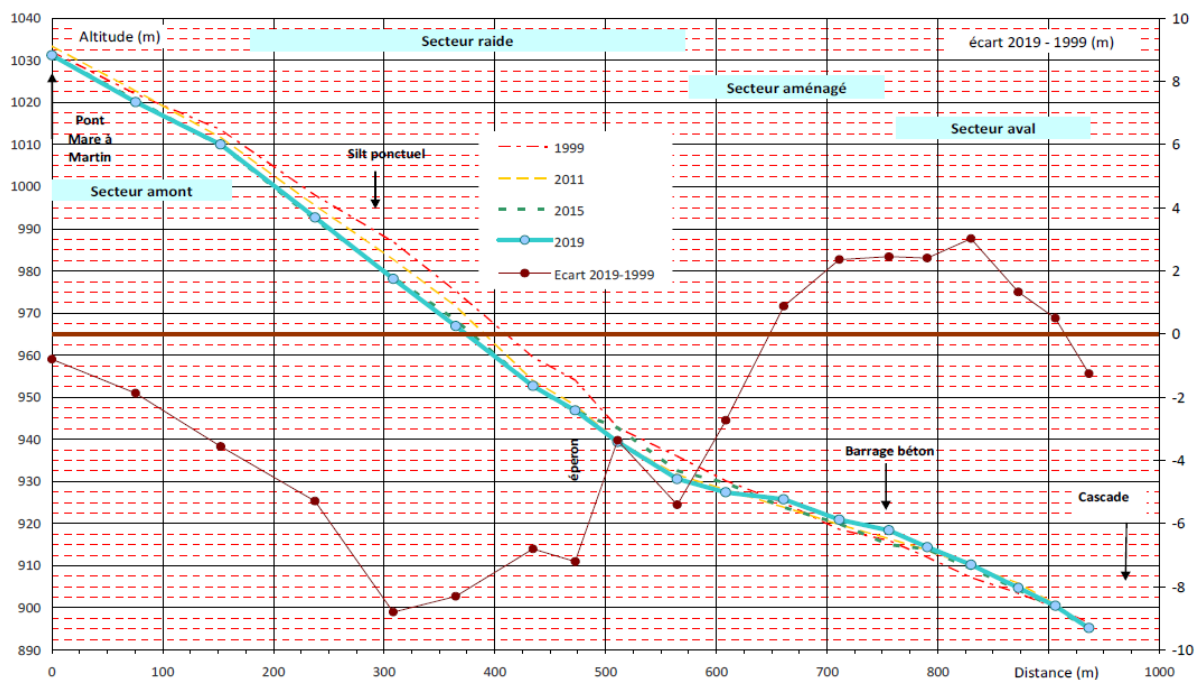


Figure 56 : Evolutions du profil en long de la Ravine Roche à Jacquot aval entre 1999 et 2019 (source : Artelia-ETRM- (2021))

Il en ressort :

- Une **incision du secteur raide** de l'ordre de 8 mètres
- Un **exhaussement de 2 mètres en amont du barrage**, dû à la construction de l'ouvrage.

Au-delà de la cascade Micheline, la Ravine Roche à Jacquot aval est **profondément encaissée** dans les unités basaltiques. **Plusieurs cascades** compartimentent le tronçon RJ2 : une cascade de 20 m de hauteur est présente 650 m en aval de la cascade Micheline, elle est suivie de deux autres cascades de respectivement 4 m et 6 m de hauteur. Sur le tronçon RJ2, il n'est pas possible de connaître l'évolution du fond du lit du fait du **manque de données topographiques**. Cependant, **ce dernier est probablement peu mobile** car les trois cascades forment des points durs fixant le profil en long. En aval de ces cascades, le lit s'élargit au contact d'une large zone de glissements située en rive droite et qui correspond à l'une des bordures du glissement de Grand Ilet. Cet élargissement s'étend jusqu'à la confluence avec la Rivière des Fleurs Jaunes.

2.4.3.2.2 Ravine Blanche

La Ravine Blanche est d'abord caractérisée par une zone de fortes pentes (30%) s'étendant sur 200 m. Ensuite, la pente décroît autour de 7%.

A cause du **manque de données topographiques**, l'évolution verticale de la ravine ne peut pas être caractérisée avec certitude. Toutefois, il est **probable que la Ravine Blanche ait subi une évolution verticale similaire à la Ravine Roche à Jacquot** du fait de leur proximité spatiale.

2.4.3.2.3 Rivière des Fleurs Jaunes

Sur le tronçon **FJ1**, **aucune comparaison topographique** n'a pu être réalisée (une seule donnée topographique est présente, le LiDAR 2015). De plus, il n'y a **pas de terrasses anciennes** qui pourraient permettre d'estimer l'évolution verticale de lit. En effet, la bande active est régulièrement remaniée ou recouverte par des glissements latéraux.

L'analyse de la diachronie en plan du tronçon et les vidéos drone réalisées en 2022, nous permettent cependant de supposer que le tronçon subit une **alternance de phases d'exhaussement et d'incision**. En effet, le cyclone Batsirai et les pluies d'avril 2022 ont provoqué un vaste glissement de terrain sur ce tronçon qui a conduit à la formation d'une zone de tressage. Des événements violents ou successifs peuvent donc entraîner des phénomènes d'exhaussement et d'élargissement de la bande active liés à l'importance des apports latéraux. La bande active se réencaisse ensuite dans ces dépôts.



Figure 57 : Zone de tressage formée au printemps 2022 en aval direct d'un glissement massif

Sur **FJ2**, une analyse des terrasses a pu être effectuée ponctuellement (cf. graphique ci-dessous). L'écart entre les terrasses de 1950 et le lit actuel est compris entre 8 m et 12 m. Les terrasses de 1984 n'ont pu être analysées que dans un seul secteur et l'écart est plus réduit, entre 4 m et 8 m. Nous pouvons néanmoins avancer que **depuis 1950 et 1984, le cours d'eau s'est incisé** dans ses alluvions.

Les terrasses 2008 sont quant à elles plus élevées d'environ 2 m à 4 m. Cet écart est moins significatif puisque les terrasses peuvent être très hautes sur FJ2 (cf. Figure 58). Il est donc **possible que le lit ait peu évolué depuis 2008**. Lors de nos visites de terrain en avril 2022, le chenal principal s'était déjà ré-encaissé dans les alluvions apportées plus tôt au printemps du fait de la forte proportion en matériaux fins. Nous pouvons donc supposer qu'après des apports importants comme en 2007, le chenal se réencaisse relativement rapidement. Or, actuellement la **roche mère affleure à plusieurs endroits** du tronçon FJ2 (sills en amont du pont et au droit du pont) ce qui fixe le fond du lit. D'après l'orthophotographie, la roche mère semblait d'ailleurs déjà affleurer aux mêmes endroits en 2008. Actuellement, **l'évolution verticale du lit sur les 2/3 amont du tronçon FJ2 est donc probablement limitée à des exhaussements temporaires liés à des événements hydrologiques extrêmes**.



Figure 58 : Dépôts alluviaux très épais en amont de FJ2 et dans lesquels s'est ré-encaissé le chenal

Sur le tiers aval nous n'avons pas observé d'affleurements rocheux. Le lit ne semble pas avoir évolué plus fortement qu'en amont du pont.

68

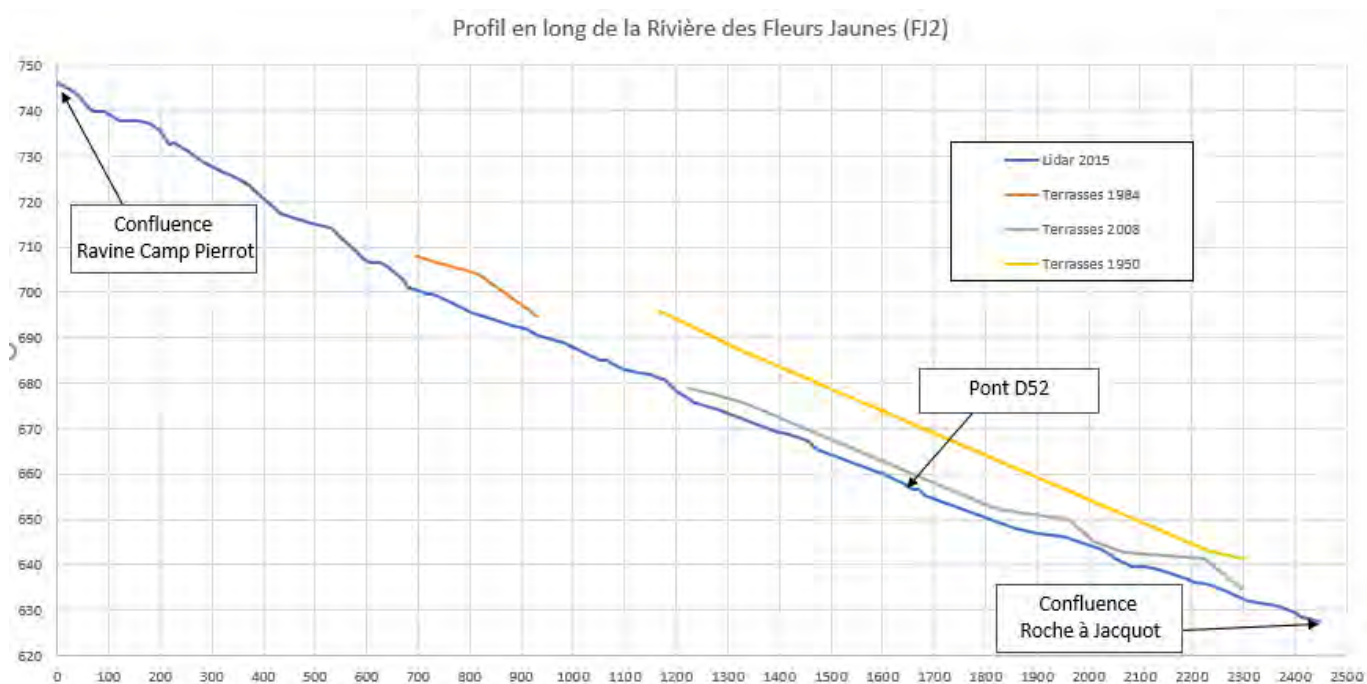


Figure 59 : Profil en long 2015 du tronçon FJ2 et profils issus de l'analyse des terrasses



Comme sur FJ1, nous n'avons pas pu faire d'analyse de la topographie ou des terrasses sur FJ3 et FJ4.

L'amont de FJ3 est situé à la confluence avec la Ravine Roche à Jacquot. Dans ce secteur, la vallée est relativement large et permet le dépôt des matériaux provenant des deux cours d'eau. Sur le reste du tronçon FJ3, le cours d'eau s'écoule dans une vallée encore assez large pour permettre le développement de structures alluvionnaires.

Malgré l'absence de signal faible d'incision, **nous ne pouvons pas conclure quant à l'évolution verticale de FJ3.**

Sur **FJ4, l'affleurement de la roche mère limite les phénomènes d'incision.** De plus, la **prise ILO en aval forme un point dur** fixant le profil en long en amont proche. Des **phénomènes d'exhaussement peuvent toutefois avoir lieu** dans ces gorges pendant ou à la suite d'événements de crue.

2.4.3.2.4 Bras Sec

Aucune donnée topographique n'est disponible sur le Bras Sec mis à part le LiDAR 2015.

Une grande terrasse ancienne non remaniée depuis Hyacinthe (1980) a été identifiée en rive gauche. L'analyse de la topographie indique que **le lit du cours d'eau pourrait s'être incisé de 10 m entre 1980 et 2015.** Cela paraît cohérent puisque **l'analyse des terrasses plus récentes montre que le lit s'est incisé de 7 m entre 2003 et 2015.**

Le Bras Sec aval (BS2) semble donc être en incision depuis au moins 1980 malgré les apports conséquents provenant des ravines et versants. **Ces apports massifs ont probablement engendré des exhaussements temporaires du lit mais insuffisants pour empêcher l'incision.**

La succession des cyclones Diwa et Gamède (2006-2007) n'a pas permis d'inverser la tendance à l'incision. Il est donc possible de supposer qu'il faudrait un cyclone d'intensité équivalente voire supérieure à Hyacinthe pour inverser plus durablement cette tendance à l'incision.

2.4.3.2.5 Rivière du Mât amont (M1, M2 et M3)

Sur le tronçon **M1**, le profil en long 2007 a pu être comparé au LiDAR 2015. **Entre 2007 et 2015, un exhaussement moyen de 2.9 m est visible sur les 1200 m amont du tronçon.** Cet exhaussement est probablement lié à des **apports importants des versants.** **Sur le tiers aval du tronçon, le niveau du tronçon est par contre stable voire en léger exhaussement** entre 2007 et 2015. Le niveau d'exhaussement moyen y est de 0.8 m ce qui n'est pas forcément significatif du fait des incertitudes de mesure topographique en rivière.

La stabilité du fond en aval du tronçon pourrait être liée à une difficulté de remobilisation des matériaux stockés en amont (sinuosité du tracé et présence de seuils naturels constitués de blocs grossiers) ainsi qu'à la végétalisation du versant de rive droite aval entre 2007 et 2017. En 2007, ce versant présentait un front de glissement actif sur 280 m. Les apports latéraux ont donc pu se tarir entre 2007 et 2015.

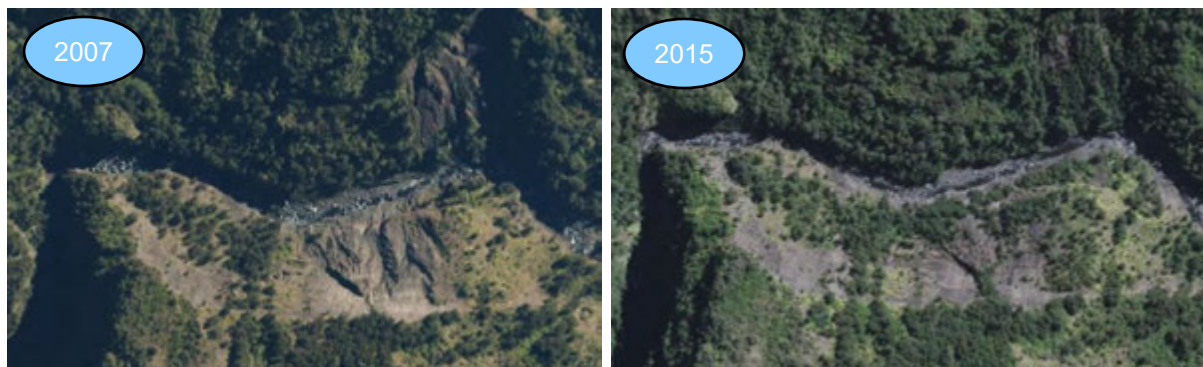


Figure 60 : Végétalisation du glissement de terrain de rive droite en aval du tronçon

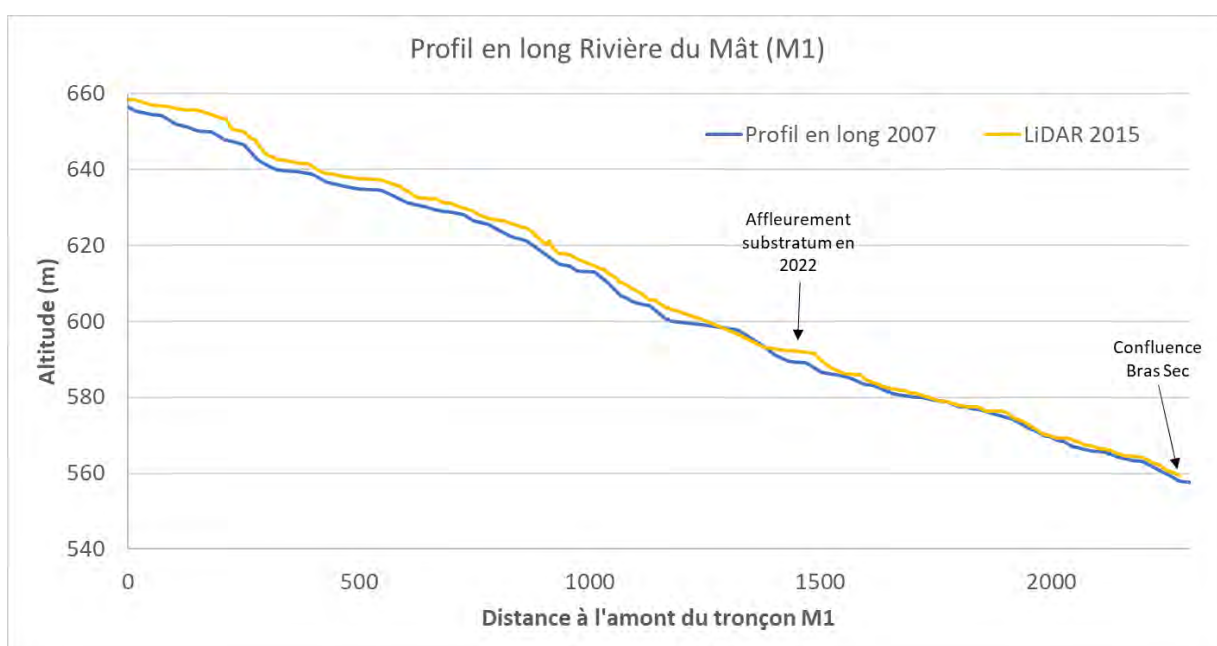


Figure 61 : Profil en long 2007 et 2015 sur le tronçon M1

Le manque de données topographiques plus anciennes et l'absence de terrasses anciennes ne permettent par contre pas de connaître l'évolution du profil en long de M1 avant 2007.

Le tronçon **M2** s'apparente à un lit en tresses, la Rivière du Mât s'écoulant sur une épaisse couche d'alluvions. La pente y est plus faible qu'en amont mais aussi en aval. Les crues y construisent et détruisent des terrasses alluviales de plusieurs mètres d'épaisseur.

Les terrasses alluviales les plus anciennes semblent dater de 1980 (Hyacinthe). Celles-ci sont toujours visibles aujourd'hui et indiquent **une incision de l'ordre de 15 m depuis 1980**, notamment en amont.

Les terrasses alluviales datant de 2003 sont situées entre 5 et 10 m au-dessus du fond du lit actuel. **Entre 1980 et 2003, l'incision est comprise entre 4 et 8 m** selon les secteurs.

L'analyse des terrasses de 2007 comparées au levé topographique de 2007 permet toutefois de constater que **sur ce tronçon l'analyse des terrasses** peut être associée à des **niveaux d'incertitudes très importants**. L'écart entre le fond du chenal actif et les terrasses est souvent supérieur à 5 m.

Cet écart est dû au fait qu'il est difficile de trouver des terrasses anciennes qui n'ont pas été remaniées et qui constituaient également le fond du chenal auparavant actif. De plus, l'épaisseur des terrasses non végétalisées et régulièrement réactivées est souvent importante sur ce tronçon (1 à 3 m voire parfois plus). Lors des crues, des volumes importants de matériaux sont déposés et peuvent entraîner un exhaussement significatif du lit. Le chenal d'écoulement courant se ré-encaisse ensuite rapidement dans ces alluvions. Cette épaisseur importante des terrasses accentue donc l'incertitude lors de leur comparaison à des données fond de lit.

Les niveaux d'incision constatés entre 1980 et 2015 sont donc probablement moins importants que les valeurs que nous avons calculées.

La comparaison des données topographiques récentes indique que le niveau du chenal d'écoulement principal est relativement stable depuis 2007.



Figure 62 : Terrasse alluviale datant du cyclone Hyacinthe, 15 m au-dessus du fond du lit

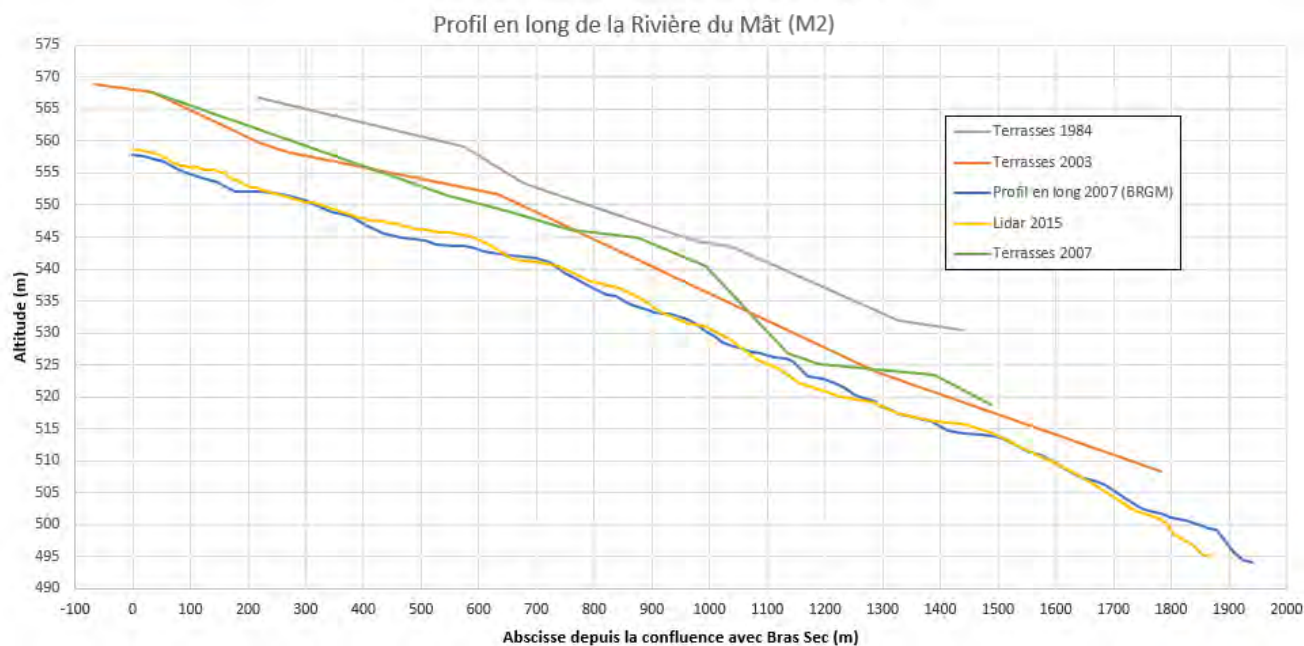


Figure 63 : Profil en long du tronçon M2 entre 1984 et 2015

Le tronçon **M3** est un tronçon en gorges. Comme sur M1 et M2, nous avons pu comparer les données topographiques 2007 et 2015.

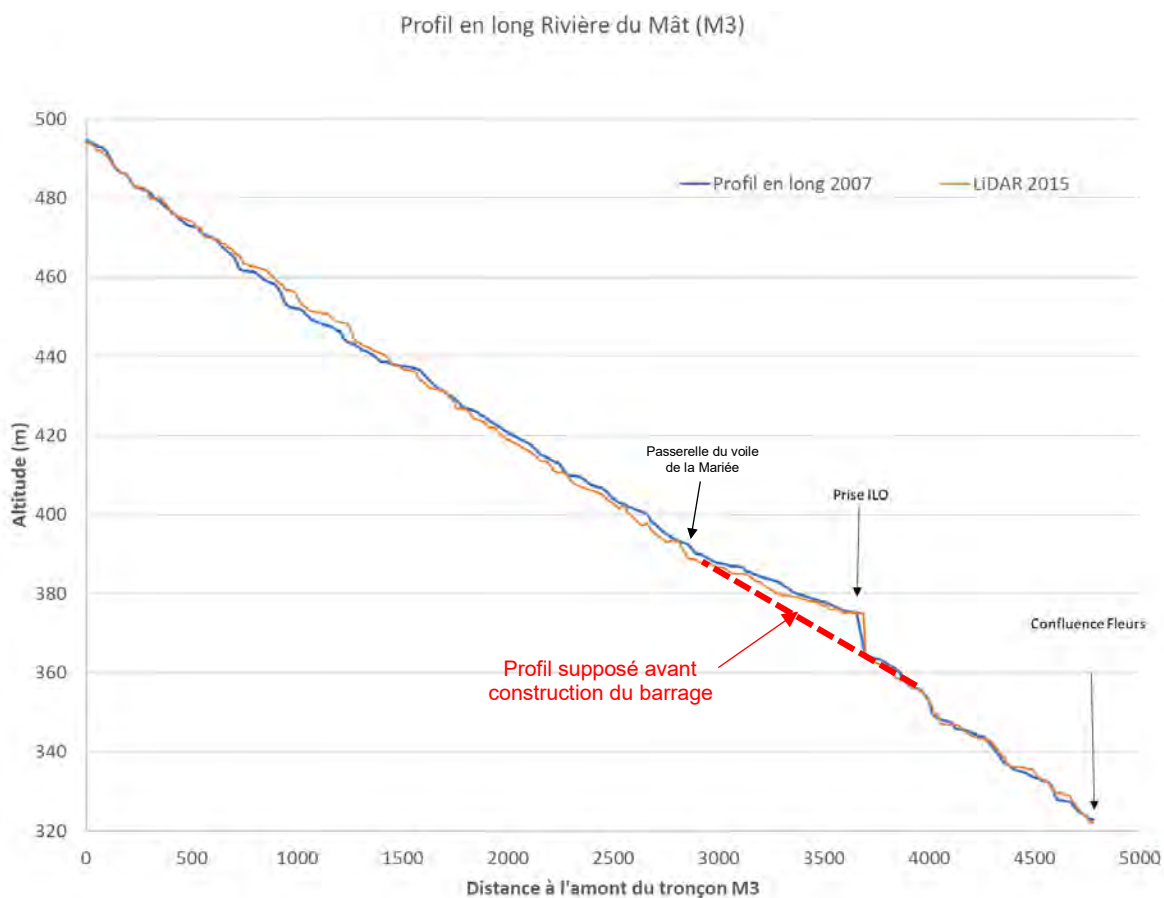


Figure 64 : Profils en long 2007 et 2015 sur le tronçon en gorges M3



Entre 2007 et 2015, les 600 premiers mètres du tronçon sont stables. Une zone d'exhaussement est ensuite visible sur 800 m. Deux hypothèses : l'incertitude du levé LiDAR qui lève le fil d'eau (valeurs plus élevées qu'un levé topographique terrestre) ou la présence d'une **bouffée sédimentaire** qui provoque un exhaussement moyen de 2 m.

Entre la fin de cette zone d'exhaussement et le début de la zone d'influence du seuil, une légère incision semble avoir eu lieu entre 2007 et 2015 (en moyenne -1,4 m). En 2017, la **roche mère** affleurerait dans ce secteur (secteur de la passerelle du voile de la Mariée), ce qui pourrait corroborer le phénomène d'incision précédent. Les matériaux plus anciens ou déposés lors des cyclones de 2006-2007 aurait ainsi été remobilisés et transportés au-delà même du barrage puisque l'incision est même présente dans la partie amont du Remous Régressif Solide (RRS). Ce déstockage a eu lieu au cours d'une période où les événements de crues étaient moins extrêmes. Ces crues plus courantes ne remobilisaient probablement pas assez de matériaux en amont pour maintenir le niveau du profil post-crue 2006-2007.

En aval du barrage, le profil en long est stable. Les gorges sont très étroites, ce qui limite les dépôts des matériaux au profit de leur transfert vers l'aval.

2.4.3.2.6 Rivière du Mât intermédiaire (M4 et M5)

L'étude du CEREMA (2018) compare les profils en long de la Rivière du Mât de la prise ILO à l'embouchure entre 2007 et 2017. Les tronçons M4 et M5 ont subi un abaissement général du fond du lit extrême sur cette période.

Les secteurs les plus concernés par l'incision sont : l'aval de la confluence avec la Rivière des Fleurs Jaunes sur 1500 m et l'aval du Pont de l'Escalier jusqu'à la passerelle de Cap Argile. Cet abaissement est de l'ordre de 2 ou 3 mètres ce qui constitue la limite de précision. Il est précisé dans l'étude que les variations inférieures à ± 2 mètres sont des évolutions géomorphologiques non significatives. Ces zones de faible incision sont entourées de points stables qui sont restés à la même altitude entre 2007 et 2017.

Sur M4, ces points stables sont probablement des zones où la rivière s'écoule directement sur le substratum basaltique ou des zones en appui sur des affleurements basaltiques. Par contre sur M5, la roche basaltique ne semble pas affleurer en fond de lit. Les points stables semblent donc plutôt correspondre à des zones en cours de pavage, des zones pavées ou des seuils naturels liés à l'érosion régressive et aux phénomènes de pavage (seuils constitués de gros blocs imbriqués).

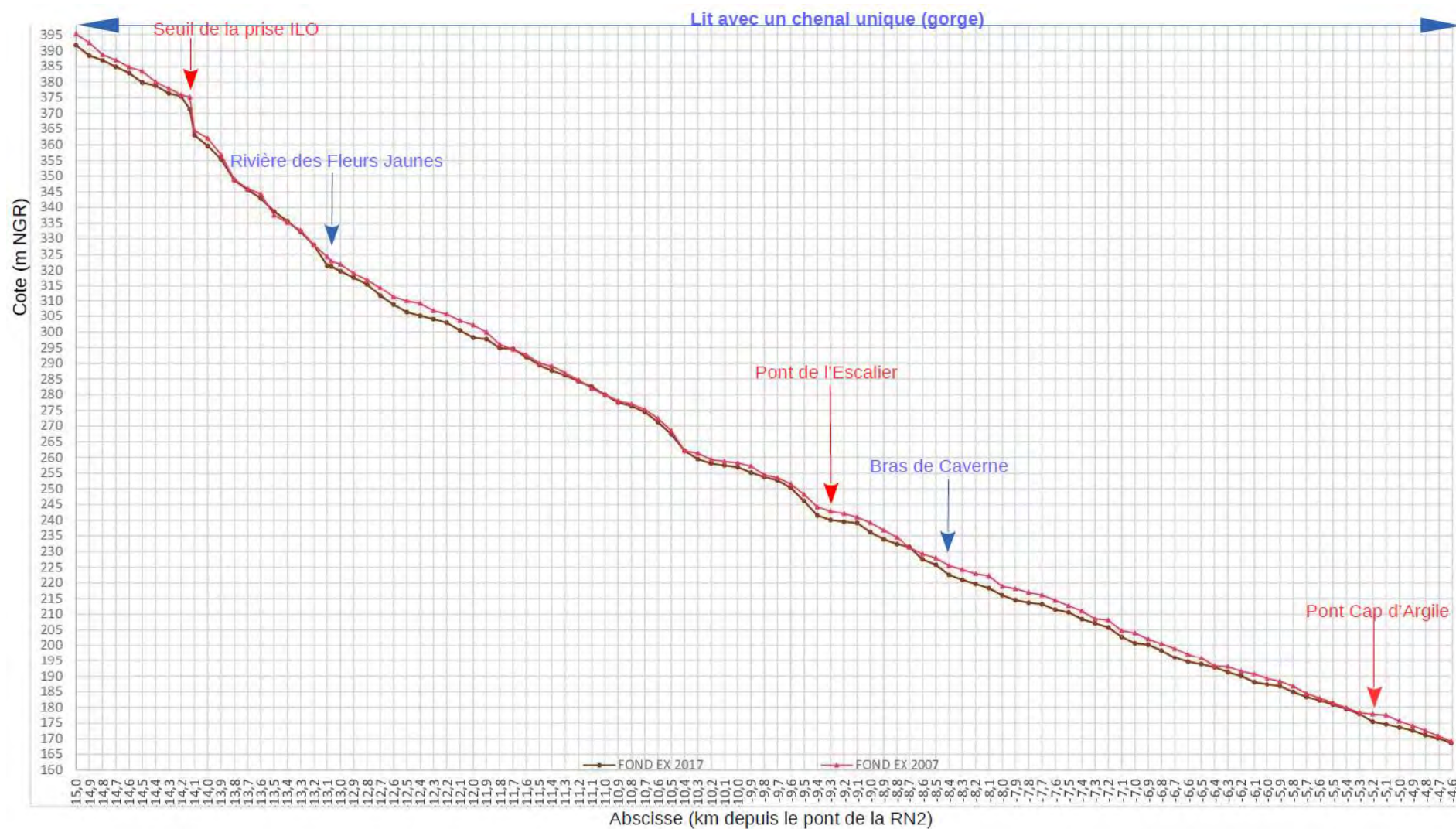


Figure 65 : Profil en long de la Rivière du Mât (M4 et M5) entre 2007 et 2017 (source : CEREMA)

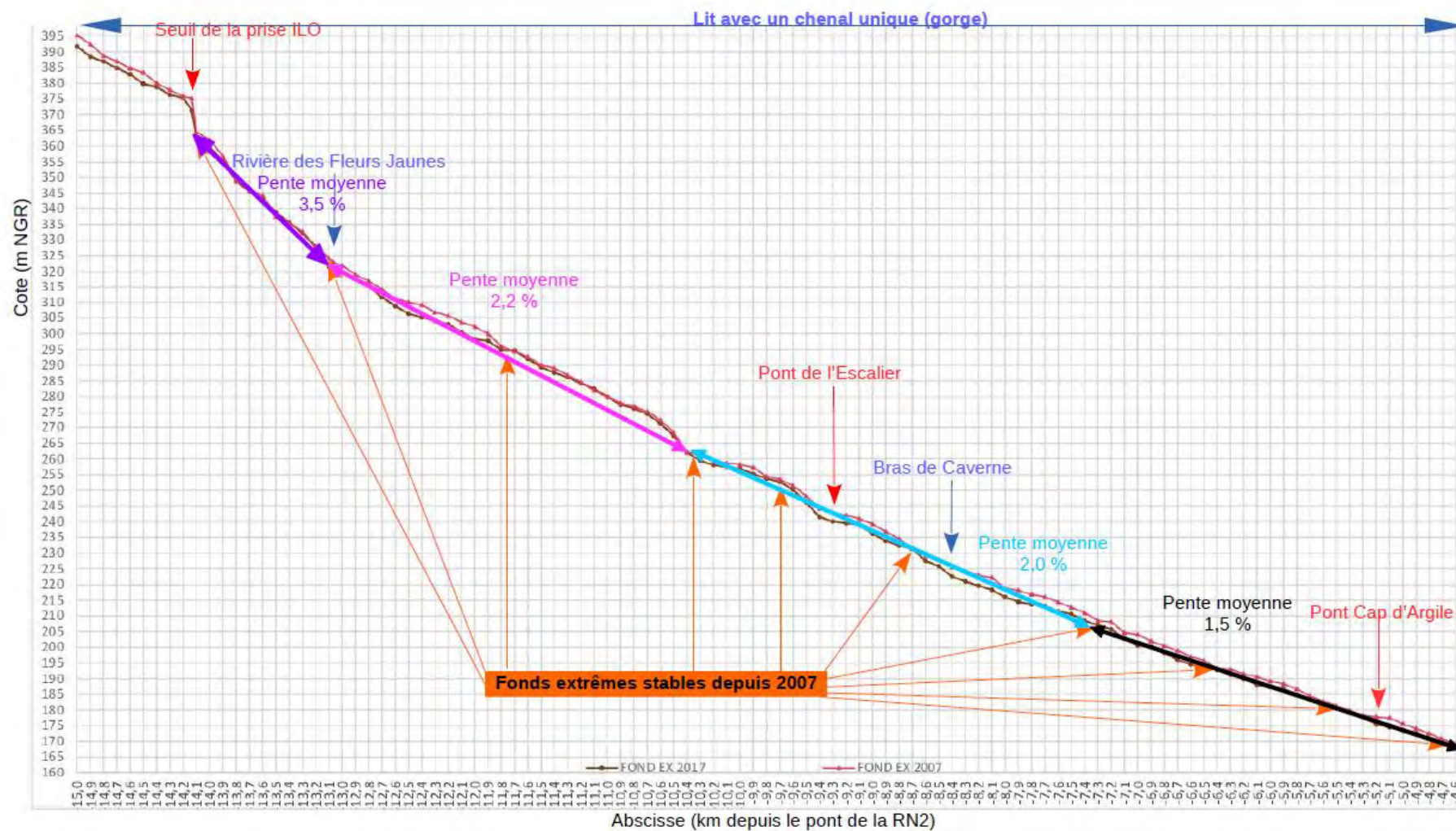


Figure 66 : Profil d'équilibre de la Rivière du Mât (M4 et M5)



L'aval du tronçon M5 est marqué par la présence du barrage Bengalis. Ce dernier a rapidement été atterri après sa mise en service en 1975. Il forme un point dur fixant actuellement le profil en long amont sur environ 1.2 km. Entre 2007 et 2017 aucune évolution n'est donc visible en amont proche du barrage.

D'après nos estimations, entre 100 000 et 200 000 m³ de matériaux se seraient déposés en amont du barrage depuis sa construction². C'est bien plus que la capacité initiale du réservoir qui devait contenir 4 500 m³ d'eau mais qui s'est rapidement engravé (BRLi, 2016). En effet, une fois le réservoir atterri les matériaux ont continué de se déposer afin de rééquilibrer le profil en long du cours d'eau. Le Remous Régressif Solide (RRS)³ s'étend aujourd'hui sur environ 1.2 km.

En aval du seuil, le lit s'est fortement incisé. Selon BRLi, le phénomène d'incision avait déjà commencé 10 ans avant la construction du seuil. Il s'est ensuite poursuivi en aval du seuil jusqu'à aujourd'hui comme le montrent les épis perchés en rive gauche du barrage et l'affouillement visible en pied de barrage coté rive droite (voir figure ci-dessous). En aval du seuil, l'incision a également mis à nu le substratum basaltique qui forme aujourd'hui un seuil naturel.



Figure 67 : Signe d'incision de la Rivière du Mât en aval du barrage de Bengalis

² Exhaussement moyen de 2-4 m du fond de lit 1978 sur une distance de 1200 m et une largeur moyenne de lit de 45 m.

³ Dépôt de matériaux dans la retenue d'un ouvrage transversal (seuil, barrage). Ce remous se dépose d'abord au niveau de l'ouvrage, puis la retenue se remplit en remontant vers l'amont petit à petit au gré des crues. Les matériaux manquant (piégés dans la retenue) vont générer en aval de l'ouvrage une incision du lit par déficit sédimentaire.

Evolution du profil en long du fond de la rivière du Mat entre 1978 et 2007

Nature géologique du fond - Visite juillet 2017

Extraits modifiés et assemblés du rapport BRGM/RP-56364-FR

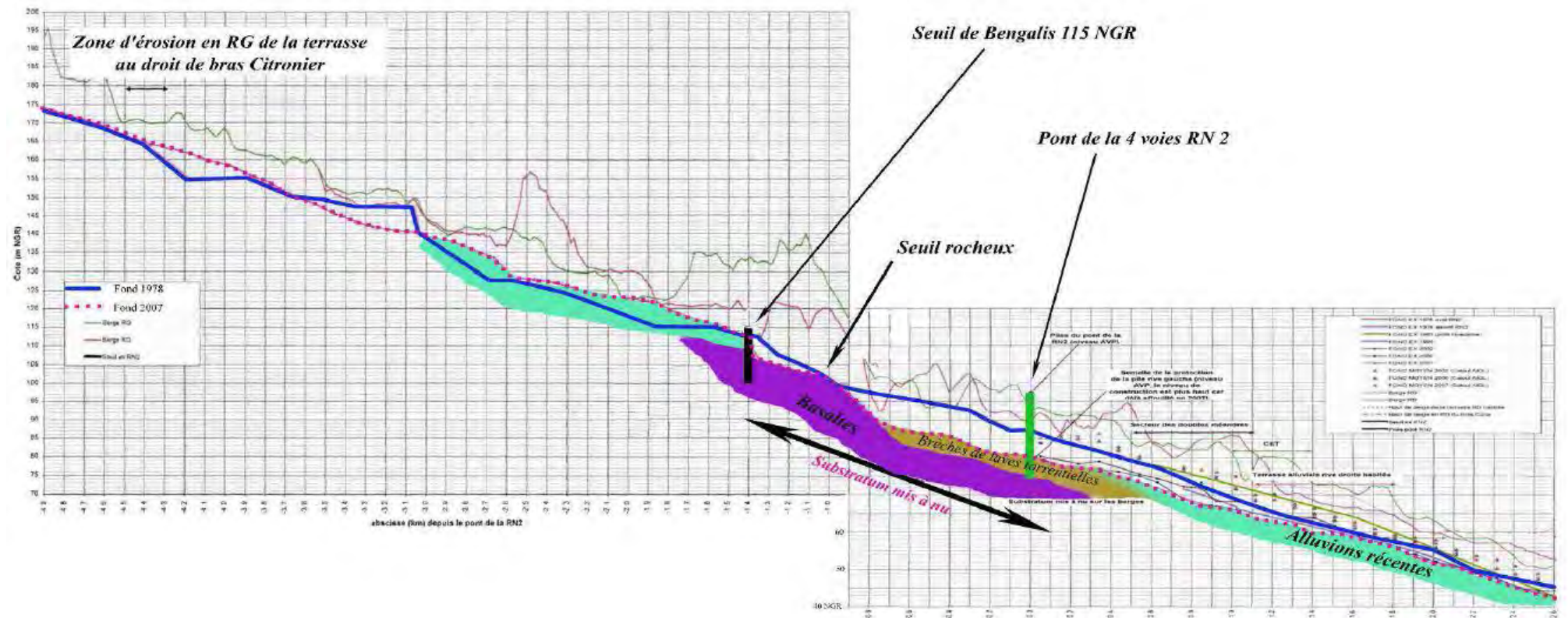


Figure 68 : Evolution du profil en long entre 1978 et 2007 (source : BRLi)

2.4.3.2.7 Rivière du Mât aval (M6 et M7)

a) Analyse des profils en long

Sur ces tronçons, les profils en long 1978, 1983, 2007 et 2017 ont été combinés afin d'estimer les évolutions.

A ces profils en long s'ajoute une **estimation du profil en long 1950**. Les données topographiques étant inexistantes en 1950, l'altitude des **terrasses datant de 1950 et non remaniées** depuis servira de référence. Cette méthode permet d'avoir une idée du profil en long 1950, même si elle reste imprécise par rapport aux autres données.

Ces profils mettent en évidence une **incision généralisée depuis 1950**, plus marquée en aval du barrage Bengalis et du seuil naturel en roche mère. En effet, en aval direct du barrage de Bengalis, l'affleurement de la roche mère explique la stabilité du fond du lit entre 1978 et 2017.

En aval du barrage et du seuil naturel, l'incision depuis 1978 est de l'ordre de 10 m au droit du pont RN2 et 3 mètres entre 2007 et 2017. Ce phénomène aurait commencé avant la construction du barrage comme l'indique le niveau des terrasses de 1950.

Au droit du pont de la RN2, le cours d'eau s'écoule dans des coulées de boues indurées peu résistantes à l'érosion par rapport aux basaltes, cette formation est vraisemblablement présente jusqu'à 72 mNGR. La cote du fond extrême au niveau du pont de la RN2 atteint aujourd'hui 77m mNGR.



Figure 69 : Formations relativement érodable au droit du pont RN2

Initialement les parois moulées du pont de la RN2 descendaient à 79 m NGR pour l'ouvrage de franchissement initial et à 74.5 m NGR pour l'ouvrage plus récent lié au doublement du pont. Par conséquent, le pont a dû fait l'objet de plusieurs aménagements de protection contre l'incision.

Une protection provisoire en enrochements liés au béton a d'abord été réalisée en 2000 jusqu'à une cote de 82.3 m NGR, cet ouvrage a ensuite été renforcé. En 2017, d'après le rapport du Cerema, une paroi moulée a été réalisée jusqu'à la cote de 63 m NGR. Cela permet de protéger l'ouvrage à long terme, l'affouillement maximal étant prévu à 72 m NGR.

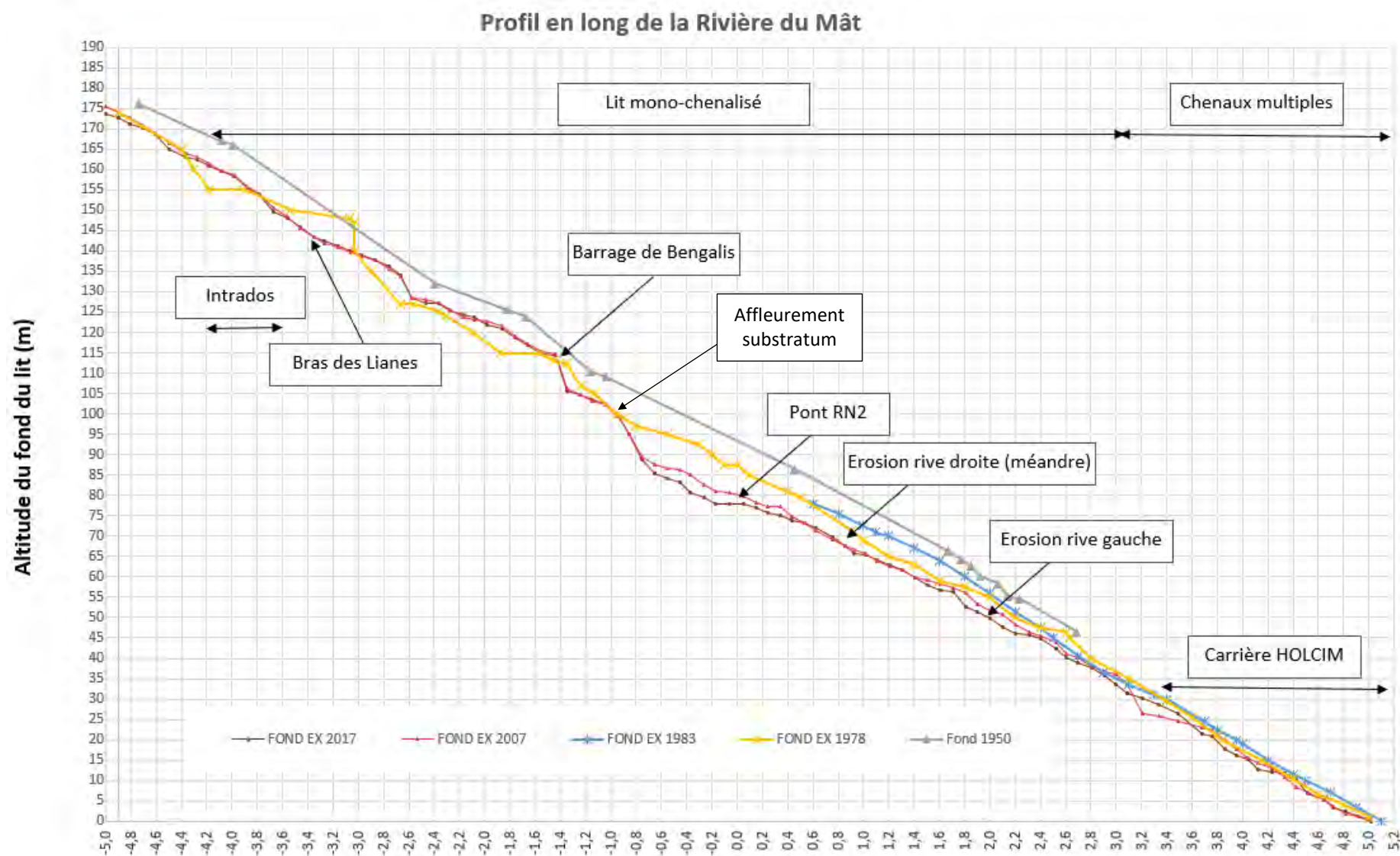


Figure 70 : Evolution du profil en long entre 1950 et 2017

Au niveau du double méandre (aval pont RN2), le niveau de fond extrême s'est abaissé depuis 1978 (-2 m à -5 m). Cette incision a provoqué un abaissement de la pente et a favorisé la formation de méandres. De plus, l'encaissement du lit a provoqué la déconnexion d'un ancien bras en rive gauche qui se retrouve aujourd'hui 4 m au-dessus de la ligne d'eau actuelle.

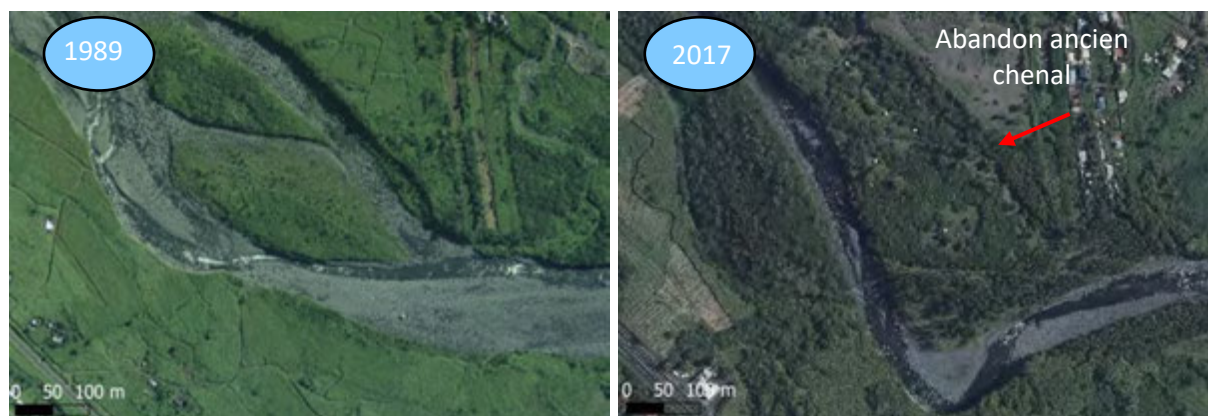


Figure 71 : Abandon du chenal en rive gauche actif en 1989, signe d'incision

Plus en aval, un ancien bras rive gauche, réactivé pour la dernière fois en 2003 est aujourd'hui totalement végétalisé et se retrouve aussi 4 m au-dessus du chenal principal.



Figure 72 : Abandon du chenal en rive gauche depuis 2003, signe d'incision

Sur le tronçon M6, l'incision est probablement liée aux extractions ayant eu lieu en lit mineur du cône alluvial (M7). La mise en place du barrage de Bengalis en amont a également pu accentuer ce phénomène.

A partir du tronçon **M7**, le cours d'eau se multichenalise et le cône alluvial actuel commence.

Sur les profils en long, l'incision est beaucoup moins marquée sur M7 que sur M6. Cependant, **l'analyse comparative des LiDAR levés depuis 2002 indique un phénomène d'incision quasi continu et un déficit sédimentaire important.**

b) Bilans sédimentaires

Afin de mieux évaluer les phénomènes d'incision, notamment sur le cône alluvial multichenalisé, des bilans sédimentaires ont été réalisés entre 2002 et 2017. Un bilan sédimentaire approximatif 1950-2017 a aussi été effectué, il est présenté en Annexe 5.

Focus : Bilans sédimentaires du pont de la RN2 à l'océan

Des bilans sédimentaires ont été réalisés par le BRGM (2008) en comparant 3 modèles numériques de surface (MNS) levés en 2002, 2006 et 2007 par photogrammétrie (Talibart et AIGL).

Ces comparaisons se sont limitées au lit actif du cours d'eau et n'ont pas pris en compte les terrasses végétalisées. En effet, les MNS ne sont pas retraités pour retirer la végétation et le bâti. Entre 2002 et 2007, la végétation du cône alluvial a diminué. Une sous-estimation des bilans sédimentaires est donc probable.

Nous avons complété le bilan sédimentaire du BRGM en comparant les données photogrammétriques de 2007 au LiDAR 2017.

Le LiDAR 2017 est le plus récent à notre disposition sur l'aval du bassin. Il présente une précision planimétrique de 1 m. Il est donc beaucoup plus précis que le LiDAR 2007 dont le semis de points est relativement lâche en comparaison. Cette différence de précision sera source d'incertitude dans les résultats du bilan sédimentaire 2007-2017. Elle s'ajoutera à l'incertitude liée au fait que le levé 2007 est un MNS et non un MNT, la végétation n'est donc pas retraitée.

Lors du COTECH restreint d'avril 2022, la DEAL sur les conseils de la RTM nous a demandé de **recaler le MNS 2007 par rapport au LiDAR 2017 à l'aide de l'application Cloud Compare**. En effet, **un MNT mal calé peut engendrer de fortes incertitudes** dans l'évaluation des bilans sédimentaires.

Les données 2007 et 2017 étant déjà géoréférencées, nous avons tenté de réaligner le nuage de points 2007 au LiDAR 2017. Ce réalignement a été réalisé à partir de la **fonction ICP ("Iterative Closest Point")** qui permet de recaler automatiquement des nuages de points déjà quasiment alignés.

Néanmoins, **les résultats du recalage n'ont pas été concluants. L'erreur quadratique moyenne (RMS error) minimale que nous avons pu obtenir est de 1.73 m.** Cette erreur est très élevée comparée à la marge d'erreur initiale des levés topographiques terrestres ou LiDAR. En général, la précision planimétrique de ces levés est d'ordre centimétrique voire déci-centimétrique. Le recalage du nuage de point à l'aide de Cloud Compare **risque donc d'avoir accentué l'erreur en plan.**

Différents éléments peuvent expliquer l'échec du recalage sous Cloud Compare :

- Le nuage de point 2007 est particulièrement large comparé au LiDAR 2017, le nombre de point de comparaison peut donc être limité ;
- L'emprise des deux modèles est principalement centrée autour du cours d'eau, or, la morphologie du site a fortement changé entre 2007 et 2017 (érosions, déplacement des chenaux, exploitation de la carrière HOLCIM, etc.). Le nombre de point de comparaison sur des zones stables est donc également limité ;
- Le nuage 2007 est un MNS, la végétation n'a donc pas été retraitée.

En conclusion, **nous avons donc choisi de présenter les résultats du bilan sédimentaire 2007-2017 basés sur le nuage de point non recalé.**

Les bilans sédimentaires 2002 à 2017 sont présentés dans le tableau ci-dessous.

Tableau 2 : Bilans sédimentaires du pont de la RN2 à l'océan entre 2002 et 2017

	Zone 1 : amont profil 19			Zone 2 : entre P19 et P35			Zone 3 : aval P35			Total Z1+Z2+Z3		
	Volume +	Volume -	Variation	Volume +	Volume -	Variation	Volume +	Volume -	Variation	Volume +	Volume -	Variation
2006-2002	17 222	-193 577	-176 355	64 317	-187 415	-123 098	91 471	-344 691	-253 220	173 010	-725 683	-552 673
2007-2006	66 779	-356 942	-290 163	170 897	-586 209	-415 312	913 163	-458 945	454 218	1 150 839	-1 402 096	-251 257
2017-2007 (sans zone carrière)	65 764	-153 746	-87 982	353 674	-552 479	-198 806	474 768	-485 742	-10 974	894 205	-1 191 967	-297 762
2017-2007 (uniquement zone carrière)							247 970	-1 928 348	-1 680 378			
2017-2007 (avec zone carrière)	65 764	-153 746	-87 982	353 674	-552 479	-198 806	722 738	-2 414 089	-1 691 352	1 142 175	-3 120 315	-1 978 134

Volumes en m³

Bilans 2006-2002 et 2007-2006 réalisés par le BRGM en 2008

Attention, sur 2017-2007, l'emprise est légèrement différente (prise en compte de certaines érosions)

La numérotation des profils indiqués est celle du BRGM illustrée sur la carte page suivante

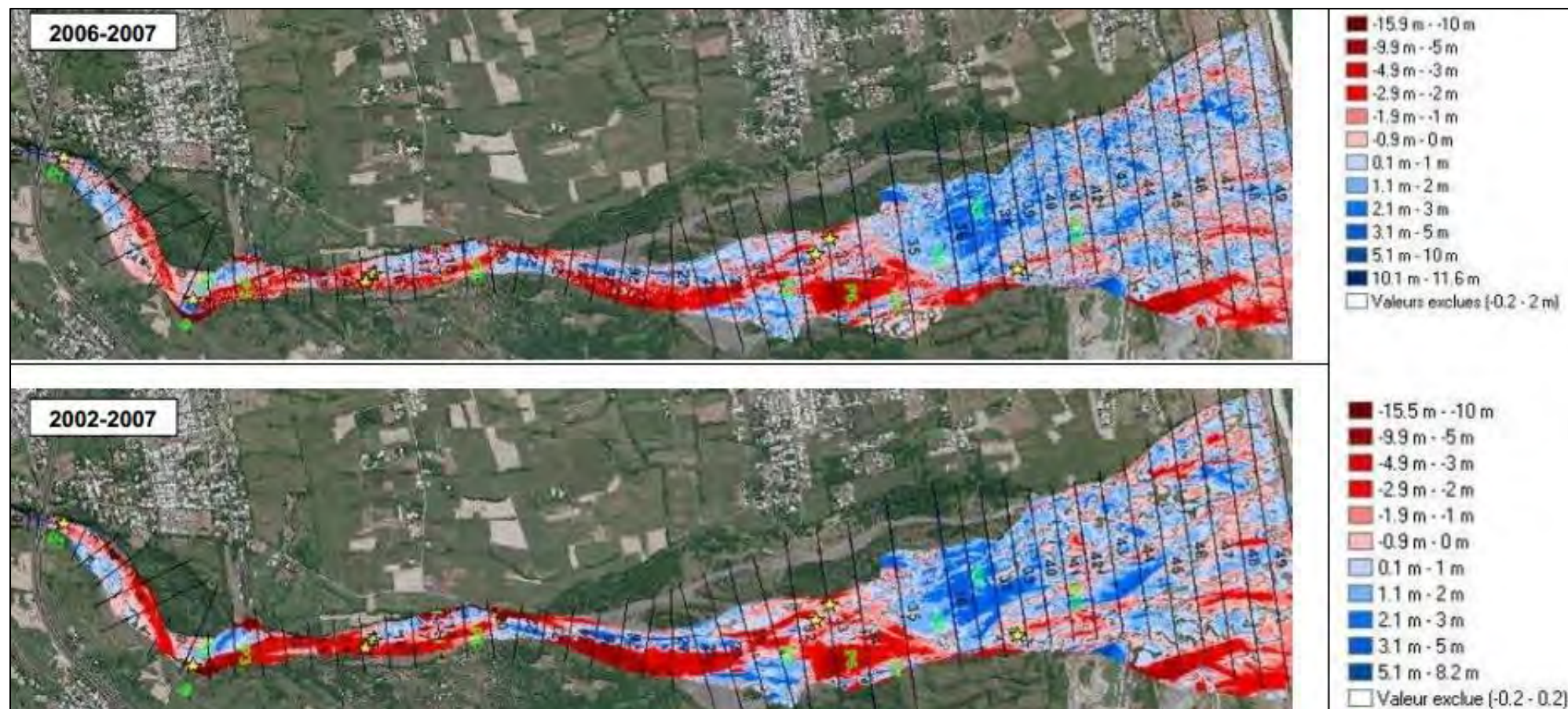


Figure 73 : Cartographie des bilans sédimentaires 2002-2006-2007 du BRGM (2008) (en rouge abaissement, en bleu exhaussement)

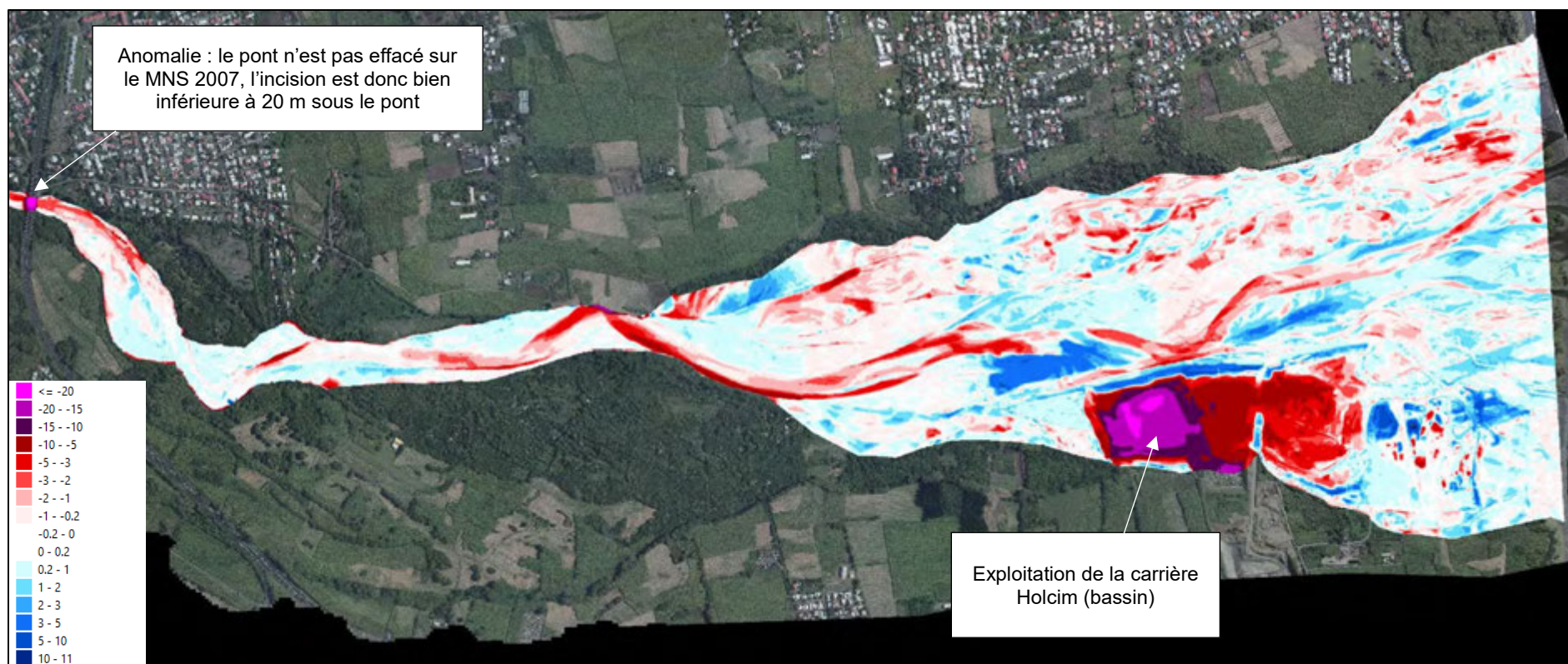


Figure 74 : Cartographie du bilan sédimentaire 2007-2017 (en rouge abaissement, en bleu exhaussement)

En dehors des zones actives en 2017 et 2007 (chenaux et zones non végétalisées), des variations d'altitude sont visibles, cela s'explique notamment par le fait que la végétation n'a pas été retraitée sur le MNS 2007.



D'après les bilans sédimentaires, entre 2002 et 2006 (BRGM, 2008), l'incision est généralisée sur le cône alluvial. Le déficit sédimentaire est de 552 673 m³.

Avec le passage du cyclone Gamède (2007), la situation évolue fortement sur le cône alluvial. Entre le pont de la RN2 et le début de l'emprise actuelle de la carrière Holcim, l'incision est beaucoup plus forte. En une seule année, ce secteur a perdu plus de 705 000 m³ de matériaux. **Une partie de ces matériaux s'est déposée sur le tiers aval du cône.** Le bilan sédimentaire indique le dépôt de 454 000 m³ de matériaux.

Entre 2007 et 2017, le bilan sédimentaire paraît dans un premier temps très négatif. Les deux zones amont sont toujours en incision bien que le bilan soit moins déficitaire qu'entre 2006 et 2007 (perte de « seulement » 286 800 m³ de sédiments). **La zone aval du cône accuse quant à elle un déficit énorme de 1.69 Mm³.** Ce déficit est en **fait en grande partie liée à l'exploitation de la carrière.** Cette exploitation a ainsi soustrait aux terrasses alluviales de la rivière environ 1.68 Mm³ de sédiments⁴ d'après l'analyse LiDAR et 3.85 Mm³ dans l'analyse de la topographie terrestre. **En omettant les extractions en bordures de cours d'eau, le bilan sur la partie aval du cône est quasiment stable puisque le déficit sédimentaire est d'environ 11 000 m³.**

Plusieurs sources d'incertitudes doivent toutefois être gardée en tête dans le cadre de cette analyse :

- *Les levés LiDAR lèvent fil d'eau et non le fond du lit, une variation du niveau du fil d'eau peut ainsi entraîner une marge d'erreur plus ou moins importante concernant les bilans sédimentaires ;*
- *La végétation n'est pas toujours traitée dans les différents levés de la Rivière du Mât ;*
- *La précision des levés diffère, le levé de 2007 présente beaucoup moins de points que celui de 2017 ce qui accentue davantage la marge d'erreur des bilans sédimentaires ;*
- *Les levés topographiques (LiDAR, nuage de point) présentent également des incertitudes. Ces dernières sont généralement faibles (centimétriques) mais lors de bilans sédimentaires sur des emprises importantes, cette incertitude peut conduire à des différences significatives en termes de volumes (Lallias-Tacon et al., 2014 ; ONF-RTM / Terralp / INRAE, 2017). L'alignement des nuages de points peut réduire ces incertitudes. Cependant, comme expliqué précédemment le recalage du nuage de point 2007 par rapport au LiDAR 2017 n'a pas été fructueux.*

⁴ Cette estimation est basée sur l'analyse du LiDAR qui ne lève que le fil d'eau. En analysant plus finement les données topographiques, quasiment 4 Mm³ ont été extraits en bordure de la Rivière du Mât (cf. partie extraction et page suivante).



Afin de mieux cerner les tendances d'évolutions réelles du site entre 2007 et 2017, nous avons également calculé le bilan sédimentaire du cône alluvial uniquement sur l'emprise de la bande active 2007+2017.

Le bilan obtenu est bien différent et est présenté dans le tableau ci-dessous.

Variations de volume (m ³)	Zone 1 : Amont profil 19	Zone 2 : Entre P19 et P35	Zone 3 : Aval P35	Total Z1+Z2+Z3
2017-2007	-84 826	-63 078	+ 55 420	-92 484

La numérotation des profils indiqués est celle du BRGM

Figure 75 : Bilan sédimentaire 2007-2017 dans l'emprise de leurs bandes actives

Le bilan sédimentaire resserré donne une **estimation de l'incision très proche sur la zone la plus en amont** (zone monochenalisée en aval du pont de la RN2). **Sur la deuxième zone, l'incision est beaucoup moins importante.** Le déficit sédimentaire passe de 198 806 m³ à 63 078 m³. **Cette différence est probablement liée à la végétation** qui n'est pas traitée sur le levé 2007 **et à la précision du levé 2007** qui induit des zones d'interpolation parfois relativement étendues. Enfin, **sur la troisième zone, le bilan est plutôt positif avec le dépôt de plus de 55 000 m³ de matériaux.**

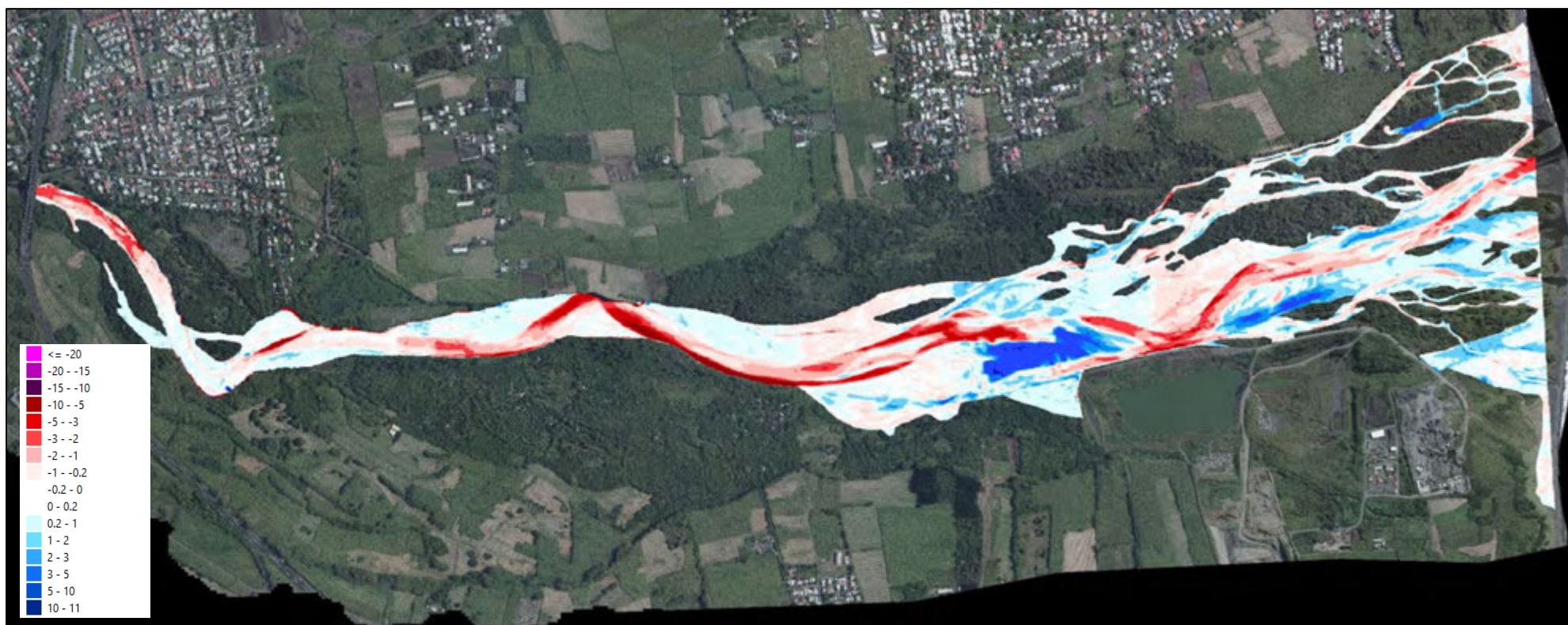


Figure 76 : Cartographie du bilan sédimentaire restreint 2007-2017 (en rouge abaissement, en bleu exhaussement)

→ Le bilan resserré ne prend pas en compte la zone d'exploitation de la carrière en bordure de cours d'eau. D'après les analyses de la topographie terrestre, environ 3.85 millions de mètres cubes de matériaux auraient été soustraits au cône alluvial sur les sites 1 et 3 (cf. illustration ci-dessous).



Figure 77 : Sites d'extractions d'alluvions de la carrière en rive droite de la Rivière du Mât

Le bilan global réel du cône alluvial entre 2007 et 2017 correspond au bilan sédimentaire restreint. Ce bilan indique ainsi l'incision d'environ 92 500 m³ de matériaux. Ce résultat est faible comparativement aux bilans précédents (2002-2006-2007), bien que les incertitudes soient plus élevées sur ces bilans.

La tendance observée irait donc plutôt à un ralentissement de l'incision voire à un **exhaussement progressif de la partie aval du cône qui pourrait ensuite se propager vers l'amont. Cette conclusion irait en partie dans le sens de l'étude du BRGM (2008) qui prévoyait un exhaussement lent du cône alluvial lié à l'arrêt des extractions en lit mineur.**

En l'absence de modifications humaines, le BRGM prévoyait même un retour progressif du cône à son niveau de 1978. Toutefois, en 2017, **l'exhaussement reste limité** et ne concerne que la partie distale du cône. De plus, **le bilan sédimentaire global reste négatif**. Un retour au niveau de 1978 pourrait donc prendre de nombreuses années ou **nécessiterait un (ou plusieurs) évènement extrême de type Hyacinthe** qui pourrait alors amener des volumes de matériaux importants de l'amont du bassin. D'après l'analyse des profils en travers, cet évènement avait d'ailleurs entraîné un exhaussement du chenal entre 1978 et 1983 en aval du pont de la RN2 et un exhaussement de la partie distale du cône.

L'arasement prévu du **barrage de Bengalis** contribuera à **augmenter les apports solides** au niveau du cône alluvial (augmentation des capacités de transport et libération des matériaux bloqués en amont du seuil). Cependant, **le volume de matériaux bloqués par le seuil reste limité par rapport au déficit sédimentaire** observé sur le cône (pour rappel, les volumes piégés en amont de l'ouvrage sont estimés entre 150 000 et 250 000 m³ de matériaux). Même après arasement du seuil, un exhaussement du cône alluvial au niveau de 1978 pourrait prendre de nombreuses années ou nécessiter un ou plusieurs évènements extrêmes de type Hyacinthe.



Enfin, **une rupture de la digue protégeant les bassins de la carrière Holcim pourrait entraîner un piégeage massif des sédiments**. Cela impacterait directement l'évolution verticale du cône en entraînant une incision progressive et régressive.

En 2007 lors du cyclone Gamède, la digue s'est d'ailleurs rompue et la rivière a été capturée. D'après l'étude du Cerema, en 2017, le cours d'eau avait retrouvé le niveau de son profil en long 2006. En cas de nouvelle capture, le Cerema estimait donc que la Rivière du Mât aurait besoin d'une dizaine d'année pour rééquilibrer son profil en long. Cependant, entre 2007 et 2017, les extractions ont continué sur le site Holcim. Un bassin a notamment été creusé (cf. Figure 77, site 1). Ce dernier pourrait piéger près de 2.5 Mm³ de matériaux avant d'atteindre la côte du fond du lit 2017. Une capture de la Rivière du Mât dans ce bassin pourrait donc impacter la dynamique du cône et des tronçons amont sur une période beaucoup plus longue. L'incision régressive pourrait même se propager sur les tronçons amont.

→ *Le transport solide entre 2007 et 2017 a été estimé dans la partie 2.5.5.6.8 en p.194. Les résultats sont comparés au bilan sédimentaire dans cette même partie.*

→ *Afin de vérifier et affermir les hypothèses que nous avançons ci-dessus et en partie 2.5.5.6.8, **un suivi du cône alluvial sera nécessaire dans le futur**. Ce suivi devra notamment passer par la réalisation de levés LiDAR en post-crue morphogènes.*



Conclusion : diachronie verticale

Par rapport à 1950, l'ensemble des cours d'eau du bassin ont connu une incision de leur lit. Cette incision généralisée pourrait être liée à :

- La revégétalisation des îlets et des versants post-1950 (exode rural). Cette revégétalisation permet de mieux fixer les versants et limite de fait la production sédimentaire bénéficiant aux cours d'eau ;
- Aux extractions en lit mineur qui ont eu lieu jusqu'au début des années 2000, notamment à l'aval du bassin ;
- Des forçages climatiques (non connus du fait du manque de données anciennes)⁵ qui pourraient avoir entraîné une diminution de la production sédimentaire.

Entre 1950 et 2017, l'évolution verticale des cours d'eau n'est pas linéaire, notamment en amont du bassin.

Sur les tronçons en amont du bassin, une alternance entre phase d'exhaussement rapide de la bande active et phase de ré-incision du chenal principal semble avoir lieu. Néanmoins, sur une échelle de temps longue (depuis les années 50-80), **la tendance globale est à l'incision** (ex : RJ1, BS2, FJ2, M2).

Dans les **tronçons en gorges** (M3 et FJ4), **l'évolution du lit est plus limitée**. L'incision se voit limitée par l'affleurement de la roche mère et par la présence des prises ILO en aval. Le passage de **bouffées sédimentaires** peut cependant entraîner des **exhaussements temporaires**.

Sur la partie intermédiaire de la Rivière du Mât, le cours d'eau est en incision. Sur **M4, la roche mère affleure** en certains points et permet de fixer l'évolution verticale du profil en long. Sur **M5**, des phénomènes de **pavage** ont pu être observés (zone de granulométrie très grossière ou seuils de blocs imbriqués), ce qui souligne l'incision en cours sur le tronçon. **Les seuils en blocs imbriqués semblent bloquer temporairement l'évolution verticale du profil en long** mais une crue extrême pourrait les remettre partiellement en mouvement ou entraîner leur contournement⁶.

Sur la partie **aval de la Rivière du Mât**, une **incision très forte** est présente depuis les années 1950, notamment entre le seuil naturel de Bengalis et l'aval du pont de la RN2 (-10 m depuis 1978). Entre le Cap Argile et l'amont du cône alluvial, nous avons estimé qu'environ 6.7 Mm³ ont été érodés/incisés entre 1950 et 2017 (cf. Annexe 5). Bien que ce volume soit approximatif, il est du même ordre de grandeur que les extractions ayant eu lieu entre 1980 et 2000 (5 Mm³).

Sur le cône alluvial, la dynamique est également à l'**incision** depuis plusieurs années. Cette incision **semble toutefois avoir ralenti entre 2007 et 2017**. Cette hypothèse devra être vérifiée grâce à un **suivi par LiDAR en post-crues morphogènes**. Dans la partie aval du cône, un **risque de capture** de la rivière dans le bassin de la carrière Holcim pourrait également impacter la dynamique alluviale.

⁵ Dans l'hémisphère Nord, le Petit Age Glaciaire (PAG, 1350-1850) est un phénomène bien connu et documenté. Il a entraîné une hausse de la production sédimentaire jusqu'au milieu de 19^{ème} siècle. A partir de cette période, cette dernière s'est ensuite réduite entraînant alors des phénomènes d'incision et de métamorphose fluviale. Dans l'Hémisphère Sud, la période du PAG est très peu étudiée et malgré nos recherches, nous n'avons pas trouvé de données concernant le climat au PAG dans l'Océan Indien. Certaines études peu nombreuses avancent toutefois qu'un PAG a bien eu lieu dans l'Hémisphère Sud (ex : Evidence for a "Little Ice Age" glacial advance within the Antarctic Peninsula – Examples from glacially-overrun raised beaches, Simms A. R. et al, 2021). Il est donc possible que le climat ait été différent dans l'Océan Indien à cette période-là (influence sur le régime des précipitations ou des cyclones par exemple).

⁶ Des kayakistes nous ont dit avoir constaté que certains seuils en blocs imbriqués avaient évolués lors des événements du printemps 2022 (seuil devenu infranchissable pour eux).



2.5 FONCTIONNEMENT DYNAMIQUE

2.5.1 Lithologie des versants et des berges

La lithologie des versants et des berges longeant les cours d'eau de la zone d'étude a été analysée afin d'évaluer l'érodabilité et la pertinence sédimentaire des différentes formations traversées.

12 unités géologiques ont été définies, issues majoritairement de la carte géologique du BRGM.

La formation Lt (Laves torrentielles) et Brèches (Brèches de Grand Ilet) ont été rajoutées à la carte géologique initiale qui ne distinguait pas ces unités.

La **sensibilité à l'érosion** a été définie pour chacune des formations (faible, moyenne, bonne et forte). Le **critère de pertinence sédimentaire** a été défini de la même manière (non pertinent, faible, moyenne, forte).

Focus sur la pertinence sédimentaire :

Ce terme fait référence à deux éléments : la granulométrie des produits d'érosion et le temps de mobilisation de ces matériaux. Ces deux conditions sine-qua-non doivent donc être remplies en même temps.

La granulométrie des matériaux fournis au cours d'eau doit être compatible avec la construction des lits fluviaux. Les matériaux ne doivent pas être trop fins et colmatant (< 8 mm) ou trop gros et ne fournissant que des éléments de rugosité risquant d'obstruer le lit (par exemple suite à un éboulement de falaise).

Ainsi ces matériaux sont pertinents granulométriquement, mais sont également biogènes en servant de support aux réseaux trophiques.

Williams & Mundie (1978), Jowett et al., (1991) indiquent que les substrats de lit les plus biogènes sont supérieurs à 20 mm. Evrard & Micha (1995) précisent que les plus fortes densités concernent les substrats dont le diamètre moyen est d'environ 40-50 mm.

En règle générale les éléments les plus pertinents sédimentairement sont les formations superficielles ayant subi une (ou plusieurs) phase(s) d'érosion et de transport (alluvions anciennes ou récentes, moraines, éboulis gravitaires...).

Attention, certaines roches s'érodant ou se délitant facilement (comme les marnes, certains schistes...) fournissent des matériaux fragiles au transport solide qui se fractionnent et donnent rapidement des grains fins peu ou pas pertinents sédimentairement.



Les différentes formations géologiques traversées, leur sensibilité à l'érosion et leur pertinence sédimentaire sont présentées dans le tableau ci-dessous.

Tableau 3 : Formations géologiques du bassin versant de la Rivière du Mât

Code	Description de la formation géologique	Erodabilité	Pertinence sédimentaire
Fy2	Alluvions anciennes indifférenciées	Forte	Forte
PE	Lahars, éboulis, tufs et éluvions	Forte	Forte
fBr3	Formations pyroclastiques, phase 3 Piton des Neiges	Forte	Forte
Brèches	Formations bréchiques de Grand Ilet	Forte	Forte
SE	Coulées de solifluxion et éboulis	Bonne	Moyenne
Lt	Laves torrentielles/coulées de boues indurées	Bonne	Faible
Zbr1	Agglomérats, brèches chloritisées et zéolitisées, phase 1 Piton des Neiges	Moyenne	Moyenne
zbf2	Coulées basaltiques à olivine chloritisées et zéolitisées, phase 2 Piton des Neiges	Moyenne	Faible
Bf2	Coulées basaltiques à olivine phase 2 Piton des Neiges	Faible	Non pertinent
Ba4	Coulées basaltiques et andésiques phase 4 Piton des Neiges	Faible	Non pertinent
Gabbros	Gabbros	Faible	Non pertinent
Syénites	Syénites	Faible	Non pertinent

La formation Lt correspond à la coulée de boue indurée située sous le pont de la RN2. Sa pertinence sédimentaire a été définie comme faible car sa matrice semble constituée d'éléments très fins cimentés. De plus, les éléments grossiers (graviers, cailloux, petits blocs) sont moins abondants que dans d'autres formations (alluvions anciennes, brèches).

Les basaltes non altérés, gabbros et syénites ont été qualifiés de non pertinents. En effet, ce sont des roches massives très difficilement érodables, elles ne fourniront donc quasiment pas de matériaux au cours d'eau.

Les basaltes altérés se sont vus attribués une pertinence sédimentaire faible. Les phénomènes d'altération et de zéolitisation les rendent plus sensibles à l'érosion. Ils peuvent donc fournir des matériaux intéressants au cours d'eau mais en quantité relativement limitée par rapport à des brèches par exemple.

La répartition générale des formations à l'échelle du bassin peut être simplifiée comme suit :

- En amont du bassin, les versants sont majoritairement constitués de brèches et d'unités fortement érodables. Les versants des tronçons RJ1, RB1, FJ1, FJ2, M1, M2, BS1 et BS2 sont susceptibles d'apporter une quantité importante de matériaux aux cours d'eau. Ces matériaux présentent généralement une granulométrie étendue allant d'éléments très fins à très grossiers. La proportion d'éléments intéressants pour le cours d'eau est importante.
- La partie intermédiaire du bassin, FJ3, FJ4, M3 et M4, est majoritairement constituée de formations basaltiques plus ou moins altérées. A l'échelle du bassin versant, ces formations sont peu érodables.
- En aval du bassin, les tronçons M5, M6 et M7 traversent majoritairement des formations érodables telles que des alluvions anciennes.



Figure 78 : Apports sédimentaires provenant de formations bréchiques

Une cartographie des formations traversées par chaque tronçon a été réalisée sous forme d'atlas cartographique. Une synthèse des formations traversées pour chacun des tronçons est également résumée dans le tableau ci-dessous. Le pourcentage de connexion permet d'identifier les principaux types de versants.

Tableau 4 : Détail de la géologie des versants pour chacun des tronçons du bassin versant de la Rivière du Mât

Rivière	Tronçons	Code	Connexion		Total (km)	Erosion	Pertinence sédimentaire
			km	%			
Rivière du Mât	M1	zbf2	3,85	81,7	4,71	Moyenne	Faible
		fBr3	0,36	7,6		Forte	Forte
		Fy2	0,18	3,8		Forte	Forte
		PE	0,32	6,9		Forte	Forte
	M2	Fy2	1,19	33,3	3,6	Forte	Forte
		fBr3	2,38	66,7		Forte	Forte
	M3	Zbr1	2,80	30,0	9,3	Moyenne	Moyenne
		zbf2	6,53	70,0		Moyenne	Faible
	M4	zbf2	2,61	32,2	8,1	Moyenne	Faible
		Bf2	0,37	4,5		Faible	Non pertinent
		Ba4	1,36	16,7		Faible	Non pertinent
		Fy2	2,99	36,8		Forte	Forte
		SE	0,79	9,7		Bonne	Moyenne
	M5	SE	0,68	4,1	16,3	Bonne	Moyenne
		Fy2	14,01	85,9		Forte	Forte
		Ba4	0,99	6,1		Faible	Non pertinent
		Bf2	0,64	3,9		Faible	Non pertinent
	M6	Fy2	4,57	68,8	6,6	Forte	Forte
		Lt	2,07	31,2		Bonne	Faible
	M7	Fy2	6,22	100,0	6,2	Forte	Forte
Rivière des Fleurs Jaunes	FJ1	PE	3,42	72,7	4,7	Forte	Forte
		zbf2	1,29	27,3		Moyenne	Faible
	FJ2	zbf2	2,66	58,3	4,6	Moyenne	Faible
		PE	0,64	14,0		Forte	Forte
		fBr3	1,17	25,7		Forte	Forte
		Syénites	0,09	1,9		Faible	Non pertinent
	FJ3	Zbr1	0,18	5,0	3,5	Moyenne	Moyenne
		zbf2	3,30	93,2		Moyenne	Faible
		Gabbros	0,06	1,8		Faible	Non pertinent
	FJ4	zbf2	11,43	91,6	12,5	Moyenne	Faible
		Zbr1	1,05	8,4		Moyenne	Moyenne
Ravine Roche à Jacquot	RJ1	PE	1,01	46,3	2,2	Forte	Forte
		zbf2	0,22	9,8		Moyenne	Faible
		Fy2	0,31	14,3		Forte	Forte
		Brèches	0,65	29,5		Forte	Forte
	RJ2	Ba4	2,05	57,6	3,6	Faible	Non pertinent
		zbf2	0,59	16,6		Moyenne	Faible
		Zbr1	0,59	16,7		Moyenne	Moyenne
		PE	0,33	9,1		Forte	Forte
Bras sec	BS1	zbf2	2,14	52,2	4,1	Moyenne	Faible
		PE	1,96	47,8		Forte	Forte



Ravine Blanche	BS2	fBr3	1,58	78,2	2,0	Forte	Forte
		PE	0,44	21,8		Forte	Forte
	RB1	Brèches	0,69	48,2	1,4	Forte	Forte
		Ba4	0,07	4,5		Faible	Non pertinent
		Fy2	0,58	40,5		Forte	Forte
		PE	0,10	6,8		Forte	Forte

Ce tableau permet d'identifier les tronçons les plus propices aux phénomènes de glissements ou d'érosion. Sans surprise, il s'agit des tronçons amont traversant des formations bréchiques (fbr3, Brèches de Grand Ilet, PE) et les tronçons aval érodant les terrasses anciennes (Fy2).

2.5.2 Glissements de terrain

Le cirque de Salazie est particulièrement affecté par les glissements de terrain avec plus de **19% des surfaces** touchées et une densité de glissement de 10.7 glissements par km². De plus, la majorité des glissements sont **actifs** (95%) (Rault et al, 2022).

Cette situation est liée à la géologie, au climat, à la topographie et aux écoulements souterrains.

On distingue principalement deux types de glissements : les **glissements lents de grande ampleur** qui concerne des îlets entiers, les **glissements rapides** en front de glissement lents ayant généralement lieu suite à un événement de précipitations important.

2.5.2.1 Types de glissements

2.5.2.1.1 Glissements de grande ampleur

Les glissements de grande ampleur occupent des surfaces de **plusieurs km²**.

Dans le cirque de Salazie, ils sont généralement composés d'une **formation bréchique** peu cohésive de 50 à 200 m d'épaisseur formée par le démantèlement du massif de Piton des Neiges. Les brèches reposent sur une formation cohésive et imperméable appelée **substratum de glissement**.

Les **vitesses de déplacement sont relativement continues dans le temps** bien qu'**accélérée lors de précipitations intenses**. Sur certains glissements, il semblerait aussi que les ravines majeures et **cours d'eau** puissent influencer la vitesse de déplacement de ces glissements. Ainsi, l'encaissement progressif du lit de la Ravine Roche à Jacquot semble contribuer à une **accélération des vitesses** de déplacement du glissement de Grand Ilet (ETRM, 2021).

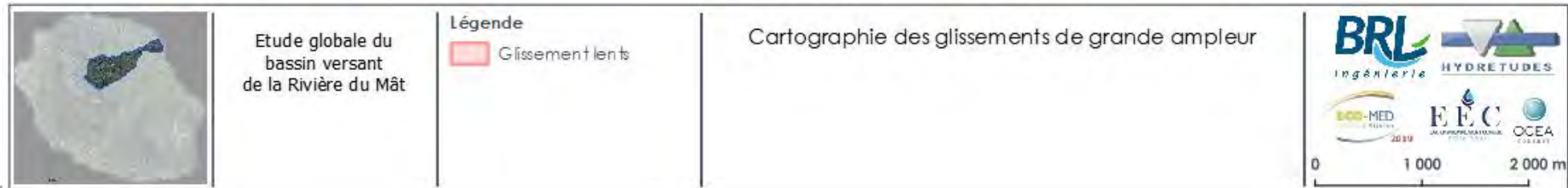
Ce type de glissement est **très actif en bordure de plateau**, les vitesses horizontales et verticales (tassement) y sont maximales. **L'ordre de grandeur des vitesses est de quelques centimètres à un mètre par an (le déplacement horizontal est plus important que le déplacement vertical).**

Les glissements lents occasionnent des dommages aux bâtiments et infrastructures des îlets.



Figure 79 : Limite entre le glissement et le substratum sur le front du glissement de Grand Ilet. Des sources sortent au contact de ses formations durant la saison cyclonique ou après des précipitations. Sous la limite de glissement, les matériaux sont cohérents et cohésifs, au-dessus les matériaux sont non cohérents (source : BRGM)

Les principaux glissements de grande ampleur du cirque de Salazie sont ceux de Grand Ilet, d'Hell-Bourg et d'Ilet à Vidot.



c) Glissement de Grand Ilet

Selon le BRGM, le glissement de Grand Ilet occupe une zone de 2,5 km² avec une pente moyenne de 17% vers le nord. **Il se déplace en direction de la Ravine Roche à Jacquot** à des vitesses horizontales comprises **entre 0,02 et 0,55 m/an**. Les vitesses verticales sont comprises entre 0 et 0,15 m/an. Il est **responsable des glissements rapides observés en front de glissement en rive droite de la Ravine Roche à Jacquot (RJ1 et RJ2)**.

Les matériaux glissés sont des **brèches peu cohésives** (Brèche de Grand Ilet) d'une épaisseur de 50 et 100 m, reposant sur un substratum cohésif et imperméable.

d) Glissement d'Hell Bourg

Le glissement d'Hell bourg occupe une zone de 2,8 km² avec une pente moyenne de 26 % vers le nord. **Il se déplace en direction de la Rivière du Mât (tronçon M2) et de Bras Sec (BS1)** à des vitesses horizontales comprises **entre 0,20 et 1,15 m/an**. Les vitesses verticales sont comprises entre 0,1 et 0,4 cm/an. Il est **responsable des glissements rapides observés en front de glissement en rive droite de la Rivière du Mât (tronçon M2)**.

Les matériaux glissés sont des **brèches peu cohésives altérées** (brèche de Mare à Poule d'Eau) d'une épaisseur de 100 à 200 m.

e) Glissement d'Ilet à Vidot

Le glissement d'Ilet à Vidot occupe une zone de 2,3 km². Il se déplace à la fois vers l'ouest et l'est dans Bras Sec (BS1 et BS2). Le déplacement vers l'est atteint des vitesses horizontales de 2 à 10 cm/an et verticales de 2 à 25 cm/an. Ce glissement est responsable des glissements rapides observés en front de glissement en rive gauche de Bras Sec

Les matériaux glissés sont des brèches peu cohésives altérées (Brèche d'Ilet à Vidot) d'une épaisseur moyenne de 150m.

2.5.2.1.2 Glissements rapides

Des glissements rapides apparaissent **au front des glissements de grande ampleur**, en bordure de plateau. Ils sont heureusement bien plus localisés que les glissements lents, même si leur taille peut atteindre **jusqu'à 20 hectares** (exemple : glissement à Grand Ilet en rive droite de RJ2 suite au cyclone Bejisa de 2014).

En 1980, le **cyclone Hyacinthe** a provoqué plus de 1420 glissements rapides. Ces derniers s'étendent sur des surfaces comprises entre 5 m² et 200 000 m². Ils auraient individuellement produit entre **100 m³ et 555 000 m³ de matériaux** (Rault et al, 2021). **Au total**, les glissements de terrains rapides liés au cyclone Hyacinthe ont ainsi érodé **environ 15.2 millions de m³ de matériaux**.

En 2022, les versants impactés par les glissements rapides sont :

- Les versants rive gauche et droite de la Rivière du Mât sur le tronçon M2 (glissement de Mare Sèche à gauche et d'Hell Bourg à droite).
- Les versants rive gauche et droite de Bras Sec (glissement d'Ilet à Vidot à gauche, glissement d'Hell Bourg à droite).
- Les versants rive gauche et droite de la Rivière des Fleurs Jaunes amont (tronçon FJ1).
- Le versant en rive droite de la Ravine de Roche à Jacquot (glissement de Grand Ilet).
- Le versant rive gauche de la Ravine Blanche (glissement d'Ilet Mathurin).

Les glissements rapides et actifs ont été relevés sur le terrain, puis cartographiés (cf. Figure 86 pour la carte globale et Annexe 6 pour l'atlas plus précis).



Figure 81 : Glissements rapides observés dans le cirque de Salazie (1 : rive droite FJ1, 2 : rive droite M2, 3 : rive droite M2, 4 : rive droite M1)

Les glissements rapides peuvent prendre plusieurs formes : laves torrentielles, déboulés, écroulements (rock slides), glissements de débris (debris slides), avalanches de débris, avalanches rocheuses. Les phénomènes les plus courants sur le cirque de Salazie sont les laves torrentielles, les glissements de débris et les écroulements.

Nous détaillerons ci-dessous seulement trois de ces phénomènes : les laves torrentielles (car c'est le phénomène le plus courant), les déboulés (car c'est un phénomène typique du cirque qui peut apporter des volumes de matériaux massifs) et les avalanches de débris (car elles peuvent apporter des volumes massifs de matériaux au cours d'eau).

a) Laves torrentielles (debris flow)

Les laves torrentielles sont des coulées de débris généralement composées de matériaux très grossiers type blocs et de matériaux fins. Ces coulées saturées ou partiellement saturées se déplacent rapidement et sur des distances importantes. Les laves torrentielles sont particulièrement présentes du côté est de l'Ilet à Vidot (rive gauche du Bras Sec sur BS1 et BS2).

Selon Rault et al (2021), lors du cyclone Hyacinthe, les volumes de matériaux mis en mouvement par les laves torrentielles sont compris entre quelques centaines de m³ et quelques centaines de milliers de m³/glissement.

Les laves torrentielles ne doivent pas être confondues avec les glissements de débris (debris slides). Ces derniers sont des phénomènes beaucoup moins fluides et rapides que les laves. Ils correspondent à des glissements de matériaux sur des versants pentus. Leur cinétique peut être accélérée par les fortes pluies. Ils produisent des volumes beaucoup moins importants que les laves torrentielles (quelques mètres cubes à quelques centaines de mètres cubes).

b) Déboulés

Les déboulés sont des **glissements rapides formant une coulée de boue et créant une ravine suite à des précipitations intenses**. Les facteurs favorisant les déboulés sont **la pente, la non cohésion des matériaux, l'érosion interne des formations et la saturation du sol en eau**. Les ravines de l'Eglise et Nourry à Grand Ilet en sont des exemples exceptionnels. Ces événements ont eu des conséquences désastreuses sur les habitations qui ont littéralement été emportés par la coulée de boue.



Figure 82 : Déboulé, ravine de l'Eglise entre 1978 et 1984

c) Avalanches de débris (debris avalanches)

Les avalanches de débris sont des phénomènes **moins courants** que les laves torrentielles ou les déboulés. Toutefois, elles peuvent mettre en mouvement des **volumes de matériaux très importants de l'ordre du million de mètres cubes**.

Dans le cirque de Salazie, les avalanches de débris concernent généralement les bordures des îlets. Lors de précipitations intenses, la saturation des sols va augmenter la pression interstitielle et entraîner l'effondrement d'une partie du versant.

Deux avalanches de débris majeures ont été recensées à Grand Ilet (Rault *et al.* 2021) : l'un sur l'amont de la Ravine Roche à Jacquot lors du cyclone Hyacinthe (environ 6 millions de m³) et l'autre sur l'aval de la Ravine Roche à Jacquot, un peu avant la confluence avec la Rivière des Fleurs Jaunes, en 2014 lors du cyclone Bejisa (environ 1 million de m³).

L'avalanche la plus récente est encore visible sur le versant en 2022 bien qu'elle commence à se revégétaliser.



Figure 83 : Avalanche de débris en aval de la Ravine Roche à Jacquot lors du cyclone Bejisa (2014) – (Source : Google Earth)

2.5.2.2 Impacts des glissements

Les glissements de terrain impactent fortement l'hydromorphologie de la Rivière du Mât et de ses affluents. Ils peuvent entraîner un ou plusieurs des phénomènes suivants :

- Le déplacement et la réduction de la surface de la bande active
- La mise à disposition d'une quantité importante de matériaux, remobilisables ou non par transport solide
- L'exhaussement de la bande active
- Le changement de style fluvial pour un style en tresses (lié à des apports massifs en matériaux et à une modification de la pente)
- La formation d'une retenue d'eau et de sédiments

2.5.3 Etat de la recharge sédimentaire

Le **fonctionnement dynamique** des cours d'eau est contrôlé par les **processus de production sédimentaire** (mettant en relation des sources sédimentaires et le cours d'eau) et le **transport sédimentaire** (faisant transiter en lit des alluvions intégrés dans le stock alluvial depuis plus ou moins longtemps).

Ces processus en interactions font ainsi évoluer la morphologie des lits fluviaux au gré des crues morphogènes. Il est donc important d'avoir une bonne vision de la recharge sédimentaire pour comprendre ce fonctionnement dynamique.

L'origine de la recharge sédimentaire est diverse, les matériaux entrant dans le stock alluvial proviennent de sources sédimentaires injectant des matériaux nouveaux (versants ou affluents contributeurs) ou remaniées (berges, lit au sens large).

Selon Malavoi et Bravard (2010), il est possible de distinguer les apports externes des apports internes :

- **Les apports externes** (au cours d'eau étudié) viennent des versants (notamment dans les zones de production au sens de Sear & Newson, 1993) et/ou des affluents. Par rapport au cours d'eau étudié ce sont des matériaux « nouveaux » ;
- **Les apports internes** concernent les matériaux provenant directement du cours d'eau, c'est-à-dire matériaux provenant du lit et des berges. Ils correspondent à des alluvions déposées puis remaniées.

On peut alors synthétiser les différents composants de la recharge sédimentaire sous la forme d'un schéma :

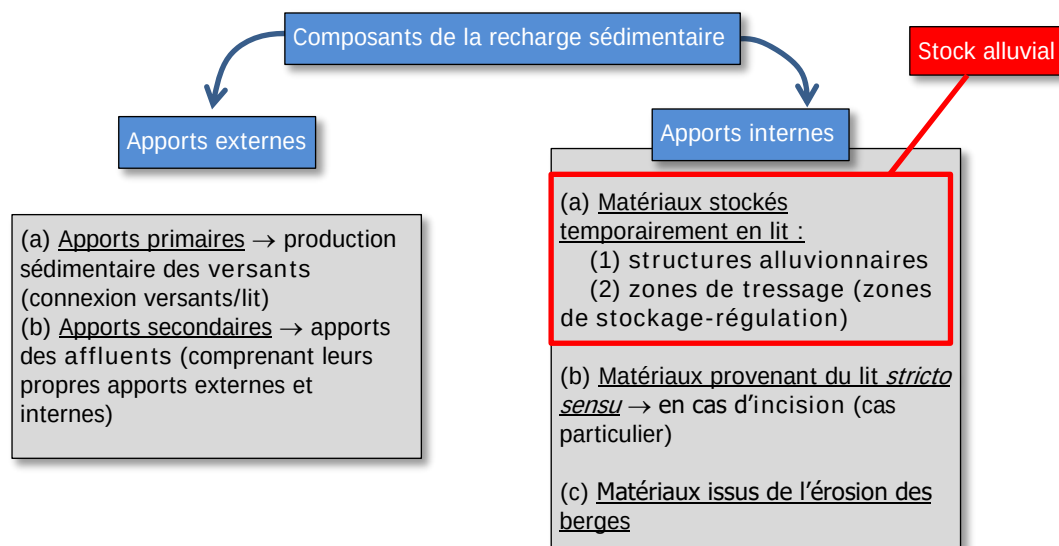


Figure 84 : Composantes de la recharge sédimentaire

L'analyse de l'état de la recharge sédimentaire permettra donc de comprendre le fonctionnement dynamique des cours d'eau du bassin de la Rivière du Mât dans le contexte des forçages anthropiques et hydroclimatiques hérités du passé.

2.5.3.1 Les apports solides externes

2.5.3.1.1 La connexion versant-lit : les glissements de terrain

Sur le bassin de la Rivière du Mât, **la production sédimentaire s'effectue principalement par glissements de terrain et plus précisément grâce aux phénomènes de glissements rapides et déboulés** (cf. partie 2.5.2, p.95). Ces glissements sont concentrés dans le cœur du cirque.

Les glissements rapides et déboulés apparaissent généralement au front des glissements de grande ampleur. Ils affectent principalement les formations bréchiques qui sont particulièrement sensibles à l'érosion.

Sur le bassin, les versants présentant actuellement des glissements rapides sont les suivants :

- Les versants rive gauche et droite de la Rivière du Mât sur le tronçon M2 (glissement d'Hell Bourg) ;
- Les versants rive gauche et droite de Bras Sec (glissement d'Ilet à Vidot à gauche, glissement d'Hell Bourg à droite) ;
- Les versants rive gauche et droite de la Rivière des Fleurs Jaunes amont (tronçon FJ1) ;
- Le versant en rive droite de la Ravine de Roche à Jacquot (glissement de Grand Ilet) ;
- Le versant rive gauche de la Ravine Blanche (glissement d'Ilet Mathurin).

→ *Les glissements rapides observés sur le terrain et sur les vidéos prises en drone ont été cartographiés (cf. Figure 86 pour la carte globale et Annexe 6 pour l'atlas plus précis). Seuls les glissements les plus actifs (les moins végétalisés) ont été recensés.*

103

Trois indicateurs ont été calculés pour caractériser les tronçons concernés par des glissements rapides :

- Les surfaces occupées par les glissements rapides actifs (non végétalisés ou très peu végétalisés) ;
- Le ratio surface de glissement/km de linéaire ;
- Le linéaire de connexion versant lit c'est-à-dire le linéaire de glissement en contact avec le cours d'eau en pied de versant.

Les résultats sont présentés dans le tableau qui suit.

Tableau 5 : Surfaces et linéaires occupées par les glissements rapides en 2022

Tronçons	M1	M2	BS1	BS2*	FJ1	FJ2	RJ1	RJ2	RB1
Surface (hectares)	8,5	21,2	19,9	21,4	29,1	4,4	5,8	30,5	6,5
Ratio surface (hectares/m)	1.8	5.5	4.7	9.6	6.0	0.9	2.6	7.8	4.2
Linéaire pied de glissement (m)**	888	1744	1380	2113	2499	209	316	646	465
Ratio pied de glissement (m/km)	188	453	328	951	515	43	139	165	304
Linéaire pied de glissement actif (m)**	477	1320	274	1227	1207	209	65	646	331
Ratio pied de glissement actif (m/km)	101	343	65	552	249	43	29	165	217

* Les surfaces de glissement de BS2 intègrent la ravine RAV1 qui correspond à un glissement rapide ou à un déboulé alimentant BS2. Le linéaire des surfaces de glissement est calculé au pied des versants de RAV1.

** Le linéaire de pied de glissement correspond à la longueur du glissement en pied de versant. Le linéaire de pied de glissement actif correspond à la longueur du glissement en contact direct avec la bande active du cours d'eau (non séparé par une bande végétalisée).

En 2022, les tronçons les plus affectés par les glissements rapides sont **M2, BS1, BS2, FJ1, RJ2 et RB1**. Parmi ces tronçons, la **production sédimentaire** est particulièrement **efficace sur BS2, M2, FJ1 et RB1**. En effet, en plus de disposer des ratios de surface de glissement les plus élevés, ces tronçons disposent aussi des ratios de pied de glissement actif les plus élevés. Cela signifie que **la connexion versant-lit est particulièrement importante sur ces tronçons**. Les matériaux peuvent transiter directement des versants à la bande active sans être bloqués par la végétation avant d'atteindre le cours d'eau.

De manière assez surprenante, **en 2022, le tronçon RJ1** (Ravine Roche à Jacquot entre le pont de Mare à Martin et la cascade Micheline) **ne fait ni partie des tronçons les plus affectés par les glissements rapides ni des tronçons dont la connexion-versant lit est la plus élevée**.

Cela s'explique par le fait qu'en 2022, la majeure partie des glissements sur ce tronçon sont **végétalisés**, ils ne sont donc plus considérés comme actifs. Les événements du printemps 2022 ne semblent pas avoir réactivé les glissements de façon significative. Par ailleurs, **les aménagements récents réalisés sur ce tronçon ont contribué à éloigner le cours d'eau du pied du glissement**. Ce dernier est donc moins soumis à l'érosion directe du cours d'eau qui peut être source de déstabilisation.



Figure 85 : Progression de la végétation sur le glissement en rive droite de RJ1

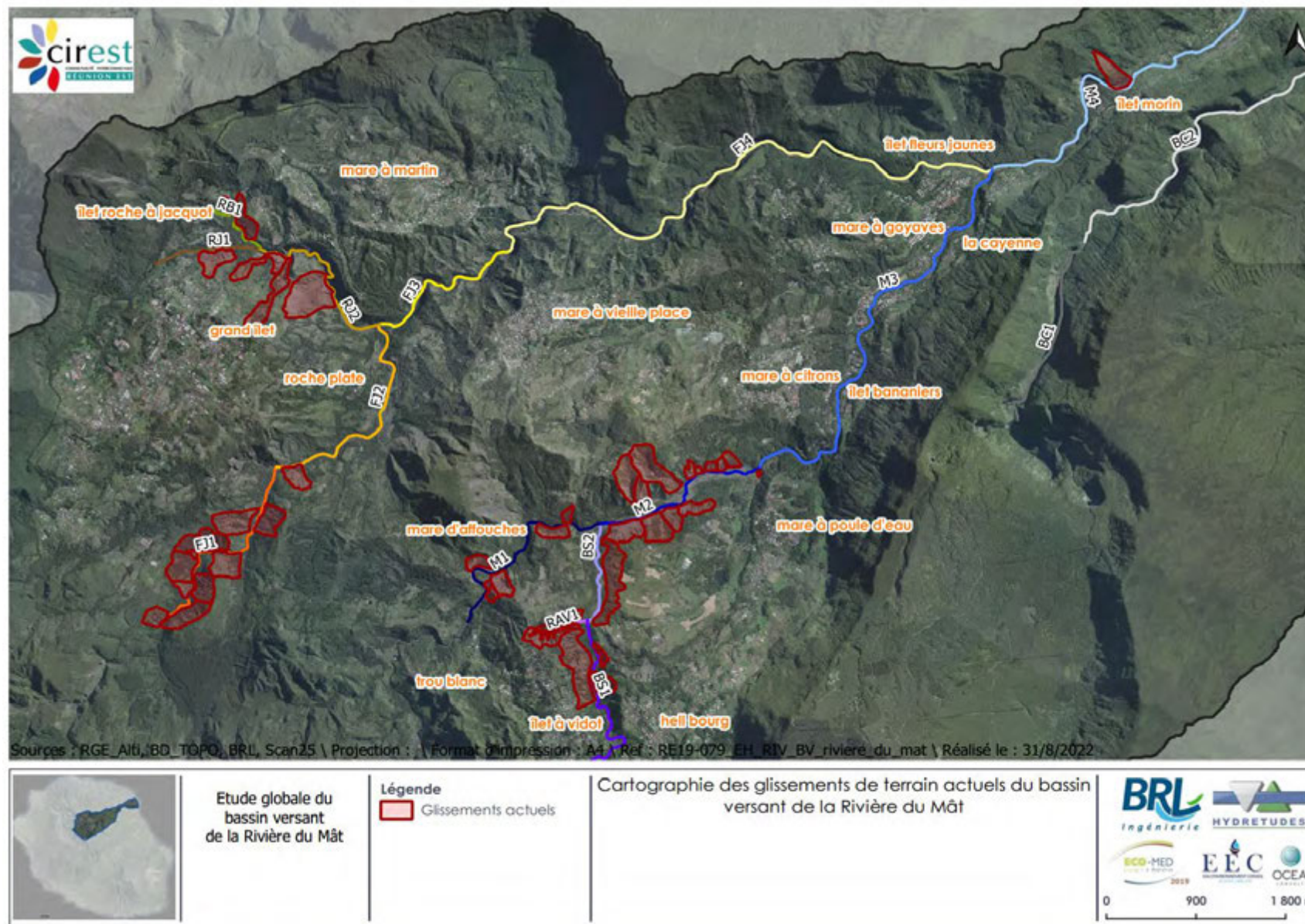


Figure 86 : Glissements de terrains sur le bassin de la Rivière du Mât en 2022

2.5.3.1.2 La contribution sédimentaire des affluents

Les apports externes de matériaux concernent notamment les matériaux provenant des affluents. On préférera parler de **contributeurs sédimentaires**, dans la mesure où certains de ces cours d'eau **fournissent une charge solide au cours d'eau principal**. Ils contribuent ainsi à renforcer le budget sédimentaire des cours d'eau principaux (la Rivière du Mât, les Fleurs Jaunes, ...) grâce à leurs apports.

L'analyse des apports externes liés aux affluents vise à **évaluer les affluents qui représenteraient des contributeurs sédimentaires potentiels importants en termes d'apports de matériaux** au cours principal.

La méthodologie utilisée repose principalement sur l'**analyse experte des confluences** (cône de déjection, déport du cours principal (émissaire sédimentaire) à la confluence, présence d'atterrissements importants en aval de la confluence, ...), de la présence d'une bande active dans le cours d'eau et/ou d'atterrissements en lit et du couplage latéral ou connexion versant/lit dans le bassin. Ces éléments sont effectués à partir des investigations de terrain, des cartes géologiques et des photographies aériennes. Ces différents éléments sont synthétisés dans le tableau suivant :

Tableau 6 : Items caractérisant les apports sédimentaires d'un affluent

ELEMENTS PERMETTANT DE DETECTER DES APPORTS SEDIMENTAIRES IMPORTANTS PAR AFFLUENT		
Localisation	Items	Méthode
Bassin	Connexion versants/lit	Analyse des photos aériennes (recherche d'éboulis connectés au lit et de la lithologie, pertinence sédimentaire de la roche ou formation superficielle)
	Bande active et atterrissements	Présence d'une bande active et/ou d'atterrissements témoignant d'une activité sédimentaire importante
Confluence	Cône de déjection	Caractérisent d'une diminution de la charge (paléo-cônes) ou d'apports plus ou moins importants (cônes actifs)
Emissaire	Impact sur le lit de l'émissaire	Déport du lit de l'émissaire suite aux apports ou au contraire érosion par l'émissaire d'un paléo-cône
	Traces d'apport	Elargissement de la bande active de l'émissaire ou présence d'apports bien visibles sous la forme d'atterrissements (plus nombreux et/ou volumineux qu'en amont de la confluence)

Les résultats des investigations réalisées sont présentés ci-dessous et détaillés dans le tableau ci-après :

Figure 87 : Légende des tableaux suivants

Apports en matériaux	Lithologie	Intérêt sédimentaire
Alimentation sédimentaire importante Alimentation sédimentaire non négligeable Alimentation sédimentaire réduite Alimentation sédimentaire négligeable	Lithologie adaptée à fournir une charge grossière Lithologie fournissant une charge de taille moyenne Lithologie fournissant une charge de faible taille Lithologie inadaptée à la fourniture de la charge grossière	Affluent contribuant à la charge solide Affluent contribuant faiblement à la charge solide Affluent contribuant très faiblement à la charge solide Affluent ne contribuant pas à la charge solide

a) Analyse des affluents de Fleurs Jaunes

Tableau 7 : Analyse des apports sédimentaires pour Fleurs Jaunes par les affluents

ANALYSE EXPERTE DES APPORTS SEDIMENTAIRES POUR FLEURS JAUNES PAR LES AFFLUENTS											
Tronçon	Cours d'eau	Rive	Bassin de l'affluent			Confluence	Impacts sur l'émissaire			Lithologie (ne concerne que les zones concernées)	Résultat
			Connexion versants / lit	Bande active	Atterrissements	Cône de déjection	Impact sur le lit	Elargissement bande active	Apports		
FJ 1-2	Ravine Camp Pierrot	RG	Limitée : quelques zones érodées en partie basse, le bassin reste très végétalisé et limite la connexion versants / lit	Non, forte rétraction	Non	Non	Non	Non		PE : Lahars, éboulis, tufs et eluvions zbf2 : Coulées basaltiques à olivine chloritisées et zéolitisées, Phase 2 Piton des Neiges	
	Ravine Camp d'Henri	RD	Faible : bassin très végétalisé	Non, forte rétraction	Non	Non	Non	Non		PE : Lahars, éboulis, tufs et eluvions	
FJ 3	Ravine Mathurin	RG	Faible : bassin très végétalisé ou urbanisé	Non, rétraction visible	Non	Non	Non	Non	Profil en long marqué par une chute depuis le rempart (~60m de hauteur) environ 100 m en amont de la confluence	PE : Lahars, éboulis, tufs et eluvions zbf2 : Coulées basaltiques à olivine chloritisées et zéolitisées, Phase 2 Piton des Neiges	
FJ 4	Ravine Bé Cabot	RG	Faible : bassin très végétalisé ou urbanisé	Oui en amont (~8 m), forte rétraction	Non	Non	Non	Non	Profil en long marqué par une chute depuis le rempart (~100m de hauteur) environ 150 m en amont de la confluence	PE : Lahars, éboulis, tufs et eluvions zbf2 : Coulées basaltiques à olivine chloritisées et zéolitisées, Phase 2 Piton des Neiges	

107

Tronçon	Cours d'eau	Rive	Bassin de l'affluent			Confluence	Impacts sur l'émissaire			Lithologie (ne concerne que les zones concernées)	Résultat
			Connexion versants / lit	Bande active	Atterrissements	Cône de déjection	Impact sur le lit	Elargissement bande active	Apports		
FJ 4	Ravine Sèche	RG	Connexion versants / lit à proximité de la confluence, faible en amont : bassin très végétalisé	Oui en partie basse (~8 m), forte rétraction	Non	Non	Non	Non	Profil très pentu environ 200m en amont de la confluence (~100m de dénivelé) marqué par plusieurs chutes	PE : Lahars, éboulis, tufs et eluvions zbf2 : Coulées basaltiques à olivine chloritisées et zéolitisées, Phase 2 Piton des Neiges	
	Ravine Combacal	RD	Faible : bassin très végétalisé, cultures en amont de la confluence, arrivée en chute en RD de Fleurs Jaunes	Non, lit très végétalisé	Non	Non	Non	Non	Profil en long marqué par la chute depuis le rempart (~80m de hauteur) à la confluence	PE : Lahars, éboulis, tufs et eluvions zbf2 : Coulées basaltiques à olivine chloritisées et zéolitisées, Phase 2 Piton des Neiges	
	Ravine Marceline	RD	Faible : bassin très végétalisé, arrivée en chute en RD de Fleurs Jaunes	Non, lit très végétalisé	Non	Non	Non	Non	Profil en long marqué par la chute depuis le rempart (~150m de hauteur) à la confluence	PE : Lahars, éboulis, tufs et eluvions zbf2 : Coulées basaltiques à olivine chloritisées et zéolitisées, Phase 2 Piton des Neiges	

Les affluents se sont fortement taris au cours du XXème siècle et ne semblent quasiment plus apporter de matériaux à la rivière de Fleurs Jaunes. En effet, **les sous-bassins versants sont aujourd'hui fortement végétalisés**, les bandes actives se sont fermées et végétalisées, comme l'illustre ci-dessous les prises de vues aériennes de la Ravine Camp Pierrot.

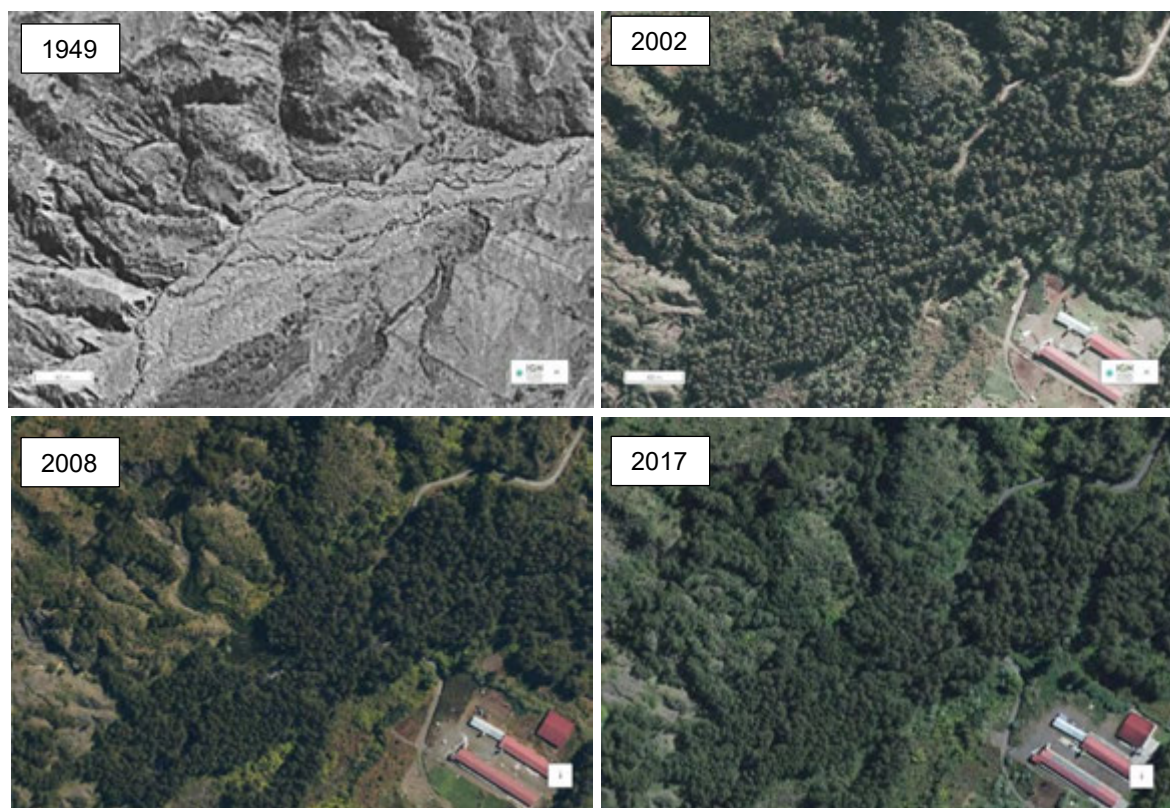


Figure 88 : Evolution de la bande active de la ravine Camp Pierrot entre 1948 et 2017 (source : Géoportail)

Les connexions versants / lit sont quasi-inexistantes (bassins très végétalisés ou urbanisés). **Les affluents ne semblent pas être des contributeurs sédimentaires significatifs** (absence de cône de déjection, bandes actives très étroites et végétalisées).

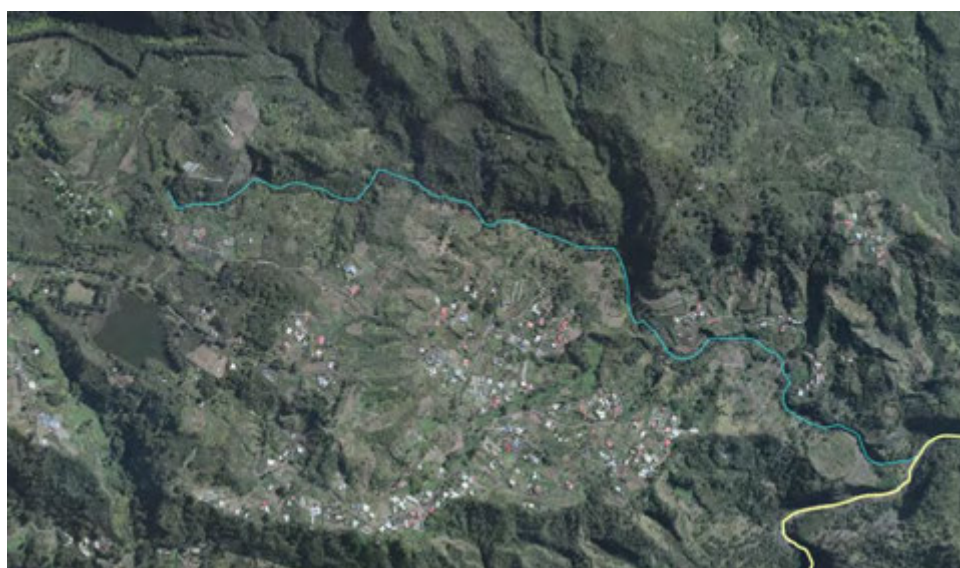


Figure 89 : Exemple de bassin versant urbanisé et très végétalisé de la ravine Bé Cabot



De plus, plusieurs affluents sont caractérisés par une **arrivée en chute** dans la rivière des Fleurs Jaunes, ou un **profil en long très accidenté** en amont immédiat de la confluence, **limitant très fortement les apports sédimentaires**. Il s'agit des ravines Mathurin, Bé Cabot, Combacal et Marceline.



Figure 90 : Confluences des ravines Bé Cabot et Combacal avec la rivière des Fleurs Jaunes

La **ravine Camp Pierrot** présente **quelques zones érodées en partie basse**. Néanmoins, les connexions versants / lit sont limitées par la végétation importante, et ces zones actives sont peu intéressantes car localisées dans les coulées basaltiques.

Le seul affluent présentant des **zones de connexion versants / lit pertinentes** est la **ravine Sèche**. Ce secteur est **toutefois très limité en termes de surfaces**. Il ne semble pas être un **contributeur sédimentaire significatif** de la rivière des Fleurs Jaunes.

b) Analyse des affluents de Bras Sec

Exceptionnellement dans le cas de l'analyse des affluents, nous avons étudié de plus près la contribution sédimentaire du tronçon amont de BS1 qui n'est pas un affluent de BS2. Actuellement, les apports solides de BS2 proviennent principalement de RAV1, une ravine de rive gauche. À la jonction entre BS1 et BS2.

Tableau 8 : Analyse des apports sédimentaires pour Bras Sec par les affluents

ANALYSE EXPERTE DES APPORTS SEDIMENTAIRES POUR BRAS SEC PAR LES AFFLUENTS											
Tronçon	Cours d'eau	Rive	Bassin de l'affluent			Confluence	Impacts sur l'émissaire			Lithologie (ne concerne que les zones concernées)	Résultat
			Connexion versants / lit	Bande active	Atterrissements	Cône de déjection	Impact sur le lit	Elargissement bande active	Apports		
BS 1	BS 1	RD	2 zones de production importante en RG et RD, mais la végétation limite la connexion versants / lit Faible connexion en amont : bassin très végétalisé	Oui en partie basse (entre 10 et 20 m), très forte rétraction	Oui, lié en grande majorité à RAV 1	Non	Non	Non		PE : Lahars, éboulis, tufs et eluvions zbf2 : Coulées basaltiques à olivine chloritisées et zéolitisées, Phase 2 Piton des Neiges Gabbros	
	Bras d'Amaleas	RD	Faible : bassin très végétalisé ou urbanisé	Non, lit très végétalisé	Non	Non	Non	Non		PE : Lahars, éboulis, tufs et eluvions	

La **partie amont du bassin** (Bras d'Amales et amont du tronçon BS1) est **très végétalisée**. Les photographies aériennes historiques illustrent bien la forte rétraction de la bande active, qui n'est aujourd'hui quasiment plus visible. En 2021, les **connexions versants / lit y sont inexistantes**.

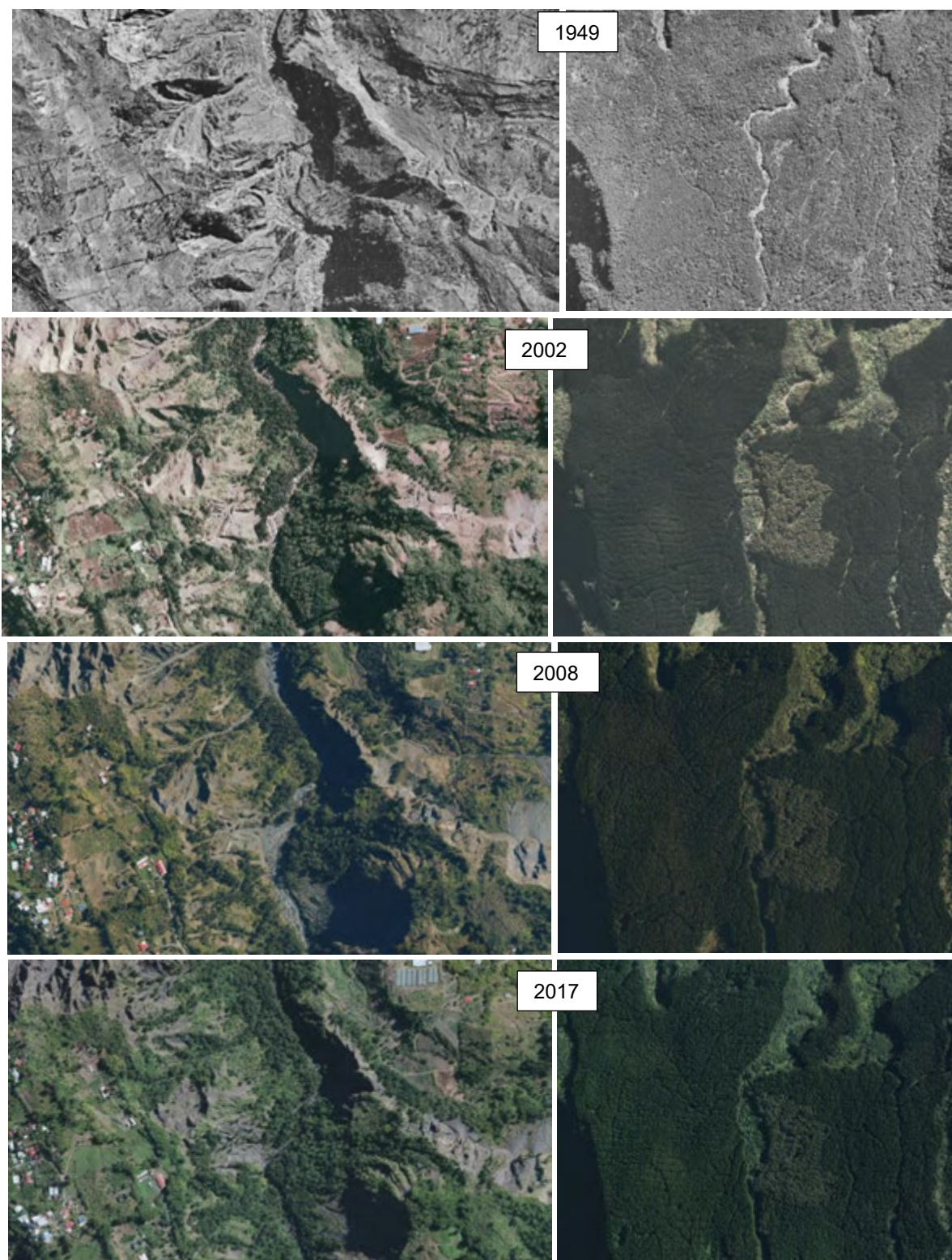


Figure 91 : Evolution de la bande active du tronçon BS1 de Bras Sec entre 1948 et 2017 (source : Géoportail)

La **partie basse du tronçon BS1** (en aval de la confluence avec le Bras d'Amales) est également **végétalisée** aujourd'hui. Néanmoins, il faut souligner qu'il était **beaucoup plus actif par le passé** (présence de glissements, bande active large, ...). Aujourd'hui, les zones de production sont présentes mais les **connexions versants / lit sont limitées par la végétation** qui recouvre la majeure partie des glissements et qui les déconnecte du cours d'eau (bande de végétation en pied de versant).



Figure 92 : Zones d'érosion sur le tronçon BS1 de Bras Sec

Sur BS1, la nature particulièrement érodable des matériaux n'exclue pas une réactivation des versant lors d'un évènement hydrologique exceptionnel. Le tronçon BS1 pourrait dans ce cas redevenir un contributeur sédimentaire significatif.

c) Affluents de la Rivière du Mât

Tableau 9 : Analyse des apports sédimentaires pour la Rivière du Mât par les affluents

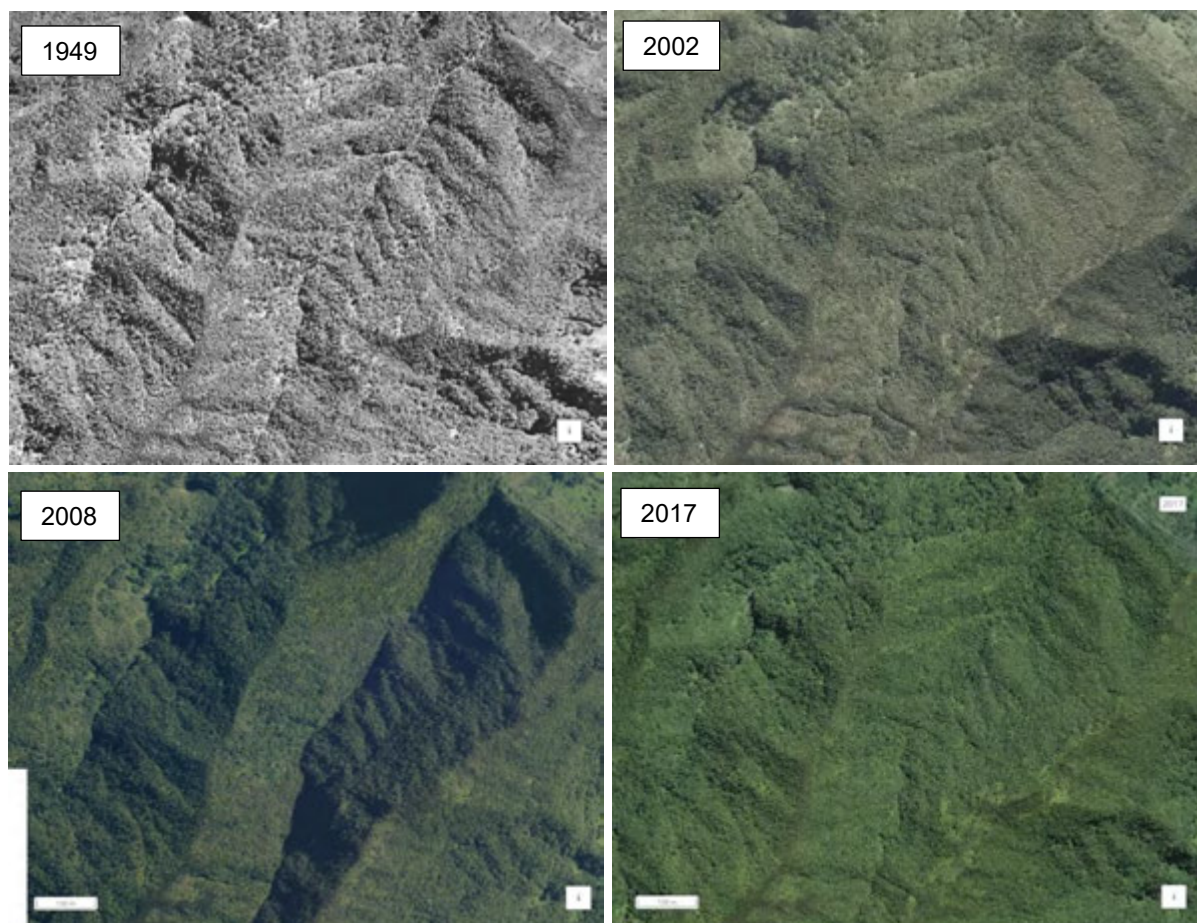
ANALYSE EXPERTE DES APPORTS SEDIMENTAIRES POUR LA RIVIERE DU MAT PAR LES AFFLUENTS											
Tronçon	Cours d'eau	Rive	Bassin de l'affluent			Confluence	Impacts sur l'émissaire			Lithologie (ne concerne que les zones concernées)	Résultat
			Connexion versants / lit	Bande active	Atterrissements	Cône de déjection	Impact sur le lit	Elargissement bande active	Apports		
M1	Bras Marron	RD	2 zones érodées de sur ravines en RD, mais la végétation limite la connexion versants / lit	Non, lit très végétalisé	Non	Non	Non	Non		PE : Lahars, éboulis, tufs et eluvions zbf2 : Coulées basaltiques à olivine chloritisées et zéolitisées, Phase 2 Piton des Neiges	
	Ravine Olivette	RG	Zones érodées importantes, mais la végétation limite la connexion versants / lit	Non, forte rétraction	Non	Non	Non	Non		PE : Lahars, éboulis, tufs et eluvions fBr3 : Formations pyroclastiques, phase 3 Piton des Neiges	
	Ravine Piton d'Anchain	RG	Zones de productions en RD, dans les pentes du Piton d'Anchain	Non	Non	Non	Non	Non		fBr3 : Formations pyroclastiques, phase 3 Piton des Neiges	
M3	Bras des Demoiselles	RD	Faible : bassin très végétalisé ou urbanisé	Non, lit très végétalisé	Non	Non	Non	Non	Profil en long marqué par la chute depuis le rempart (~30m de hauteur) à la confluence	PE : Lahars, éboulis, tufs et eluvions Zbr1 : Agglomérats, brèches chloritisées et zéolitisées, phase 1 Piton des Neiges zbf2 : Coulées basaltiques à olivine chloritisées et zéolitisées, Phase 2 Piton des Neiges fBa3 : Coulées basaltiques à feldspath, Phase 3 Piton des Neiges T3 : Coulées trachytiques du plateau de Bélouve	



Tronçon	Cours d'eau	Rive	Bassin de l'affluent			Confluence	Impacts sur l'émissaire			Lithologie (ne concerne que les zones concernées)	Résultat
			Connexion versants / lit	Bande active	Atterrissements		Impact sur le lit	Elargissement bande active	Apports		
M3	Ravine Grosse Roche	RG	Faible : bassin très végétalisé ou urbanisé	Non, lit très végétalisé	Non	Non	Non	Non		PE : Lahars, éboulis, tufs et eluvions	
										zbf2 : Coulées basaltiques à olivine chloritisées et zéolitisées, Phase 2 Piton des Neiges	
	Ravine Pavée	RD	Faible : bassin très végétalisé ou urbanisé, arrivée en chute en RD de la Rivière du Mât	Non, lit très végétalisé	Non	Non	Non	Non	Profil en long très pentu en amont, marqué par la chute depuis le rempart (~30m de hauteur) à la confluence	PE : Lahars, éboulis, tufs et eluvions	
										Ba4 : Coulées basaltiques et andésiques phase 4 Piton des Neiges fBr3 : Formations pyroclastiques, phase 3 Piton des Neiges	
M5	Ravine Gaye	RD	Faible : bassin très végétalisé, présence de chutes environ 400m en amont de la confluence	Non, lit très végétalisé	Non	Non	Non	Non	Profil en long très pentu, marqué par plusieurs chutes depuis le rempart environ 400m en amont de la confluence	Fy2 : Alluvions anciennes indifférenciées	
										Bf2 : Coulées basaltiques à olivine phase 2 Piton des Neiges	
										SE : Coulées de solifluxion et éboulis	
	Ravine Mangin	RD	Faible : bassin très végétalisé, arrivée en chute en RD de la Rivière du Mât	Non, lit très végétalisé	Non	Non	Non	Non	Profil en long marqué par la chute depuis le rempart (~400m de hauteur) à la confluence	Bf2 : Coulées basaltiques à olivine phase 2 Piton des Neiges	
										SE : Coulées de solifluxion et éboulis	
	Bras Citronnier	RG	Faible : berges végétalisées et bassins cultivés	Non	Non	Non	Non	Non	Profil en long marqué par la chute depuis le rempart (~150m de hauteur) environ 300m en amont de la confluence	Fy2 : Alluvions anciennes indifférenciées	
										Bf2 : Coulées basaltiques à olivine phase 2 Piton des Neiges	

Les **affluents des tronçons M3 et M5 de la Rivière du Mât se sont fortement taris** au cours du XXème siècle et **ne semblent quasiment plus apporter de matériaux** à la rivière. En effet, les sous-bassins versants sont aujourd'hui fortement **végétalisés**, les bandes actives se sont fermées et végétalisées, comme l'illustre ci-dessous les prises de vues aériennes de la Ravine Mangin.

Figure 93 : Evolution de la bande active de la ravine Mangin entre 1948 et 2017 (source : Géoportail)



Comme l'illustre la figure ci-dessus, les connexions versants / lit sont quasi-inexistantes (bassins très végétalisés ou urbanisés). **Ces affluents ne semblent pas être des contributeurs sédimentaires significatifs** (absence de cône de déjection, bandes actives très étroites et végétalisées).

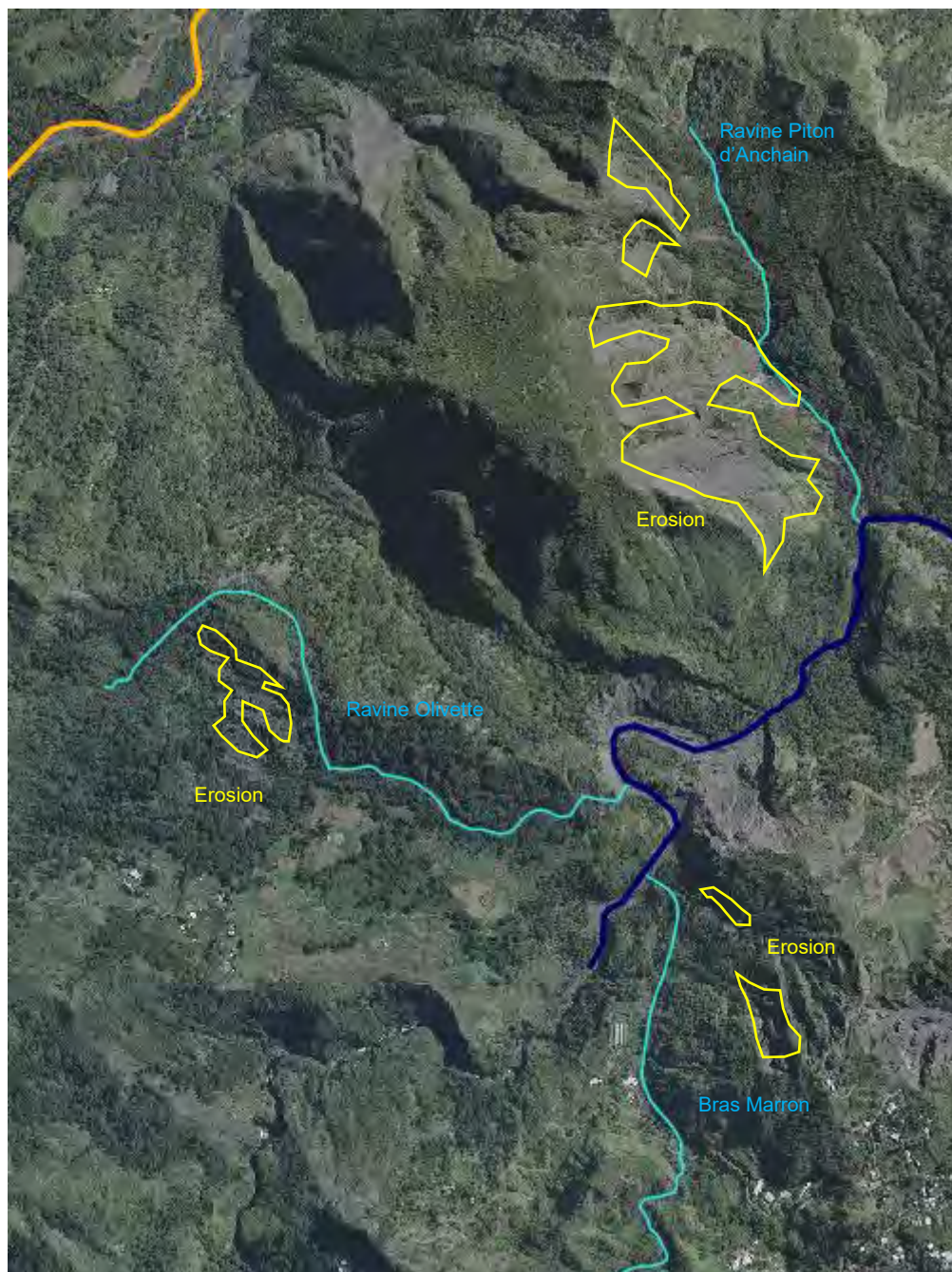
De plus, plusieurs affluents sont caractérisés par une **arrivée en chute** dans la rivière du Mât, ou un **profil en long très accidenté** en amont immédiat de la confluence, limitant très fortement les apports sédimentaires. Il s'agit du Bras des Demoiselles, des ravines Pavée, Gaye, Mangin et du Bras Citronnier.

Les affluents du tronçon M1 sont légèrement plus intéressants bien que les apports sédimentaires restent limités :

- Le Bras Marron présente des zones d'érosion intéressantes en rive droite. Néanmoins, ces secteurs sont très limités en termes de surfaces.
- La ravine Olivette présente une zone d'érosion intéressante en rive droite. La connexion versants / lit est toutefois limitée par une végétation dense.

- La ravine Piton d'Anchain présente plusieurs zones de production importantes en rive droite, néanmoins, la connexion versants / lit est réduite par une végétation dense notamment présente en pied de glissement.

Figure 94 Zones d'érosion sur les affluents du tronçon M1 de la rivière du Mât



Ainsi, ces trois affluents du tronçon M1 semblent contribuer faiblement à la charge solide de la rivière du Mât.



Figure 95 : Confluence entre la Ravine du Piton d'Anchain et la Rivière du Mât



Conclusion : Contribution des affluents

Globalement, **la contribution sédimentaire des affluents s'est péjorée au fil du temps**. Ainsi, on remarque que la plupart des contributeurs sédimentaires encore relativement actifs lors du milieu du XXème siècle (présence d'une bande active large, glissements, ...) ont fortement diminué leurs apports sédimentaires, voire se sont quasiment taris. **Les bandes actives se sont rétractées et les bassins et les zones d'érosion se sont végétalisées.**

Aussi, on peut constater que les zones de production des différents affluents sont peu nombreuses, de taille réduite et généralement boisées. Ainsi, leur connexion versants / lit reste limité.

L'ensemble de ces éléments tend à montrer que le rôle de contributeur sédimentaire est souvent limité (Tronçon BS1, Ravine Piton d'Anchain, Ravine Olivette, Bras Marron), voire nul.

2.5.3.2 Les apports solides internes

L'évaluation de l'état de la recharge sédimentaire prend également en compte les apports solides internes, c'est-à-dire les matériaux qui sont produits « directement » par les cours d'eau.

Il s'agit ainsi principalement des matériaux issus de l'érosion latérale des berges ainsi que des matériaux stockés en lit mineur (structures alluvionnaires ou zones tressantes de dépôt-régulation).

2.5.3.2.1 Les érosions de berge

Les érosions de berges **traduisent l'activité morphogène et la mobilité latérale d'un cours d'eau**. Elles se concentrent particulièrement dans les extrados de méandre et sont alors des signes de migration de ces derniers avec dépôts de matériaux dans l'intrados.

Suivant la nature de l'encaissant et la capacité de remobilisation des matériaux du lit ou encore l'incision du lit plusieurs types d'érosion sont possibles (érosion directe de la berge, sapement, glissement, phénomènes de boulangerie...). Sur le bassin la majeure partie des érosions de berge semblent se faire par **érosion directe de la berge ou par sapement du pied de berge suivi d'un effondrement de la partie haute**. Dans le second cas, les matériaux semblent directement remaniés par la Rivière du Mât car aucun bourrelet de pied de berge n'a été observé.



Figure 96 : Effondrement de berge ayant entraîné un amas de matériaux non encore remaniés probablement car l'effondrement a eu lieu hors période de crue (M5)

Sur le bassin, **les érosions de berge concernent les tronçons aval de la Rivière du Mât à partir du lieu-dit de l'Escalier et jusqu'à l'océan**. En effet, à partir de ce secteur le cours d'eau est moins contraint par la géologie et la diminution de la pente lui permet de commencer à méandrer.

A partir du pont de l'Escalier, la Rivière du Mât évolue dans des **alluvions actuelles et anciennes**. La **hauteur des berges varie entre 1 et 30 m**. Ces terrasses sont constituées de matériaux alluvionnaires plus ou moins cohésifs entre eux et dont la **granulométrie est étendue**.

Il est nécessaire de différencier les formations alluvionnaires anciennes et actuelles. Les formations anciennes forment des terrasses de plus de 10 m au début du lit actuel. Les matériaux les composant semblent plus compactés et cohésifs. Leur taille est variable : grains allant de moins d'un millimètre à plusieurs dizaines de centimètres, présence de quelques blocs ponctuellement. Une certaine organisation (granoclassement) est généralement visible. L'absence de bourrelet de matériaux en pied d'érosion indique un transport direct des volumes érodés. Les plus gros blocs sont cependant susceptibles de se déposer en pied de berge ou légèrement en aval.



Figure 97 : Erosion en aval du pont de la RN2 (M6) avec granoclassement des matériaux

Lors de la visite de terrain, le linéaire de berges érodées a été relevé. Seules les berges actives sont considérées (dont la surface d'érosion n'est pas végétalisée). Les tronçons **M5, M6 et M7 sont les plus affectés**. Le tronçon **M4 est moins impacté** car il est encore localement contraint par des **formations peu érodables** (cf. Tableau 4)

Tableau 10 : Linéaires d'érosion de berge

Rivière	Tronçons	Linéaire d'érosion (m)	% de berge érodé
Rivière du Mât	M4	107	1,3
	M5	8206	48,5
	M6	4444	65,4
	M7	2793	44,0

Sur la partie aval de M7 (entre l'amont de la carrière et l'océan), nous n'avons pas recensé de phénomènes d'érosion à proprement parler. En effet, dans ce secteur des phénomènes d'érosion sont présent mais ils concernent principalement les structures alluvionnaires en lit (alluvions récentes) et non les berges encadrant le cône alluvial.



Figure 98 : Erosions des terrasses alluvionnaires anciennes (1 : rive gauche tronçon M6 aval ; 2 : rive droite tronçon M6 ; 3 : rive droite tronçon M6 ; 4 : rive droite tronçon M5, sapement de pied de berge bien visible (Ilet Payet))

☞ Les planches cartographiques des érosions sont présentées dans l'atlas cartographique.

Lors de crues importantes, le recul de berge peut atteindre plusieurs dizaines de mètres dans certains secteurs, élargissant et déportant la bande active du cours d'eau. Ce phénomène de recul important de la berge a pu être observé en plusieurs points de la Rivière du Mât aval, principalement dans les zones d'extrados de méandre.

Les zones d'érosions de terrasses anciennes ont été relevées sur le terrain.

Au total, 24 grandes zones d'érosions actives (non végétalisées) ont été identifiées. Parmi elles, **seulement 10 érosions ont entraîné un recul significatif de la berge**. Les berges n'ayant pas entraîné de recul significatif sont généralement situés dans des secteurs rectilignes, leur évolution peut également être limitée par la présence d'ouvrages longitudinaux (corsetages, remblais routiers) ou par les spécificités géologiques (affleurement de roche mère en pied de berge protégeant des phénomènes de sapement de berge).

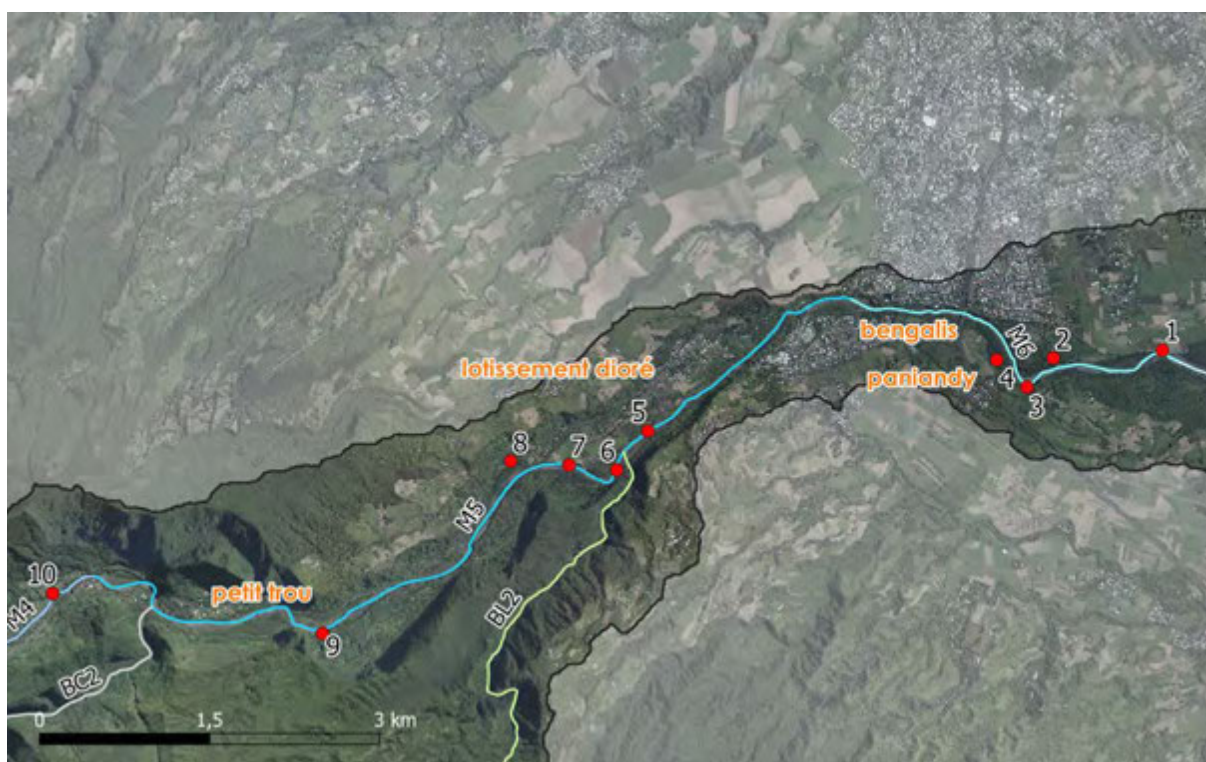


Figure 99 : Localisations des zones d'érosions de terrasses anciennes ayant entraîné un recul significatif de la berge

Sur les 10 érosions présentant un recul significatif de la berge, les volumes érodés et les vitesses de recul ont été évaluées. Les périodes d'érosion ont été estimées à partir des orthophotographies anciennes et de la liste des cyclones et crues majeures. Du fait de l'irrégularité des levés orthophotos les périodes sont parfois sur ou sous estimées.

Tableau 11 : Caractéristiques des érosions les plus actives

Erosion	Surface de terrain érodée depuis 1950 (m ²)	Hauteur (m)	Volume (m ³)	Recul linéaire maximal (m)	Vitesse recul moyennée sur 72 ans [1950-2022] (m/an)	Période de recul de berge
1	39 218	17	666 706	140	1,9	1952-2022
2	2 653	11	29 183	40	0,6	2002-2008
3	41 325	17	702 525	180	2,5	1952-1966 puis 1989-2008
4	32 232	17	547 944	125	1,7	1966 puis 1989-2003
5	12 115	12	145 380	42	0,6	1952-1973 puis 1989 puis 2003-2017
6	6 690	13	86 970	55	0,8	1952-1978 puis 2002-2008
7	8 759	12	105 108	35	0,5	1952-1984
8	11 760	15	176 400	75	1,0	1952-1961 puis 1966-1973 puis 2003-2008
9	11 870	30	356 100	60	0,8	1966 puis 1989-2008
10	3 170	30	95 100	35	0,5	1952-1966 puis 1984-1989 puis 2017

Si les vitesses d'érosion sur 72 ans paraissent limitée (entre 0.5 et 2 m par an), il faut garder en tête que **ces reculs de berge se font par à coup lors des évènements de crue**. La berge peut ainsi reculer de **plusieurs mètres voire dizaines de mètres en quelques heures**.

Au total, les **érosions** présentées ci-dessus ont permis d'apporter **2.9 Mm³ de matériaux au cours d'eau entre 1950 et aujourd'hui**. Lissé sur 72 ans, cela représente **40 436 m³ par an⁷**.

A l'échelle des volumes de matériaux qui peuvent être fournis par les glissements de terrain en amont du bassin (plusieurs millions de mètres cubes de matériaux), ces apports paraissent relativement faibles.

Toutefois, **ces apports latéraux restent indispensables** au bon fonctionnement du cours d'eau. Ils peuvent contribuer à **limiter l'incision de façon significative**. En effet, entre 2003 et 2017, les érosions de berges ont apporté 345 300 m³ de matériaux au cours d'eau dont 26 600 m³ après 2008. Entre 2007 et 2017, le bilan sédimentaire réel du tronçon M7 indique un déficit sédimentaire de l'ordre de 54 000 m³. Les apports par érosion de berge sont actuellement du **même ordre de grandeur que le déficit sédimentaire observé sur M7**.

La possibilité de mobilité latérale du cours d'eau et par conséquent de recharge sédimentaire doit donc être maintenue sur les tronçons M4 à M7 car ces apports limitent significativement l'incision de la Rivière du Mât.

⁷ En réalité, les phénomènes de recul de berge sont brutaux et ont lieu au cours d'une ou quelques crues. Il est donc difficile de prévoir avec certitudes les apports latéraux liés aux érosions de berges.



Conclusion : Recharge par érosion de berge

Sur le bassin, les érosions de berge se concentrent dans la partie aval de la Rivière du Mât (à partir du pont de l'Escalier), lorsque les contraintes latérales et la pente diminuent. Elles se forment dans les alluvions anciennes ou actuelles de la Rivière du Mât (granulométrie étendue).

Ces érosions se font principalement par **érosion directe de la berge ou par sapement du pied de berge suivi d'un effondrement de la partie haute**. Les matériaux semblent directement remaniés par le cours d'eau car aucun dépôt n'est présent en pied de berge mis à part quelques gros blocs.

Au total, 24 grandes zones d'érosion ont été identifiées. Cela représente un linéaire total de 15 550 m. Parmi ces érosions, **10 zones ont subi un recul de berge significatif** entre 1950 et aujourd'hui (recul compris entre **35 m et 180 m**). Ces zones de recul important sont situées dans les extrados de méandre ou de sinuosité.

A noter que le recul des berges a généralement lieu de manière brutale lors d'un ou quelques épisodes de crues.

Les 10 zones d'érosion les plus actives (recul de berge) ont fourni au cours d'eau **2.9 Mm³ de matériaux entre 1950 et 2022**. Lissé sur 72 ans, cela représente **40 436 m³ par an**.

Bien que les volumes fournis paraissent négligeables par rapport aux apports des glissements amont, ces matériaux peuvent contribuer significativement à **limiter l'incision en aval du bassin**. **La possibilité de mobilité latérale du cours d'eau et par conséquent de recharge sédimentaire doit donc être maintenue sur les tronçons M4 à M7.**

2.5.3.2.2 Le stock alluvial

Le **stock alluvial** d'un cours d'eau est composé de **structures alluvionnaires** de diverses natures (atterrissements, terrasses, cônes de déjection), déposées par le cours d'eau au gré des crues, des réajustements morphologiques qu'elles induisent et donc de la construction du lit.

La **mobilité des structures alluvionnaires** est contrôlée par le **niveau de végétation**, la **granulométrie** et la **fréquence des crues**. Plus la structure alluvionnaire est végétalisée moins-elle susceptible d'être remobilisée par transport solide.

La morphologie variée de la **Rivière du Mât** conduit à des zones **très hétérogènes vis-à-vis du stock alluvial**. Les secteurs étroits et pentus (gorges) disposent d'un stock alluvial très faible. En aval, la réduction de la pente, l'élargissement du lit favorisent le dépôt et donc un stock alluvial beaucoup plus important. Le cône alluvionnaire constituant le cas le plus extrême.



Figure 100 : Structures alluvionnaires de la Rivière du Mât

Les structures alluvionnaires du bassin versant de la Rivière du Mât ont été **cartographiées** sous SIG à l'aide de l'**orthophotographie 2017** et sont présentées dans l'atlas cartographique.

La hauteur moyenne des structures alluvionnaires a été mesurée grâce aux levés Lidar 2015 (amont du bassin versant) et 2017 (aval du bassin à partir de Salazie) afin de calculer le volume de chaque structure. Sur l'amont du bassin, l'utilisation du LiDAR 2015 entraîne une incertitude supplémentaire quant aux estimations du stock alluvial car les structures ont pu changer entre 2015 et 2017 (bien qu'aucun événement majeur n'ait eu lieu). Néanmoins, l'idée principale de cette partie est d'avoir un **ordre de grandeur des volumes de matériaux stockés en 2017 sur chaque tronçon** afin de pouvoir les comparer.

Pour chaque structure, le niveau de mobilité (très mobile, mobile, quasi-fixée, fixée) a été renseigné. Il dépend directement du niveau de végétalisation de la structure alluvionnaire (cf. Annexe 7).

Du fait de la pente, du niveau de végétalisation et de l'absence de structure bien définie, aucune structure alluvionnaire n'a été relevée sur les tronçons RB1, RJ1 et BS1.

a) Stock alluvial de surface (au-dessus du niveau des chenaux)

☞ Attention : l'estimation du stock alluvial présentée dans cette partie **ne prend en compte que les volumes stockés au-dessus du niveau du chenal principal** (voir méthode page précédente). Cela permet de **connaître le volume de matériaux pouvant être remobilisés sans provoquer d'incision**. Par conséquent, cette estimation ne prend pas en compte les volumes de matériaux composant le lit du cours d'eau et sous le niveau du chenal. Pour ce faire, il faudrait disposer de nombreux sondages en lit. Or, peu de sondages ont été réalisés en zone alluviale et ils sont tous situés en aval du bassin.

Selon notre méthode, le stock alluvial du bassin versant de la Rivière du Mât⁸ est estimé à environ 10 Mm³, dont près de 70% étant stocké au niveau du cône alluvionnaire. Les tronçons M2 (6,5%), M5 (10,5%) et M6 (6%) constituent des réservoirs secondaires de matériaux. Près de 80% des structures alluvionnaires sont fixées (végétalisées par une strate arborée) donc peu mobilisables.

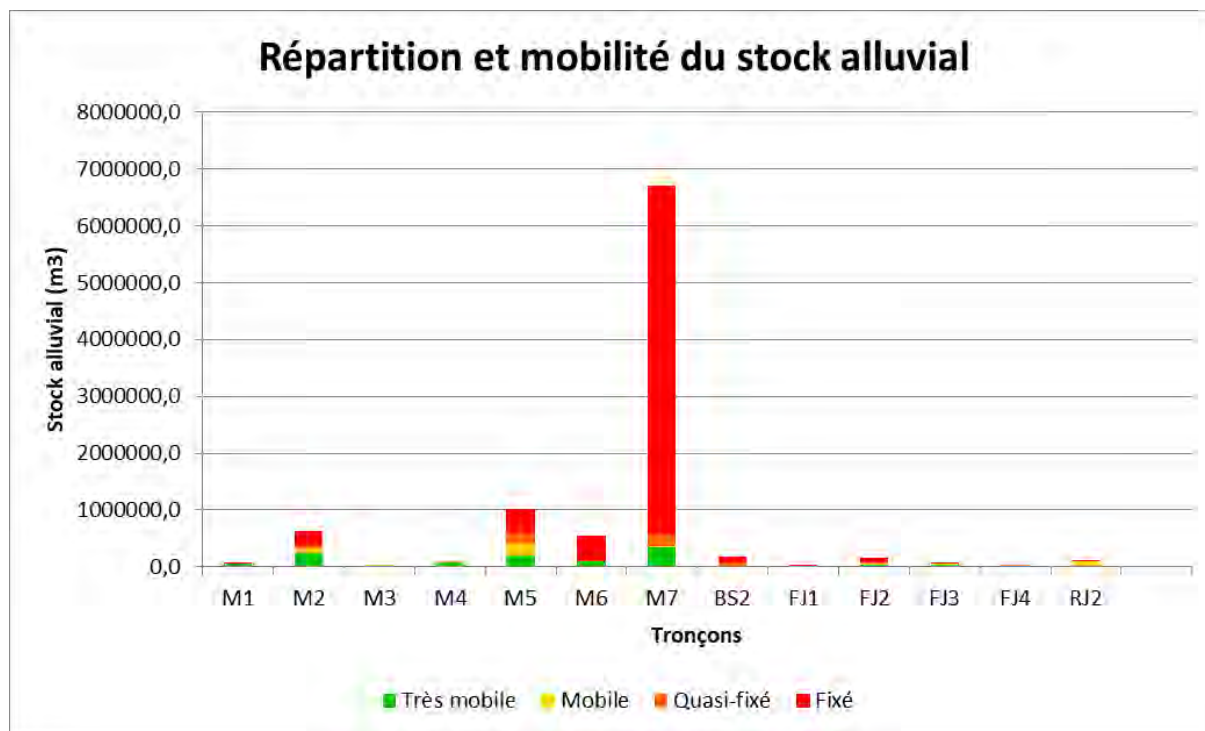


Figure 101 : Volume (en m³) du stock alluvial par tronçon et par mobilité

Sans prendre en compte les structures alluvionnaires fixées, le stock alluvial est principalement réparti entre les tronçons M2 (390 000 m³), M5 (600 000 m³) et M7 (580 000 m³).

⁸ Certains tronçons amont ou affluents n'ont pas été parcourus, leur stock alluvial est cependant négligeable par rapport aux stock alluvial des tronçons principaux (M2, M4, M6, M7).

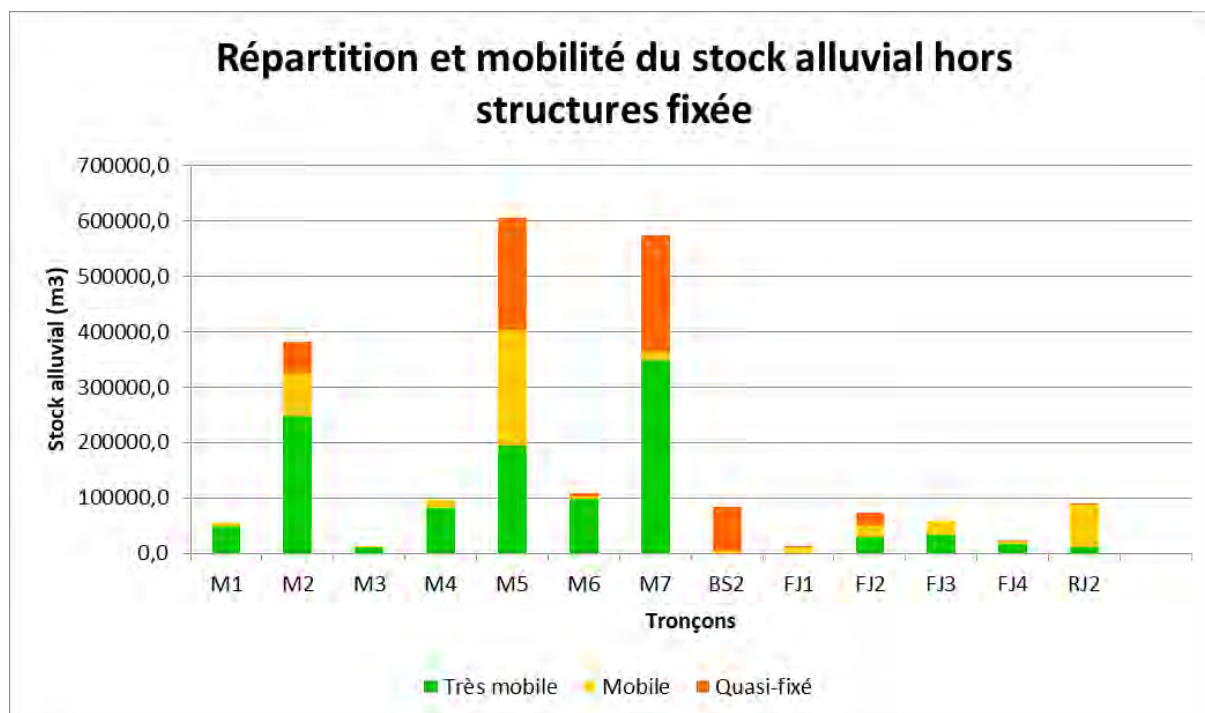


Figure 102 : Volume (en m³) du stock alluvial sans prendre en compte les structures alluvionnaires fixées

Le ratio kilométrique du stock alluvial permet de s'affranchir de la longueur des tronçons.

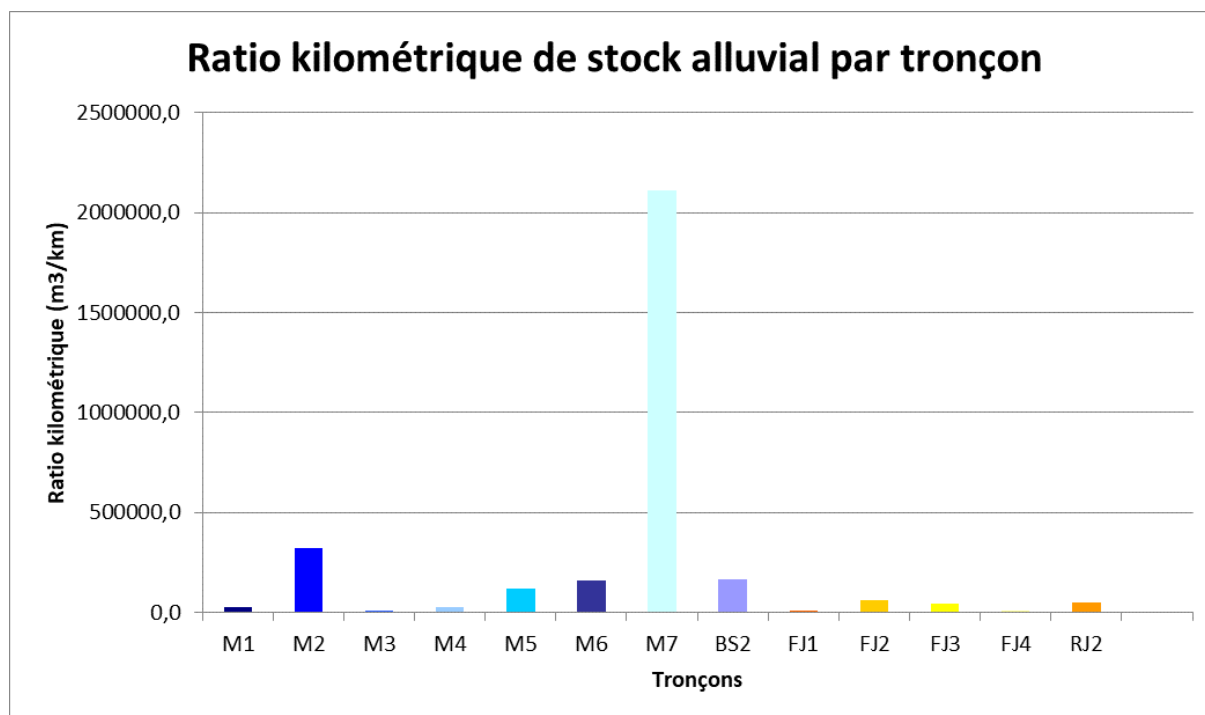


Figure 103 : Ratio kilométrique du stock alluvial par tronçon

Ces calculs permettent d'identifier les grandes tendances des tronçons vis-à-vis du stock alluvial :

- Le stock alluvial des tronçons amont M1, FJ1 et BS2 est limité malgré les apports importants des versants. Différentes causes peuvent expliquer ces situations :
 - Sur M1, la pente et les contraintes latérales (vallée étroite) sont peu propices au dépôt des matériaux qui sont alors évacués vers l'aval ;
 - Sur FJ1, la situation semblait similaire à M1 en 2017. Toutefois, les apports majeurs de 2022 ont entraîné la formation d'un tressage. Nous n'avons pas pu estimer le volume de matériaux stocké dans ce tressage (pas de donnée LiDAR 2022 disponible) ;
 - Sur BS2, la forte pente du cours d'eau favorise le transport des matériaux vers l'aval. De plus, le fond du lit est pavé et il est difficile de distinguer les structures alluvionnaires.
- Le stock alluvial du tronçon M2 représente 6,5% du stock alluvial total (mais 20% du stock alluvial facilement remobilisable). C'est une zone de dépôt et de régulation du stock alluvial du fait de la réduction de la pente et l'élargissement de la vallée. Les apports latéraux y sont aussi très importants. Les structures alluvionnaires sont très peu végétalisées, donc facilement remobilisables.
- L'aval de RJ2 et l'amont de FJ3 constitue également une zone de stockage régulation même si les volumes stockés sont moins importants que sur M2.
- Les zones de gorges M3, M4, FJ3, FJ4 ont un stock alluvial très limité du fait d'apports latéraux nuls et d'une morphologie peu favorable au dépôt. De rares atterrissements sont visibles en amont des prises ILO du fait de la diminution locale de la pente. Les matériaux provenant de l'amont sont rapidement évacués lors des crues.
- Le stock alluvial du tronçon M5 représente 10% du stock alluvial total (c'est aussi le tronçon le plus long). L'élargissement de la vallée en sortie de gorges, la diminution de la pente favorisent le dépôt des matériaux dans les intrados de méandres.
- Le tronçon M6 amont dispose d'un stock alluvial limité du fait de l'incision et de l'affleurement de la roche mère. De plus le chenal d'écoulement est très étroit au droit du Pont RN2. En aval les structures alluvionnaires sont soit fixées (terrasse en rive gauche de l'intrados) soit très mobiles.
- Le stock alluvial du tronçon M7 représente 70% du stock alluvial total (30% du stock alluvial facilement remobilisable). Il est majoritairement végétalisé en rive gauche.

b) Stock alluvial et données de sondages

D'après l'analyse hydrogéologique, entre le pont de l'Escalier et le pont de la RD48, **les données de forage et de sondage sont trop peu nombreuses pour pouvoir déterminer avec certitude l'épaisseur des formations alluviales.** Les seules indications sont fournies par le piézomètre **S3 Citronniers**, qui a recoupé 42 m d'alluvions fluviatiles grossières sur la partie axiale de la terrasse alluviale de l'îlet de Bras Citronniers. Les formations alluviales pourraient donc s'étendre jusqu'à environ 104.35 m NGR de profondeur voire au-delà (Z sol du forage à 146.35 m NGR). Environ 1km en aval, les formations basaltiques affleurent à l'aval de barrage de Bengalis à une altitude comprise approximativement entre 108 et 88 m NGR. Elles forment un point dur à une altitude moyenne de 101 m NGR (seuil naturel).

Au droit du forage des Citronniers, l'épaisseur des alluvions en lit pourrait donc atteindre une vingtaine de mètres d'épaisseur (niveau du lit actuel à environ 127 m NGR).

Entre le pont de la RD48 (aval du barrage de Bengalis) et le pont de la RN2, le substratum basaltique affleure puis la Rivière du Mât s'encaisse dans une coulée boueuse. Le stock alluvial est donc négligeable dans ce secteur.

Au niveau du cône alluvial, d'après les données de forages et de sondages, **les formations alluviales sont très épaisses**. Elles s'étendent sur **plusieurs dizaines de mètres d'épaisseur voire plus d'une centaine de mètre d'épaisseur**, largement sous le niveau de l'océan. Toutefois, ces formations sont **parfois recoupées par des coulées boueuses ou dépôts pyroclastiques**.

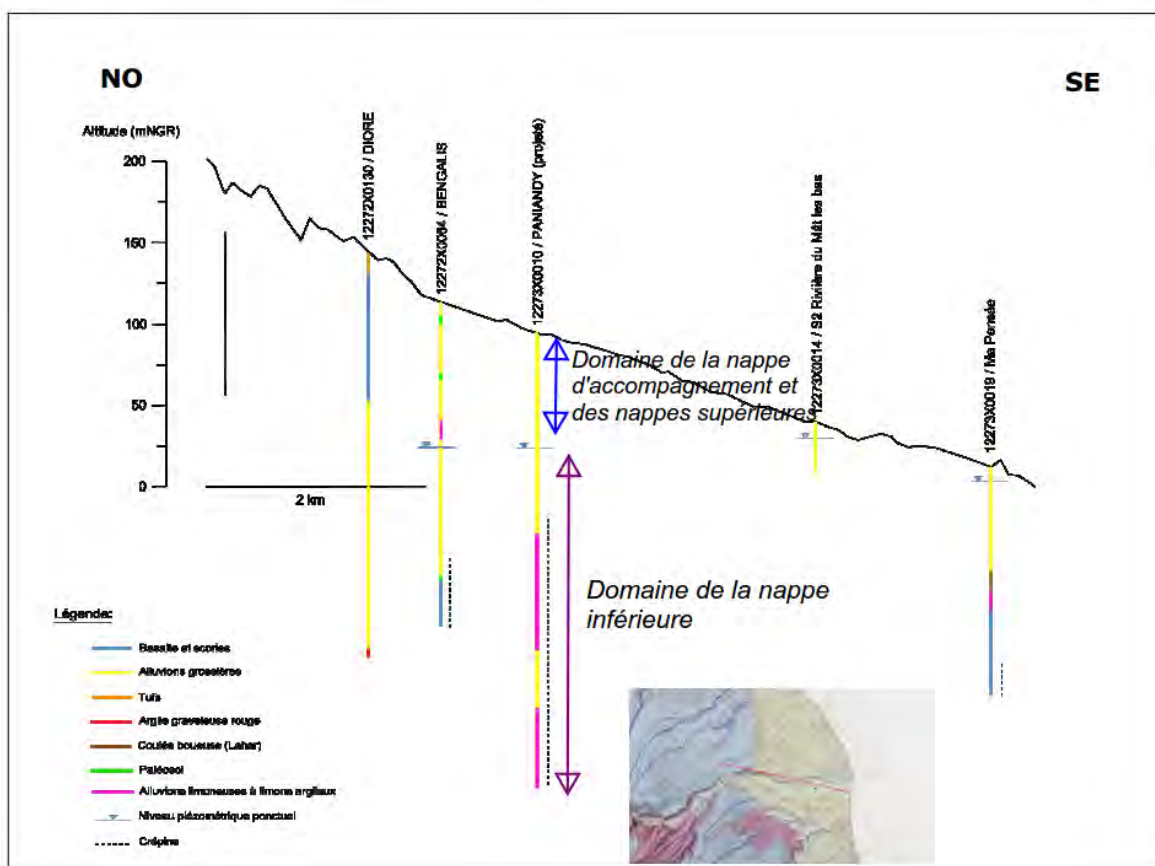


Figure 104 : Coupe géologique recoupant le lit actuel de la Rivière du Mât (Source : OLE, 2013)



Conclusion : Stock alluvial

Rappel : l'estimation du stock alluvial ne prend en compte que les volumes stockés au-dessus du niveau du chenal principal. Elle ne prend pas en compte les volumes de matériaux composant le lit du cours d'eau sous le niveau du chenal. Pour ce faire, il faudrait disposer de nombreux sondages en lit et de levés. Sur le bassin quelques sondages sont disponibles mais uniquement en aval. L'estimation du volume de matériaux stocké au-dessus du chenal actuel permet donc de connaître le volume de matériaux pouvant être remobilisé sans provoquer d'incision du cours d'eau.

Le stock alluvial du bassin (hors tronçons non parcourus) est estimé à **environ 10 Mm³** répartis en majorité sur les tronçons suivants : M2 (6.5%), M5 (10.5%), M6 (6%) et **M7 qui correspond au cône alluvionnaire (70%)**.

Près de **80% des structures alluvionnaires sont considérées comme fixées** car elles sont végétalisées par une strate arborée. Ces structures et les matériaux qui les composent sont donc plus difficilement remobilisables.

Sans prendre en compte les structures alluvionnaires fixées, le stock alluvial est principalement réparti entre les tronçons M2 (390 000 m³), M5 (600 000 m³) et M7 (580 000 m³).

2.5.4 Granulométrie du lit et des atterrissements

2.5.4.1 Pourquoi évaluer la granulométrie ?

L'analyse de la granulométrie permet de caractériser la charge grossière d'un cours d'eau et le substrat du lit.

Elle peut notamment être utile pour :

- Mieux comprendre le fonctionnement du cours d'eau (gradient granulométrique, renouvellement de la charge solide, incidence des apports latéraux de versants ou d'affluents...) ;
- Mieux connaître les habitats aquatiques (diversité des faciès, substrat plus ou moins biogènes pour les espèces en présence...) ;
- Evaluer la rugosité du lit mineur du cours d'eau dans le cadre de modélisations hydrauliques ;
- Calculer éventuellement les profondeurs d'affouillement au droit d'ouvrages existant ou en projet ;
- Evaluer le transport solide d'un cours d'eau...

2.5.4.2 Méthode de relevés granulométriques

Notre méthode de relevés se déroule en plusieurs étapes :

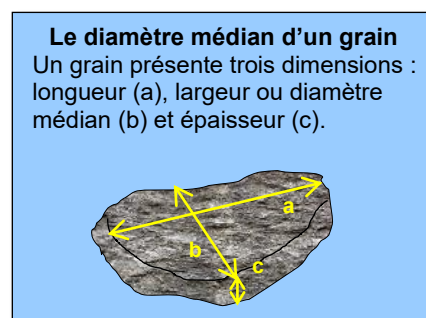
- (1) **Sélection d'un site de prélèvement adapté** qui soit représentatif de la granulométrie du secteur ;
- (2) **Photographie du substrat du site sélectionné** après pose d'une mire photographique de 200 mm.
- (3) **Prélèvement et mesure d'environ 100 grains du tapis** du lit à intervalle régulier le long d'un même axe matérialisé par un décimètre. Les grains ne sont jamais comptés deux fois.

Pour chacun des grains prélevés, le **diamètre médian** (dimension b, cf. Encart 2) du grain est mesuré au pied à coulisse numérique (précision : 10-2 mm).

Les **éléments de rugosité**, éléments surdimensionnés par rapport au reste de la granulométrie n'ont pas été mesurés. Leur mobilité est limitée et leur intégration dans la granulométrie biaiserait le résultat.

Sur le bassin de la Rivière du Mât, les matières fines constituent un volume très important du stock alluvial. En effet, les formations bréchiques de l'amont du bassin fournissent à la fois des matériaux fins et grossiers au cours d'eau. Il était donc **indispensable de prendre en compte les éléments fins** lors des relevés. Les éléments trop fins pour être mesurés au pied à coulisse ont donc été classés dans une seule catégorie : « grains inférieurs à 2 mm ». Cela n'impacte que la précision des diamètres caractéristiques les plus faibles qui se voient donc attribuer une classe de valeur (« grain inférieur à 2 mm ») au lieu d'une valeur unique.

- (4) **Calcul de la granulométrie (courbe et diamètres caractéristiques) selon la méthode des fréquences cumulées de Wolman** qui se base sur le nombre de grains dans chaque classe de diamètre (ex de classes : 16 à 32 mm).



Encart 2 : Les trois dimensions d'un grain



Figure 105 : Exemple d'un site de prélèvement : amont du tronçon M1 (à gauche décamètre matérialisant l'axe de prélèvement, à droite une photographie du substrat avec une mire de 20 cm)

2.5.4.3 Données granulométriques existantes

Des données granulométriques existent déjà en plusieurs points du bassin.

En 2007, le BRGM a réalisé 14 mesures de granulométrie sur le bassin. Les granulométries du BRGM seront comparées à nos granulométries dans la partie résultats.

En 2016, deux granulométries ont également été réalisées dans le cadre de la thèse d'Alicia Gonzalez (2020), l'une au niveau du lieu-dit Petit Trou et l'autre au niveau du pont de la Savane. Les diamètres caractéristiques de ces deux sites ont été extraits du graphique présenté dans sa thèse et sont présentés dans la partie résultats.

Récemment, 6 relevés granulométriques ont été effectués sur le tronçon amont de la ravine Roche à Jacquot dans le cadre d'une étude de correction torrentielle réalisée par Artelia, ETRM, Mascareignes Géologie, Géolithe (2021). Les graphiques présentés dans le rapport ne permettent pas d'extraire les diamètres caractéristiques et de les présenter aux côtés de nos résultats. Nous ferons donc un résumé écrit des caractéristiques granulométriques du tronçon amont de la ravine Roche à Jacquot dans la partie analyse des résultats.

2.5.4.4 Localisations retenues pour les relevés

Dans le cadre de cette étude, nous avons réalisé 18 granulométries dont 8 granulométries à proximité des sites échantillonnés par le BRGM en 2007. La localisation des granulométries du BRGM (2008), d'Alicia Gonzalez (2016), d'ETRM (2020) et d'HYDRETUDES (2022) sont présentées sur la carte suivante.

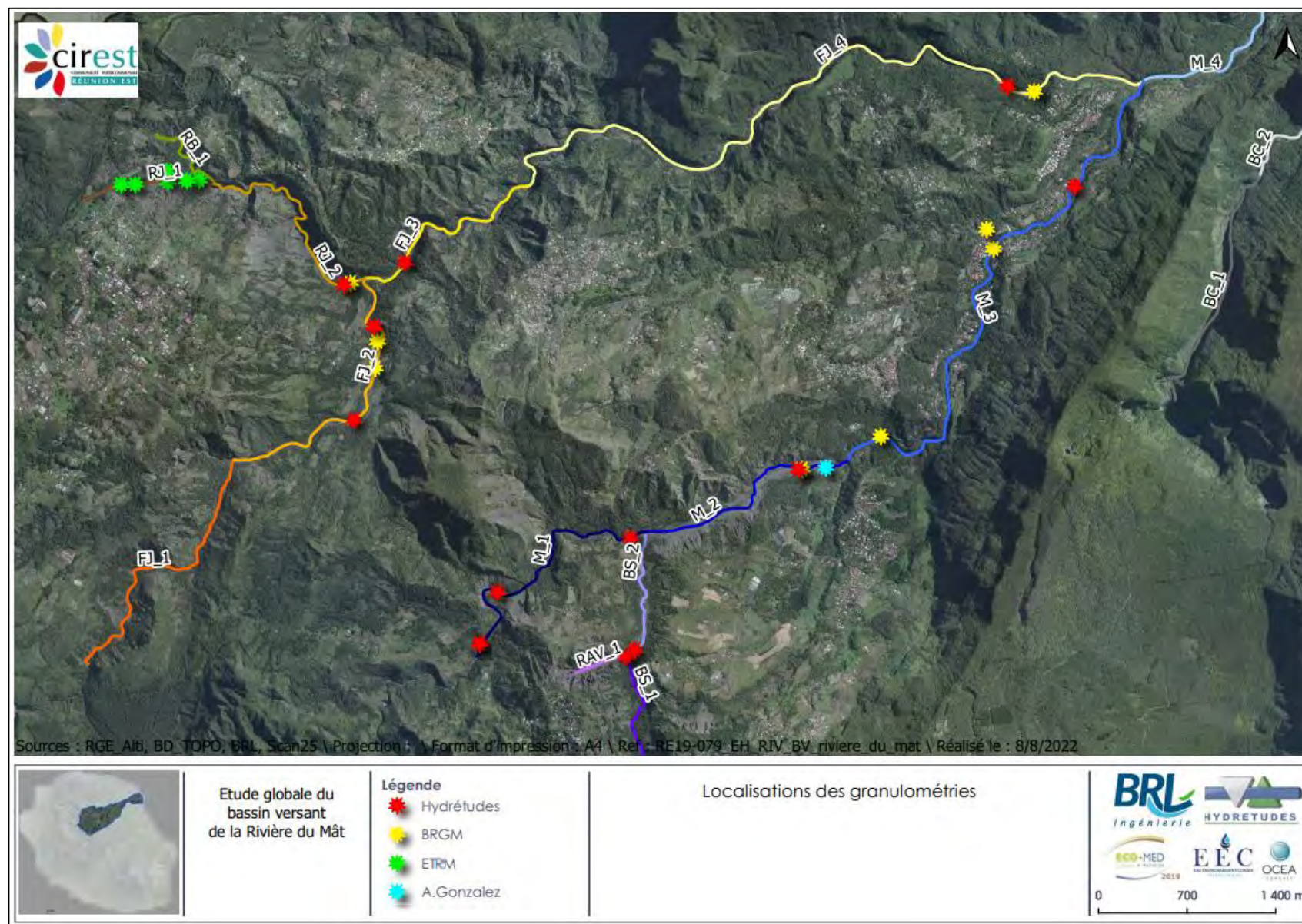


Figure 106 : Localisation des granulométries sur l'amont du bassin de la Rivière du Mât

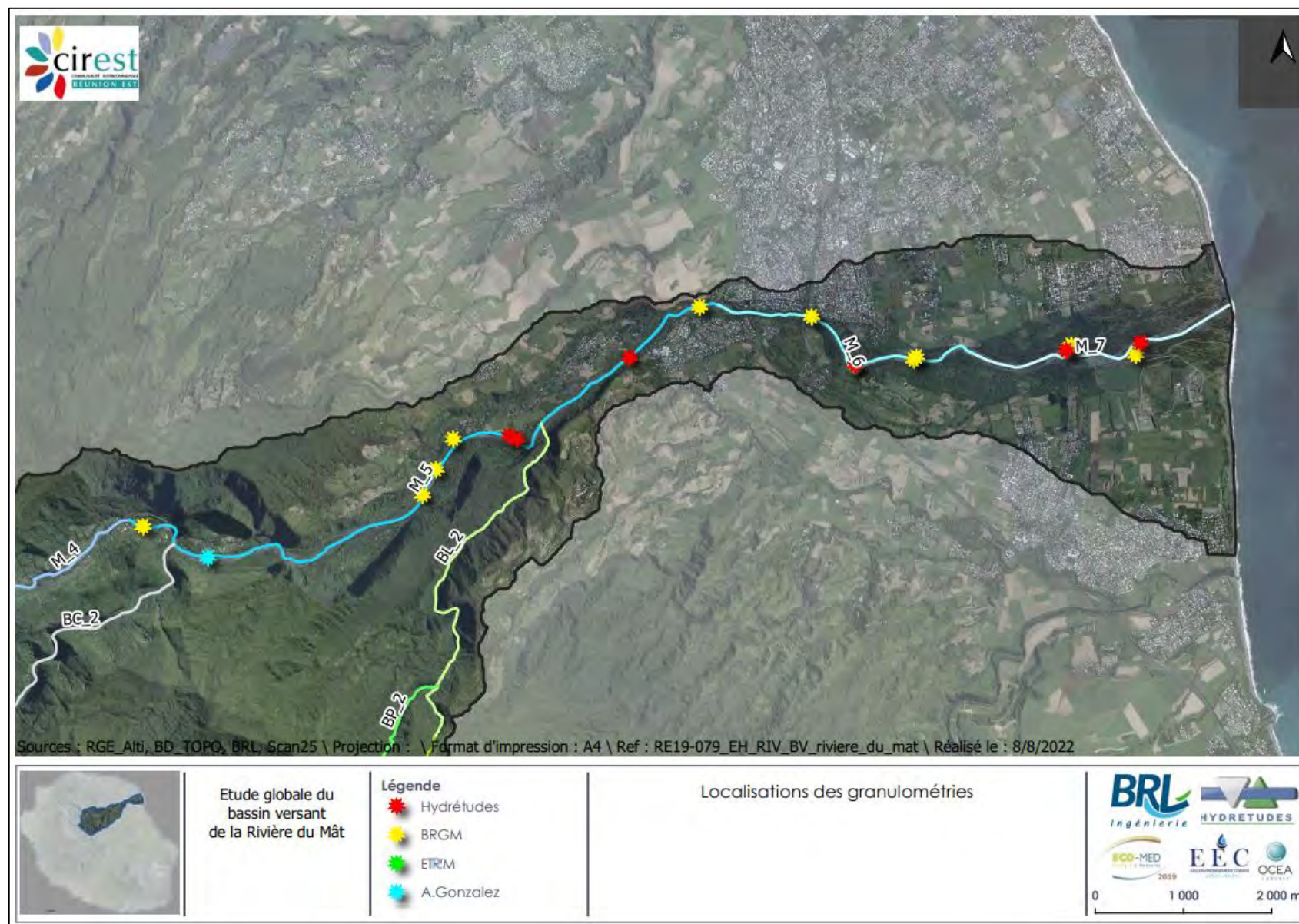


Figure 107 : Localisation des granulométries sur l'aval du bassin de la Rivière du Mât

2.5.4.5 Résultats des relevés granulométriques sur le bassin

DIAMETRES CARACTERISTIQUES DU BASSIN AMONT DE LA RIVIERE DU MAT (EN MM)									
Opérateur / date	HYDRETUDES / 2022	HYDRETUDES / 2022	HYDRETUDES / 2022	HYDRETUDES / 2022	HYDRETUDES / 2022	HYDRETUDES / 2022	BRGM / 2007	Gonzalez / 2016	HYDRETUDES / 2022
Diamètres	Amont M1	Centre M1	Aval M1	Aval RAV1	Amont BS2	Centre M2	Centre M2	Aval M2 (pont Savane)	Aval M3 (amont prise ILO)
dmin	<2	<2	<2	<2	<2	<2	2	<4	<2
d5	9	<2	<2	<2	<2	<2	4	<4	<2
d10	13	8	12	6	8	9	10	9	14
d16	16	13	19	11	12	15	30	15	20
d20	19	18	24	15	17	15	48	18	23
d30	25	24	31	22	30	20	80	30	37
d40	30	36	48	27	44	25	146	38	47
d50	35	45	58	41	77	34	200	46	59
d60	39	56	75	59	158	45	250	59	64
d70	54	73	95	80	201	55	386	70	74
d80	71	101	131	140	301	85	600	90	95
d84	84	118	169	166	370	100	708	110	102
d90	98	265	211	252	498	117	1200	160	115
d95	142	411	259	358	628	196	1500	230	154
dmax	207	600	600	750	4000	343	1800	2000	250
dmoyen	48	88	89	95	206	55	371	-	64

Figure 108 : Diamètres caractéristiques du bassin amont de la Rivière du Mât (en mm)

DIAMETRES CARACTERISTIQUES DE LA RIVIERE DES FLEURS JAUNES ET DE LA RAVINE ROCHE A JACQUOT (EN MM)								
Opérateur / date	HYDRETUDES / 2022	BRGM / 2007	BRGM / 2007	HYDRETUDES / 2022	BRGM / 2007	HYDRETUDES / 2022	HYDRETUDES / 2022	HYDRETUDES / 2022
Diamètres	Centre FJ2	Aval FJ2	Aval FJ2	Aval FJ2	Aval RJ2	Aval RJ2	Amont FJ3	Aval FJ4 (amont prise ILO)
dmin	<2	2	2	<2	<2	<2	<2	<2
d5	<2	60	4	<2	<2	<2	<2	<2
d10	<2	100	5	<2	3	<2	<2	<2
d16	5	100	8	<2	5	<2	<2	7
d20	8	100	8	<2	5	<2	<2	8
d30	15	200	10	8	10	<2	<2	14
d40	23	250	30	16	16	10	<2	17
d50	30	300	40	27	30	26	16	23
d60	38	400	50	35	60	54	33	34
d70	47	800	70	49	100	135	64	43
d80	65	1000	120	65	300	223	185	59
d84	74	1000	140	76	350	313	204	67
d90	98	1200	200	94	510	450	273	80
d95	121	1400	270	168	605	855	366	105
dmax	347	2000	400	455	800	1000	600	200
dmoyen	43	520	72	45	144	143	82	37

Figure 109 : Diamètres caractéristiques de la Rivière des Fleurs Jaunes et de la Ravine Roche à Jacquot aval (en mm)

DIAMETRES CARACTERISTIQUES DE LA RIVIERE DU MAT ENTRE L'AVAL DE LA CONFLUENCE AVEC LA RIVIERE FLEURS JAUNES ET LE SEUIL DE BENGALIS (EN MM)								
Opérateur / date	BRGM / 2007	Gonzalez / 2016	BRGM / 2007	BRGM / 2007	HYDRETTES / 2022	HYDRETTES / 2022	HYDRETTES / 2022	BRGM / 2007
Diamètres	Amont M5 (Pont de l'Escalier)	Amont M5 (Petit Trou)	Centre M5 (zone convexe)	Centre M5 (zone concave)	Centre M5 (zone fine)	Centre M5 (zone + grossière)	Aval M5 (amont Bengalis)	Aval M5 (aval Bengalis)
dmin	10	<4	2	2	<2	<2	<2	2
d5	10	<4	2	2	<2	<2	<2	2
d10	10	22	2	2	<2	<2	<2	2
d16	10	38	2	2	<2	<2	<2	4
d20	10	43	2	2	<2	<2	10	4
d30	30	51	2	4	10	6	33	10
d40	50	60	2	16	17	11	69	30
d50	70	70	10	120	24	33	85	40
d60	100	83	20	320	30	54	108	60
d70	120	110	30	600	37	133	160	95
d80	180	160	50	800	46	236	220	150
d84	200	180	50	1000	51	300	235	200
d90	300	240	80	1200	64	514	305	300
d95	380	300	150	1600	81	700	400	413
dmax	500	500	250	1800	109	2300	800	800
dmoyen	113	-	30	394	28	182	127	101

Figure 110 : Diamètres caractéristiques de la Rivière du Mât entre l'aval de la confluence avec la Rivière des Fleurs Jaunes et le seuil de Bengalis (en mm)

DIAMETRES CARACTERISTIQUES DE LA RIVIERE DU MAT ENTRE LE SEUIL DE BENGALIS ET L'OCEAN (EN MM)											
Opérateur / date	BRGM / 2007	BRGM / 2007	BRGM / 2007	HYDRETTUES / 2022	BRGM / 2007	BRGM / 2007	BRGM / 2007	BRGM / 2007	HYDRETTUES / 2022	BRGM / 2007	HYDRETTUES / 2022
Diamètres	Aval M5 (aval Bengalis)	Amont M6 (amont RN2)	Centre M6 (méandre aval RN2)	Centre M6 (méandre aval RN2)	Aval M6	Aval M6	Amont M7	Amont M7	Amont M7	Centre M7	Centre M7
dmin	2	1	2	<2	2	2	2	2	<2	1	<2
d5	2	2	2	18	2	2	2	2	<2	2	<2
d10	2	2	2	34	2	3	2	2	<2	2	<2
d16	4	20	15	45	2	4	3	2	<2	2	<2
d20	4	30	26	55	2	5	4	3	8	2	<2
d30	10	60	50	75	20	20	25	17	25	20	27
d40	30	150	72	90	200	30	40	50	40	30	46
d50	40	200	100	110	250	50	50	100	48	60	58
d60	60	290	180	154	300	70	80	200	69	150	72
d70	95	505	200	211	395	100	120	300	126	200	110
d80	150	740	288	270	500	120	300	350	185	300	152
d84	200	1152	300	324	600	150	300	400	227	350	212
d90	300	1710	414	380	700	200	400	550	590	400	300
d95	413	2200	493	525	900	300	838	650	950	500	410
dmax	800	2500	900	825	2000	1110	1250	1200	1700	1900	1600
dmoyen	101	489	168	176	305	91	170	201	174	173	114

Figure 111 : Diamètres caractéristiques de la Rivière du Mât entre le seuil de Bengalis et l'océan



Les différentes granulométries effectuées sur le bassin de la Rivière du Mât sont toutes caractérisées par une **étendue granulométrique importante**. C'est-à-dire que les matériaux présents dans le lit des cours d'eau sont très variés : ils vont des matières fines types argiles, limons, sables jusqu'aux matériaux très grossiers de taille parfois métrique à plurimétrique.

Cette large gamme de matériaux est directement liée à la géologie du cirque. En effet, le cirque est caractérisé par la présence de deux principaux ensembles géologiques :

- **Les formations basaltiques**, dures et peu érodables, qui forment les remparts du cirque et qui enserrant également les secteurs de gorges sur le bassin. Ces formations fournissent très peu de matériaux aux cours d'eau ;
- **Les formations bréchiques** qui sont issues des phénomènes d'effondrement successifs du cirque. Elles sont composées de blocs anguleux mélangés à une matrice fine mais généralement peu cohésive. Ces formations sont donc propices aux glissements et à l'érosion. **Elles fournissent ainsi la majeure partie des matériaux** qui transitent dans les cours d'eau du bassin.

La forte étendue granulométrique des cours d'eau est donc directement liée à la composition des formations bréchiques (matériaux très grossiers à très fins).

A l'échelle du bassin versant, les granulométries que nous avons relevées ne montrent **pas de gradient amont-aval**. Généralement, les cours d'eau présentent une diminution de la granulométrie de l'amont vers l'aval. Ce gradient est lié à deux éléments : l'usure des grains et le tri granulométrique (lié au transport préférentiel de certaines particules en fonction de leur taille ou de leur forme ; cf. Brousse et Arnaud-Fassetta, 2011 ; Cassel, 2019).

Sur le bassin de la Rivière de Mât, plusieurs hypothèses pourraient expliquer l'absence de gradient granulométrique :

- Un linéaire relativement court entre les zones de production sédimentaire et l'aval du bassin (28 km entre l'amont du tronçon M1 et l'océan, 32 km entre l'amont de FJ1 et l'océan) ;
- Le volume important de matières fines fournies au cours d'eau dès les zones de production amont ;
- La présence de zones de recharge par érosion de terrasses ou du paléocône en aval ;
- La forte variabilité spatiale et temporelle de la granulométrie (zone pavées, zones plus fines ou plus grossières en fonction des apports ou de la morphologie du lit ; changements brutaux de la granulométrie après les crues à causes d'apports massifs des versants...).

N-B : En 2022, la phase de terrain d'HYDRETUDES s'est déroulée entre mi-avril et début mai. Le bassin de la Rivière du Mât venait de subir le cyclone Batsiraï en janvier-février puis des pluies exceptionnelles au mois d'avril. De nombreux glissements s'étaient donc créés ou réactivés lors de ces événements, apportant aux cours d'eau du bassin un volume important de nouveaux matériaux. Pour rappel, ces matériaux bréchiques comprennent une très forte proportion de matière fines. Les granulométries effectuées par HYDRETUDES sur l'amont du bassin sont donc influencées par ces événements.

2.5.4.5.1 Ravine Roche à Jacquot

Entre le pont de Mare à Martin et la cascade Micheline, la granulométrie a été évaluée sur 6 sites par le groupement Artelia-ETRM en 2020 dans le cadre d'une étude ciblée sur l'amont de la ravine.

Cette étude étant très récente, nous avons fait le choix de ne pas rééchantillonner le secteur.

Les matériaux rencontrés sur le Ravine Roche à Jacquot sont de taille très variable. Ils s'étendent des matières très fines jusqu'aux blocs plurimétriques (blocs de plus de 3 m de diamètre échantillonnés par Artelia-ETRM en 2020). Cela est directement lié à la nature des apports latéraux par glissement.

Sur 150 m en aval du pont de Mare à Martin, le lit est pavé de très gros blocs et il n'y a pas d'apports latéraux. D'après Artelia-ETRM, ce petit tronçon semble relativement stable. Les mesures de granulométrie ont donc été réalisées en aval.

Le diamètre moyen de la granulométrie entre l'aval du secteur pavé et la cascade Micheline a été estimé à 200 mm par Artelia-ETRM (2020). Les autres diamètres caractéristiques ne sont pas présentés dans le rapport. Les graphiques permettent toutefois d'évaluer approximativement certains de ces diamètres caractéristiques. Par exemple, le d50 est compris entre 200 mm et 645 mm dans le lit actuel de la ravine, il atteint 810 mm dans l'ancien méandre déconnecté. La granulométrie est donc relativement grossière sur la partie amont de la ravine, ce qui peut s'expliquer par la présence d'un pavage du lit dans certains secteurs.

Sur l'aval de la Ravine Roche à Jacquot (en amont de la confluence avec la Rivière des Fleurs Jaunes, RJ2), la granulométrie semble plus fine.

En effet, le d50 a été estimé par HYDRETTUDES à 26 mm en 2022 et par le BRGM à 30 mm en 2007.

Cette diminution du d50 par rapport à l'amont s'explique tout d'abord par la présence de plusieurs cascades entre l'amont et l'aval de la ravine (dont la cascade Micheline de quasiment 100 m de haut). Ces cascades provoquent la fracturation des matériaux en provenance de l'amont.

De plus, en 2022, un large glissement de terrain était actif au droit de la zone de mesure. Ce dernier a apporté beaucoup de matières fines au cours d'eau. En 2007, des petits glissements étaient aussi présents en rive droite mais leur ampleur était beaucoup plus limitée.

Ces deux facteurs tirent ainsi le d50 vers le bas malgré la présence de blocs métriques en lit.

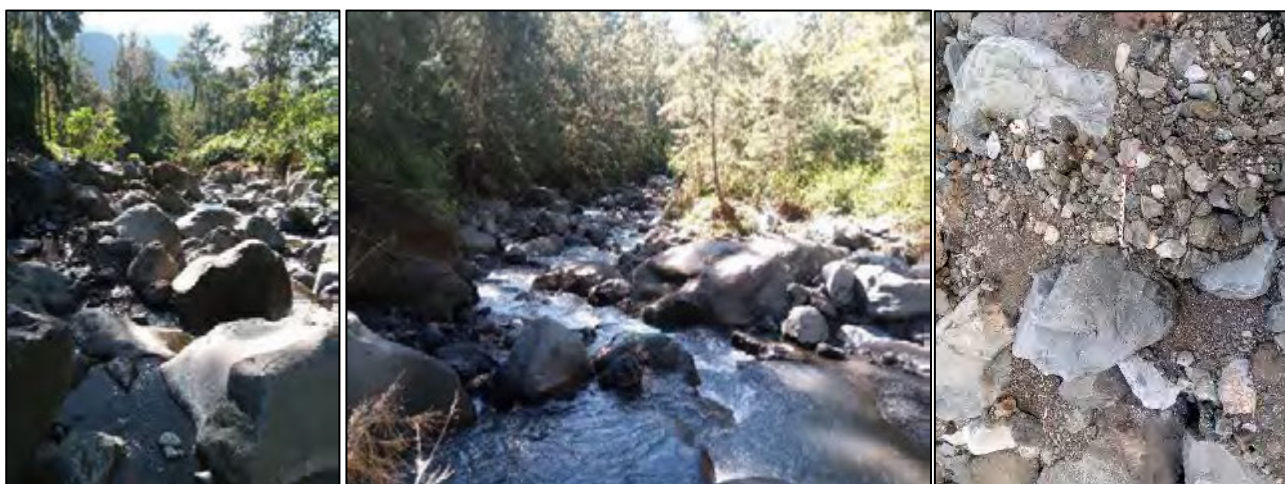


Figure 112 : Matériaux sur la Ravine Roche à Jacquot en 2022 (à gauche : zone pavée en aval du pont de Mare à Martin (RJ1), au centre : secteur grossier entre le barrage et la cascade Micheline (RJ1) ; à droite : matériaux mixtes en aval de la ravine à proximité d'une zone de glissement, mire de 20 cm (RJ2).

2.5.4.5.2 Rivière des Fleurs Jaunes

Le tronçon amont de la Rivière des Fleurs Jaunes (FJ1) n'a pas pu être échantillonné. En effet, un glissement de versant massif avait eu lieu dans ce secteur au printemps. Les versants étant déstabilisés, HYDRETUDES n'a pas pu parcourir ce tronçon.

En 2022, les granulométries mesurées sur le tronçon FJ2 sont relativement étendues et présentent un d50 d'environ 30 mm. En 2007, le BRGM avait réalisé deux granulométries dans ce secteur : une granulométrie sur structure alluvionnaire caractérisée par un d50 proche du notre de 40 mm et une granulométrie en lit vif avec un d50 très grossier de 300 mm.

En 2007 et 2022, la faiblesse du d50 sur les structures alluvionnaires s'explique par la présence de nombreux glissement sur FJ1.

En effet, au printemps 2022, la morphologie du tronçon FJ2 montrait que de grandes quantités de matières fines s'étaient déposées récemment : d'épaisses structures alluvionnaires très fines aux bordures verticales étaient présentes de part et d'autre du cours d'eau (cf. photographie ci-dessous). Lors de la visite de terrain, le cours d'eau s'était déjà encaissé au sein de ces alluvions très fine et la granulométrie du fond du lit était effectivement plus grossière. Nous pouvons supposer que la situation était similaire en 2007, après le passage des cyclones Diwa et Gamède.



Figure 113 : Morphologie du tronçon FJ2 indiquant des apports récents en matériaux fins en cours de déstockage : structures latérales très fines aux bordures verticalisées entre lesquelles s'encaisse le cours d'eau (à gauche FJ2 en amont de l'ancienne gravière, à droite FJ2 en aval du pont de la RD52)



Sur FJ3, la granulométrie est toujours étendue mais le d50 est de 16 mm, ce qui est légèrement plus fin que sur les deux tronçons amont FJ2 et RJ2. Cela pourrait s'expliquer par un dépôt plus important des matériaux fins en provenance des tronçons amont. En effet, le tronçon FJ3 est moins pentu que FJ2 et RJ2. Toutefois, la variation spatiale de la granulométrie est relativement forte sur ce bassin, cette diminution pourrait donc également être liée au choix de la zone de mesure.



Figure 114 : Variabilité de la granulométrie sur FJ3

Une dernière mesure de granulométrie a été réalisée à l'amont de la prise ILO des Fleurs Jaunes qui est atterrie. Le d50 de 23 mm est similaire aux tronçons amont mais l'étendue granulométrique est légèrement plus faible. Il y a moins de matières fines et de gros blocs. La diminution du nombre de blocs s'explique par la présence de la prise ILO qui entraîne une diminution importante de la pente à en amont à cause de son Remous Régressif Solide. Ces derniers se déposent donc probablement plus en amont sur le tronçon.



Figure 115 : Granulométrie en amont de la prise ILO

2.5.4.5.3 Rivière du Mât amont (M1, M2, M3, BS2, RAV1)

Sur l'amont de la Rivière du Mât (M1), les granulométries sont également étendues mais leur d50 est plus élevé que sur la Rivière des Fleurs jaunes. Il est compris entre 35 et 58 mm. Comme sur la Rivière des Fleurs Jaunes et la Ravine Roche à Jacquot, plusieurs glissements de versant sont présents et viennent directement alimenter le cours d'eau en matériaux.



Figure 116 : Granulométrie sur le tronçon M1 (mires de 20 cm)

En aval de M1, la Rivière du Mât conflue avec le Bras Sec. Actuellement le Bras Sec est principalement alimenté en sédiments par une ravine de rive gauche située à l'amont de BS2. Cette ravine fournit des matériaux fins à grossiers dont le d50 est de 41 mm. Cependant, sur le tronçon BS2, le d50 est de 77 mm et des matériaux plurimétriques sont présents. Cela peut s'expliquer par un début de phénomène de pavage sur le tronçon. Les matériaux fins et moyens sont progressivement emportés laissant uniquement les matériaux les plus grossiers et les plus difficilement remobilisables. Ces derniers s'imbriquer progressivement entre eux pour former un pavage qui tend à fixer le fond du lit. Sur le tronçon BS2, ce phénomène ne semble que partiel car l'étendue granulométrique est encore importante. De plus, le lit de BS2 est encore en capacité d'évoluer latéralement ce qui pourrait rompre le début de pavage.



Figure 117 : Granulométrie grossière du Bras Sec sur BS2 (à gauche) et granulométrie de la ravine l'alimentant (RAV1)



Le tronçon M2 débute à la confluence de M1 et BS2. C'est un tronçon tressant car sa capacité de transport n'est pas suffisante pour remobiliser l'intégralité des matériaux qui l'alimentent (depuis les tronçons amont et les glissements latéraux).

Trois granulométries sont disponibles sur ce tronçon. Les deux granulométries les plus récentes (HYDRETUDES et A. Gonzalez) ont été réalisées sur les structures alluvionnaires, elles sont donc caractérisées par un d50 plus faible, respectivement 34 mm et 46 mm.

La granulométrie du BRGM présente un d50 plus élevé (200 mm) car elle prend à la fois en compte les structures et les matériaux dans le lit vif des chenaux. Néanmoins, le fort écart entre les granulométries peut aussi s'expliquer par la forte évolution spatio-temporelle de la granulométrie dans ce secteur (cf. extraits Géoportail ci-dessous). Cette variabilité est liée à la forte mobilité des chenaux, à l'évolution régulière de zone de dépôt et au fonctionnement à deux échelles de ce secteur (périodes de sédimentation intense à la suite de fortes crues associés à des apports importants des versants puis périodes de déstockage progressif des matériaux).

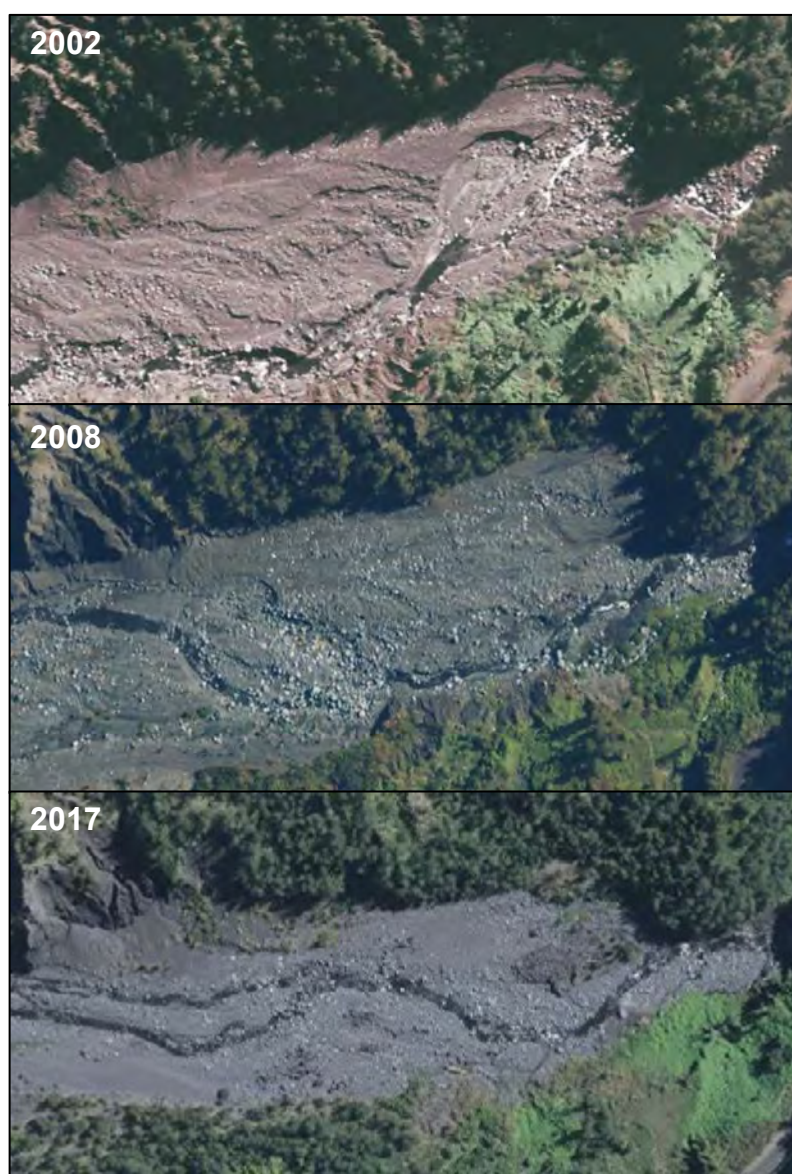


Figure 118 : Variation spatio-temporelle de la granulométrie entre 2002 et 2017 dans le secteur aval de M2

Sur M3, le relevé granulométrique a été réalisé en amont de la prise ILO sur le Remous Régressif Solide (RRS). Le d50 est de 53 mm et la granulométrie est moins étendue qu'en amont : la proportion de matériaux fins semble plus faible et les blocs sont moins grossiers. Comme sur la prise ILO des Fleurs Jaunes, ce phénomène peut s'expliquer par le tri granulométrique qui s'opère du fait de la diminution de la pente du lit en amont du barrage (présence du RRS).



Figure 119 : Zoom sur la granulométrie en amont du seuil (mire 20 cm)

2.5.4.5.4 Rivière du Mât intermédiaire (M4 et M5)

Le tronçon M4 commence à la confluence entre la Rivière du Mât et la Rivière des Fleurs Jaunes. C'est un tronçon en gorges qui présente des bancs alternes. Nous n'avons pas réussi à atteindre le lit du cours d'eau, aucune granulométrie n'a donc été réalisée sur ce tronçon.

Sur M5, plusieurs relevés granulométriques sont disponibles tout le long du tronçon. Ces derniers indiquent que la granulométrie est spatialement hétérogène. En effet, d'un point de mesure à un autre les diamètres caractéristiques varient beaucoup. Le d50 oscille par exemple entre 10 et 120 mm sur le tronçon.

La cause majeure de cette hétérogénéité granulométrique est probablement l'incision qui entraîne la formation progressive d'un pavage (cf. partie diachronie verticale 2.4.3.2 p.65). Ce pavage est visible sous plusieurs formes :

- Zone en début de pavage présentant au fil du temps un nombre croissant de blocs métriques à plurimétriques non remobilisables ;
- Zone pavées caractérisées par de larges plages de dépôts de matériaux métriques à plurimétriques ;
- Seuils naturels composés de blocs métriques à plurimétriques imbriqués (fonctionnement step-pool).

Dans le lit, à l'abri ou en appui sur les secteurs pavés, des dépôts alluviaux sont encore présents. Ces derniers sont caractérisés par une granulométrie plus fine.

D'autres éléments influencent également la répartition granulométrique sur ce tronçon mais dans une moindre mesure : le tri granulométrique au niveau des bancs et des méandres (dépôts de matériaux plus grossiers en amont) ainsi que la recharge par érosion de berge (bien que cette recharge soit limitée, les érosions de berge sur ce tronçon fournissent des matériaux plus fins que ceux du lit).



Figure 120 : Variabilité granulométrique d'un méandre sur M5 – L'intrados est très grossier, il semble pavé. En aval des dépôts plus fins sont présents.

En aval du barrage de Bengalis, une granulométrie a été effectuée par le BRGM en 2007. Toutefois, lors de la visite de terrain 2022, le niveau d'eau était assez haut dans ce secteur et les zones de dépôts étaient peu épaisses (roche mère affleurante), aucune granulométrie n'a donc été réalisée. Le secteur étant fortement incisé, les zones de dépôt de matériaux sont limitées.

2.5.4.5.5 Rivière du Mât aval (M6 et M7)

Sur M6, la Rivière du Mât présente un style à méandres. Elle adopte ensuite un style multichenalisé en delta sur le tronçon M7. Cinq granulométries ont été réalisées sur chacun des tronçons (BRGM et HYDRETTUDES).

Sur M6, le d50 est compris entre 50 mm et 250 mm. La granulométrie est donc relativement grossière. Ce phénomène est probablement lié à la pente du lit qui diminue et favorise le dépôt des matériaux les plus grossiers. De plus, il est possible que le tronçon présente un début de pavage puisque le secteur est en incision.

Sur M7, le d50 est plus faible, il se stabilise entre 48 mm et 100 mm. Cela s'explique probablement par le tri granulométrique qui s'est opéré le long des tronçons M6 (diminution de la pente favorisant le dépôt des matériaux grossiers).



Conclusion sur la granulométrie du bassin de la Rivière du Mât

40 relevés granulométriques ont pu être exploités sur le bassin : 14 relevés du BRGM (2007), 2 relevés d'A. Gonzalez (2016), 6 relevés d'Artelia-ETRM (2020) et 18 relevés d'HYDRETUDES (2022).

Les **relevés HYDRETUDES** ont eu lieu **entre mi-avril et début mai 2022**, le bassin avait donc subi le cyclone Batsiraï en janvier-février et les pluies exceptionnelles du mois d'avril. Lors de ces événements, certains tronçons ont reçu des **apports sédimentaires massifs par glissement ou ravinement** de versants. Ces phénomènes ont pu peut générer un véritable artéfact sédimentaire rendant ainsi plus complexe l'interprétation granulométrique

L'analyse des relevés montre que les granulométries du bassin sont **étendues** (présence de matériaux très fins à très grossiers), cela s'explique par l'origine des matériaux qui proviennent des **formations bréchiques** (blocs anguleux mélangés à une matrice fine).

Aucun gradient amont-aval n'a pu être mis en évidence à l'échelle du bassin, les hypothèses pouvant expliquer ce phénomène sont : un linéaire relativement court entre les zones de production sédimentaire et l'océan, un volume très important de matières fines fournies aux cours d'eau dès les zones de production, des zones de recharge par érosion en aval, la forte variabilité spatio-temporelle de la granulométrie sur le bassin.

Les d50 sont compris entre 10 mm et 300 mm. Cette **forte variabilité granulométrique** s'exprime **dans l'espace et dans le temps** et peut être liée à :

- Des apports sédimentaires récents par glissement ou ravinement qui entraînent une baisse du temporaire d50 du fait des apports importants en matières fines (ex : FJ2) ;
- Des phénomènes de déstockage des matériaux les plus fins voire de pavage du lit probablement liés à un processus d'incision encore actif. Ces phénomènes entraînent une augmentation du temporaire ou durable du d50 (ex : BS2, M4) ;
- La présence de barrages entraînant un tri granulométrique en amont en favorisant le dépôt d'une partie des matériaux (prises ILO, Bengalis) ;
- Des variations de pente qui favorisent un tri granulométrique des matériaux (ex : diminution de la pente dans le cône alluvial sur M6 et M7).

2.5.5 Transport solide

2.5.5.1 Vocabulaire utilisé : armure et pavage⁹

Dans les **rivières à lit mobile appartenant au domaine des lits à blocs, galets ou graviers**, le lit fluvial se caractérise par la **stratification des alluvions**. En fond de lit, on distingue ainsi **une couche superficielle grossière appelée substrat et une couche interne plus fine**.

Il existe **deux types de substrat : l'armure (1) et le pavage (2)**.

(1) L'armure (Bray & Church, 1980) concerne une couche superficielle de grains grossiers rencontrée sur les **cours d'eau non incisés** et dont la fourniture sédimentaire est donc plutôt abondante.

Cette armure est liée à une **ségrégation granulométrique** des alluvions qui ont généralement une granulométrie étendue en rivière. Lors des crues, les éléments les plus fins sont mis en mouvement laissant alors les plus grossiers forment une armure sur la surface du lit (Bray & Church, 1980).

L'armure a environ un **diamètre moyen (d50) 2,5 fois plus grossier que celui de la sous-couche** (Klingeman & Emmet, 1982), par contre les fractions grossières de ces deux strates sont très proches ($\geq d_{90}$) (Klingeman & Emmet, 1982 ; Hey & Thorne, 1983 ; Church, Mc Lean & Wolcott, 1987). L'épaisseur de l'armure est celle des plus grosses particules la constituant (Simon, 1986). Elle est remaniée régulièrement par les crues.

(2) Le pavage (Bray & Church, 1980) concerne les **cours d'eau incisés** à déficit de fourniture sédimentaire. Le substrat y est plus grossier que pour les lits à armure. **Sa granulométrie est très nettement supérieure à celle de la sous-couche** avec une imbrication des matériaux sans tuilage (Bray & Church, 1980).

Un pavage **se forme lorsque la charge de fond est inexistante ou trop faible** (Kellerhals, 1967). Par exemple lorsqu'elle est bloquée en amont par un barrage, supprimée par un reboisement intensif... voire lorsque le cours d'eau s'est incisé pendant une longue période (Bray & Church, 1980). **L'absence de fourniture sédimentaire conduit alors à un tri granulométrique** des particules grossières, ce tri **s'exerçant de manière permanente** (à la différence des armures qui sont remaniées régulièrement). Le pavage est ainsi souvent **très stable**.

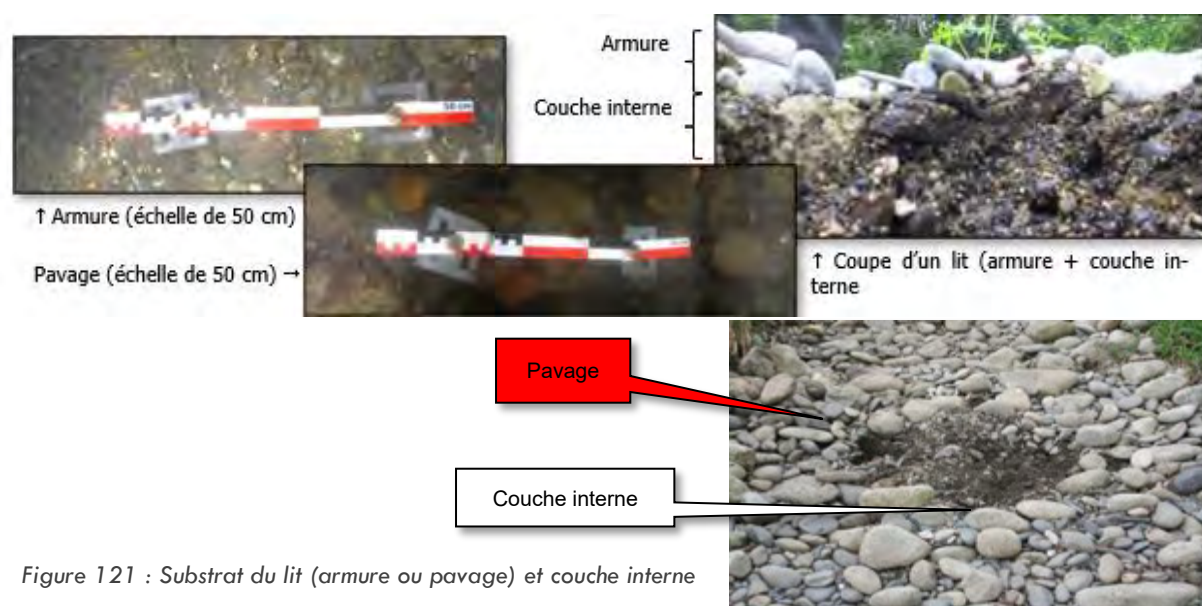


Figure 121 : Substrat du lit (armure ou pavage) et couche interne

⁹ Attention, les termes de pavage et armure ne sont pas utilisés de la même manière par tous les auteurs. Nous utilisons ici le terme d'armure au sens de Bray et Church (1980).

La **mobilité du substrat des lits à blocs, galets ou graviers** répond à **deux seuils distincts de mise en mouvement par charriage (et donc deux niveaux de débits)** :

- **En-dessous du premier seuil, le substrat n'est pas mobilisable** (seuil de mise en mouvement) ;
- **Au-dessus du premier seuil, certaines particules grossières** (non imbriquées¹⁰ dans l'épaisseur du substrat) **peuvent être mises en mouvement** et se déplacer, favorisant alors la remobilisation de certaines particules qu'elles masquaient. La charge alluviale est très faible et localisée, ce n'est pas un mouvement de masse et la carapace formée par le substrat n'est pas détruite. Elle subit peu de déformations et reste cohérente. Ce phénomène de mise en mouvement de certaines particules grossières touche essentiellement les matériaux grossiers surimposés au substrat.
- **Au-dessus d'un second seuil, les particules grossières surimposées et tuilées¹⁰ sont mobilisées** et les patchs de matériaux les plus uniformes regroupant des particules de faible taille se mettent en mouvement et conduisent à la **déstructuration puis à la destruction (par rupture) complète ou partielle du substrat**.

Dans le cas d'un substrat de type armure, **la remobilisation de l'armure se fera régulièrement lors de crues courantes**.

Au contraire, dans le cas d'un **pavage**, la granulométrie du substrat sera très grossière. Le seuil de mise en mouvement des premières particules (premier seuil) correspondra déjà à un débit élevé. D'autant plus si les particules présentent une imbrication ou un tuilage. Le second seuil permettant la déstructuration et la **rupture du pavage** sera par conséquent encore plus élevé et correspondra à des **événements et à débits exceptionnels**. Les pavages sont donc beaucoup plus stables dans le temps que les armures.

2.5.5.2 Transport solide en lit à granulométrie étendue

On a généralement tendance à considérer que pour une condition hydraulique, il existe une seule valeur de transport solide. Cette situation se vérifie dans les lits composés de matériaux uniforme mais pas dans les lits à granulométrie étendue.

En effet, lorsque la granulométrie du lit est étendue (ce qui est le cas sur la Rivière du Mât), le débit solide peut fortement varier pour des conditions hydrauliques quasiment constantes et ce quelle que soit la pente (Recking, 2006). En plus de ces variations de débits solides, des variations aléatoires du niveau du lit ont également été relevées.

Ces fluctuations du transport solide et du niveau du lit rendent d'autant plus difficile l'estimation des capacités de charriage dans les lits à granulométrie étendue tels que ceux du bassin de la Rivière du Mât.

Dans le cadre de sa thèse, A. Recking a d'ailleurs réalisé différentes expériences afin de mieux comprendre le comportement et les fluctuations observées dans les lits à granulométrie étendue. Il a ainsi pu observer que ces fluctuations étaient « fortement liées à des variations cycliques de l'état du lit ».

¹⁰ Les particules grossières formant le substrat protégeant la couche interne peuvent se déposer de trois manières distinctes :

- Par imbrication (Reid et al., 1980 ; Reid & Frostick, 1984 ; Brayshaw, 1985), une partie de la particule est intégrée, imbriquée dans l'épaisseur du substrat, telle une dent, la particule est enracinée dans le substrat voire dans la couche interne et est donc peu mobilisable. Il s'agit donc d'éléments captifs.
- Par surimposition : la particule est déposée sur le substrat, et est donc facilement mobilisable, elle n'est pas imbriquée mais surimposée. Il s'agit donc d'éléments libres.
- Par accumulation de tuilage (Brayshaw et al., 1983 ; Brayshaw, 1985). Il s'agit donc d'éléments bloqués.



Le cycle d'évolution des lits à granulométrie étendue décrit par A. Recking peut être résumé comme suit :

- 1- Le lit se stabilise à une pente minimale et le débit solide diminue.
- 2- Les sédiments fins continuent d'être transportés et la surface du lit devient plus grossière. On observe la formation d'une armure et d'une sous couche.
- 3- Un cycle long se met en place avec une alternance entre (1) formation d'une armure en surface et (2) destructions locales de l'armure entraînant la formation de nappes de charriage.
- 4- L'armure devient progressivement de plus en plus grossière, le cycle précédent ralentie et un pavage plus ou moins stable se forme.
- 5- L'armure ou le pavage se rompt et se détruit entièrement entraînant alors une érosion du profil en long et un retour à la pente minimale et à l'étape 1.

Les nappes de charriage observées lors de l'étape 3 sont ainsi responsables des fluctuations aléatoires du transport solide ainsi que de fluctuations rapides du niveau du lit. La répétition du cycle précédent entraîne quant à elle une évolution cyclique du niveau du lit.

☞ **Le transport solide dans les lits à granulométrie étendue peut donc fortement varier à cause des phénomènes de nappes de charriage et à cause des phénomènes d'armurage-pavage suivis de leur rupture cyclique.**

2.5.5.3 Les phénomènes de pavage sur le bassin de la Rivière du Mât

2.5.5.3.1 Où sont localisés les zones de pavage sur le bassin ?

En théorie, **les cours d'eau incisé présentent un lit pavé**. Sur le bassin de la Rivière du Mât, on devrait donc retrouver des pavages sur tous les tronçons incisés.

Cependant, sur les bassins dont la tendance lourde est à l'incision, **la réalité est plus complexe**.

Lors d'évènement hydrologiques basse fréquence (intenses) des apports sédimentaires massifs par glissement de versant ou érosion de berge peuvent alimenter le cours d'eau. Dans certains cas, ces apports entraîneront un **exhaussement du lit qui permettra de masquer partiellement ou totalement la présence d'un pavage**.

Après la crue, **ces apports seront toutefois déstockés progressivement** puisque la tendance globale du bassin reste à l'incision. Selon la durée de la période de relaxation¹¹, **le pavage pourra alors être remis à jour**.

Ces apports temporaires peuvent être qualifiés d'**artefacts sédimentaires** car ils ne sont pas représentatifs de la dynamique à long terme du bassin qui semble actuellement à l'incision.

¹¹ Période entre deux crues de basse fréquence qui va permettre au lit de se reconstruire et de se réajuster au fil des crues plus courantes.



Sur le bassin de la Rivière du Mât, ce phénomène d'**artefacts sédimentaires** est particulièrement présent sur l'**amont du bassin**. En effet, les **glissements de versant** peuvent fournir au cours d'eau des volumes de matériaux énormes. Il est alors possible d'observer un **exhaussement significatif du fond du lit voire un changement de style fluvial**.

Ces évolutions morphologiques sont cependant temporaires. En effet, les matériaux apportés proviennent de formations bréchiques. Ils sont donc caractérisés par une granulométrie très étendue et par une **forte proportion de matériaux fins**. La **remobilisation** d'une grande partie des matériaux est donc **relativement facile**. Elle peut être très rapide et même commencer **dès la fin de la crue**. Une fois les matériaux les plus fins déstockés, le cours d'eau revient à un niveau proche de son niveau initial. Il ne reste que les matériaux les plus grossiers et **le pavage va donc se renforcer**.

Sur le bassin de la Rivière du Mât, **certains tronçons bénéficient également d'un stock alluvial très abondant, l'apparition d'un pavage est donc retardée** car le cours d'eau peut puiser dans ces réserves.

On observe notamment cette situation sur le tronçon M2. Malgré une incision de 15 m depuis 1980, le tronçon ne présente pas de pavage et présente même un style tressant typique des secteurs où la charge sédimentaire est abondante. Sur ce tronçon, l'évolution vers un lit monochenalisé et pavé est également ralentie par des apports sédimentaires importants en amont et au droit du tronçon (glissements de versants). Sur le long terme, ces apports restent toutefois insuffisants puisque le tronçon continue de s'encaisser.

Par conséquent, **bien que le bassin présente une tendance globale à l'incision, on ne trouve pas de lit pavé sur l'intégralité des cours d'eau** et tronçons du bassin.

En 2022, les tronçons sur lesquels un pavage plus ou moins marqué a pu être observé sont les suivants :

- **RJ1 et RB1** : sur ces cours d'eau le pavage est particulièrement marqué. Il est lié aux fortes pentes et à une incision très importante.
- **BS2** : le pavage est bien développé, mais semble moins stable que sur certains secteurs de RJ1 (blocs moins imbriqués). Là aussi, il est lié aux fortes pentes et à une incision importante.
- **M5** : le pavage de ce tronçon est moins continu. Il est visible sous deux formes : des zones de granulométrie très grossière (radiers, partie supérieure de certains atterrissements) et des pseudo-seuils composés de blocs métriques à plurimétriques imbriqués entre eux formant de véritables marches dans le profil en long.
- **M6** : les matériaux en lit sont relativement grossiers mais la présence du pavage se remarque principalement lorsqu'on compare les relevés granulométriques du tronçon qui sont plus grossiers que les relevés des tronçons amont et aval. Sur M6, le D50 est compris entre 100 et 250 mm selon les granulométries, alors que sur M5 il est compris entre 10 et 120 mm, et sur M7 entre 50 et 100 mm. La présence de ce pavage est liée à l'incision subit par le tronçon depuis les années 1980.



2.5.5.3.2 *Quel est l'impact de ces zones de pavage sur le transport solide et l'évolution du profil en long ?*

La présence de ces zones de pavage entraîne une diminution du transport solide, notamment sur les tronçons qui ne bénéficient pas d'apports latéraux ou amont abondants (M5 et M6). En effet, le lien entre le lit et le transport solide est rompu pour les crues courantes. Il ne se fait plus que lors de crues extrêmes. Dans ces cas-là, le transport solide est rétabli de façon brutale par rupture du pavage. Cela peut entraîner des évolutions importantes de la géométrie du lit.

Sur l'amont du bassin (RJ1, RB1 et BS2), la présence du pavage permet de maintenir le profil en long et de le protéger de l'incision (au moins lors des crues courantes). Il favorise aussi de façon indirecte la stabilité du versant. En effet, à cause des fortes pentes, les capacités de charriage peuvent être très importantes même pour des crues de faibles occurrences. En l'absence de pavage ou si celui-ci venant à se rompre, le cours d'eau pourrait subir une incision très forte. Or, dans ces secteurs, l'incision peut favoriser la dynamique des glissements rapides situés sur les versants longeant ces cours d'eau, ce qui pourrait menacer les enjeux situés sur les plateaux (Grand Ilet, Hell-Bourg, Ilet à Vidot).

Sur BS2, une rupture du pavage pourrait également favoriser la réactivation du tronçon BS1 par érosion régressive du tronçon puis par déstabilisation de versants.

Sur M5, l'arasement prochain du barrage de Bengalis entrainera un réajustement vertical du profil en long. Le pavage présent en amont du barrage risque de se rompre rapidement, ce qui sera suivi d'une érosion régressive au moins sur les 1 200 m impactés actuellement par la présence du barrage.

2.5.5.4 Approche géomorphologique du transport solide : un fonctionnement du transport solide multiscalaire

Le bassin de la Rivière du Mât est caractérisé par un **fonctionnement hydromorphologique différencié dans le temps et l'espace**.

Tout d'abord, le climat contrasté de l'île de la Réunion entraîne une forte **variabilité des précipitations et des débits** entre saison sèche et saison des pluies, mais aussi d'une année à l'autre. En effet, les phénomènes cycloniques sont caractérisés par une variabilité annuelle voire décennale très élevée (cf. partie forçages climatiques 2.4.1 p.20). La variabilité des précipitations et des débits va impacter la production sédimentaire (phénomènes de glissement/ravinement), la recharge sédimentaire (érosion de berges) et le transport solide.

Deuxièmement, les formations géologiques fournissant le plus de matériaux aux cours d'eau du bassin sont les formations bréchiques dont la **granulométrie** est très **étendue**. Lorsque ces matériaux vont se retrouver en lit, ils vont donc subir un **transport différencié** en fonction de leur granulométrie et des débits.

Enfin, le fonctionnement hydromorphologique du bassin est différent spatialement : en amont (zone de production sédimentaire), dans la zone intermédiaire en gorges (zone de transfert), dans la zone intermédiaire à méandres (zone de transfert, de dépôt et de recharge sédimentaire) et en aval (zone de dépôt).



2.5.5.4.1 Variabilité temporelle du transport solide en amont du bassin

Sur l'amont du bassin, le régime hydrologique contrasté, les phénomènes de glissements rapides et la granulométrie très étendue des sédiments entraînent un fonctionnement hydromorphologique à **deux échelles temporelles : événements hydrologiques de basse fréquence versus événements hydrologiques de haute fréquence**.

a) Episodes hydrologiques de basse fréquence

Lors d'**épisodes hydrologiques exceptionnels** (forte pluviométrie / fort débit), la production sédimentaire est particulièrement intense sur le bassin. De nombreux glissements et ravines s'activent et fournissent des volumes très importants de matériaux aux cours d'eau.

Ce phénomène d'apport massif de sédiments peut être appelé **pulse sédimentaire**. En fonction de leur volume, ces pulses vont entraîner une **modification morphologique du lit** plus ou moins forte et durable : modification du tracé du lit, exhaussement du lit, apparition de bancs alternes, apparition d'un tressage (cf. Figure 122), etc.

b) Episodes hydrologiques de forte fréquence

Lors d'**épisodes hydrologiques courants**, les apports de versants sont moins importants. En effet, les précipitations n'ont pas une intensité suffisante pour activer ou réactiver de façon significative les glissements et ravines qui ont généralement commencé à se végétaliser pendant la période d'intercrue. Les cours d'eau remobilisent donc principalement leur stock alluvial. Un phénomène de déstockage des matériaux et de végétalisation de la bande active/des terrasses récentes peut alors être observé : encaissement du lit dans ses alluvions, réduction de la bande active par végétalisation, évacuation des matériaux les plus fins, réapparition/renforcement de l'armure ou du pavage, etc (cf. Figure 123)



Figure 122 : Glissement de terrain et apparition d'un tressage en aval sur l'amont de FJ1 lors des événements basse fréquence du printemps 2022



Figure 123 : Déstockage des matériaux commencé en fin de crue puis avec les débits courants et risquant de s'accroître au fil des mois (voire années) à venir jusqu'au prochain événement basse fréquence (FJ2)

→ L'encaissement progressif du chenal dans ses alluvions est visible. Les terrasses les plus hautes vont probablement se végétaliser progressivement conduisant à une rétraction de la bande active. Jusqu'à la prochaine crue morphogène / basse fréquence, le cours d'eau aura plutôt tendance à remanier ses matériaux récents.

2.5.5.4.2 Transport solide dans la zone intermédiaire du bassin

La zone intermédiaire du bassin (M3, FJ3, FJ4, M4) est une **zone de transfert des matériaux**. Il y a très **peu d'apports sédimentaires latéraux** et les **zones de dépôts sont limitées** mis à part à l'amont des prises ILO et quelques zones latérales de blocage des matériaux.

Lors des événements de crue, les matériaux remobilisés et provenant de l'amont transitent dans les gorges mais se déposent peu. Un **exhaussement du fond du lit peut avoir lieu pendant la crue** mais **il semblerait que les matériaux se déstockent assez rapidement en fin de crue et après la crue** avec les débits courants.

Dans les zones de gorges non influencées par les prises ILO, nous avons pu observer d'étroites terrasses latérales. Ces terrasses semblent relativement hautes et sont probablement les restes d'un exhaussement du lit ayant eu lieu lors des événements hydrologiques du printemps 2022. Ces terrasses reposent parfois sur la roche mère ou cette dernière affleure souvent à proximité.



Figure 124 : Terrasses étroites et hautes témoignant d'un exhaussement récent du fond du lit (flèches rouges), chenal s'étant réencaissé entre ses alluvions et affleurement de la roche mère (flèche bleue), tronçon M3 dans la traversée de Salazie

2.5.5.4.3 Variabilité temporelle du transport solide sur la partie aval du bassin

Sur l'aval du bassin (M5, M6, M7), c'est principalement les variations de débits qui vont différencier temporellement le fonctionnement hydromorphologique. En effet, la production sédimentaire (apport des versants) est inexistante, la recharge sédimentaire par érosion de berge a un impact plus limité sur le transport solide et la granulométrie est moins étendue.

Deux cycles majeurs de fonctionnement peuvent ainsi être distingués : **crues de basse fréquence versus crues de haute fréquence**.

a) Crues basse fréquence

Les **crues de basse fréquence** ou **crues BFHM** (Basse Fréquence Haute Magnitude, Arnaud-Fassetta & Fort, 2004) sont des crues **hypermorphogènes**. Elles présentent une **morphogénie de dégrossissement et d'ébauche** du lit caractérisée par des avulsion, des migrations importantes ou des recoupements de méandres, un élargissement de la bande active, des réactivations d'annexes alluviales, etc.

Lors de ce type de crue, le transport solide est particulièrement intense et le cours d'eau peu remobiliser des matériaux particulièrement grossiers. De plus, c'est lors de ce genre de crue qu'on pourra observer une déstructuration partielle voire une rupture totale des zones de pavage entraînant alors une augmentation du transport solide.

Lors de ces crues, des volumes massifs de matériaux peuvent transiter vers l'aval du bassin. Ils seront ensuite remobilisés lors des crues haute fréquence ou se végétaliseront pendant l'intercrue.

b) Crues haute fréquence

Les **crues de haute fréquence** sont des crues courantes dont la **morphogénie** est **plus faible** bien qu'elles agissent sur les matériaux les plus fins. Leur répétitivité va permettre au cours d'eau de **façonner son lit** notamment en s'entaillant dans ses alluvions lorsque la granulométrie le permet. Elles favorisent l'export des matériaux fins qui ne sont pas protégés par une armure ou un pavage.

Lors de ces crues courantes ou crues de construction, le cours d'eau étant moins puissant, il est beaucoup moins mobile latéralement et il ne peut pas remobiliser un fuseau granulométrique aussi large que lors des crues d'ébauche. Il va donc avoir tendance à déstocker petit à petit les apports des crues d'ébauche en s'incisant dans ses matériaux. Il se crée ainsi un chenal plus étroit emboîté dans le lit d'ébauche.

La bande active se réduit progressivement par végétalisation et du fait de l'encaissement progressif du chenal dans ses alluvions, les annexes fluviales se déconnectent petit à petit, les secteurs multichenalisés tendent vers un style monochenalisé, le cours d'eau n'a pas la puissance suffisante pour éroder ses berges, etc.

Il faut noter que ces crues mobilisent les matériaux fins et moyens, ce tri **granulométrique** **favorise le renforcement progressif de l'armure ou du pavage du lit**.

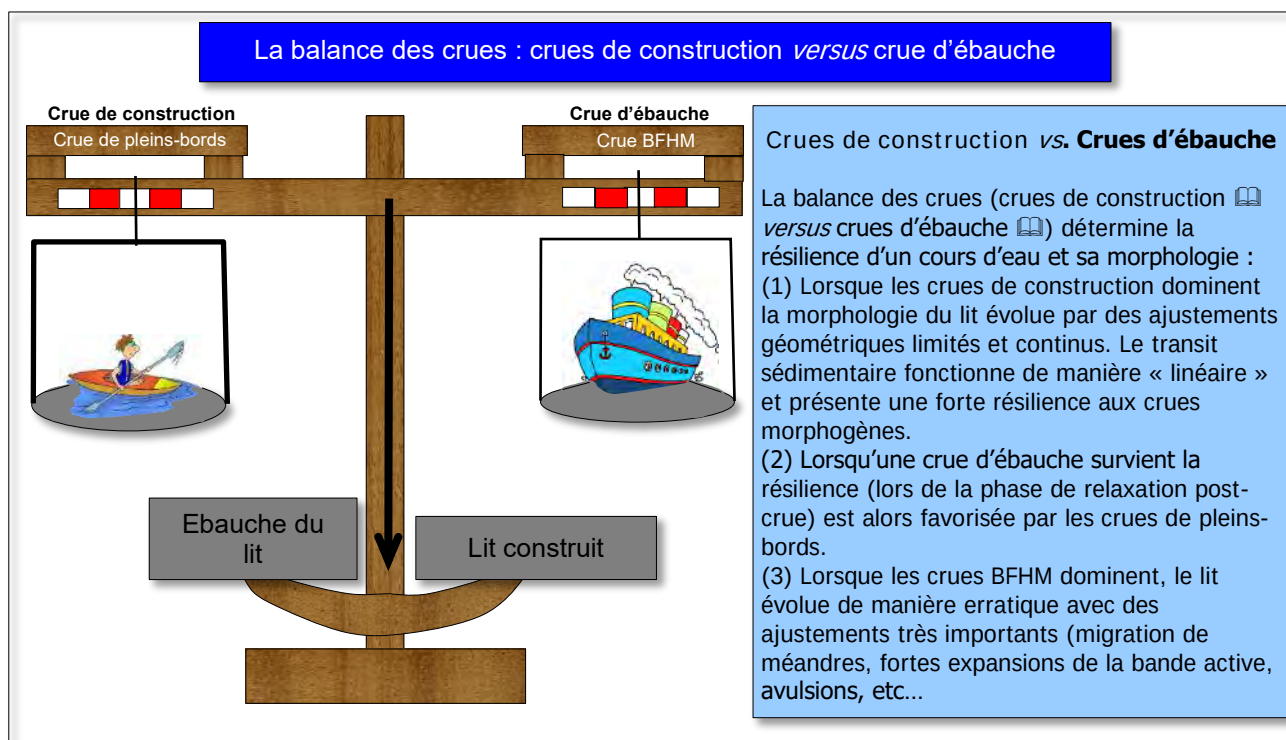


Figure 125 : La balance des crues : construction *versus* ébauche



Fonctionnement hydromorphologique des cours d'eau du bassin

1- Fonctionnement à deux temps

Au cours d'un temps, on observe donc une alternance entre **deux fonctionnements** sur le bassin : **basse fréquence et haute fréquence**.

Un **évènement hydrologique/une crue basse fréquence** ou BFHM peut **remobiliser des volumes de matériaux importants** sur le bassin de la Rivière du Mât (apports par glissements, produits d'érosion, remobilisations de terrasses végétalisées, rupture de pavage libérant des matériaux auparavant fixés, etc.).

Après le passage d'un évènement hydrologique/crue BFHM, le lit doit se reconstruire (grâce aux évènements hydrologiques courants et aux crues de construction) cette période est qualifiée de **temps de relaxation** (Wolman & Gerson, 1978).

Plusieurs auteurs ont ainsi montré que pendant cette période de relaxation, **le transport solide augmente** (Lenzi, 2001 ; Lenzi et al., 2004 ; Recking, 2012 ; Turowski et al., 2009). En effet, les évènements BFHM remobilisent des volumes de matériaux importants et les rendant ensuite disponibles pour le transport solide.

Morche et al., (2008) ont également précisé qu'**avec le temps** (et en l'absence de nouvel évènement/crue BFHM), la bande active se trouve colonisée par la végétation et **le transport solide diminue alors graduellement** du fait de la moindre mobilité des matériaux. De plus, d'après Recking (2006), l'armurage du lit va aussi se reformer progressivement et se renforcer parfois jusqu'à devenir un pavage, réduisant donc aussi le transport solide.

☞ **Ainsi, une tendance constatée pendant une longue période d'intercrue (période entre deux crues BFHM) peut s'inverser brutalement à la suite d'une seule crue BFHM. Cela complexifie l'analyse du transport solide qui peut donc fortement varier dans le temps.**

2- Fonctionnement spatialisé

Le fonctionnement des cours d'eau du bassin de la Rivière du Mât est différent en **amont** (influence directe des glissements, zones très pentues, zones de régulation du transport solide), dans les **gorges** (zone de transfert) et en **aval** (apports latéraux plus limités, dépendance forte aux apports amonts).

L'évaluation du transport solide se heurte donc à une question majeure : combien de temps la charge solide met-elle pour arriver de l'amont à l'aval du bassin ? Les éléments de connaissance dans ce domaine sont présentés en Annexe 8 mais sont encore très limités et ne concernent pas les bassins réunionnais. La mise en place de campagnes de **traçage sédimentaire** sur le bassin de la Rivière du Mât serait donc particulièrement intéressante pour mieux prévoir l'arrivée d'ondes sédimentaires en aval du bassin et leur impact sur le profil en long.



2.5.5.5 Synthèse bibliographique

2.5.5.5.1 Capacité de charriages calculées par le BRGM en 2008

Les capacités de transport solide ont été estimées dans le cadre de l'étude hydrogéomorphologique de la Rivière du Mât (BRGM, 2008).

Le calcul de la capacité maximale de transport solide a été effectué à partir la **formule Sogreah-Lefort (1991)** qui était la plus adaptée au bassin.

Tableau 12 : Plages de validité de la formule Sogreah-Lefort (1991)

Plages de validité	
Éléments	Sogreah-Lefort (1991)
Pente	0.004 % à 20 %
D ₅₀	Supérieur 1 mm
Débit liquide / Débit de début d'entraînement Q/Q ₀	Inférieur à 25

Ces calculs ont été réalisés sur 17 sections réparties sur la rivière du Mât et la rivière des Fleurs Jaunes. Ces sections sont situées au droit des sites de mesure de la granulométrie (14 sites) ou sur des sites où la granulométrie a été estimée par observation (3 sites).

Dans certains cas, les calculs ont été effectués dans des zones de gorges non adaptées aux formules de transport solide. Le BRGM précise que cette démarche leur a permis de vérifier la cohérence globale de leurs calculs.

Les données topographiques utilisées pour ces calculs ont été réalisés par photogrammétrie (levés aériens). Ce type de levés était suffisant pour définir la pente d'écoulement du cours d'eau et la largeur du lit qui sont les paramètres d'entrée « topographiques » nécessaire à la formule Sogreah-Lefort.

Les données de débit utilisées ont été estimées par le BRGM dans le cadre de la même étude par analyse hydrologique et utilisation du modèle Gardenia.

Les capacités de transport maximales ont été calculés par années entre 1993 et 2007. Les résultats retenus par tronçons par le BRGM sont présentés dans le tableau suivant.



Tableau 13 : Evaluation par tronçon de la capacité maximale de transport de la Rivière du Mât suivant la formule de Sogreah Lefort (pente 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

En résumé, les **capacités maximales annuelles** de transport solide calculées par le BRGM en dehors des zones de gorges sont les suivantes :

- 130 000 m³/an pour la rivière du Mât amont ;
- 97 000 m³/an pour la rivière des Fleurs Jaunes hors ravine Roche à Jacquot, environ 130 000 m³ en incluant la ravine ;
- 250 000 m³/an pour la rivière du Mât intermédiaire.

Les **capacités maximales de transport solide lors d'un évènement tel que Hyacinthe** en dehors des zones de gorges sont les suivantes :

- 610 000 m³/an pour la rivière du Mât amont ;
- Plus de 510 000 m³ pour la rivière des Fleurs Jaunes hors ravine Roche à Jacquot, environ 610 000 m³ en incluant la ravine ;
- 1 500 000 m³ pour la rivière du Mât intermédiaire ;
- Entre 1 200 000 m³ et 1 600 000 m³ pour la rivière du Mât aval.



2.5.5.5.2 Capacité de charriages calculées par Artelia-ETRM sur la Ravine Roche à Jacquot en 2021

a) Complexité du site et limites des formules

L'étude d'Artelia-ETRM sur la Ravine Roche à Jacquot a tenté d'estimer la capacité de transport solide de la Ravine Roche à Jacquot en amont de la cascade Micheline (tronçon RJ1).

☞ L'étude précise bien que les **estimations du transport solide de la Ravine Roche à Jacquot sont complexes** car elle ne coule pas dans un lit alluvionnaire mais dans un **lit pavé** (cf. partie 2.5.5.1 p.148). Il y a donc une déconnexion entre la géométrie du lit et le transport solide. Or, les formules de transports solide sont calibrées pour être utilisées dans des lits alluvionnaires (sections auto-formées dans leurs alluvions) où géométrie du lit, transport solide et hydraulique sont liés. Autre source d'incertitude, **la pente** actuelle du tronçon est très importante **et atteint parfois les limites d'utilisation des formules de transport solide**.

Afin de bien comprendre le fonctionnement de la Ravine Roche à Jacquot, il est important de faire la **distinction entre la capacité de transport et le transport effectif** :

- Capacité de transport : c'est une valeur théorique maximale ou potentielle qui ne peut être atteinte que s'il y a suffisamment de matériaux disponibles (stock alluvial, des apports amont et des apports des versants).
- Transport solide effectif : cela correspond au transport solide réel au cours d'une crue qui pourra donc être inférieur à la capacité de transport (ex : si le stock alluvial et les apports amont et latéraux sont insuffisants, si le lit est pavé et résiste à la crue).

Ainsi, **dans le cas de la Ravine Roche à Jacquot dont le lit est pavé, deux situations peuvent se produire lors d'une crue** :

- **Le pavage du lit résiste à la crue** : le transport solide effectif correspondra alors uniquement aux apports latéraux et amont. Il sera inférieur à la capacité de transport théorique. Sur la Ravine Roche à Jacquot, à cause des fortes pentes, les matériaux provenant de l'amont et des versants seront transportés vers l'aval quasiment sans se déposer (hors zone aménagées ou zones de masquage). Les échanges avec le lit seront quasi-nul et le profil en long évoluera donc très peu voire pas du tout.
- **Le pavage se rompt** (en général lors de crues extrêmes), ce qui rétablit un lien entre le transport solide effectif et le lit du cours d'eau. Dans ces cas-là, le transport solide peut être très important puisque les matériaux de la sous-couche sont également remobilisés. Le profil en long peut également subir des évolutions de grande ampleur.

Cette dynamique de lit pavé est très différente de la dynamique d'un lit alluvionnaire qui va généralement évoluer progressivement au fil des crues. Dans le cas d'un pavage résistant à la crue, le transport solide effectif sera largement inférieur à la capacité de charriage théorique. Dans le cas d'une rupture du pavage, les capacités de charriage calculées ne seront peut-être pas réalistes non plus car le transport effectif dépendra aussi du niveau de déstructuration du pavage et de l'évolution du profil en long.

Malgré les difficultés associées à l'estimation du transport solide sur la Ravine Roche à Jacquot, le groupement Artelia-ETRM a proposé une méthode de quantification du transport solide de la Ravine.

b) Méthode Artelia-ETRM

La capacité du transport solide a été calculée avec la formule de Lefort 2015 dont la seule limite d'utilisation est la pente (elle doit être inférieure à 20%).

Cette formule nécessite plusieurs paramètres d'entrée :



- Le débit : Artelia-ETRM a appliqué cette formule pour des crues Q10, Q30 et Q100 avec respectivement des débits de pointe de 100 m³/s, 130 m³/s et 200 m³/s. Les hydrogrammes ont été créés en prenant comme hypothèse une durée de crue de 72h.
- La largeur du lit : une largeur généralisée à 15 m
- Le diamètre moyen du matériau généralisé à 20 cm
- La pente du lit : deux pentes différentes ont été utilisées dans les calculs par Artelia ETRM :
 - Une pente de 5% correspondant selon Artelia-ETRM à la pente d'équilibre du tronçon ;
 - La pente observée/réelle (comprise entre 6,4% et 21%).

Les effets de la pente influencent grandement les résultats obtenus. Pour rappel, la formule de Lefort ne s'applique pas pour des pentes supérieures à 20%.

L'utilisation de la pente d'équilibre n'est pas clairement explicitée dans le rapport.

La pente d'équilibre représente une pente relativement stable (bien qu'elle varie dans le temps et l'espace) pour laquelle le transport solide est à l'équilibre. Les apports arrivant en amont du tronçon sont équivalents aux matériaux sortants. Lorsqu'un tronçon est à l'équilibre, il présente un lit alluvionnaire.

Il semblerait qu'Artelia-ETRM ait choisi d'utiliser la pente d'équilibre dans les calculs car elle pourrait représenter le transport solide si le profil en long évoluait drastiquement à la suite d'un événement hydrologique extrême. En effet, une rupture du pavage ou des apports massifs du versant pourraient fortement modifier le profil en long et créer (peut-être temporairement) des zones alluvionnaires et non pavées.

L'utilisation de cette pente a peut-être aussi permis d'évaluer le transport solide dans le cas où la Ravine serait aménagée de manière globale (pente inter-ouvrages).

Artelia-ETRM a choisi une pente d'équilibre à 5% car ils estiment que c'est une pente d'équilibre « probable en temps ordinaires ».

c) Résultats

Les volumes des matériaux (en m³) charriés par la Ravine Roche à Jacquot au niveau de la cascade pour Q10, Q30 et Q100 calculés selon les 2 modes de calcul sont donnés dans le tableau ci-dessous.

Tableau 14 : Capacités de charriage de la Ravine Roche à Jacquot (Artelia-ETRM, 2021)

ETRM 2021	Q10	Q30	Q100
Pente = 5%	90 000	140 000	270 000
Secteur amont	900 000	1 200 000	2 200 000
Secteur raide	2 100 000	2 800 000	4 900 000
Aval secteur raide	1 300 000	1 800 000	3 200 000
Secteur aménagé	150 000	200 000	450 000
Secteur aval	650 000	900 000	1 600 000



Avec la pente d'équilibre, les capacités de charriage obtenues sont de 90 000, 140 000 et 270 000 m³ pour Q10, Q30 et Q100. Ces volumes pourraient déjà entraîner des modifications significatives de la géométrie du cours d'eau.

Les résultats avec la pente du lit actuel donnent des capacités de charriage bien supérieures étant donné que les pentes réelles sont largement supérieures à la pente d'équilibre. La capacité de charriage dépasse ainsi largement le million de mètres cubes. Ces résultats induiraient des incisions majeures dans le secteur raide et des dépôts conséquents dans le secteur aménagé de l'ordre de la centaine de mètres de matériaux. Ce scénario est décrit par Artelia-ETRM comme « improbable ». En effet, de nombreuses incertitudes pèsent sur ces résultats (pavage du lit, forte pente, granulométrie très étendue des matériaux). De plus, pour qu'un tel scénario se réalise cela nécessiterait que des millions de mètres cubes de matériaux soient fournis au cours d'eau depuis les versants. Bien que les glissements soient très actifs de tels apports transformeraient le cours d'eau bien avant qu'il ne se soit exhaussé de centaines de mètres.

Toutefois, ces calculs permettent de montrer que la Ravine Roche à Jacquot est capable de transporter des volumes de matériaux très importants. En cas de dépavage, la ravine pourrait donc se transformer complètement (modification verticale et en plan), menacer les infrastructures amont (route, pont) et impacter la dynamique du glissement de Grand Ilet.

D'après Artelia-ETRM, le pavage a donc un rôle essentiel sur la Ravine Roche à Jacquot.

2.5.5.6 Approche calculatoire du transport solide - HYDRETUDES

2.5.5.6.1 Outils et formules

Le calcul des capacités de charriage a été effectué à l'aide de l'outil en ligne BedLoadWeb, dont le code numérique a été développé par Alain Recking.

Cet outil permet entre autres de calculer la capacité de charriage maximale d'un cours d'eau et son bilan sédimentaire annuel ou à l'échelle d'une crue.

Pour cela, il intègre à son module de calcul une quinzaine de formules de transport solide différentes adaptées à différents types de cours d'eau (dont les principales Lefort, Meyer-Peter & Muller, Recking, Smart & Jaeggi...). Ces formules permettent de calculer à partir des diamètres caractéristiques de la granulométrie complétés par d'autres paramètres (hauteur d'eau, pente du lit...) la capacité maximale de transport par unité de temps (seconde, année, crue...).

Les calculs de transport solide seront effectués à partir des formules de Recking (2013) et de Lefort (2017).

La **formule de Recking** (2013) présente un **domaine de validité globalement adapté au bassin** de la rivière du Mât aussi bien en termes de pentes que de granulométrie (cf. tableau ci-dessous). Quelques secteurs sont caractérisés par des diamètres caractéristiques ou des pentes hors domaine de validité mais cela reste ponctuel. Les secteurs les plus pentus ne feront dans tous les cas pas l'objet de calculs de transport solide.

L'utilisation du D₈₄ permet à cette formule de mieux prendre en compte les effets de masquage surexposition courants dans le cas de **granulométries étendues** et présentant un D₈₄ supérieur à 50 mm (cf. Eléments de connaissance pour la gestion du transport solide en rivière, Malavoi *et al.* 2011). Les granulométries du bassin sont particulièrement étendues et présentent toutes un D₈₄ supérieur ou égal à 50 mm.

Cette formule intègre également la **notion de transport solide partiel** grâce à l'estimation du **Shields de mobilité** (τ_m^*). Ce nombre délimite le transport partiel du transport total (Equations et concepts pour le calcul du transport solide en rivières, Recking, 2019). La formule de calcul estimant le τ_m^* est différente en fonction de la morphologie du lit (seuils-mouilles et bancs alternés $\neq$ step-pool, lit plat et autres morphologies).

Estimation du Shields de mobilité, Recking, 2015

pour les Seuils-mouilles, bancs alternés $\tau_m^* = (5S + 0,06) \left(\frac{D_{84}}{D_{50}} \right)^{4,4\sqrt{S}-1,5}$
pour les autres morphologies $\tau_m^* = 1,5S^{0,75}$
(Pour les rivières à sable, peu importe τ_m^* car les écoulements vérifient en général $\tau > \tau_m^*$)

Figure 126 : Formules d'estimation du Shields de mobilité (Source : Recking, 2019)

La **formule de Lefort** (2017) présente un **domaine de validité très ouvert** et peut donc être utilisée sur le bassin de la Rivière du Mât. Sa version antérieure (formule Sogreah-Lefort) avait déjà été utilisée dans l'étude du BRGM (2008) et l'étude Artelia-ETRM a utilisé la formule de Lefort 2015 sur la Ravine Roche à Jacquot.

Cette formule se base sur l'**utilisation du D_m** (diamètre moyen) au lieu du D₅₀ car cela permet de **mieux prendre en compte le début d'entraînement des matériaux** dans le cas de granulométries étendues.



De plus, la formule **intègre également en tant que paramètre l'étendue granulométrique (G_r)** (Equations et concepts pour le calcul du transport solide en rivières, Recking, 2019). Cette dernière est calculée selon la formule ci-dessous.

$$G_r = \frac{1}{2} \left[\frac{D_{84}}{D_{50}} + \frac{D_{50}}{D_{16}} \right]$$

Figure 127 : Etendue granulométrique dans la formule Lefort 2017

Tableau 15 : Plages de validité des formules de Recking (2013) et Lefort (2017)

Conditions expérimentales et plages de validité		
Éléments	Recking (2013)	Lefort (2017)
Pente	0.004 % à 8.5 %*	<20%
D₅₀	0.25 à 220 mm	Non utilisé directement par la formule
D_m	Non utilisé par la formule	Pas de limite d'utilisation
D₈₄	0.30 à 558 mm	Non utilisé directement par la formule

2.5.5.6.2 Incertitudes de l'approche calculatoire

Il est important de souligner que l'utilisation des formules de transport solide est associée à de **nombreuses incertitudes** :

■ **Les données d'entrée présentent déjà une part intrinsèque d'incertitudes :**

- La granulométrie varie dans l'espace et au fil des crues ;
- Les données des stations hydrométriques n'ont pas toutes la même fiabilité ;
- Les incertitudes relatives aux débits modélisés par MESRI ;
- La pente qui est une moyenne ;
- La rugosité de la section est simplifiée alors qu'elle peut fortement varier ;
- La morphologie, élément pris en compte dans le calcul du Shields de mobilité de la formule de Recking, est parfois difficile à définir (ex : forme intermédiaire entre le tressage et les bancs alternés) ;
- Les données topographiques extraites des LiDAR ne permettent pas d'obtenir la cote du fond du lit dans les zones en eaux et des incertitudes persistent dans les zones fortement végétalisées. Le transport solide est donc sous ou sur estimé au niveau de ces profil. L'utilisation de profils en travers topographiques est donc à privilégier ;

■ **Les formules de transport solide permettent de calculer une capacité maximale de transport solide.** Cette capacité de transport est **potentielle** puisqu'elle dépend de la disponibilité en matériaux provenant de l'amont et des versants ;

■ **Les formules de transport solide sont calibrées pour être utilisées sur des sections alluviales et non contraintes**, où hydraulique, granulométrie et géométrie du lit sont liées (Recking, 2019). Les formules de transport solide ne sont donc pas adaptées aux sections trop contraintes par les versants ou par des ouvrages anthropiques trop pentues ou présentant un lit à bloc ou en roche mère. Dans le cas de tronçons à très fortes pentes (>5%), le lit est souvent caractérisé par la présence d'une armure très peu mobile. Ces tronçons fonctionnent donc comme des zones de transferts des matériaux ou tubes (cf. Recking, 2016), ce qui signifie que le transport solide n'impacte pas la morphologie de ces tronçons (hors événements extrêmes). Sur le bassin, nous n'effectuerons donc pas de calcul de transport solide pour tous les tronçons (cf. sous-partie 2.5.5.6.3) ;



- Les formules de transport solide ne prennent pas en compte **l'évolution du fond du lit** au cours du temps ;
- **Sur les tronçons en tresses/multichenalisés, il existe des incertitudes** concernant l'évaluation du lit actif lors des événements ou débits exceptionnels. La littérature s'accorde toutefois à dire que le transport solide se concentre dans le chenal principal (cf. Manuel d'Utilisateur de BedloadWeb, Recking, 2019). En effet, au-delà d'une certaine cote la lame d'eau s'étale, on observe un abattement des vitesses et le transport solide ne se concentre plus que dans le chenal principal ;
- Dans les calculs réalisés sous BedLoadWeb, **les chenaux secondaires** ne sont pas considérés comme actifs du point de vue du transport solide. Or, leur taille et leur cote de fond est parfois très proche de celles du chenal principal ;
- Les résultats sont calculés sur plusieurs profils puis moyennés à l'échelle des tronçons « homogènes ». En réalité, le transport solide peut varier à l'intérieur même du tronçon et entre chaque profil ;
- La **granulométrie étendue** présente sur le bassin entraîne également des incertitudes quant à l'évaluation du transport solide. En effet, les phénomènes de nappes de charriages et d'armurage-pavage associés à ces granulométries entraînent des variations de débit solide pour une même condition de débit liquide.

2.5.5.6.3 Tronçons retenus pour les calculs de transport solide

Tous les tronçons du bassin ne sont pas adaptés au calcul du transport solide. En effet, l'utilisation de formules semi-empirique nécessite de respecter des plages de validité et de soigneusement sélectionner les sections de calcul.

Les sections de calcul doivent correspondre à des sections auto-formées ou alluviales (Recking, 2019). Ces sections présentent un lien direct entre la géométrie du lit, la granulométrie et l'hydraulique.

Sur les sections contraintes par le relief ou par des ouvrages de protection de berge, les sections trop pentues et les sections dont le fond du lit est fixé (roche mère affleurante, lit à blocs), la morphologie du lit est soumise à influence d'autres facteurs. Les formules ne sont donc pas adaptées à ces secteurs.

☞ Les tronçons sur lesquels nous effectuerons des calculs de transport solide sont présentés dans le tableau ci-dessous et en Figure 129.

Tableau 16 : Tronçons retenus pour les calculs de transport solide

TRONCONS ET POSSIBILITE DE CALCUL DU TRANSPORT SOLIDE					
Cours d'eau	Identifiant + couleur	Longueur [km]	Pente [%]	Calcul de TS	Commentaire
Rivière du Mât	M_1	2.4	4.5	Non	Cours d'eau trop contraint.
	M_2	1.9	3.3	Oui	Bien que le lit soit contraint latéralement par le relief, le stock alluvial est très important et le lit actuel évolue localement entre des terrasses végétalisées. Le fonctionnement du tronçon semble donc relativement adapté au calcul de transport solide.
	M_3	4.7	3.7	Non	Cours d'eau trop contraint (gorges).

	M_4	4.1	2.0	Non	Cours d'eau trop contraint (gorges).
	M_5	8.5	1.6	Oui	Le cours d'eau est localement contraint par le relief ou la route alors que dans d'autres secteurs il s'écoule entre des terrasses alluviales. Nous sélectionnerons les sections les plus adaptées au calcul du transport solide (zones alluviales).
	M_6	3.4	1.6	Oui	L'amont du tronçon est localement contraint par une coulée de basalte, cette zone ne sera pas prise en compte dans le cadre des calculs de transport solide.
	M7	3.2	1.5	Oui	Tronçon divagant en delta.
Ravine sans nom	RAV_1	0.4	24.5	Non	Tronçon trop pentu.
Bras Sec	BS_1	1.1	10.9	Non	Le tronçon est très pentu et le lit semble composé de matériaux très grossiers (blocs), le calcul du transport solide semble donc peu adapté.
Rivière des Fleurs Jaunes	FJ_1	2.4	9.7	Non	Cours d'eau trop contraint.
	FJ_2	2.5	5.0	1 section de calcul	Tronçon contraint sur sa moitié amont. Sur la moitié aval, la vallée s'élargit un peu et la rivière s'écoule ponctuellement entre des structures alluvionnaires ou des terrasses végétalisées. Nous réaliserons un à deux calculs de transport solide dans ce secteur.
	FJ_3	1.8	3.4	1 section de calcul	Bien que ce tronçon soit contraint (gorges), 1 section de calcul est proposée à l'amont du tronçon dans un secteur où le cours d'eau présente encore une bande active assez large avec un chenal divagant.
	FJ_4	6.2	3.9	Non	Cours d'eau trop contraint (gorges).
Ravine Roche à Jacquot	RJ_1	1.1	13.8	Non	Tronçon trop pentu.
	RJ_2	2.0	8.2	1 section de calcul	Tronçon très pentu et contraint sur ses deux tiers amont. A l'approche de la confluence avec la rivière des Fleurs Jaunes, la pente diminue et la vallée s'élargit localement. Nous réaliserons un calcul de transport solide dans ce secteur.
Ravine Blanche	RB_1	0.8	12.8	Non	Tronçon trop pentu.

2.5.5.6.4 Données d'entrée

Les paramètres d'entrée utilisés sont la **pente**, la granulométrie du lit, la **largeur active et la bande active** du cours d'eau, la **morphologie** du lit et le **débit** (courbe des débits classés pour la capacité de charriage annuelle ou hydrogramme pour le calcul de la capacité de charriage maximum lors d'une crue).

Les paramètres largeur active et largeur de la bande active ont été définis à partir des données topographiques les plus récentes (LiDAR 2015 sur l'amont du bassin, profils 2017 sur l'aval).



Les hydrogrammes de crue Q20, Q50, Q100 et Q500 ont été extraits du modèle MESRI et sont présentés dans l'Annexe 9. Pour chaque période de retour, le modèle MESRI a ainsi permis de modéliser 20 hydrogrammes correspondant chacun à un point de calcul du transport solide sur le bassin.

Les hydrogrammes de Dina (2002) sont ceux mesurés en station (Escalier et Bengalis).

L'hydrogramme de Hyacinthe est celui du BRGM (2008) ajusté par BRLi afin d'obtenir un pic de crue à 2500 m³.

Les débits classés proviennent des données HydroPortail (stations hydrométriques Pont de l'Escalier et Bengalis, cf. figure ci-dessous).

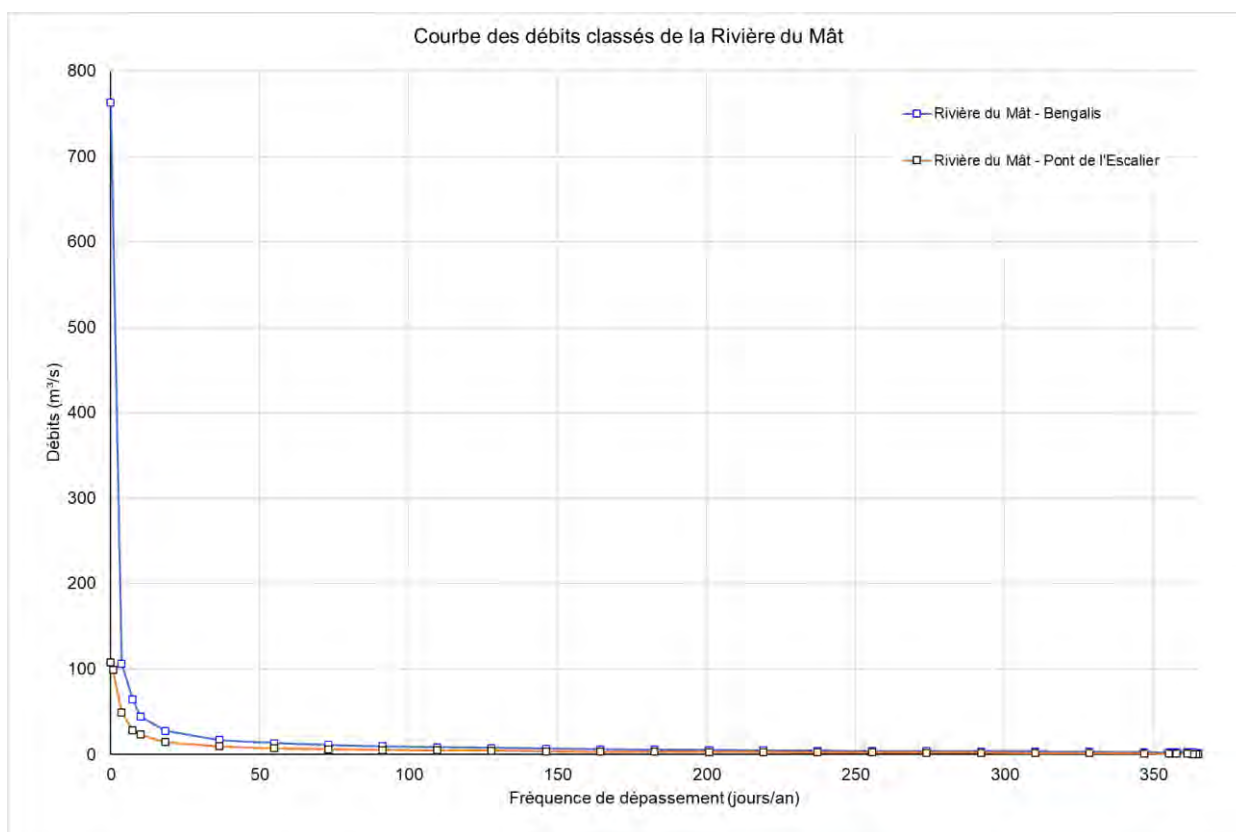


Figure 128 : Courbe des débits classés de la Rivière du Mât

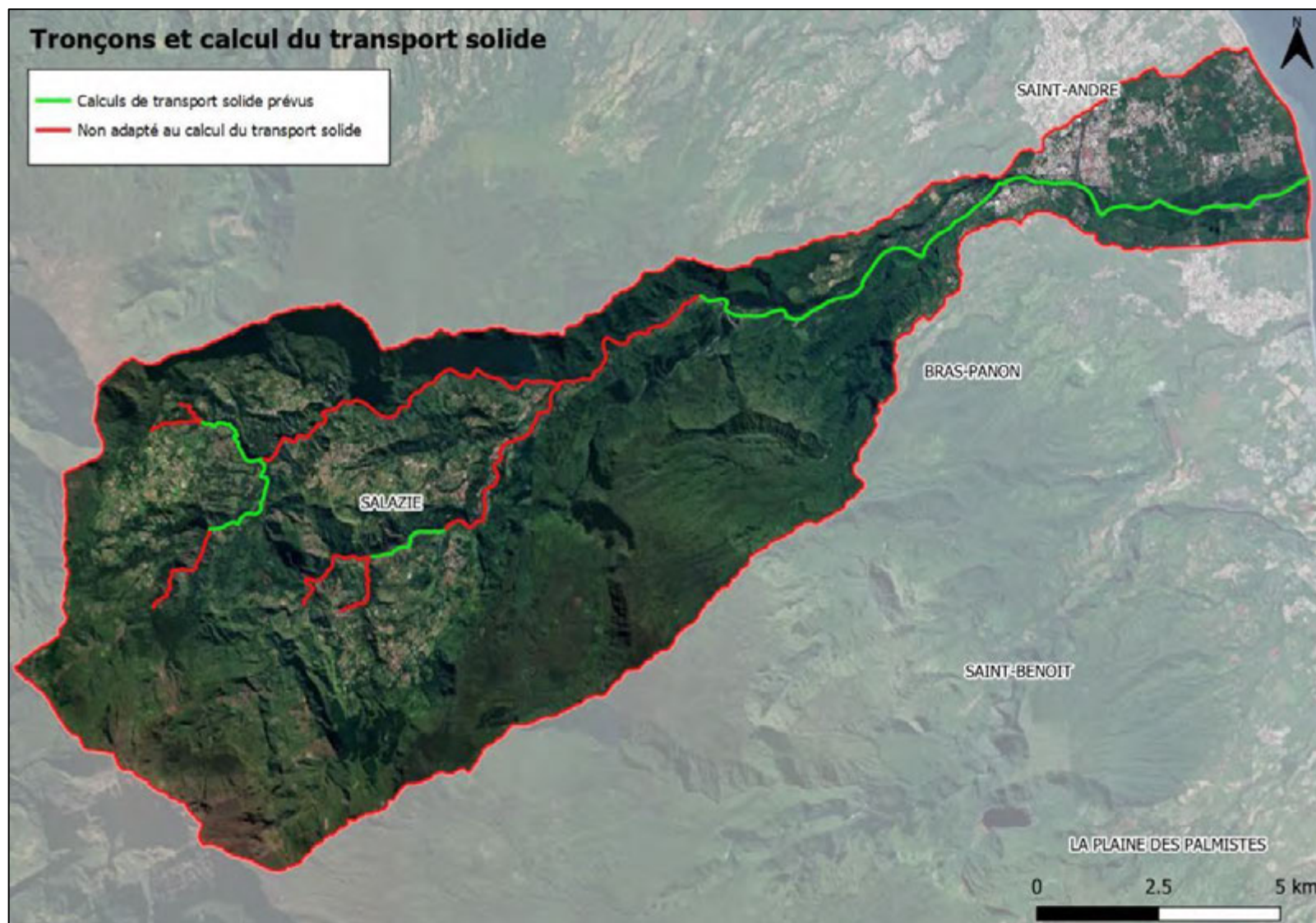


Figure 129 : Tronçons et calcul du transport solide

2.5.5.6.5 Capacité de charriage maximale annuelle et en crue Q20-Q50-Q100-Q500

Les capacités de charriage maximales en crue ont été calculées sur les tronçons M2, FJ2, RJ2, FJ3, M5, M6, M7.

Les capacités de charriage maximales annuelles n'ont été calculées que sur l'aval du bassin (M5 à M7) car les données disponibles en amont ne sont pas suffisantes (pas de stations sur la Rivière des Fleurs Jaunes et insuffisance de données sur la station de Trou Blanc).

☞ Le **volume réel** correspond au volume de roche transporté sans prendre en compte le vide entre les grains. Ces **vides** sont pris en compte dans le **volume apparent**. Les volumes de matériaux relevés sur le terrain et présentés dans les parties stock alluvial et bilan sédimentaire sont des volumes apparents. Ils sont donc à comparer avec les volumes apparents.

a) Rivière du Mât amont : Tronçon M2

La capacité de transport a été calculée à partir de **deux granulométries** différentes sur ce tronçon :

- La granulométrie relevée par HYDRETUDES en 2022, plus fine et représentative de dépôts récents et des apports latéraux particulièrement fins ;
- Une granulométrie mélangée (HYDRETUDES + BRGM + Gonzalez), plus grossière, qui pourrait mieux représenter les variations spatiales de granulométrie sur le tronçon.

Ces deux granulométries permettent de donner **une discrimination haute et basse du transport solide** sur le tronçon.

La capacité de transport a été calculée sur **trois profils** en travers du tronçon M2. Globalement, on observe une **diminution de la capacité de transport le long du tronçon**. Si les apports sédimentaires provenant de l'amont et des versants sont suffisants, des dépôts auront donc lieu sur le tronçon. Cela semble **cohérent avec le style fluvial** observé actuellement (tressage). Toutefois, il faut souligner que **les apports sédimentaires semblent bien souvent insuffisants car la tendance globale du tronçon est à l'incision** (cf. 2.4.3.2.5).

Un écart très important est observable entre les capacités de transports calculées avec les deux formules. **Les valeurs obtenues avec la formule de Lefort sont en moyenne 2.5 fois supérieures aux valeurs obtenues avec la formule de Recking** (de x0.6 à x4.4).

Sur ce tronçon, cet écart s'explique principalement par **le diamètre pris en compte** dans les deux formules : le diamètre moyen (Dm) pour Lefort (qui est généralement compris entre le D50 et le D75) et le D84 pour Recking.

Ces deux diamètres ont été choisis pour représenter la granulométrie générale du lit en considérant que le lit est armuré et que la notion de mobilité équivalente des fractions granulométriques est donc respectée.

La notion de mobilité équivalente est prise en compte à travers :

- Le débit de début de mouvement (q0) pour la formule de Lefort qui utilise le diamètre moyen (Dm) ;
- Le nombre de Shields dans la formule de Recking calculé à partir du D84.

**Focus : La mobilité équivalente**

La notion de mobilité équivalente (Parker et Klingeman, 1982) permet d'expliquer la relative stabilité des lits armurés¹² (au sens de Bray et Church, 1980) et la similitude entre la granulométrie charriée et la granulométrie de la sous-couche.

Cette hypothèse part du principe que l'armure du lit (plus grossière) joue le rôle de couche tampon et protège la sous-couche (plus fine). Cette couche tampon reste en place aussi bien pour de faibles débits qu'en crue. Elle induit alors une égale mobilité des différentes granulométries composant le lit armuré.

Pour des conditions hydrauliques fortes, la présence d'une armure n'est plus nécessaire pour maintenir la mobilité équivalence.

(Source : Alain Recking, Thèse, 2006)

Or, **sur le tronçon M2, le principe de mobilité équivalente semble difficilement applicable.** En effet, le lit ne présente pas une armure homogène. Elle est présente dans le fond du chenal principal mais le reste du lit présente une grande variabilité de la granulométrie de surface.

La capacité de charriage calculée à l'aide des deux formules risque donc d'être sous-estimée. En effet, dans la réalité, le transport solide commencera bien avant la mise en mouvement des diamètres les plus grossiers car l'armure n'est pas continue et homogène. De plus, sur ce tronçon, le transport solide pourra également être facilement alimenté par les apports latéraux (terrasses récentes ou anciennes et glissements) qui présentent une proportion de matières fines très importante.

En conclusion, **nous avons choisi de retenir les capacités de charriages les plus élevées qui sont celles calculées avec la formule de Lefort.** L'utilisation du diamètre moyen (Dm) permet de moins sous-estimer le transport solide.

Sur M2, la valeur principale de capacité de charriage correspond à la moyenne des capacités de charriage calculées au droit de 3 profils en travers avec les différentes granulométries, soit 6 valeurs au total. L'intervalle en dessous correspond à la valeur minimale et maximale de capacité de charriage calculée parmi les 6 valeurs. Le détail des résultats par profil et pour les deux formules est présenté en Annexe 14.

Tableau 17 : Capacité de charriage en crue sur le tronçon M2 – Lefort 2017

CAPACITE DE TRANSPORT MAXIMALE LORS DES CRUES DE LA RIVIERE DU MAT LEFORT 2017 - MOYENNE SUR LE TRONCON M2								
Granulo	Q20		Q50		Q100		Q500	
	Volume réel (m³)	Volume apparent (m³)	Volume réel (m³)	Volume apparent (m³)	Volume réel (m³)	Volume apparent (m³)	Volume réel (m³)	Volume apparent (m³)
HYDRETTUES 2022	180 969	239 784	280 770	372 021	335 534	444 583	434 994	576 367
Dm = 55 mm	[163 299 ; 198 103]	[216 371 ; 262 486]	[242 235 ; 317 117]	[320 961 ; 420 181]	[282 531 ; 384 964]	[374 354 ; 510 077]	[353 446 ; 508 097]	[468 316 ; 673 228]
Mélange BRGM, HYDRETTUES, Gonzalez	95 239	126 191	163 690	216 889	201 692	267 242	272 134	360 577
Dm = 371 mm	[82 692 ; 111 346]	[109 567 ; 147 534]	[134 911 ; 196 064]	[178 757 ; 259 786]	[162 087 ; 243 570]	[214 766 ; 322 731]	[210 867 ; 331 767]	[279 399 ; 439 591]

¹² Attention, les termes de pavage et armure ne sont pas utilisés de la même manière par tous les auteurs. Nous utilisons ici le terme d'armure au sens de Bray et Church (1980) (cf. partie 2.5.5.1).



b) Rivière des Fleurs Jaunes : Tronçons FJ2, RJ2 et FJ3

Le transport solide a été calculé sur **trois tronçon** : FJ2, RJ2 et FJ3. Le tronçon de calcul sur FJ3 est situé est aval de la confluence entre la Ravine Roche à Jacquot (RJ2) et la Rivière des Fleurs Jaunes (FJ2).

La capacité maximale de charriage est plus importante sur FJ2 que sur RJ2 car le tronçon FJ2 est beaucoup plus **pentu** (5.2 % contre 3.4 %). Sur **FJ3**, la pente est de 3.7%. Les capacités de charriage sont équivalentes ou inférieures à la somme des capacités de FJ2 et RJ2. Lorsque les apports sédimentaires et le stock alluvial permettent d'atteindre la capacité de charriage, la zone de confluence est donc **soit stable soit en exhaussement**.

La **granulométrie** joue également un rôle sur la capacité de charriage. Les 2 granulométries utilisées sur FJ2 sont relativement différentes. Les diamètres mesurés par le BRGM sont plus grossiers que les diamètres HYDRETTUES. En effet, la granulométrie est très hétérogène sur ce tronçon. Cela est lié au apports amont et latéraux qui présentent une granulométrie très étendue. Le lit présente ainsi un fond de chenal armuré plus grossier et des atterrissements caractérisés par une granulométrie plus fine. Toutefois, comme sur M2, ces atterrissements présentent également une hétérogénéité granulométrique (bed patchiness) qui est typique des cours d'eau à granulométrie étendue.

Sur RJ2, les granulométries BRGM et HYDRETTUES sont relativement proches (Dm quasi égaux, D50 et D84 proches). Ces petites différences entraînent néanmoins un écart entre les capacités de charriage mesurées avec les deux granulométries, les valeurs restent toutefois du même ordre de grandeur.

Sur FJ3, les calculs ont été effectués avec la granulométrie HYDRETTUES (2002) et un mélange des granulométries HYDRETTUES et BRGM amont. Bien que les diamètres caractéristiques obtenus soient différents, les capacités de charriage ont les mêmes ordres de grandeur.

Comme sur M2, les deux formules donnent des résultats très différents : les valeurs de Lefort sont 1.8 à 46 fois plus élevées que les valeurs issues de la formule de Recking.

Les écarts les plus forts sont observés sur la Ravine Roche à Jacquot. Les valeurs sont 15 à 46 fois plus grandes avec la formule de Lefort.

La cause principale de cet écart est la granulométrie, notamment le D84. En effet, les deux granulométries utilisées pour calculer les capacités de charriage de RJ2 sont caractérisées par un D84 largement supérieur au D50. Or la formule de Recking utilise uniquement le D84 à la différence de la formule de Lefort qui utilise le Dm et l'étendue granulométrique. Les volumes théoriquement transportés sont donc logiquement plus faibles avec la formule de Recking puisque le diamètre des matériaux à transporter est beaucoup plus élevé.

Sur les tronçons FJ2 et RJ2, en dehors du chenal principal le lit ne présente pas d'armure. Sur FJ3, **une armure commence à être visible** sur les atterrissements, elle semblait plus marquée à mesure que nous avançons vers l'aval. De **gros blocs indiquant un début de pavage ou l'affleurement d'un pavage fossile** étaient également présents. Cependant, des **apports importants de sédiments fins semblent aussi se faire en crue** (structures plus fines et non armurées présentes ponctuellement).

Comme sur M2, nous choisissons donc de conserver les **résultats de la formule de Lefort sur les trois tronçons**.



Figure 130 : Absence d'armure et granulométrie hétérogène sur FJ2 (vue drone – HYDETUDES 2022)



Figure 131 : Hétérogénéité de la granulométrie et possible début de pavage sur l'aval de RJ2 (vue drone – HYDETUDES 2022)



Figure 132 : Hétérogénéité de l'amont du tronçon FJ3 – A gauche : zone armurée avec affleurement de gros blocs ; à droite : matériaux fins à moyens, armure localisées et affleurements de gros blocs.



Tableau 18 : Capacité de charriage en crue sur les tronçons FJ2, RJ2 et FJ3 – Lefort 2017

CAPACITE DE TRANSPORT MAXIMALE LORS DES CRUES DE LA RIVIERE DES FLEURS JAUNES ET DE LA RAVINE ROCHE A JACQUOT								
LEFORT 2017								
Granulo	Q20		Q50		Q100		Q500	
	Volume réel (m³)	Volume apparent (m³)	Volume réel (m³)	Volume apparent (m³)	Volume réel (m³)	Volume apparent (m³)	Volume réel (m³)	Volume apparent (m³)
FJ2								
HYDRETUDE S 2022 - Aval FJ2 - Dm = 45 mm	414 381	549 055	654 085	866 663	781 810	1 035 899	1 009 892	1 338 106
BRGM 2007 - Aval FJ2 - Dm = 296 mm	124 036	164 348	225 750	299 119	282 868	374 799	388 659	514 973
RJ2								
HYDRETUDE S 2022 - Aval RJ2 - Dm = 143 mm	50 749	67 243	93 749	124 218	118 228	156 652	163 038	216 025
BRGM 2007 - Aval RJ2 - Dm = 144 mm	40 498	53 659	75 369	99 864	95 092	125 997	131 503	174 241
FJ3								
HYDRETUDE S 2022 - Aval FJ2 - Dm = 82 mm	284 720	377 254	412 834	547 005	477 790	633 071	593 583	786 497
Mélange BRGM + HYDRETUDE S amont - Dm = 185 mm	164 730	218 267	251 382	333 081	296 182	392 441	378 117	501 005

*c) Zones de transfert : Tronçons M3, FJ3 aval, FJ4, M4 amont*

Ces tronçons sont des tronçons en **gorges**. Ils ne sont donc **pas adaptés** à l'utilisation de **formules de transport solide**.

Toutefois, leurs caractéristiques géométriques et géologiques permettent de supposer que la **capacité de charriage de ces gorges est équivalente voire supérieure à celle des tronçons amont**.

Par exemple, entre M2 et M3, la pente moyenne passe de 3.3 % à 3.7%, la largeur d'écoulement et la rugosité diminuent. Cela va donc entraîner une augmentation de la capacité de charriage. Le même phénomène s'observe entre la confluence FJ2-RJ2 puis FJ3 et FJ4.

Il est ainsi possible de supposer que le volume de matériaux charrié dans les gorges amont est au maximum équivalent à la capacité de transport solide de l'aval du tronçon M2 et de l'amont du tronçon FJ3.

Le **volume maximum de matériaux pouvant être transporté dans les gorges amont** est présenté dans le tableau ci-dessous. Ce volume dépend directement de la capacité de charriage en amont et donc de la morphologie des tronçons M2 et FJ3 en 2022, il est ainsi **amené à évoluer au fil des crues**. **Nous avons retenu la valeur haute de nos estimations.**

Tableau 19 : Volume maximum pouvant être transporté en crue dans les gorges amont

VOLUME MAXIMUM POUVANT ETRE TRANSPORTE EN CRUE DANS LES GORGES AMONT								
	Q20		Q50		Q100		Q500	
	Volume réel (m³)	Volume apparent (m³)	Volume réel (m³)	Volume apparent (m³)	Volume réel (m³)	Volume apparent (m³)	Volume réel (m³)	Volume apparent (m³)
M3	163 299	216 371	242 235	320 962	282 532	374 354	353 447	468 317
FJ4	284 720	377 254	412 834	547 005	477 790	633 071	593 583	786 497

Ces deux secteurs de gorges se terminent chacun par la présence d'un barrage atterri (prise ILO). L'atterrissement des prises ILO modifie la pente sur environ 700 ml, ce qui peut favoriser le dépôt des matériaux les plus grossiers pour les débits courants ou les crues faibles. En crue plus intense, la majeure partie de la charge solide transite probablement vers l'aval. Entre 2007 et 2015, la diachronie verticale a même montré qu'une partie du Remous Régressif Solide (RRS) de la prise ILO de la Rivière du Mât avait été remobilisée (incision du profil en long).

Sur l'amont du tronçon M4, la pente est plus faible que dans les gorges amont (2.6%) toutefois les dépôts sont très limités du fait de l'étroitesse des gorges et la charge solide continue de transiter vers l'aval.



L'incidence limitée des prises ILO en crue intense et l'absence de zone de dépôt sur l'amont de M4 nous permet de supposer que l'intégralité du volume transporté par M3 et FJ4 en crue Q20 à Q500 ressort en aval des gorges.

Le tableau suivant présente donc le volume maximum de matériaux pouvant actuellement atteindre M4 en crues Q20 à Q500.

Tableau 20 : Volumes de matériaux pouvant atteindre l'aval des gorges

VOLUME MAXIMUM POUVANT ATTEINDRE LA SORTIE DES GORGES (aval M4)								
	Q20		Q50		Q100		Q500	
	Volume réel (m³)	Volume apparent (m³)	Volume réel (m³)	Volume apparent (m³)	Volume réel (m³)	Volume apparent (m³)	Volume réel (m³)	Volume apparent (m³)
M4	448 019	593 625	655 069	867 967	760 322	1 007 425	947 030	1 254 814

d) Rivière du Mât aval : Tronçon M5, M6 et M7

Le tronçon M5 est actuellement influencé par la présence du barrage de Bengalis à son aval. **Il est prévu que ce barrage soit prochainement arasé à la cote de 107 m NGR.** Le profil en long du cours d'eau se réajustera donc progressivement.

Nous avons donc calculé les **capacités de charriage en l'état actuel** du profil en long (barrage présent) **et avec une pente « d'équilibre »** (barrage arasé). Cette pente est de 1.7%, elle est calée sur la cote d'arase du barrage et s'étend sur 4.2 km en amont. Le profil ne se réajustera pas d'un coup mais progressivement, il conservera peut-être des ruptures de pente comme c'est le cas actuellement (seuils en blocs imbriqués). **Les calculs réalisés avec la pente de 1.7% donnent cependant une estimation de l'évolution de la capacité de charriage après arasement.**

Au total, nous avons calculé les capacités de charriage sur **9 profils en travers**.

Comme sur l'amont du bassin, **la granulométrie est hétérogène et étendue**. Nous avons donc réalisé nos calculs en utilisant les différents relevés granulométriques à disposition (BRGM et HYDRETUDES). Les résultats obtenus peuvent fortement varier en fonction de la granulométrie.

En moyenne, selon la granulométrie les capacités de charriage en crue peuvent être multipliées par 3.6 avec la formule de Recking et par 1.8 avec la formule de Lefort.

Pour les capacités de charriage annuelles, les écarts sont plus limités avec la formule de Recking : selon la granulométrie multiplication des capacités par 1.4 en moyenne, sauf sur un profil en travers où les valeurs sont multipliées par plus de 10 car l'une des granulométries utilisées est beaucoup plus grossière (zone pavée en amont de Bengalis). Avec la formule de Lefort, la granulométrie impacte beaucoup plus les capacités de charriage annuelles. En effet, l'une des granulométries du BRGM présente des diamètres particulièrement grossiers au-delà du D50. Cela impacte notamment le seuil de mise de mouvement de la formule de Lefort qui a lieu beaucoup plus tard qu'avec la formule de Recking. Les capacités de charriage obtenues avec la formule de Lefort et cette granulométrie sont donc très faibles.



Sur le tronçon M5, malgré l'hétérogénéité de la granulométrie de surface, les structures alluvionnaires et le lit du cours d'eau présentent **généralement une armure ou un pavage** (granulométrie particulièrement grossière des matériaux). **La notion de mobilité équivalente est donc également difficile à appliquer** sur ces tronçons. Toutefois à la différence des tronçons amont, à cause de la présence de zones pavées ou en cours de pavage, **les capacités de charriage calculées pourraient être surestimées** (dans le cas où le pavage résisterait à la crue) **ou sous-estimées** (si le pavage se déstructure voire se rompt).

Au vu des éléments précédents, nous conserverons les résultats calculés avec les différentes granulométries et les deux formules (Recking et Lefort) afin de donner une enveloppe de la capacité de charriage maximale potentielle.

Nous avons toutefois écarté les valeurs de capacité de charriage annuelles mesurées avec les granulométries 8 et 9 du BRGM et la formule de Lefort car les valeurs paraissaient beaucoup trop faibles (quelques centaines de mètres cubes de matériaux transportés par an).

Le tableau page suivante présente les capacités de charriages maximales calculées (moyenne, minimum et maximum) et moyennées sur le tronçon M5. Le détail des résultats par profil en travers, granulométrie et formule est présenté en Annexe 14.

De manière générale, **l'arasement du barrage de Bengalis devrait entraîner une augmentation des capacités de charriages**. En effet, la pente devra se rééquilibrer une fois le seuil arasé. D'après l'analyse des données topographiques la pente du profil pourrait à terme se stabiliser autour de 1.7% (pente plus élevée qu'aujourd'hui). Cependant, il est difficile de prévoir l'évolution exacte du tronçon notamment à cause du pavage qui a tendance à former des zones de ruptures de pente localisées (pseudo-seuils).

☞ Ces seuils pourraient avoir un fonctionnement similaire aux step-pools. Ils sont généralement stables et présentent un transport solide réduit mais ils peuvent être partiellement ou totalement remaniés lors de crues extrêmes, le transport solide augmente ensuite le temps que le lit se restabilise et se repave (Recking, 2020). D'après des kayakistes réunionnais, certains seuils du tronçon M5 ont d'ailleurs évolués lors des crues du printemps 2022 et l'un d'entre eux est devenu infranchissable.

Les valeurs de capacité de charriage mesurées sur le tronçon M5 varient beaucoup en fonction des granulométries utilisées. Les zones plus pavées sont évidemment moins mobiles (par exemple amont du barrage). Dans le contexte d'érosion régressive qu'entraînera l'arasement du seuil de Bengalis, ces zones pavées et ces seuils pourraient cependant être plus facilement déstabilisées et remaniées entraînant alors un transport de matériaux plus intense vers l'aval.

Sur M5, la valeur principale de capacité de charriage correspond à la moyenne des capacités de charriage calculées au droit de 9 profils en travers avec les différentes granulométries (sauf les granulométries du BRGM 8-9 pour la formule de Lefort), soit 11 valeurs avec la formule de Lefort et 14 avec celle de Recking. L'intervalle en dessous correspond à la valeur minimale et maximale de capacité de charriage calculée parmi ces valeurs.

→ Le détail des résultats par profil et pour les deux formules est présenté en Annexe 14.

CAPACITE DE TRANSPORT MAXIMALE ANNUELLE ET LORS DES CRUES DE LA RIVIERE DU MAT AVANT ARASEMENT - RECKING 2013										
M 5	Capacité annuelle		Q20		Q50		Q100		Q500	
	Volume réel (m3)	Volume apparent (m3)	Volume réel (m3)	Volume apparent (m3)	Volume réel (m3)	Volume apparent (m3)	Volume réel (m3)	Volume apparent (m3)	Volume réel (m3)	Volume apparent (m3)
	42 638	56 496	93 147	123 420	153 393	203 246	187 984	249 079	254 125	336 715
	[3732 ; 120410]	[4944 ; 159543]	[36355 ; 226278]	[48170 ; 299819]	[59125 ; 361924]	[78341 ; 479550]	[72572 ; 434846]	[96158 ; 576171]	[98556 ; 568947]	[130587 ; 753854]

CAPACITE DE TRANSPORT MAXIMALE ANNUELLE ET LORS DES CRUES DE LA RIVIERE DU MAT AVANT ARASEMENT - LEFORT 2017										
M 5	Capacité annuelle		Q20		Q50		Q100		Q500	
	Volume réel (m3)	Volume apparent (m3)	Volume réel (m3)	Volume apparent (m3)	Volume réel (m3)	Volume apparent (m3)	Volume réel (m3)	Volume apparent (m3)	Volume réel (m3)	Volume apparent (m3)
	35 648	47 233	171 106	226 716	271 257	359 415	325 425	431 188	425 006	563 133
	[5247 ; 134465]	[6953 ; 178167]	[77819 ; 336016]	[103110 ; 445221]	[145948 ; 497632]	[193382 ; 659362]	[174043 ; 579959]	[230607 ; 768445]	[219276 ; 725990]	[290541 ; 961937]

Tableau 21 : Capacités de charriage maximales annuelles et en crue du tronçon M5 avant arasement (formules Recking 2013 et Lefort 2017)

CAPACITE DE TRANSPORT MAXIMALE ANNUELLE ET LORS DES CRUES DE LA RIVIERE DU MAT PENTE 1.7% APRES ARASEMENT - RECKING 2013										
M 5	Capacité annuelle		Q20		Q50		Q100		Q500	
	Volume réel (m3)	Volume apparent (m3)	Volume réel (m3)	Volume apparent (m3)	Volume réel (m3)	Volume apparent (m3)	Volume réel (m3)	Volume apparent (m3)	Volume réel (m3)	Volume apparent (m3)
	55 617	73 692	131 452	174 174	217 544	288 246	267 207	354 049	362 235	479 961
	[3732 ; 149817]	[4944 ; 198508]	[49570 ; 298137]	[65680 ; 395032]	[76339 ; 513412]	[101149 ; 680271]	[90407 ; 642874]	[119789 ; 851808]	[115893 ; 897652]	[153558 ; 1189390]

CAPACITE DE TRANSPORT MAXIMALE ANNUELLE ET LORS DES CRUES DE LA RIVIERE DU MAT PENTE 1.7% APRES ARASEMENT - LEFORT 2017										
M 5	Capacité annuelle		Q20		Q50		Q100		Q500	
	Volume réel (m3)	Volume apparent (m3)	Volume réel (m3)	Volume apparent (m3)	Volume réel (m3)	Volume apparent (m3)	Volume réel (m3)	Volume apparent (m3)	Volume réel (m3)	Volume apparent (m3)
	62 919	83 367	251 453	333 175	395 079	523 480	472 542	626 119	614 788	814 594
	[5247 ; 184438]	[6953 ; 244381]	[98979 ; 427287]	[131148 ; 566155]	[148711 ; 632064]	[197043 ; 837484]	[174043 ; 736058]	[230607 ; 975277]	[219276 ; 957451]	[290541 ; 1268623]

Tableau 22 : Capacités de charriage maximales annuelles et en crue du tronçon M5 après arasement (formules Recking 2013 et Lefort 2017)

Sur M6, les capacités de charriage n'ont été **calculées qu'en aval du pont de la RN2**. En effet, entre l'aval du seuil de Bengalis et le pont, la roche mère affleure en fond de lit ou latéralement ce qui ne permet pas d'appliquer les formules de transport solide.

Entre l'aval du pont de la RN2 et la fin du tronçon M6 (début de la zone multichenalisée), les capacités de charriage ont été calculées sur **4 profils en travers**. Nous avons donc réalisé nos calculs en utilisant les différents **relevés granulométriques locaux** à disposition (BRGM et HYDRETUDES).

Actuellement (avant arase) les capacités de charriage calculées sont similaires (Recking) ou plus légèrement plus élevées (Lefort) sur M6 qu'en aval de M5, le lit devrait donc être stable ou en incision. Ce résultat est **cohérent avec la dynamique locale qui est actuellement en incision**.

De plus, les **granulométries locales sont très grossières** sur l'aval de M6 car **le secteur est pavé (zone en incision)**. Les capacités de charriage obtenues sont donc probablement sous-estimées, ce qui corrobore le phénomène d'incision.

*☞ Pour rappel, les **équations utilisées** ont été calées à partir de mesure du transport solide réalisées sur le terrain. Ces mesures de terrains permettent d'intégrer aux équations de façon implicite (coefficients) les échanges se faisant entre la surface et la subsurface (Recking, 2020). Or, les mesures de terrain ayant permis de caler ces équations n'ont pas été réalisées à la Réunion. De plus, elles ont été réalisées sur des sections non pavées et représentent donc la relation existante entre une armure et sa sous-couche. Cette relation est différente de celle entre un pavage et sa sous-couche puisque l'écart granulométrique est beaucoup plus important. L'utilisation des formules en secteur pavé peut donc conduire à **sous-estimer les capacités de charriage** dans le cas où le pavage se déstructure voire se rompt.*

Le tableau suivant présente les valeurs de capacité de charriage calculées en amont proche du barrage de Bengalis et les capacités de charriage de M6 en aval du pont de la RN2.

Sur M6, la valeur principale de capacité de charriage correspond à la moyenne des capacités de charriage calculées au droit de 4 profils en travers avec les différentes granulométries, soit 8 valeurs au total. L'intervalle en dessous correspond à la valeur minimale et maximale de capacité de charriage calculée parmi les 8 valeurs.

→ Le détail des résultats par profil et pour les deux formules est présenté en Annexe 14.



		CAPACITE DE TRANSPORT MAXIMALE ANNUELLE ET LORS DES CRUES DE LA RIVIERE DU MAT									
Etat	Formule	Capacité annuelle		Q20		Q50		Q100		Q500	
		Volume réel (m3)	Volume apparent (m3)	Volume réel (m3)	Volume apparent (m3)	Volume réel (m3)	Volume apparent (m3)	Volume réel (m3)	Volume apparent (m3)	Volume réel (m3)	Volume apparent (m3)
M5 – amont proche Barrage Bengalis											
Avant arase	Recking 2013	5 972	7 912	48 335	64 044	78 768	104 367	95 251	126 207	126 382	167 456
		[4064 ; 7879]	[5385 ; 10439]	[46721 ; 49949]	[61906 ; 66182]	[78314 ; 79221]	[103767 ; 104968]	[95076 ; 95425]	[125976 ; 126439]	[125652 ; 127111]	[166489 ; 168422]
	Lefort 2017	10 239	13 566	119 995	158 994	193 893	256 909	234 092	310 172	307 893	407 958
		[6273 ; 14204]	[8312 ; 18821]	[102767 ; 137223]	[136166 ; 181821]	[171443 ; 216343]	[227162 ; 286655]	[209591 ; 258593]	[277708 ; 342636]	[279947 ; 335839]	[370929 ; 444987]
Après arase	Recking 2013	12 650	16 761	110 253	146 085	181 572	240 583	221 645	293 679	295 792	391 924
		[11028 ; 14271]	[14613 ; 18910]	[94287 ; 126219]	[124930 ; 167240]	[149171 ; 213972]	[197652 ; 283513]	[179770 ; 263520]	[238195 ; 349164]	[237642 ; 353942]	[314875 ; 468973]
	Lefort 2017	55 072	72 971	292 473	387 527	459 740	609 156	550 034	728 796	715 372	947 868
		[60967 ; 49178]	[80781 ; 65161]	[314321 ; 270625]	[416475 ; 358578]	[501661 ; 417820]	[664701 ; 553611]	[604275 ; 495794]	[800664 ; 656927]	[793536 ; 637208]	[1051435 ; 844301]
M6 – aval pont RN2											
Granulo pavée locale	Recking 2013	6 455	8 553	52 154	69 104	82 297	109 039	99 093	131 298	130 777	173 280
		[1466 ; 19352]	[1942 ; 25642]	[27467 ; 74069]	[36393 ; 98142]	[43756 ; 118712]	[57976 ; 157294]	[52106 ; 143426]	[69040 ; 190040]	[66712 ; 188510]	[88393 ; 249775]
	Lefort 2017	2 570	3 405	136 849	181 325	218 007	288 851	259 947	344 430	335 420	444 431
		[369 ; 7222]	[489 ; 9570]	[50037 ; 198049]	[66299 ; 262415]	[82106 ; 312046]	[108725 ; 413461]	[98503 ; 370873]	[130517 ; 491407]	[127340 ; 476019]	[168726 ; 630725]

Tableau 23 : Capacités de charriage maximales annuelles et en crue du tronçon M5 aval avant et après arasement ainsi que sur le tronçon M6 (formules Recking 2013 et Lefort 2017)



Sur le cône alluvial (M7), les capacités de transport calculées indiquent des dynamiques différentes à l'échelle d'une année courante ou à l'échelle d'une crue intense (cf. partie 2.5.5.4.1).

A l'échelle d'une année courante, l'amont du cône est marqué une dynamique en incision (apports insuffisants de M6). Sur la partie centrale, les deux formules donnent des tendances différentes, il est donc difficile de tirer une conclusion (la formule de Lefort semble sensible à la granulométrie). L'aval du cône semble quant à lui marqué par une légère incision.

En crue, le cône a au contraire tendance à s'inciser dans sa partie amont tandis que des dépôts auront lieu dans sa partie centrale (à partir de l'amont de la carrière) et jusqu'à l'aval.

Cette dynamique pourrait être cohérente avec les conclusions du bilan sédimentaire 2007-2017 (incision sur M6 et sur la moitié amont du cône et exhaussement sur sa partie aval) puisqu'une tendance au dépôt est présente lors des crues intenses sur la partie centrale et aval du cône (cf. 2.5.5.6.8 p.194).

Toutefois, aucune crue supérieure à Q20 n'a eu lieu entre 2007 et 2017. De plus, le pavage présent sur le tronçon amont M5 et M6 accentue probablement les phénomènes d'incision observés sur M6 et sur le cône alluvial amont.

Sur M7, la valeur principale de capacité de charriage correspond à la moyenne des capacités de charriage calculées au droit :

- Du PT25, pour l'amont du cône, soit 2 valeurs en considérant les différentes granulométries ;
- Des PT26, 27 et 28 pour le centre du cône, soit 6 valeurs en considérant les différentes granulométries ;
- Du PT30, pour l'aval du cône, soit 2 valeurs en considérant les différentes granulométries.

L'intervalle en dessous correspond à la valeur minimale et maximale de capacité de charriage calculée parmi les différentes valeurs de chaque secteur.

→ Le détail des résultats par profil et pour les deux formules est présenté en Annexe 14.

☞ A la suite des tableaux en page suivante, des cartes synthétiques des capacités de transport maximales calculées à l'échelle du bassin sont présentées. Les valeurs retenues sont toujours les valeurs maximales des tableaux présentés dans cette partie.



CAPACITE DE TRANSPORT MAXIMALE ANNUELLE ET LORS DES CRUES DE LA RIVIERE DU MAT M7 - RECKING 2013										
Granulo	Capacité annuelle		Q20		Q50		Q100		Q500	
	Volume réel (m3)	Volume apparent (m3)	Volume réel (m3)	Volume apparent (m3)	Volume réel (m3)	Volume apparent (m3)	Volume réel (m3)	Volume apparent (m3)	Volume réel (m3)	Volume apparent (m3)
Apex (monochenalisé)	17 637 [11060 ; 24214]	23 369 [14655 ; 32083]	76351 [64656 ; 88047]	101 165 [85669 ; 116662]	125 915 [106592 ; 145239]	166838 [141235 ; 192441]	154 458 [130599 ; 178316]	204 656 [173044 ; 236269]	209 011 [176165 ; 241857]	276 939 [233418 ; 320460]
Centre du cône	3 194 [808 ; 7369]	4 232 [1070 ; 9764]	42 223 [7372 ; 107338]	55 945 [9767 ; 142223]	70 956 [14904 ; 167830]	94 017 [19747 ; 222375]	86 944 [21258 ; 196863]	115 201 [28167 ; 260843]	116 745 [35592 ; 246162]	154 687 [47159 ; 326165]
Aval du cône	4 881 [1427 ; 8334]	6 467 [1891 ; 11043]	13 535 [5989 ; 21080]	17 934 [7936 ; 27932]	25 603 [12811 ; 38396]	33 925 [16975 ; 50874]	32 734 [17435 ; 48033]	43 372 [23102 ; 63643]	47 149 [27285 ; 67012]	62 472 [36153 ; 88791]

CAPACITE DE TRANSPORT MAXIMALE ANNUELLE ET LORS DES CRUES DE LA RIVIERE DU MAT M7 - LEFORT 2017										
Granulo	Capacité annuelle		Q20		Q50		Q100		Q500	
	Volume réel (m3)	Volume apparent (m3)	Volume réel (m3)	Volume apparent (m3)	Volume réel (m3)	Volume apparent (m3)	Volume réel (m3)	Volume apparent (m3)	Volume réel (m3)	Volume apparent (m3)
Apex (monochenalisé)	3 384 [1734 ; 5034]	4 484 [2297 ; 6670]	215 321 [210076 ; 220566]	285 300 [278351 ; 292250]	349 792 [340023 ; 359561]	463 475 [450531 ; 476418]	421 092 [408940 ; 433244]	557 947 [541846 ; 574048]	548 991 [532489 ; 565493]	727 413 [705548 ; 749279]
Centre du cône	32 186 [1367 ; 123910]	42 646 [1811 ; 164180]	189 538 [108960 ; 334853]	251 138 [144372 ; 443680]	274 457 [173278 ; 469305]	363 656 [229594 ; 621828]	317 355 [207994 ; 530682]	420 495 [275593 ; 703154]	393 441 [271513 ; 631975]	521 309 [359755 ; 837367]
Aval du cône	40 106 [9068 ; 71144]	53 140 [12015 ; 94266]	123 583 [95665 ; 151500]	163 747 [126756 ; 200738]	187 926 [151055 ; 224798]	249 002 [200147 ; 297857]	221 273 [180167 ; 262379]	293 186 [238721 ; 347652]	280 665 [232537 ; 328794]	371 882 [308112 ; 435652]

Tableau 24 : Capacités de charriage maximales annuelles et en crue du tronçon M7 (formules Recking 2013 et Lefort 2017)

Capacités de charriage maximales annuelles – Volume apparent

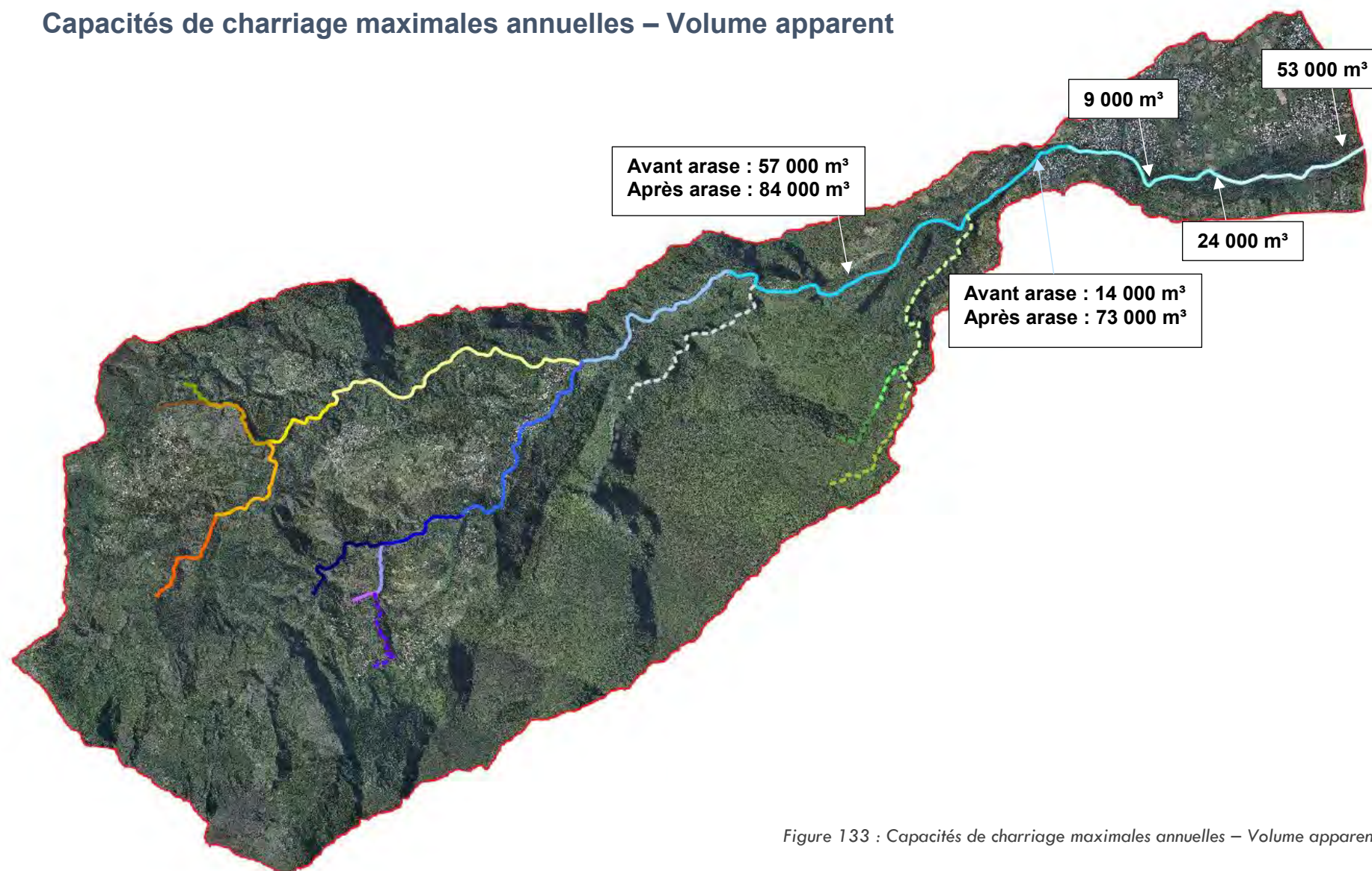


Figure 133 : Capacités de charriage maximales annuelles – Volume apparent

Capacités de charriage maximales Q20 – Volume apparent

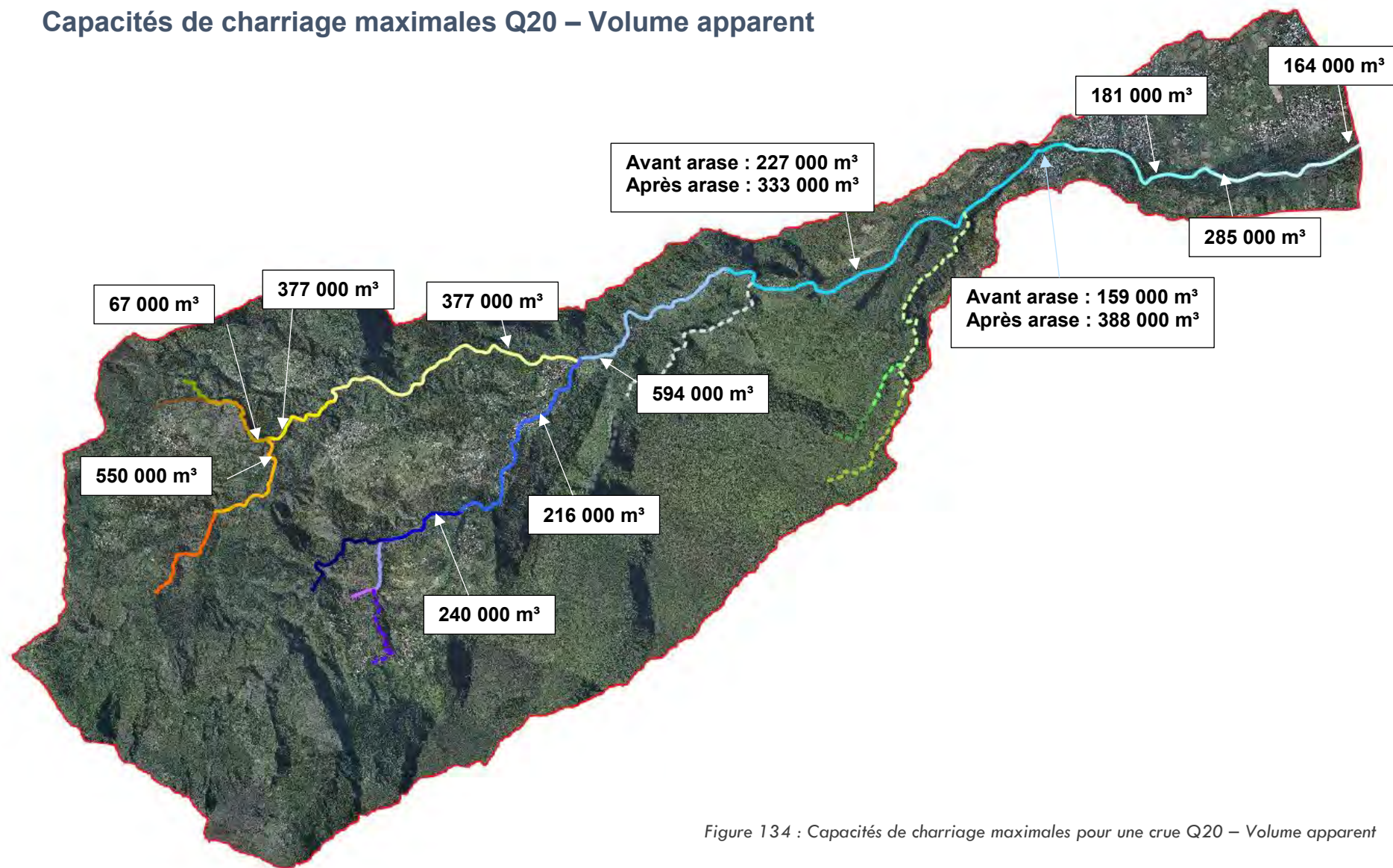


Figure 134 : Capacités de charriage maximales pour une crue Q20 – Volume apparent

Capacités de charriage maximales Q50 – Volume apparent

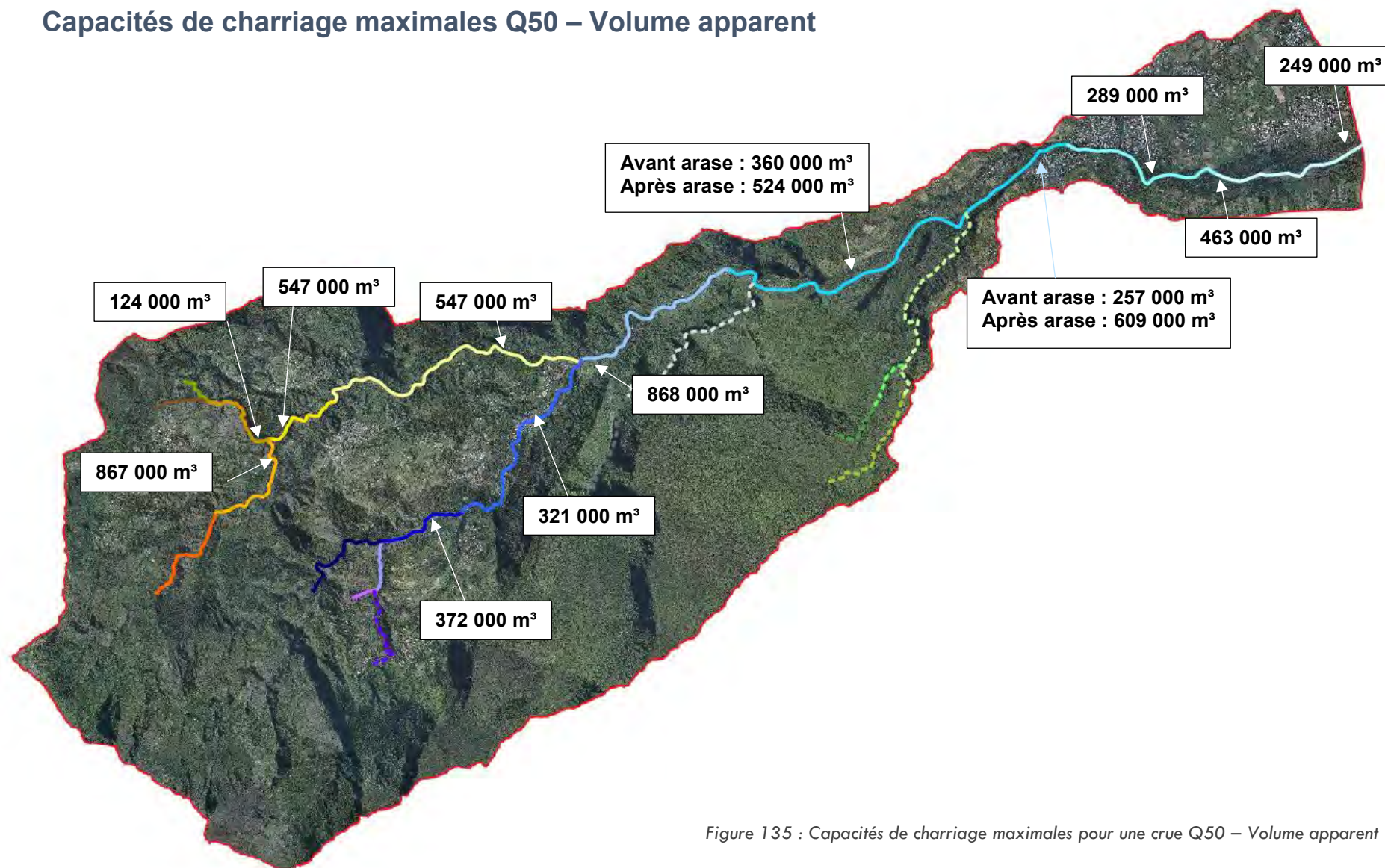


Figure 135 : Capacités de charriage maximales pour une crue Q50 – Volume apparent

Capacités de charriage maximales Q100 – Volume apparent

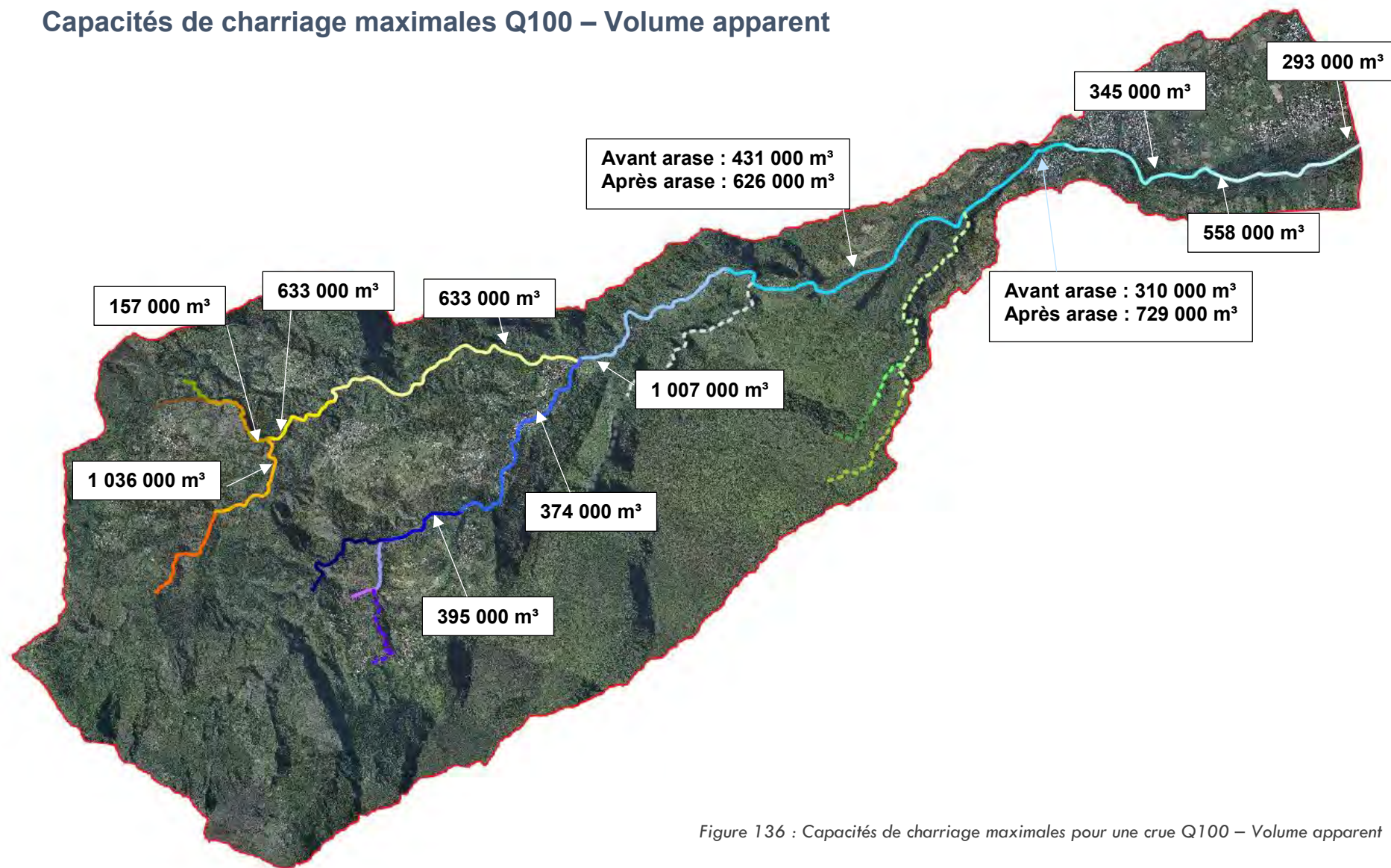


Figure 136 : Capacités de charriage maximales pour une crue Q100 – Volume apparent

Capacités de charriage maximales Q500 – Volume apparent

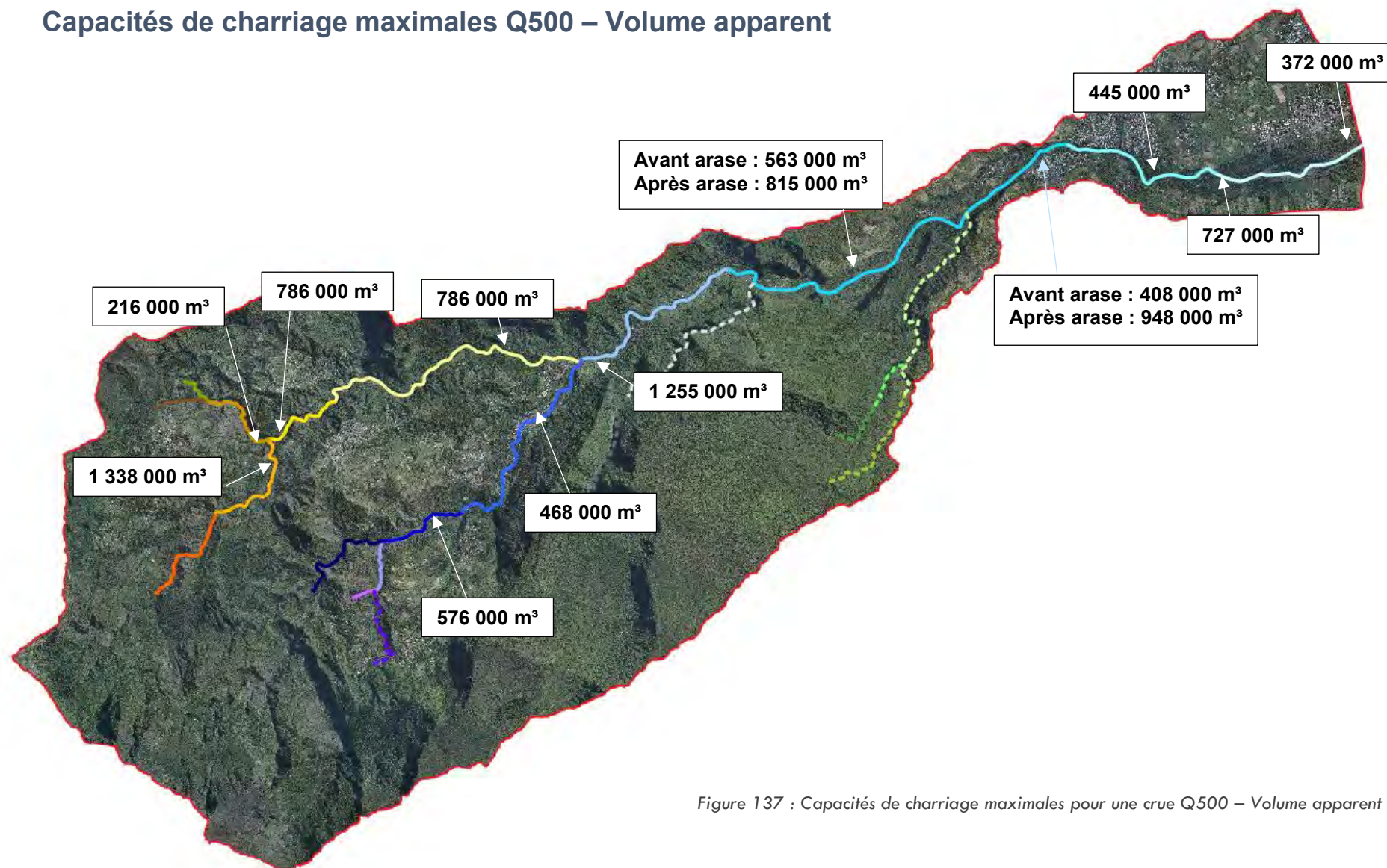


Figure 137 : Capacités de charriage maximales pour une crue Q500 – Volume apparent

2.5.5.6.6 *Capacités de charriage lors du cyclone Hyacinthe (1980)*

Les capacités de charriage lors du cyclone Hyacinthe ont été estimées sur la partie aval du bassin entre l'Escalier et l'océan. En effet l'hydrogramme est estimé à la station de Bengalis, il nous paraît donc difficile de l'extrapoler sur la partie amont du bassin qui est relativement éloignée. L'hydrogramme est présenté en Annexe 10.

Le débit maximal de l'évènement est de 2500 m³/s, ce débit correspond à une crue de période de retour comprise entre Q20 et Q50. Toutefois, compte tenu de la durée particulièrement longue de l'évènement, les capacités de charriage sont supérieures à celles provoquées par une crue Q500.

CAPACITE DE TRANSPORT MAXIMALE DE LA RIVIERE DU MAT LORS DE HYACINTHE RECKING 2013				
	Q500		Hyacinthe	
	Volume réel (m3)	Volume apparent (m3)	Volume réel (m3)	Volume apparent (m3)
M5 Avant arase	254 125	336 715	398 452	527 949
	[98556 ; 568947]	[130587 ; 753854]	[157246 ; 938288]	[208351 ; 1243232]
M5 Après arase	362 235	479 961	614 361	814 028
	[115893 ; 897652]	[153558 ; 1189390]	[215676 ; 1284471]	[285771 ; 1701924]
M5 Avant arase Amont proche barrage	126 382	167 456	197 021	261 053
	[125652 ; 127111]	[166489 ; 168422]	[194640 ; 199402]	[257898 ; 264208]
M5 Après arase Amont proche barrage	295 792	391 924	462 846	613 271
	[237642 ; 353942]	[314875 ; 468973]	[384121 ; 541572]	[508960 ; 717582]
M6 Aval pont RN2	130 777	173 280	214 003	283 554
	[66712 ; 188510]	[88393 ; 249775]	[114894 ; 305441]	[152235 ; 404710]
M7 Apex du cône	209 011	276 939	321 931	426 558
	[176165 ; 241857]	[233418 ; 320460]	[273246 ; 370615]	[362051 ; 491065]
M7 Centre du cône	116 745	154 687	183 617	243 293
	[35592 ; 246162]	[47159 ; 326165]	[34338 ; 449579]	[45497 ; 595692]
M7 Aval du cône	47 149	62 472	63 952	84 736
	[27285 ; 67012]	[36153 ; 88791]	[30717 ; 97187]	[40699 ; 128773]



CAPACITE DE TRANSPORT MAXIMALE DE LA RIVIERE DU MAT LORS DE HYACINTHE LEFORT 2017				
	Q500		Hyacinthe	
	Volume réel (m3)	Volume apparent (m3)	Volume réel (m3)	Volume apparent (m3)
M5 Avant arase	425 006	563 133	717 143	950 214
	[219276 ; 725990]	[290541 ; 961937]	[369863 ; 1332024]	[490069 ; 1764931]
M5 Après arase	614 788	814 594	1 106 581	1 466 219
	[219276 ; 957451]	[290541 ; 1268623]	[512575 ; 1692962]	[679162 ; 2243174]
M5 Avant arase Amont proche barrage	307 893	407 958	484 460	641 910
	[279947 ; 335839]	[370929 ; 444987]	[436576 ; 532345]	[578463 ; 705357]
M5 Après arase Amont proche barrage	715 372	947 868	1 194 699	1 582 976
	[793536 ; 637208]	[1051435 ; 844301]	[1091312 ; 1298085]	[1445988 ; 1719963]
M6 Aval pont RN2	335 420	444 431	567 878	752 438
	[127340 ; 476019]	[168726 ; 630725]	[213608 ; 816459]	[283031 ; 1081808]
M7 Apex du cône	548 991	727 413	904 816	1 198 881
	[532489 ; 565493]	[705548 ; 749279]	[880054 ; 929578]	[1166071 ; 1231691]
M7 Centre du cône	393 441	521 309	749 687	993 335
	[271513 ; 631975]	[359755 ; 837367]	[456089 ; 1300122]	[604317 ; 1722662]
M7 Aval du cône	280 665	371 882	502 999	666 473
	[232537 ; 328794]	[308112 ; 435652]	[400058 ; 605940]	[530077 ; 802870]

Tableau 25 : Capacités de charriage maximales lors du cyclone Hyacinthe comparées à celles d'une Q500 (formules Recking 2013 et Lefort 2017)



Sur le tronçon M5, l'arasement du barrage de Bengalis permettra au tronçon d'augmenter sa capacité de charriage. En supposant que les capacités de charriage soient satisfaites (apports amont et latéraux et stock alluvial suffisant), M5 fournira suffisamment de matériaux au tronçon M6 pour éviter une incision.

On observera alors une dynamique de dépôt sur l'amont du tronçon M6. Entre 360 000 m³ et 1.1Mm³ de matériaux pourraient se déposer entre Bengalis et l'aval du pont de la RN2.

Sur l'aval du tronçon M6, jusqu'à l'apex du cône, la dynamique devrait au contraire être à l'incision. Une incision régressive pourrait donc se mettre en place jusqu'à ce que le profil trouve son équilibre sur M6.

Le cône alluvial présenterait une dynamique en exhaussement sauf à proximité de la carrière Holcim où une incision locale pourrait avoir lieu. L'exhaussement général du cône pourrait atteindre entre 320 000 m³ et 700 000 m³.

Toutefois, à l'heure actuelle, le stock alluvial présent sur le tronçon M5 ne semble pas en mesure de satisfaire les capacités de charriage de la Rivière du Mât. En cas de cyclone type Hyacinthe, le tronçon M5 risquerait donc de subir une incision régressive. Si le substratum est proche du fond du lit actuel les apports en aval pourrait être insuffisant pour entrainer les exhaussements calculés précédemment (cf. partie 3 p.212).



2.5.5.6.7 Capacités de charriage lors du cyclone Dina (2002)

Les capacités de charriage lors du cyclone Dina ont été estimées sur la partie aval du bassin entre l'Escalier et l'océan. En effet l'hydrogramme est estimé à la station de Bengalis, il nous paraît donc difficile de l'extrapoler sur la partie amont du bassin qui est relativement éloignée. L'hydrogramme est présenté en Annexe 11.

Le débit maximal de l'évènement est d'environ 540 m³/s à la station de l'Escalier et d'environ 980 m³/s à la station de Bengalis. Cela correspond à une période de retour inférieure à Q20.

CAPACITE DE TRANSPORT MAXIMALE DE LA RIVIERE DU MAT LORS DE DINA RECKING 2013				
	Q20		Dina	
	Volume réel (m3)	Volume apparent (m3)	Volume réel (m3)	Volume apparent (m3)
M5 Avant arase	93 147	123 420	55 532	73 580
	[36355 ; 226278]	[48170 ; 299819]	[22297 ; 154892]	[29543 ; 205232]
M5 Après arase	131 452	174 174	87 210	115 553
	[49570 ; 298137]	[65680 ; 395032]	[32223 ; 194719]	[42695 ; 258002]
M5 Avant arase Amont proche barrage	48 335	64 044	31 514	41 756
	[46721 ; 49949]	[61906 ; 66182]	[27303 ; 35725]	[36176 ; 47336]
M5 Après arase Amont proche barrage	110 253	146 085	70 141	92 936
	[94287 ; 126219]	[124930 ; 167240]	[67861 ; 72420]	[89916 ; 95956]
M6 Aval pont RN2	52 154	69 104	35 474	47 004
	[27467 ; 74069]	[36393 ; 98142]	[16783 ; 54303]	[22237 ; 71952]
M7 Apex du cône	76 351	101 165	52 576	69 664
	[64656 ; 88047]	[85669 ; 116662]	[43734 ; 61419]	[57947 ; 81380]
M7 Centre du cône	42 223	55 945	23 914	31 685
	[7372 ; 107338]	[9767 ; 142223]	[5224 ; 64322]	[6922 ; 85227]
M7 Aval du cône	13 535	17 934	6 341	8 402
	[5989 ; 21080]	[7936 ; 27932]	[2137 ; 10545]	[2832 ; 13972]



CAPACITE DE TRANSPORT MAXIMALE DE LA RIVIERE DU MAT LORS DE DINA LEFORT 2017				
	Q20		Dina	
	Volume réel (m3)	Volume apparent (m3)	Volume réel (m3)	Volume apparent (m3)
M5 Avant arase	171 106	226 716	102 547	135 875
	[77819 ; 336016]	[103110 ; 445221]	[16366 ; 269303]	[21685 ; 356827]
M5 Après arase	251453	333175	164 090	206 438
	[98979 ; 427287]	[131148 ; 566155]	[27331 ; 344694]	[36214 ; 456719]
M5 Avant arase Amont proche barrage	119 995	158 994	78 186	103 597
	[102767 ; 137223]	[136166 ; 181821]	[62463 ; 93909]	[82764 ; 124429]
M5 Après arase Amont proche barrage	292 473	387 527	210 473	278 876
	[314321 ; 270625]	[416475 ; 358578]	[222335 ; 198610]	[294594 ; 263158]
M6 Aval pont RN2	136 849	181 325	85 593	113 411
	[50037 ; 198049]	[66299 ; 262415]	[26882 ; 127617]	[35619 ; 169093]
M7 Apex du cône	215 321	285 300	127 056	168 349
	[210076 ; 220566]	[278351 ; 292250]	[124663 ; 129448]	[165179 ; 171519]
M7 Centre du cône	189 538	251 138	150 692	199 667
	[108960 ; 334853]	[144372 ; 443680]	[69446 ; 291262]	[92016 ; 385922]
M7 Aval du cône	123 583	163 747	96 745	128 187
	[95665 ; 151500]	[126756 ; 200738]	[65544 ; 127947]	[86845 ; 169529]

Tableau 26 : Capacités de charriage maximales lors du cyclone Dina comparées à celles d'une Q20 (formules Recking 2013 et Lefort 2017)



Lors d'un cyclone type Dina, les capacités de charriage sont inférieures à celles provoquées par une crue Q20.

Sur le tronçon M5, l'arasement du barrage de Bengalis permettra au tronçon d'augmenter sa capacité de charriage. En supposant que les capacités de charriage soient satisfaites (apports amont et latéraux et stock alluvial suffisant), M5 fournira suffisamment de matériaux au tronçon M6 pour éviter une incision.

On observera alors une dynamique de dépôt sur l'amont du tronçon M6. Entre 70 000 m³ et 245 000 m³ de matériaux pourraient se déposer entre Bengalis et l'aval du pont de la RN2.

Sur l'aval du tronçon M6, jusqu'à l'apex du cône, la dynamique devrait au contraire être à l'incision. Une incision régressive pourrait donc se mettre en place jusqu'à ce que le profil trouve son équilibre sur M6.

Le cône alluvial présenterait une dynamique en exhaussement sauf à proximité de la carrière Holcim où une incision locale pourrait avoir lieu. L'exhaussement général du cône pourrait atteindre jusqu'à 85 000 m³.

Toutefois, à l'heure actuelle, le stock alluvial présent sur le tronçon M5 risque d'être un peu limité pour satisfaire les capacités de charriage de la Rivière du Mât lors d'un cyclone type Dina. Le tronçon M5 risquerait donc de subir une incision régressive. Si le substratum est proche du fond du lit actuel les apports en aval pourrait être insuffisant pour entrainer les exhaussements calculés précédemment (cf. partie 3 p.212).



2.5.5.6.8 *Estimation des capacités de charriage lors de la période 2002-2007 et comparaison avec le bilan sédimentaire BRGM*

Afin d'estimer le volume de matériaux potentiellement transportés sur la période de **septembre 2002 à août 2007**, nous avons calculé les capacités de charriage entre l'Escalier et l'océan lors des cyclones Diwa (mars 2006) et Gamède (février 2007), ainsi que lors de la tempête du 18 février 2006 (tempête tropicale 12S_2006).

Les données hydrologiques d'entrée utilisées sont les suivantes :

- Dina à la station de l'Escalier et à la station de Bengalis : hydrogrammes composés des débits mesurés en stations. Cet hydrogramme est considéré équivalent à celui de la tempête tropicale 12S_2006 (voir paragraphe qui suit) ;
- Diwa à la station de l'Escalier et à la station de Bengalis : hydrogramme MESRI ;
- Gamède à la station de l'Escalier et à la station de Bengalis : hydrogramme MESRI.

Les hydrogrammes sont présentés en Annexe 11 et Annexe 12.

Sur la période 2002-2007, une tempête tropicale a aussi impacté significativement la Rivière du Mât en février 2006 (tempête tropicale 12S_2006). Aucune donnée de débit ou de hauteur d'eau n'est disponible pour cet événement sur HydroPortail et l'hydrogramme de cet événement n'a pas été reconstitué avec MESRI. Toutefois, le débit de pointe de la Rivière du Mât lors de la tempête aurait atteint 1077 m³/s à Bengalis d'après Sogreah et 937 m³/s d'après le BRGM. Ces valeurs sont très proches des débits atteints lors du cyclone Dina : débit estimé 1060 m³ par SOGREAH et à 980 m³/s par le BRGM. De plus, d'après la DIREN, la hauteur d'eau au niveau de la prise d'irrigation du barrage de Bengalis était de 5.39 m, soit à peine plus que la hauteur lors du cyclone Dina (5.34 m). Par conséquent, nous avons considéré que l'hydrogramme de la tempête 12D_2006 (et donc les capacités de charriage) était équivalent à l'hydrogramme du cyclone Dina.

Les capacités de transport calculées ont ensuite pu être comparées aux résultats du bilan sédimentaire 2007-2017 présenté en partie 2.4.3.2.7 b) page 81.

Le bilan sédimentaire du BRGM est découpé en deux périodes : septembre 2002 à septembre 2006 (1) et septembre 2006 à août 2007 (2).

Sur la période septembre 2002 à septembre 2006 (dates des levés photogrammétriques), les années **2002 à 2005** ont été considérées comme des **années moyennes sans événement majeur**. En effet, les débits maximums enregistrés sont équivalents ou légèrement supérieurs au débit de fréquence de dépassement 0.01 (débit dépassé 3.65 jours par an en moyenne). Au printemps **2005** quelques pics de débits journaliers moyens plus importants ont lieu (respectivement 131 m³/s, 156 m³/s et 168 m³/s). Toutefois, ces pics sont beaucoup plus faibles que ceux du printemps 2006. Le **transport solide lors de ces années** a donc été estimé à partir des **capacités de charriage d'une année moyenne**. Le transport solide de **janvier à septembre 2006** correspond quant à lui aux capacités de charriages induite par la **tempête 12S_2006** et par **Diwa**.

Sur la courte période de septembre 2006 à août 2007, (dates des levés photogrammétriques), les capacités de charriage ont été assimilées à celles de cyclone Gamède (février 2007).

SOMME DES CAPACITES DE TRANSPORT MAXIMALE DE LA RIVIERE DU MAT ENTRE 2002 ET 2007 – RECKING 2013

	Capacité annuelle moyenne		Dina (équivalent tempête tropicale 12S_2006)		Diwa		Tempête 12S_2006 + Diwa + 3 années moyennes		Gamède	
	Volume réel (m3)	Volume apparent (m3)	Volume réel (m3)	Volume apparent (m3)	Volume réel (m3)	Volume apparent (m3)	Volume réel (m3)	Volume apparent (m3)	Volume réel (m3)	Volume apparent (m3)
M5 Avant arase	42 638	56 496	55 532	73 580	99 684	132 082	283 131	375 149	215 988	286 184
	[3732 ; 120410]	[4944 ; 159543]	[22297 ; 154892]	[29543 ; 205232]	[20647 ; 371916]	[27357 ; 492789]	[60351 ; 888037]	[79966 ; 1176649]	[85278 ; 533229]	[112994 ; 706529]
M5 Avant arase Amont proche barrage	5 972	7 912	31 514	41 756	96 598	127 993	146 027	193 486	141 831	187 926
	[4064 ; 7879]	[5385 ; 10439]	[27303 ; 35725]	[36176 ; 47336]	[67309 ; 125887]	[89185 ; 166801]	[106806 ; 185249]	[141517 ; 245455]	[102809 ; 180853]	[136222 ; 239630]
M6 Aval pont RN2	6 455	8 553	35 474	47 004	85 028	112 663	139 868	185 325	126 777	167 980
	[1466 ; 19352]	[1942 ; 25642]	[16783 ; 54303]	[22237 ; 71952]	[39283 ; 129257]	[52050 ; 171265]	[60464 ; 241617]	[80114 ; 320143]	[59910 ; 181511]	[79381 ; 240502]
M7 Apex du cône	17 637	23 369	52 576	69 664	127 432	168 847	232 919	308 617	181 752	240 821
	[11060 ; 24214]	[14655 ; 32083]	[43734 ; 61419]	[57947 ; 81380]	[33301 ; 91340]	[44124 ; 121026]	[183438 ; 282400]	[243055 ; 374180]	[55281 ; 143172]	[73248 ; 189704]
M7 Centre du cône	3 194	4 232	23 914	31 685	59 522	78 867	93 018	123 249	93 058	123 301
	[808 ; 7369]	[1070 ; 9764]	[5224 ; 64322]	[6922 ; 85227]	[12951 ; 157957]	[17161 ; 209294]	[22712 ; 237143]	[30093 ; 314214]	[19192 ; 246412]	[25429 ; 326495]
M7 Aval du cône	4 881	6 467	6 341	8 402	16 801	22 261	37783	50063	25 520	33 814
	[1427 ; 8334]	[1891 ; 11043]	[2137 ; 10545]	[2832 ; 13972]	[5881 ; 27720]	[7792 ; 36729]	[12300 ; 63267]	[16297 ; 83829]	[9530 ; 41511]	[12627 ; 55002]

SOMME DES CAPACITES DE TRANSPORT MAXIMALE DE LA RIVIERE DU MAT ENTRE 2002 ET 2007 – LEFORT 2017										
	Capacité annuelle moyenne		Dina (équivalent tempête tropicale 12S_2006)		Diwa		Tempête 12S_2006 + Diwa + 3 années moyennes		Gamède	
	Volume réel (m3)	Volume apparent (m3)	Volume réel (m3)	Volume apparent (m3)	Volume réel (m3)	Volume apparent (m3)	Volume réel (m3)	Volume apparent (m3)	Volume réel (m3)	Volume apparent (m3)
M5 Avant arase	35 648	47 233	123 917	164 190	221 711	293 767	452 572	599 658	464 720	615 753
	[5247 ; 134465]	[6953 ; 178167]	[52853 ; 269303]	[70031 ; 356827]	[50303 ; 634050]	[66652 ; 840116]	[118899 ; 1306749]	[157541 ; 1731443]	[230392 ; 880287]	[305269 ; 1166380]
M5 Avant arase	10 239	13 566	78 186	103 597	183 307	242 882	292 209	387 177	271 003	359 078
Amont proche barrage	[6273 ; 14204]	[8312 ; 18821]	[62463 ; 93909]	[82764 ; 124429]	[153128 ; 213486]	[202895 ; 282869]	[234410 ; 350007]	[310594 ; 463761]	[230392 ; 311613]	[305269 ; 412888]
M6 Aval pont RN2	2 570	3 405	85 593	113 411	208687	276510	301 990	400 137	317 403	420 559
	[369 ; 7222]	[489 ; 9570]	[26882 ; 127617]	[35619 ; 169093]	[64884 ; 310228]	[85972 ; 411052]	[92874 ; 449379]	[123058 ; 595428]	[103677 ; 466413]	[137371 ; 617998]
M7 Apex du cône	3 384	4 484	127 056	168349	315499	418037	452 706	599 836	489604	648 725
	[1734 ; 5034]	[2297 ; 6670]	[124663 ; 129448]	[165179 ; 171519]	[311376 ; 319623]	[412573 ; 423501]	[451141 ; 454272]	[597761 ; 601910]	[481390 ; 497818]	[637842 ; 659609]
M7 Centre du cône	32 186	42 646	150 692	199 667	363 628	481 807	610 877	809 413	518 901	687 544
	[1367 ; 123910]	[1811 ; 164180]	[69446 ; 291262]	[92016 ; 385922]	[169026 ; 690023]	[223959 ; 914280]	[242573 ; 1353014]	[321410 ; 1792744]	[257737 ; 940890]	[341502 ; 1246679]
M7 Aval du cône	40 106	53 140	96 745	128 187	234 429	310 619	451 492	598 227	320 640	424 848
	[9068 ; 71144]	[12015 ; 94266]	[65544 ; 127947]	[86845 ; 169529]	[161042 ; 307816]	[213381 ; 407857]	[253790 ; 649195]	[336272 ; 860183]	[232778 ; 408501]	[308431 ; 541264]

Tableau 27: Somme des capacités de charriage maximales lors des cyclones Dina, Diwa et Gamède (formules Recking 2013 et Lefort 2017)



Les tableaux suivants présentent les évolutions verticales du lit observées sur la période 2002-2007 et les évolutions supposées d'après les capacités de charriage calculées.

Evolution du lit : comparaison entre les éléments calculés (capacité de charriage) et observés (bilan sédimentaire LiDAR) sur la période 2002-2006			
Secteur	Recking 2013	Lefort 2017	Evolution observée
Barrage de Bengalis - aval du pont RN2	Exhaussement faible	Incision	-
Aval du pont RN2 : P21 – P22	Exhaussement d'environ 111 000 m ³	Exhaussement d'environ 311 000 m ³	Incision d'environ 176 355 m³
P22 – P24	Incision d'environ 130 000 m ³	Incision comprise entre 142 000 et 413 000 m ³	
P21 – P24	Incision comprise entre 4 000 et 35 000 m³	Incision d'environ 64 000 m³ à exhaussement d'environ 132 000 m³ selon la granulométrie	
P24 – P25	Incision d'environ 172 000 m ³ à exhaussement d'environ 77000 m ³ selon la granulométrie	Incision comprise entre 6 500 m ³ et 333 000 m ³	Incision d'environ 123 098 m³
P25 – P26	Exhaussement compris entre 210 000 et 262 000 m ³	Exhaussement d'environ 265 000 m ³	
P26 – P27	Incision d'environ 16 000 m ³ à léger exhaussement d'environ 3 000 m ³ selon la granulométrie	Incision d'environ 364 000 m ³	
P24 – P27	Exhaussement compris entre 74 000 m³ et 290 000 m³	Incision comprise entre 73 000 m³ et 465 000 m³ selon la granulométrie	
P27 – P28	Incision comprise entre 82 000 m ³ et 187 000 m ³	Incision comprise entre 145 000 et 1 062 000 m ³ selon la granulométrie	Incision d'environ 253 220 m ³
P28 – P30	Exhaussement compris entre 106 000 et 230 000 m ³	Exhaussement compris entre 658 000 et 933 000 m ³	
P27 – P30	Exhaussement compris entre 24 000 m³ et 89 000 m³	Incision d'environ 130 000 m³ à exhaussement d'environ 332 000 m³ selon la granulométrie	

La numérotation des profils correspond aux profils de calcul 2017



Evolution du lit : comparaison entre les éléments calculés (capacité de charriage) et observés (bilan sédimentaire LiDAR) sur la période 2006-2007			
Secteur	Recking 2013	Lefort 2017	Evolution observée
Barrage de Bengalis - aval du pont RN2	Exhaussement	Incision	-
Aval du pont RN2 : P21 – P22	Exhaussement d'environ 105 000 m ³	Exhaussement compris entre 259 000 et 321 000 m ³	Incision d'environ 290 163 m³
P22 – P24	Incision d'environ 135 000 m ³	Incision comprise entre 318 000 et 395 000 m ³	
P21 – P24	Incision d'environ 30 500 m³	Incision comprise entre 59 000 et 75 000 m³	
P24 – P25	Incision d'environ 64 000 m ³ à exhaussement d'environ 37 500 m ³ selon la granulométrie	Incision comprise entre 42 000 et 183 000 m ³	Incision d'environ 415 312 m³
P25 – P26	Exhaussement d'environ 168 000 m ³	Exhaussement d'environ 304 000 m ³	
P26 – P27	Exhaussement compris entre 8 000 et 10 000 m ³	Incision d'environ 295 000 m ³	
P24 – P27	Exhaussement compris entre 113 000 m³ et 215 000 m³	Incision comprise entre 13 000 m³ et 194 000 m³	
P27 – P28	Incision comprise entre 107 000 m ³ et 225 000 m ³	Incision comprise entre 171 000 et 597 000 m ³ selon la granulométrie	Exhaussement d'environ 454 218 m³
P28 – P30	Exhaussement compris entre 128 000 et 270 000 m ³	Exhaussement compris entre 503 000 et 705 000 m ³	
P27 – P30	Exhaussement compris entre 21 000 m³ et 77 000 m³	Exhaussement compris entre 428 000 m³ et 502 000 m³	

La numérotation des profils correspond aux profils de calcul 2017

Les deux formules utilisées (Recking et Lefort) donnent des résultats variables. La formule de Recking donne à plusieurs reprises des tendances d'évolution opposées aux bilans du BRGM. **Les résultats obtenus avec la formule de Lefort coïncident plus souvent avec les tendances du bilan sédimentaire BRGM (notamment sur le bilan 2006-2007), toutefois les volumes calculés et mesurés sont souvent éloignés.**

Sur le bilan sédimentaire 2002-2006, les deux formules ont du mal à retranscrire les évolutions verticales observées du lit.

Sur le bilan 2006-2007, la formule de Lefort se démarque et retranscrit assez bien les tendances d'évolutions même si les volumes sont éloignés sur les deux tiers amont du cône.

Cependant, ces deux comparaisons ne permettent pas de déterminer clairement la formule la plus adaptée aux calculs de transport solide sur le cône alluvial. En effet, les **données topographiques** utilisées par le BRGM pour les bilans 2002-2006-2007 présentent des **incertitudes importantes** (végétation non retraitée et beaucoup moins de points que le levé 2017) qui rendent la comparaison plus incertaine.

En partie suivante, la comparaison des formules avec le bilan sédimentaire 2007-2017 apporte des éléments complémentaires à cette analyse.

2.5.5.6.9 *Estimation des capacités de charriage lors de la période 2007-2017 et comparaison avec le bilan sédimentaire*

Afin d'estimer le volume de matériaux potentiellement transportés sur la période 2007-2017, nous avons calculé les capacités de charriage lors des cyclones Dumile (03-04/01/2013), Felleng (31/01-01/02/2013), Bejisa (02-03/01/2014) et Habiba (07-08/03/2015) entre l'Escalier et l'océan. Ces trois cyclones sont les événements principaux ayant eu lieu lors de la période 2007-2017.

Ces capacités de transport ont ensuite pu être comparées aux résultats du bilan sédimentaire 2007-2017 présenté en partie 2.4.3.2.7 b) page 81.

Les données hydrologiques d'entrée des 4 cyclones sont :

- Dumile à la station de l'Escalier : le calage MESRI pour l'évènement Dumile étant mauvais, nous avons utilisé un hydrogramme composé des débits mesurés en station jusqu'au 04/01/2013 minuit puis des débits calculés à partir des hauteurs d'eau pour la suite de l'évènement (les débits mesurés étant indisponibles à partir du 04/01/2013 minuit, nous avons utilisé une courbe de tarage calculée d'après les hauteurs et débits de la première partie de l'évènement) ;
- Dumile à la station de Bengalis : le calage MESRI pour l'évènement Dumile étant mauvais, nous avons utilisé un hydrogramme composé des débits observés en station ;
- Felleng à la station de l'Escalier : nous avons calculé les débits à partir des hauteurs d'eau mesurées en station, la courbe de tarage 'Escalier' de l'évènement Dumile ayant eu lieu quelques semaines avant a été utilisée ;
- Felleng à la station de Bengalis : nous avons calculé les débits à partir des hauteurs d'eau mesurées en station, la courbe de tarage 'Bengalis' de l'évènement Dumile ayant eu lieu quelques semaines avant a été utilisée ;
- Bejisa aux deux stations : hydrogrammes composés des débits mesurés en stations ;
- Habiba aux deux stations : hydrogrammes composés des débits mesurés en stations.

Les hydrogrammes sont présentés en Annexe 12.

Sur la période août 2007 à septembre 2017 (dates du levé photogrammétrique et LiDAR), les années **2007, 2009, 2010, 2011, 2012 et 2017** peuvent être considérées comme des **années moyennes sans évènement majeur**. En effet, les débits maximums enregistrés sont équivalents ou légèrement supérieurs au débit de fréquence de dépassement 0.01 (débit dépassé 3.65 jours par an en moyenne). Les années **2008 et 2016** présentent un ou deux pics de débits importants (respectivement 175 m³/s et 258 m³/s). Toutefois, les pics de crue au-dessus de 120 m³/s sont très courts (respectivement moins d'1h et 6h). Ces années seront donc également considérées comme moyennes. Le **transport solide lors de ces années** a donc été estimé à partir des **capacités de charriage d'une année moyenne**.

Les années **2013, 2014 et 2015** ont chacune subies des cyclones majeurs. En 2013, le cyclone **Dumile et Felleng**. En 2014 puis 2015, les cyclones **Bejisa puis Habiba** faisait partie du club des 500 mm. L'estimation du **transport solide lors de ces années-là** s'est donc basée sur la **capacité de charriage moyenne de ces quatre cyclones** (cf. Tableau 28). En effet, cette capacité de charriage est largement supérieure à la capacité de charriage annuelle estimée à partir des débits classés.

☞ Nous avons écarté les valeurs de capacité de charriage calculées avec les granulométries 8 et 9 du BRGM et la formule de Lefort car les valeurs paraissaient trop faibles par rapport aux autres résultats (entre 1 000 et 10 000 mètres cubes de matériaux transportés par an).



SOMME DES CAPACITES DE TRANSPORT MAXIMALE DE LA RIVIERE DU MAT ENTRE 2007 ET 2017 - RECKING 2013								
	Capacité annuelle moyenne		Q20		Dumile + Felleng + Bejisa + Habiba		Dumile + Felleng + Bejisa + Habiba + 7 années moyennes	
	Volume réel (m3)	Volume apparent (m3)	Volume réel (m3)	Volume apparent (m3)	Volume réel (m3)	Volume apparent (m3)	Volume réel (m3)	Volume apparent (m3)
M5 Avant arase	42 638	56 496	93 147	123 420	93 725	124 186	392 192	519 655
	[3732 ; 120410]	[4944 ; 159543]	[36355 ; 226278]	[48170 ; 299819]	[20671 ; 304828]	[27389 ; 403897]	[46795 ; 1147698]	[61997 ; 1520698]
M5 Avant arase	5 972	7 912	48 335	64 044	43 421	57 533	85 222	112 919
Amont proche barrage	[4064 ; 7879]	[5385 ; 10439]	[46721 ; 49949]	[61906 ; 66182]	[34452 ; 52390]	[45649 ; 69417]	[62900 ; 107543]	[83344 ; 142490]
M6 Aval pont RN2	6 455	8 553	52 154	69 104	50710	67191	95 895	127 061
	[1466 ; 19352]	[1942 ; 25642]	[27467 ; 74069]	[36393 ; 98142]	[20499 ; 98733]	[27161 ; 130822]	[30761 ; 234197]	[40755 ; 310316]
M7 Apex du cône	17 637	23 369	76 351	101 165	89 926	119 152	213 385	282 734
	[11060 ; 24214]	[14655 ; 32083]	[64656 ; 88047]	[85669 ; 116662]	[71114 ; 108738]	[94227 ; 144078]	[148534 ; 278236]	[196812 ; 368659]
M7 Centre du cône	3 194	4 232	42 223	55 945	28 257	37 440	50 615	67 065
	[808 ; 7369]	[1070 ; 9764]	[7372 ; 107338]	[9767 ; 142223]	[6890 ; 73090]	[9129 ; 96844]	[12546 ; 124673]	[16619 ; 165192]
M7 Aval du cône	4 881	6 467	13 535	17 934	11 292	14 962	45 456	60 230
	[1427 ; 8334]	[1891 ; 11043]	[5989 ; 21080]	[7936 ; 27932]	[3166 ; 19419]	[4195 ; 25730]	[13155 ; 77757]	[17432 ; 103031]



SOMME DES CAPACITES DE TRANSPORT MAXIMALE DE LA RIVIERE DU MAT ENTRE 2007 ET 2017 – LEFORT 2017								
	Capacité annuelle moyenne		Q20		Dumile + Felleng + Bejisa + Habiba		Dumile + Felleng + Bejisa + Habiba + 6 années moyennes	
	Volume réel (m3)	Volume apparent (m3)	Volume réel (m3)	Volume apparent (m3)	Volume réel (m3)	Volume apparent (m3)	Volume réel (m3)	Volume apparent (m3)
M5 Avant arase	35 648	47 233	171 106	226 716	183 723	243 433	433 258	574 067
	[5247 ; 134465]	[6953 ; 178167]	[77819 ; 336016]	[103110 ; 445221]	[41746 ; 523274]	[55313 ; 693339]	[78475 ; 1464529]	[103984 ; 1940508]
M5 Avant arase	10 239	13 566	119 995	158 994	105 872	140 281	177 542	235 245
Amont proche barrage	[6273 ; 14204]	[8312 ; 18821]	[102767 ; 137223]	[136166 ; 181821]	[82047 ; 129697]	[108713 ; 171848]	[125958 ; 229125]	[166897 ; 303595]
M6 Aval pont RN2	2 570	3 405	136 849	181 325	141 047	186 887	121 618	161 144
	[369 ; 7222]	[489 ; 9570]	[50037 ; 198049]	[66299 ; 262415]	[136190 ; 145904]	[180452 ; 193323]	[138773 ; 196458]	[183875 ; 260313]
M7 Apex du cône	3 384	4 484	215 321	285 300	249 468	330 545	164 734	218 272
	[1734 ; 5034]	[2297 ; 6670]	[210076 ; 220566]	[278351 ; 292250]	[83145 ; 581915]	[110167 ; 771037]	[95283 ; 617153]	[126246 ; 817727]
M7 Centre du cône	32 186	42 646	189 538	251 138	184 135	243 979	474 767	629 067
	[1367 ; 123910]	[1811 ; 164180]	[108960 ; 334853]	[144372 ; 443680]	[95773 ; 272497]	[126900 ; 361058]	[105342 ; 1139867]	[139577 ; 1510318]
M7 Aval du cône	40 106	53 140	123 583	163 747	141 047	186 887	464 877	615 962
	[9068 ; 71144]	[12015 ; 94266]	[95665 ; 151500]	[126756 ; 200738]	[136190 ; 145904]	[180452 ; 193323]	[199666 ; 643912]	[264557 ; 853185]

Tableau 28 : Somme des capacités de charriage maximales lors des cyclones Dumile, Bejisa et Habiba comparées à celles d'une Q20 (formules Recking 2013 et Lefort 2017)



Le tableau suivant présente les évolutions verticales du lit observées sur la période 2007-2017 et les évolutions supposées d'après les capacités de charriage calculées.

Evolution du lit : comparaison entre les éléments calculés (capacité de charriage) et observés (bilan sédimentaire LiDAR) sur la période 2007-2017			
Secteur	Recking 2013	Lefort 2017	Evolution observée
Barrage de Bengalis - aval du pont RN2	Incision	Exhaussement	Incision
Aval du pont RN2 : P21 – P22	Exhaussement d'environ 84 000 m ³	Exhaussement compris entre 158 000 et 220 000 m ³	Incision de 30 636 m ³
P22 – P24	Incision d'environ 76 000 m ³	Incision comprise entre 164 000 et 232 000 m ³	Incision de 30 410 m ³
P24 – P25	Incision d'environ 58 000 m ³	Exhaussement d'environ 11 000 m ³	Incision de 156 663 m ³
P25 – P27	Exhaussement compris entre 173 000 et 257 000 m ³	Incision comprise entre 164 000 et 232 000 m ³	Exhaussement de 81 788 m ³
P27 – P30	Exhaussement compris entre 14 000 et 58 000 m ³	Exhaussement compris entre 206 000 et 334 000 m ³	Exhaussement de 55 420 m ³

La numérotation des profils correspond aux profils de calcul 2017

Les résultats les plus proches du bilan sédimentaire 2007-2017 sont ceux obtenus avec la formule de Recking 2013.

Les tendances observées et calculées sont les mêmes sauf en aval proche du pont de la RN2. Les valeurs calculées avec Recking sont relativement proches des valeurs observées, tout particulièrement sur le secteur P27-P30.

Avec la formule de Lefort, les tendances d'évolution déduites des calculs de transport solide sont souvent opposées aux tendances observées. Lorsque les tendances sont similaires, les valeurs d'exhaussement ou d'incision calculées sont beaucoup trop importantes.

La comparaison des formules de transport solide avec les différents bilans sédimentaire débouche sur des conclusions opposées :

- Les bilans sédimentaires 2002-2006-2007 correspondent mieux aux résultats obtenus avec la formule de Lefort 2017 qui retranscrit mieux les tendances d'évolution du cône alluvial malgré des volumes calculés relativement éloignés des volumes mesurés ;
- Le bilan sédimentaire 2007-2017 est quant à lui plus proche des résultats obtenus avec la formule de Recking.

Les nombreuses incertitudes des formules et des bilans sédimentaires rendent difficile le choix entre l'une ou l'autre des formules.

De plus, nous n'avons pu comparer le bilan sédimentaire et les calculs de transport solide que sur trois périodes : 2002-2006, 2006-2007 et 2007-2017.



Sur la période 2002-2006-2007, **les données topographiques manquent de précision** (végétation non retraitée et beaucoup moins de points que le levé 2017).

Sur la période 2007-2017, les cyclones ayant eu lieu ne sont **pas les évènements les plus morphogènes** connus par la Rivière du Mât.

L'idéal serait donc de pouvoir effectuer d'autres bilans sédimentaires et calculs de transport solide dans le futur afin de confirmer si une formule retranscrit mieux le transport solide sur le cône alluvial de la Rivière du Mât.



Approche calculatoire du transport solide sur le bassin de la Rivière du Mât

1- Fonctionnement à l'échelle du bassin

Les capacités de charriage maximales mesurées permettent de mieux comprendre le fonctionnement général du bassin.

La majeure partie des matériaux produits en amont du bassin semble transiter jusqu'à **deux principales zones de stockage régulation** : le tronçon M2 et la zone de confluence Rivière des Fleurs Jaunes – Ravine Roche à Jacquot.

Ces zones de stockage régulation sont des zones moins pentues et plus larges qui favorisent le dépôt des matériaux. Elles sont situées en amont de secteurs en gorges.

Ces secteurs en **gorges vont faire transiter la charge solide** jusqu'au tronçon M4. Les prises ILO situées sur M3 et FJ4 semblent avoir un impact mineur sur le transport solide en crue. Par conséquent, c'est donc la capacité de charriage en amont des gorges qui va dicter le volume de matériaux y transitant.

A partir de la sortie des gorges, la pente diminue et la vallée s'élargie. Les matériaux peuvent à nouveau se déposer, notamment dans les intrados de méandre. **La capacité de charriage maximale de M5 est inférieure au volume de matériaux maximum pouvant transiter dans les gorges en crue.** Si les apports solides amont sont suffisants, des dépôts devraient donc avoir lieu sur l'aval de M4 et sur M5. **Toutefois**, plusieurs zones de pavage sont présentes sur M5 et la diachronie verticale indique une **incision de l'aval de M4 et de M5**.

Cette incohérence entre la capacité de transport calculée en crue et la dynamique en incision observée pourrait être liée à deux éléments :

- **Les crues courantes qui pourraient avoir du mal à faire transiter des volumes de matériaux suffisants depuis l'amont** (absence de débit classés en amont permettant de creuser cette hypothèse) et qui auraient alors tendance à déstocker les matériaux déposés par les crues extrêmes ;
- **Les phénomènes de pavage qui entraînent une sous-estimation des capacités de transport** en cas de rupture du pavage.

L'arasement du seuil de Bengalis va entraîner une augmentation des capacités de transport en amont ainsi qu'une érosion régressive du lit. **Les matériaux transportés devraient se déposer à partir de l'aval du pont de la RN2** (aval M6). Un exhaussement important en aval du pont **pourrait favoriser l'exhaussement du secteur encaissé** en amont du pont.

Sur **M6**, malgré les dépôts potentiels liés aux apports amont, le tronçon **risque de subir une incision régressive** car l'amont du cône alluvial est caractérisé par des capacités de transport supérieures. Par ailleurs, il est important de noter qu'en aval du pont de la RN2, le tronçon semble pavé ce qui pourrait conduire à une **sous-estimation du transport solide**.

Sur le cône alluvial, lors d'une **année moyenne**, le cône semble plutôt subir une **incision globale**. Lors de **crues extrêmes** (supérieures Q20), les capacités de transport indiquent par contre une incision de la partie amont et des **dépôts dans la zone centrale (sauf secteur carrière) et aval**.



Approche calculatoire du transport solide sur le bassin de la Rivière du Mât

2- Incertitudes et pistes d'amélioration des connaissances

Le calcul des capacités de charriage maximales présente de **nombreuses incertitudes** (données d'entrées, formules, spécificités locales du bassin de la Rivière du Mât).

Les capacités de charriage obtenues sont globalement inférieures aux valeurs proposées par le BRGM en 2008. Pour l'évènement Hyacinthe (période de retour entre Q50 et Q100), seules les valeurs calculées sur la Rivière des Fleurs Jaunes sont du même ordre de grandeur que les valeurs du BRGM. Sur les autres tronçons les valeurs obtenues sont entre 1.6 et 5 fois plus faibles que les valeurs du BRGM.

Cette différence de valeurs **peut être lié aux formules, aux granulométries utilisées, à la topographie** plus récente ainsi qu'au **mode d'application des formules** en zones multichenalisées (un seul chenal considéré comme actif). Elle pourrait aussi être liée à la **période d'estimation** des capacités de transport qui présente de nombreux évènements cycloniques intenses (sur 15 ans d'estimations annuelles, 5 années avec de gros cyclones : 1993, 1998, 2002, 2006, 2007).

Afin de diminuer les incertitudes, **il est nécessaire d'améliorer les connaissances relatives au transport solide**. La mesure du transport solide réel lors de certains épisodes de crues permettrait par exemple de pouvoir caler les formules de transport solide.

La thèse d'Alicia Gonzalez a notamment essayé de relier les **enregistrements sismiques** de la Rivière du Mât au transport solide (volumes transportés). Bien qu'elle ait mis en évidence que les hautes fréquences correspondent à l'impact des sédiments, elle n'a pas réussi à relier ces données à des volumes de matériaux.

Elle propose toutefois plusieurs pistes afin d'améliorer les connaissances relatives à cette méthode de suivi de la charge solide, entre autres :

- **Réaliser plus de levés/prises de vues aériennes** avant-après évènements cycloniques, cela permettrait notamment de réaliser des bilans sédimentaires plus régulièrement et de les confronter aux valeurs de capacité de charriage calculées (cela permettrait d'affiner les conclusions de la partie 2.5.5.6.8) ;
- **Réaliser des campagnes de sondage en mer** pour évaluer les volumes de matériaux déposés sur le cône sous-marin ;
- **Exploiter les données de calibration du signal sismique** conduites à partir de lâchers de blocs.

Le **traçage de la charge solide** serait également intéressant pour connaître la vitesse de propagation de différents fuseaux granulométriques sur le bassin.

2.6 EVOLUTION DYNAMIQUE

La compréhension de l'**évolution dynamique** s'effectue **en confrontant les deux composantes de la trajectoire géomorphologique** déjà déterminées (héritage géomorphologique versus fonctionnement dynamique), à travers notamment l'**état de leurs différents items** (forçage climatique, extractions de matériaux, compartimentage, corsetage, diachronie ; connexion versants/lit, érosion des berges, apports des contributeurs sédimentaires, état du stock alluvial, cinématique du transport solide...).

Il s'agit ainsi de dégager des **tendances lourdes** potentiellement adaptées au bassin étudié. Elles vont nous permettre de comprendre comment le triptyque « **alimentation sédimentaire – transport solide – stock alluvial** » va évoluer et par la suite d'**appréhender les modalités de gestion future du bassin** (PPG) pour **accompagner sa dynamique fluviale**.

Pour présenter l'évolution dynamique à travers la détermination de ces tendances lourdes nous présentons ces éléments sous la forme de graphiques synthétiques prenant en compte :

(1) → **Les éléments connus de la trajectoire géomorphologique** (héritage géomorphologique versus fonctionnement dynamique),

(2) → **Les forçages passés et présents impactant le cours d'eau** et éventuellement leurs impacts futurs,

(3) → **La capacité de résilience des cours d'eau** (celle-ci peut notamment s'évaluer en regardant si les forçages concernent les variables de contrôle ou les variables d'ajustement au sens de Malavoi & Bravard, 2010),

(4) → **Les conditions de réversibilité éventuelle** des différents phénomènes, mécanismes et processus impliqués et les conditions de leur mise en œuvre.

Ils prennent en compte totalement le contexte local, mais cherchent également à contextualiser l'impact du **contexte global** sur le **contexte local**.

Ils mettent ainsi en exergue les **tendances lourdes** qu'il convient de bien appréhender pour déterminer un plan de gestion adapté, allant dans le sens de l'amélioration de la trajectoire géomorphologique de chaque cours d'eau par l'accompagnement dynamique et le suivi dynamique.

Ils s'inscrivent ainsi dans une **approche didactique** et leur vocation simplificatrice de phénomènes et processus complexes a pour objectif principal de permettre une appréhension et une compréhension rapide de la dynamique.

Le code de couleurs utilisés à la fois pour les tableaux et les schémas dynamiques de la trajectoire géomorphologique est présenté dans le tableau suivant :

Légende des tableaux et schémas dynamiques

	Très impactant négativement
	Impactant négativement
	Neutre ou très faiblement impactant
	Impactant positivement
	Impactant très positivement
	Données insuffisantes



Tableau 29 : Impact de chaque item sur la trajectoire géomorphologique du bassin de la Rivière du Mât, permettant de déterminer les tendances lourdes d'évolution dynamique

IMPACT DE CHAQUE ITEM SUR LA TRAJECTOIRE GEOMORPHOLOGIQUE DU BASSIN DE LA RIVIERE DU MAT (EVOLUTION DYNAMIQUE)					
Séquences	Items étudiés	Impact		Impact global sur trajectoire	Commentaires
		Fourniture	Transport solide		
Le passé : Héritage géomorphologique	Climatologie	?	?	?	Les données climatiques disponibles pour l'Ile de la Réunion sont limitées (peu de recul). De plus, le changement climatique actuel rend difficile la futurisation du climat. Actuellement, le régime cyclonique et la dissymétrie saisonnière et spatiale des précipitations sont à l'origine de très forts taux d'érosion dans le cirque de Salazie. D'après les scientifiques, les cyclones devraient s'intensifier et les précipitations devraient se concentrer ce qui entrainerait une augmentation des taux d'érosion.
	Géologie/lithologie des berges				En dehors des zones de gorges, la lithologie est intéressante pour les cours d'eau. En amont des formations bréchiques très facilement remobilisables alimentent le cours d'eau en matériaux grossiers bien qu'elles présentent une forte proportion de fines. En aval, les terrasses alluviales fournissent également des matériaux intéressants au cours d'eau par érosion. Elles sont composées de matériaux grossiers dans une matrice fine assez cohésive. Malgré ces apports abondants en matériaux (notamment en amont), les cours d'eau du bassin sont tous en incision depuis les années 50. En dehors des crues les plus fortes, les apports grossiers semblent donc insuffisants.
	Extractions				Des extractions ont eu lieu en lit mineur jusqu'au début des années 2000 notamment en aval du bassin. Sur le cône alluvial, 5Mm3 d'alluvions auraient ainsi été prélevés en lit mineur entre 1980 et 2000. Ces prélèvements ont probablement impacté de manière durable la trajectoire géomorphologique du cône alluvial. Actuellement des extractions ont encore lieu en lit moyen (en rive droite aval du cône). Un risque de capture de la Rivière du Mât et de piégeage des sédiments est aussi présent dans ce secteur, ce qui pourrait impacter la trajectoire future du cours d'eau.
	Compartimentage				Le compartimentage est limité mais 4 barrages majeurs sont tout de même présents. (Le barrage de Bengalis doit prochainement être arasé). Les 4 barrages sont atterris. Ils bloquent un volume significatif de matériaux en amont mais semblent peu impacter le transport solide en crue. Des données complémentaires sur le transit de la charge sédimentaire au droit des seuils seraient néanmoins intéressantes (traçage notamment).



IMPACT DE CHAQUE ITEM SUR LA TRAJECTOIRE GEOMORPHOLOGIQUE DU BASSIN DE LA RIVIERE DU MAT (EVOLUTION DYNAMIQUE)					
Séquences	Items étudiés	Impact		Impact global sur trajectoire	Commentaires
		Fourniture	Transport solide		
	Corsetage				Dans les zones de production ou de recharge sédimentaire, le corsetage d'origine anthropique (route, enrochements, ...) est faible voire absent. Il n'impacte que très ponctuellement la fourniture sédimentaire (ex : route en amont du pont de Savane qui déconnecte les apports de rive droite).
	Evolution diachronique latérale				La surface des bandes actives varie fortement entre période post-crue et période d'intercrue. En amont, les bandes actives se réactivent encore de façon significative lors des crues les plus extrêmes. Par contre, en aval du bassin, la rétraction est constante depuis 1950.
	Evolution diachronique verticale				Par rapport à 1950, l'ensemble des cours d'eau du bassin ont connu une incision métrique à plurimétrique de leur lit. Cela témoigne d'un déficit sédimentaire majeur.
	Evolution production sédimentaire (depuis un siècle environ)				La production sédimentaire s'est appauvrie depuis 1950. Les petits affluents se sont taris (rétraction de leurs BA et végétalisation de leurs bassins) et la connexion versants-lit a diminué (re-végétalisation des versants probablement liée à la déprise rurale).
Le présent : Fonctionnement dynamique	Contribution des versants				Des apports importants se font actuellement par glissement de versant, toutefois les zones affectées par des glissements actifs (non végétalisés) sont moins nombreuses qu'en 1950 (post-cyclone 1948) car nous sommes dans un période de relatif « calme » hydrologique. En effet, les apports majeurs par glissement de versant ont généralement lieu lors des cyclones ou phénomènes hydrologiques les plus extrêmes (15.2 millions de m ³ érodés lors du cyclone centennal Hyacinthe). Les matériaux fournis par les glissements proviennent de formations bréchiques qui comportent une grosse part de matières fines. Les glissements sont concentrés en amont du bassin (cirque).
	Contribution des affluents				Les apports des petits affluents sont très limités (tarissement depuis au moins le milieu du XXème s). Les affluents majeurs (Rivière des Fleurs Jaunes, Bras Sec, Ravine Roche à Jacquot et Ravine Blanche) présentent encore un stock alluvial important et une capacité de production sédimentaire non négligeable.
	Contribution des érosions de berges				Les 10 zones d'érosion les plus active (recul de berge) ont fourni au cours d'eau 2.9 Mm ³ de matériaux entre 1950 et 2022. Bien que les volumes fournis paraissent négligeables par rapport aux apports des glissement amont, ces matériaux peuvent contribuer significativement à limiter l'incision en aval du bassin.
	Stock alluvial en lit				Le stock alluvial de la Rivière du Mât est abondant (à environ 10 Mm ³) mais 80% de ces matériaux sont fixés et 70 % sont stockés en aval sur le cône alluvial. Les tronçons M2 et M5 présentent toutefois eux aussi un stock alluvial intéressant et assez facilement remobilisable (env. 1Mm ³ non fixés à eux deux).

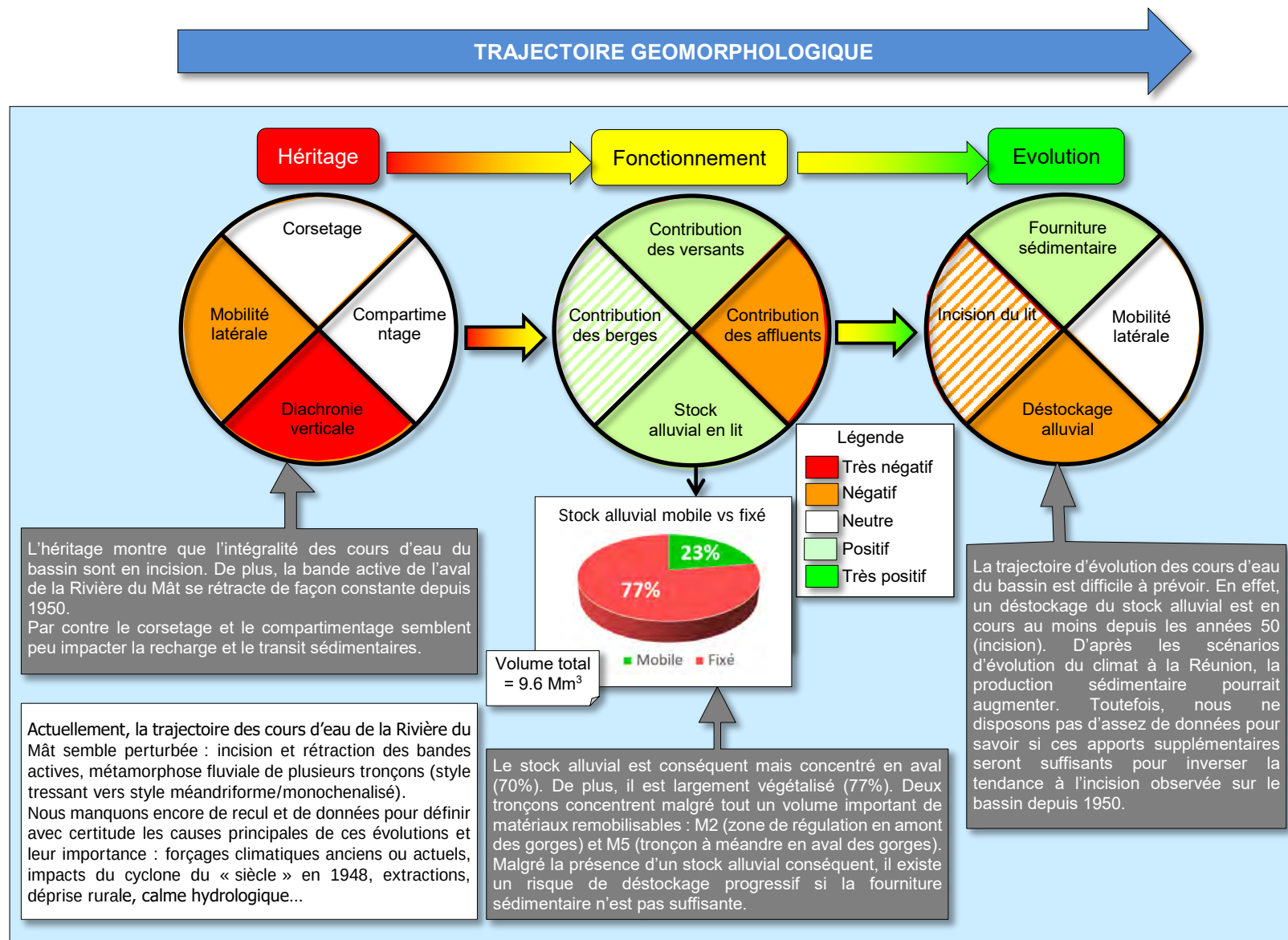


Figure 138 : Schéma synthétique d'analyse dynamique de la trajectoire géomorphologique du bassin de la Rivière du Mât



Il apparaît difficile d'avoir un avis tranché sur l'**évolution dynamique** des cours d'eau, même si notre connaissance de l'héritage géomorphologique et du fonctionnement dynamique est relativement conséquente.

En effet, les données disponibles actuellement concernant l'alimentation sédimentaire, le transport solide et l'évolution du stock alluvial sont encore insuffisantes, alors qu'il existe des chroniques de données parfois séculaires de météorologie (pluviométrie, température...), d'hydrologie (débits liquides, crues...). De plus, les impacts du changement climatique sont aussi difficiles à prévoir, que ce soit en termes d'ampleur que de vitesse d'évolution.

Ces carences limitent notre perception de l'évolution dynamique et devront être palliée grâce à la mise en place d'un **suivi dynamique** du triptyque alimentation sédimentaire/transport solide/stock alluvial qui constitue le moteur de la construction et de l'évolution des lits fluviaux.

Ce suivi permettra de suivre « en temps réel » les évolutions futures en collectant et en analysant de la donnée mesurée dont le point-zéro sera notamment constitué par les éléments de la présente l'étude. Ce suivi fera partie intégrante du plan de gestion (phase 7). Il permettra de faire évoluer le plan de gestion au fil du temps et de l'adapter à la réalité de l'évolution dynamique sous forçage climatique



2.7 CONCLUSION

Le **fonctionnement hydromorphologique** du bassin de la Rivière du Mât est marqué par l'influence du **climat** local (climat tropical humide à cyclone très contrasté d'une saison à l'autre) et de la **géologie** (formations bréchiques propices aux glissements, coulées basaltiques formant des gorges, ...).

Depuis 1950, nous avons pu constater que le **fonctionnement des cours d'eau du bassin semble s'être dégradé** (incision généralisée, zones pavées, bandes actives réduites, changement de styles fluviaux...). Les forçages anthropiques anciens ou actuels, notamment les **extractions**, semblent avoir joué un rôle non négligeable dans l'évolution de certains tronçons. Néanmoins, **nous manquons de données antérieures à 1950** (bande active, climat, profil en long, état du cours d'eau avant le cyclone de 1948...) qui nous permettrait de mieux comprendre si cette dégradation représente une tendance de long, moyen ou court terme, réversible ou irréversible.

Enfin, le **changement climatique** qui commence à se faire ressentir à la Réunion depuis le début des années 2000 risque aussi d'impacter la trajectoire géomorphologique des cours d'eau du bassin. Le contraste entre saisons sèche et humide risque d'augmenter et les cyclones de s'intensifier, ce qui aurait pour effet de faire **augmenter les taux d'érosion** dans le cirque de Salazie et par conséquent d'**augmenter la fourniture sédimentaire** des cours d'eau.

Afin de lever une partie des **incertitudes** pesant sur la compréhension du fonctionnement hydromorphologique du bassin, il nous paraît indispensable de mettre en place un **suivi dynamique**. Ce dernier permettra de suivre les évolutions des cours d'eau du bassin au fil des crues morphogènes (évolution verticale, évolution en plan, impacts liés au changement climatique, bilans sédimentaires, mesure des vitesses de transit de la charge solide, etc.).



3 EVOLUTION DU PROFIL EN LONG DANS LE SECTEUR BENGALIS-PONT DE LA RN2

☞ Cette analyse est un exercice complexe et présente de nombreuses incertitudes du fait du manque de données anciennes, mais aussi du fait du fonctionnement incertain des cours d'eau et notamment de la Rivière du Mât (l'intensité et la fréquence des cyclones varie fortement d'une année sur l'autre, la bande active évolue au fil des crues et intercrues, les vitesses de transit sédimentaire sont peu connues, les capacités de charriage calculées présentent beaucoup d'incertitudes...). Cette analyse donne toutefois une idée des scénarios qui pourraient se produire à la suite de l'arasement du seuil de Bengalis.

3.1 ANALYSE DU SITE

Pour rappel, le barrage de Bengalis est situé en aval du tronçon M5, sur les communes de Saint-André et Bras-Panon. Il présente une hauteur de chute de 9,5 m. Il a été mis en service en 1974-75. Son arasement est prévu prochainement à la cote de 107 m NGR.

D'après BRLi, le seuil s'est rapidement atterri après sa mise en service. L'incision à l'oeuvre entre le seuil de Bengalis et le pont de la RN2 semblait déjà avoir commencé 10 ans avant la construction du seuil. La mise en place du seuil a donc accéléré temporairement l'incision du tronçon aval, le temps que le barrage soit totalement atterri par piégeage des alluvions.

Nous avons estimé le volume piégé dans le Remous Régressif Solide¹³ (RRS), il serait compris entre 150 000 et 250 000 m³ de matériaux

En aval du barrage, l'incision est particulièrement marquée. Les fondations de l'ouvrage sont mises à nu et les protections de berges situées en aval proche sont situées largement au-dessus du lit actuel.

L'affleurement d'une couche de basalte joue toutefois le rôle de point dur en aval proche du barrage, ce qui a permis de limiter l'incision du cours d'eau. En effet, au-delà de cette couche, le lit s'encaisse plus profondément et s'écoule dans un canyon étroit creusé dans une ancienne coulée de boue indurée. Ce n'est qu'en aval du pont de la RN2 que le lit s'élargit à nouveau.

L'arasement est prévu à la cote de 107 m NGR qui correspond à la cote supérieure d'une coulée de basalte (cf. figure page suivante).

¹³ Les seuils bloquent la charge grossière et les matériaux se déposent dans leur retenue, formant ainsi un remous régressif solide. Le remous se dépose d'abord au niveau du seuil puis la retenue se remplit en remontant d'aval vers l'amont au gré des crues.

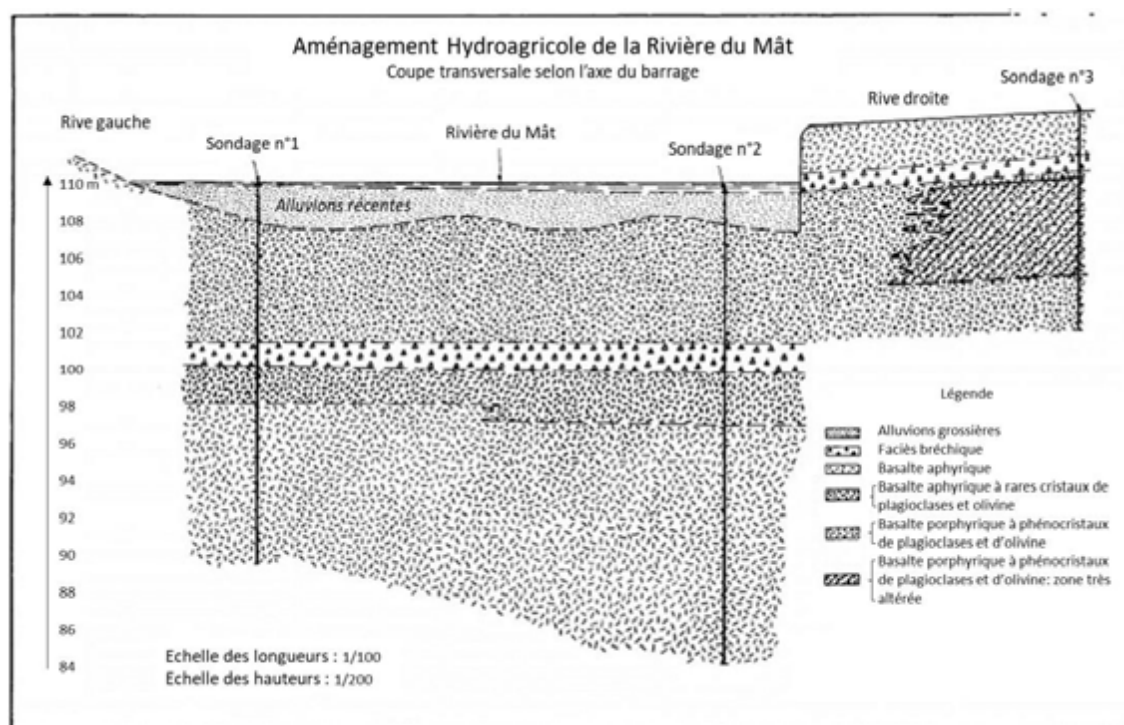


Figure 139 : Coupe transversale selon l'axe du barrage (Source : BRGM)

Après l'arasement du barrage, les matériaux composant le RRS devraient subir une érosion régressive et être transportés vers l'aval. Les matériaux dont la granulométrie est inférieure ou égale au d_{84} (23.5 cm) semblent pouvoir être remobilisés par des débits compris entre 60 et 80 m^3/s . Ces débits sont dépassés environ 7 à 8 jours par an. L'armure (ou pavage) et les matériaux sous-incombants stockés en amont du seuil seront donc facilement remaniés lors des périodes de hautes eaux annuelles. Les matériaux les plus grossiers (diamètre d'environ 80cm) résisteront mieux mais pourront être remaniés par des crues comprises entre la crue biennale et quinquennale (débit de mise en mouvement estimé à 1 100 m^3/s).

Ainsi, la majeure partie du RRS devrait rapidement être remise en mouvement.



3.2 MODELISATION DU FOND DE LIT REALISEE PAR L'ONF-RTM

3.2.1 Synthèse

L'ONF-RTM a modélisé sur EVOFOND l'évolution verticale du lit de la rivière du Mât après arasement du seuil de Bengalis.

Trois scénarios de pente d'équilibre ont été analysés : 1.1 % (S1), 1.7 % (S2) et 1.3% (S3).

Le **scénario S1** conduit à une **incision forte en amont du seuil** de Bengalis (jusqu'à 10 m). Toutefois, l'ONF-RTM souligne que ce scénario est **pessimiste** car le pavage présent en amont de Bengalis semble résistant, de plus, les bancs rocheux présents ponctuellement devraient limiter ou ralentir l'incision. En aval du seuil de Bengalis, l'incision observée actuellement devrait continuer.

Le scénario S2 propose une pente d'équilibre plus forte liée à des apports sédimentaires massifs. Un exhaussement est présent du pont de l'Escalier jusqu'au pont de Cap Argile, le lit une incision d'environ 2 m jusqu'au seuil de Bengalis puis le tronçon entre Bengalis et l'aval du pont de la RN2 se ré-engrave.

Le scénario S3 est un scénario intermédiaire.

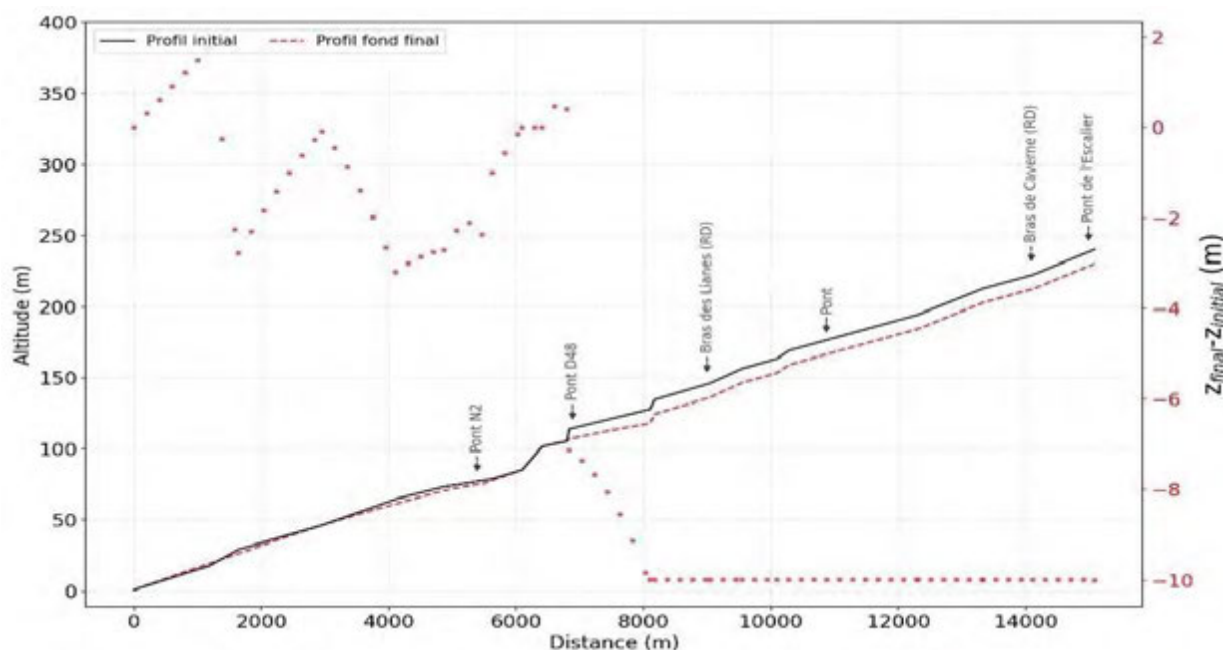


Figure 140 : Résultat de la modélisation ONF-RTM sous EVOFOND – Scénario S1

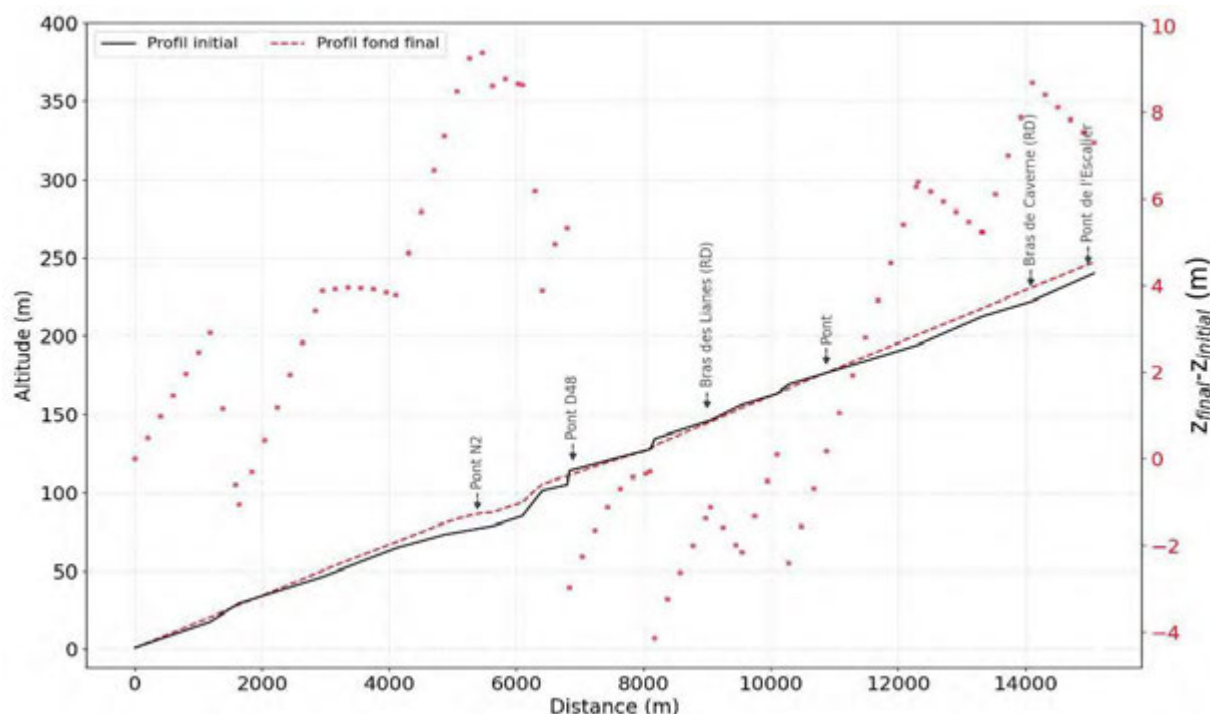


Figure 141 : Résultat de la modélisation ONF-RTM sous EVOFOND – Scénario S2

3.2.2 Limites de la modélisation : les données d'entrée

215

Les données d'entrée utilisées par l'ONF-RTM peuvent être discutées.

Pour commencer, le modèle tourne en régime permanent avec un débit d'entrée de 200 m³/s pendant 7200 h afin de représenter l'évolution du lit sur un temps long. Cela correspond à 300 jours complets avec un débit de 200 m³/s dans la Rivière du Mât.

Or, d'après les débits classés à la station de Bengalis, le débit de la Rivière du Mât ne dépasse en moyenne les 106 m³/an que 3,65 jours par an. A la station de l'Escalier, le débit dépasse les 99 m³/s moins d'une journée par an en moyenne.

Lors du cyclone Hyacinthe, d'après les modélisations MESRI, le débit de la Rivière du Mât dépasse les 200 m³/s pendant 69h.

Le débit d'entrée et la durée de modélisation correspondent donc à une évolution sur un temps très long, probablement bien au-delà siècle.

Par ailleurs, **aucune indication n'est donnée en ce qui concerne le volume de matériaux entrant à l'amont du modèle.** Dans le cas du scénario S2, cela pourrait fortement modifier l'évolution du profil en long.



3.2.3 Analyse complémentaire rapide des résultats de modélisation

Dans le scénario S1, le tronçon entre le pont de l'Escalier et le seuil de Bengalis s'incise de plus de 10 m sur 7 km. En supposant que le lit est large d'en moyenne 50 m, cela correspond à un volume de matériaux remobilisé de 3 500 000 m³. Or, quasiment aucun exhaussement du lit n'est observé entre le seuil de Bengalis et l'océan. On observe seulement un exhaussement de moins de 2 m sur le dernier kilomètre avant l'océan.

Dans ce scénario, l'évolution de l'aval du lit de la Rivière du Mât semble totalement décorrélé de l'évolution du tronçon Escalier-Bengalis, ce qui paraît surprenant vu le volume de matériaux remobilisés en amont du barrage.

Dans le scénario S2, l'exhaussement du lit est particulièrement important. Dans le secteur de l'Escalier, d'après le graphique, il est possible de supposer que le volume de matériaux déposé est d'environ 1 million de m³ sur une distance de 4 km. Sur 3 km en aval de Bengalis, un volume similaire de matériaux semble s'être déposé.

Les apports nécessaires pour que ce scénario se réalise sont très élevés. Cela nécessiterait plusieurs crues extrêmes pour amener les matériaux en amont du tronçon puis pour les répartir jusqu'en aval du bassin.

3.3 EVOLUTION POTENTIELLE DU PROFIL EN LONG A PARTIR DES CAPACITES DE CHARRIAGE (TEMPS COURT)

Nous avons analysé 2 scénarios d'exhaussement du profil en long dans le secteur Bengalis – Pont de la RN2 :

- Exhaussement entre l'aval du seuil naturel et l'aval du pont de la RN2 permettant un élargissement de la bande active sur 400 m en amont du pont ;
- Retour au profil 1978 entre le seuil naturel et la carrière Holcim.

3.3.1 Exhaussement entre le seuil naturel et l'aval du pont de la RN2 permettant un élargissement de la bande active

En aval direct du barrage, le lit est large. L'arasement du barrage devrait donc favoriser le dépôt des matériaux dans ce secteur. Néanmoins, au bout de 400 m, le lit se réduit et s'encaisse rapidement dans une ancienne coulée de boue jusqu'en aval du pont de la RN2. Lorsque les apports sont limités, ce secteur réduit semble uniquement faire transiter les matériaux vers l'aval (il n'y a quasiment pas de structures alluvionnaires). Cependant, en cas d'apports massifs lors d'une crue exceptionnelle ou à la suite de l'arasement du barrage, le lit pourrait s'exhausser significativement. D'autant plus, si le tronçon en aval du pont de la RN2 s'exhausse lui aussi. Si l'exhaussement dépasse la limite supérieure de la coulée de boue, le lit pourra alors s'élargir et retrouver une bande active proche de 1978 (sans pour autant retrouver le niveau altimétrique de 1978). Cette bande active plus large sera moins propice à l'incision puisque les capacités de transport seront réduites. Son maintien nécessitera toutefois des apports suffisants en matériaux depuis l'amont. De plus, l'exhaussement du fond du lit accentuerait le risque d'inondation.

Pour dépasser le niveau supérieur de cette formation et pour permettre au lit de s'élargir, **il faudrait toutefois qu'environ 325 000 m³ de matériaux se déposent entre le pied du seuil naturel et l'aval du pont de la RN2.**

Un tel volume de matériaux pourrait transiter depuis l'amont dès une crue Q20 dans le cas où les valeurs maximales de capacités de charriage sont retenues (formule de Lefort). Mais cela ne suffira pas pour qu'ils se déposent entre l'aval du pont de la RN2 et le seuil naturel. En effet, **il faudrait au moins que la capacité de charriage en aval du pont soit inférieure de 325 000 m³ par rapport à la capacité de charriage en amont du barrage.** Cela se produit pour une crue légèrement inférieure à la Q50 selon la formule de Lefort et pour une crue supérieure à la crue Q500 avec la formule de Recking.

Dans tous les cas pour atteindre les capacités de charriage en crue extrême, **des apports suffisants devront provenir du tronçon M5.**

Tout d'abord, **les matériaux du RRS pourront être remobilisés.**

Le volume du RRS en amont du seuil de Bengalis a été estimé entre 150 000 et 250 000 m³ répartis sur un linéaire de 1200 m.



Une fois le barrage arasé, ces matériaux seront transportés vers l'aval. Une partie des matériaux (entre 15 000 et 40 000 m³) pourrait se bloquer entre l'actuel seuil de Bengalis et la bordure du seuil naturel. Cela favoriserait la formation d'un profil équilibré en amont d'une pente approximative de 0.017 m/m. **Environ 60 000 à 150 000 m³ de matériaux du RRS pourraient donc réellement transiter vers l'aval.**

☞ A noter que pour une pente de 0.017 m/m (pente équilibrée post-arasement en considérant le point dur du début des gorges résistant), les capacités de charriage en amont proche de l'actuel barrage semblent diminuer. Cela pourrait favoriser le dépôt des matériaux. Cependant, les capacités de transport sont peut-être sous estimées (zones pavées) et la forte rupture de pente au niveau du seuil de Bengalis pourrait également favoriser une érosion régressive.

Le **stock alluvial** pourra également être repris. Sur les 1500 ml en amont du seuil naturel, on compte environ **38 000 m³ de matériaux dont 17 000 m³ facilement remobilisables.**

Bien que nous ne disposions pas de données sur les vitesses de transit de la charge solide à la Réunion, **le volume de matériaux disponible à proximité** de la zone de canyon (RRS + stock alluvial) est **insuffisant pour satisfaire la capacité de charriage en crue Q20**. Une incision du profil en long ou des érosions devront donc avoir lieu sur M5 pour permettre à des crues équivalentes et supérieures de satisfaire leur capacité de charriage.



3.3.2 Retour au profil en long 1978

Le profil en long 1978 est situé plus haut que le profil présenté dans l'hypothèse précédente. L'exhaussement s'étend aussi beaucoup plus en aval, jusqu'à l'aval de la carrière Holcim.

Au total, il faudrait qu'au moins **1.64 Mm³ de matériaux** se déposent entre le seuil naturel et la carrière pour retrouver un tel profil (dont 355 000 m³ en amont du pont, 510 000 m³ entre le pont et l'aval de M6 et 775 000 m³ entre l'amont de M7 et la carrière).

Or, **même en crue Q500, la capacité de charriage en aval de M5 ne permet pas de faire transiter autant de matériaux**. La capacité maximale de transport en Q500 au droit de Bengalis est estimée à 948 000 m³ après arasement (avec la formule de Lefort).

Le retour à un tel profil nécessiterait donc **plusieurs crues rapprochées** (pour limiter les phénomènes de déstockages pouvant avoir lieu en période d'intercrue) et des **apports soutenus provenant de l'amont** et notamment de M5 (or le RRS et le stock alluvial proche sont aujourd'hui limités).

De plus, l'absence de données concernant la vitesse de transit sédimentaire nous empêche d'évaluer le temps de transit des matériaux entre l'amont du bassin et les tronçons aval (M5, M6, M7).

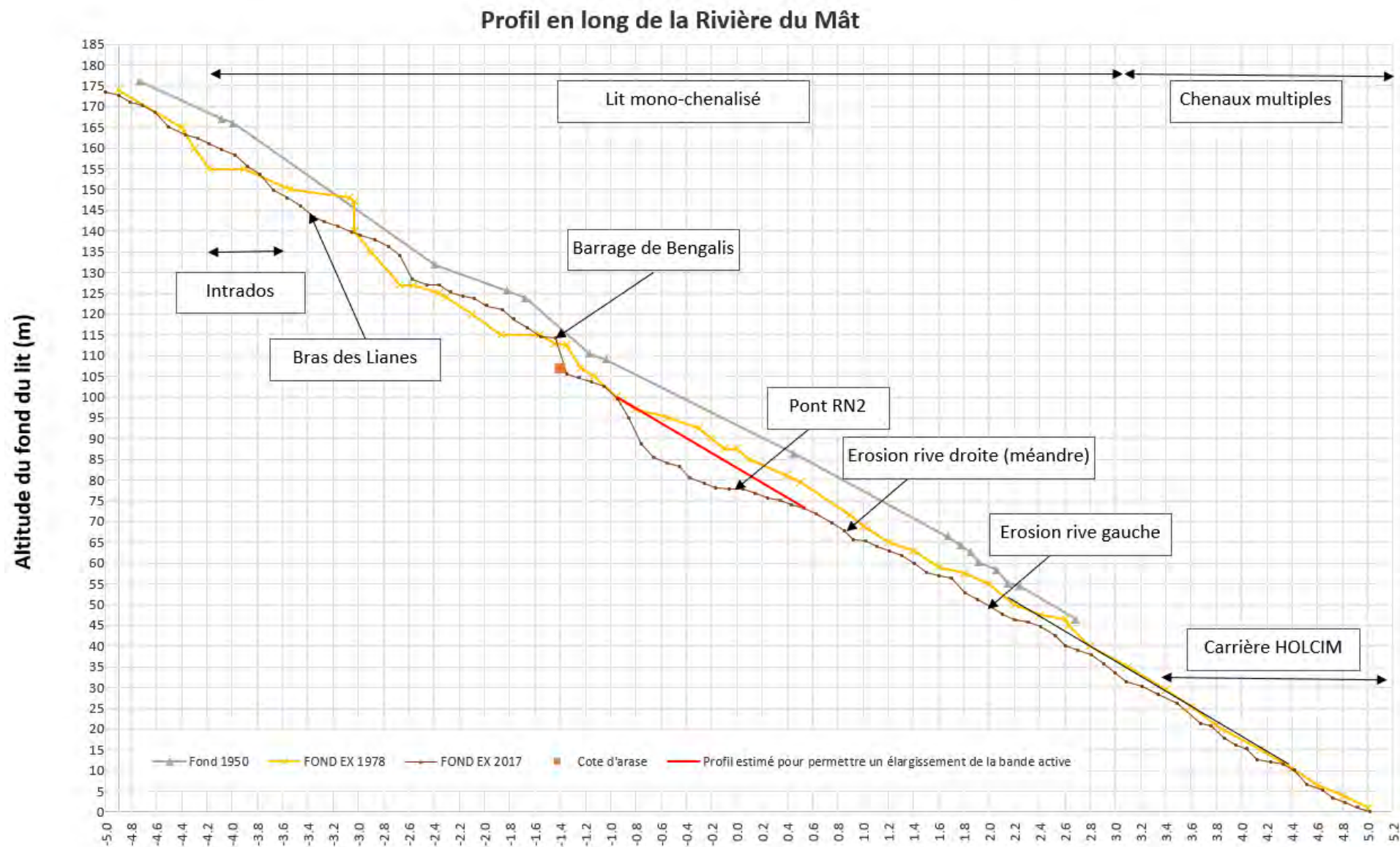


Figure 142 : Profils d'exhaussement étudiés



4 EVOLUTION DU PROFIL EN LONG SUR UN TEMPS LONG (50-100 ANS)

☞ Cette analyse complémentaire a été réalisé à la demande de la DEAL.

☞ Attention cette analyse est basée sur une approche calculatoire du transport solide (calcul des capacités de charriage profils par profil), ce qui est différent d'une modélisation du transport solide (cf. p.225).

4.1 HYDROLOGIE

L'évolution d'un profil sur le long terme est un exercice éminemment complexe dont il convient de préciser le contexte pour fixer les limites de cet exercice.

Le changement climatique place le climat comme une méga-variable de contrôle de la morphologie des lits fluviaux :

En premier lieu, il est nécessaire de rappeler qu'un facteur particulièrement important entre en ligne de compte. Il s'agit du changement climatique et de son évolution en cours qui est drastique. Le changement climatique devient une « **méga-variable** » de **contrôle** (c'est-à-dire contrôlant toutes les autres directement ou indirectement).

En effet le réchauffement climatique impacte les variables de contrôle classiques : débits liquides et solides, celles-ci impactant les variables de contrôle secondaires ou variables de réponse (pente et forme de la vallée, granulométrie et végétation ; Thorne, 1997). Dans la période d'évolution drastique du climat que nous subissons, celui-ci est donc devenu la **variable de contrôle des autres variables de contrôle**.

Ainsi, nous avons vu dans les dernières décennies des évolutions affectant les conditions hydrosédimentaires apparaître et s'aggraver ces dernières années au niveau planétaire. La réunion n'est pas exempte d'évolutions climatiques rapides qui (comme pratiquement comme partout ailleurs sur la planète) commencent à se faire plus ou moins ressentir.

L'impact le plus important concerne les températures, très visible depuis 50 ans (étude sur 13 stations). Concernant la pluviométrie, la tendance est moins évidente d'autant plus que la pluviométrie réunionnaise présente la particularité d'avoir une forte variabilité interannuelle et la lecture évolutive sur une cinquantaine d'année n'est pas suffisante. Pour les cyclones les périodes de suivi (50 ans) sont également insuffisantes pour dégager des tendances lourdes. Toutefois, les experts s'accordent sur le fait que les **cyclones pourraient s'intensifier dans la région** dans les années à venir.

Ces données sur le climat rappelant la partie forçage climatique (cf. chapitre **Erreur ! Source du envoi introuvable**. p.28) montrent la difficulté pour définir avec une certaine cohérence les crues pouvant servir à évaluer l'évolution du profil en long. En effet, pour estimer cette évolution du profil sur 50 à 100 ans, il est d'abord nécessaire de définir les crues morphogènes qui pourraient avoir lieu sur cette période de temps.

La série de données disponibles en hydrologie est limitée dans le temps (recul de 70 ans et débits ou périodes de retour non connus pour certains évènements) ce qui limite encore la pertinence de la démarche.



Dans un premier temps, nous avons défini la période de retour pour laquelle les crues seraient considérées comme morphogènes. Sur la partie aval de la rivière du Mât, les crues récentes ont eu du mal à remobiliser la bande active (réduction constante de la surface de la bande active depuis 2008, cf. analyse diachronie en partie 2.4.3.1 p. 40).

Ainsi, entre 2008 et 2022, toutes les crues majeures ayant eu lieu sont largement inférieures à la Q10. Leur période retour est plutôt comprise entre 2 et 5 ans. Ces crues n'ont pas eu la capacité de rouvrir la bande active.

Entre 2002 et 2008, plusieurs cyclones et tempêtes se sont succédés (Dina, tempête 12D_2006, Diwa, Gamède). Ces crues étaient rapprochées et présentaient des débits de pointe supérieurs aux crues ayant eu lieu plus récemment (2008-2022). Leur période de retour est inférieure ou proche de la Q10 (Gamède). Ces crues ont réussi à maintenir ou légèrement augmenter la bande active de la Rivière du Mât.

D'après l'analyse des bandes actives récentes, nous pouvons donc considérer que les crues équivalentes ou supérieures à des crues Q10 sont morphogènes sur la Rivière du Mât aval.

Depuis 1952 (70 ans), il y a eu 8 évènements équivalents ou supérieurs à une Q10 dont 7 évènements ayant eu lieu depuis 1972 (50 ans). Toutefois, les débits ou période de retour ne sont pas toujours connus pour les cyclones les plus anciens (notamment les évènements antérieurs aux années 90), ce qui pose un problème.

Parmi les évènements recensés, le **cyclone Hyacinthe (1980)** est caractérisé par une période de retour de 50 à 100 ans en termes de débits. Cependant, **la durée exceptionnelle** de l'évènement a entraîné un très fort transport solide. Ainsi, les capacités de charriage associées sont supérieures à celles d'une crue Q500 (cf. partie 2.5.5 p.148).

Il paraît évident de dire que la survenue de crues morphogènes n'est pas prévisible et que la seule approche théorique ne peut se faire qu'avec une vision statistique.

Pour une période d'évolution du lit de 50 à 100 ans, la succession des 12 crues suivantes a donc été retenue, en fonction d'une approche liée à la probabilité statistique de survenue d'une crue, (basée sur la période de retour) :

- 5 crues décennales,
- 3 crues vicennales,
- 1 crue cinquantennale,
- 1 crue centennale,
- 1 crue cinq-centennale,
- 1 évènement type Hyacinthe.

Le temps de retour des deux derniers évènements est supérieur à 100 ans mais cela ne veut pas dire que de tels évènements ne peuvent pas se produire sur une période temps de 50 ou 100 ans. D'ailleurs, le cyclone Hyacinthe a eu lieu il y a moins de 50 ans.

Ces deux évènements ont donc été ajoutés dans une approche complémentaire. Cette approche paraît d'autant plus importante dans le contexte de changement climatique observé actuellement (cf. partie 2.4.1.3.3 p.28).



4.2 METHODE

La méthode est basée sur une simple approche calculatoire du transport solide réalisée sous Bedloadweb.

Nous avons utilisé les capacités de charriage de chaque occurrence de crue. Celles-ci ont été calculées dans le cadre de l'étude. Elles sont présentées en partie 2.5.5 p.148 et en Annexe 14.

A partir de ces données, la somme des capacités de charriage des 12 crues a été réalisée au droit de chaque profil de calcul retenu.

Les capacités de charriage entre chaque profil ont été comparées afin de calculer le volume de matériaux déposés (capacité de charriage plus faible en aval) ou incisés (capacité de charriage plus forte en aval).

Les volumes inter-profil ont ensuite été sommés afin de présenter un résultat à l'échelle d'un tronçon ou d'un secteur.

4.3 INCERTITUDES ET LIMITES

Cette méthode présente de nombreuses incertitudes et biais (au sens scientifique du terme) qui se cumulent et les résultats obtenus doivent donc être interprétés avec une grande prudence.

4.3.1 Incertitudes liées aux données d'entrées

Prédire l'évolution du fond d'un cours d'eau est un exercice **complexe** du fait des nombreuses variables qui entrent en jeu : morphologie, pente du lit, granulométrie, rugosité du lit, phénomènes de pavage, hydraulique et hydrologie, etc. (cf. partie incertitudes de l'approche calculatoire 2.5.5.6.2 p.164). Les limites liées au climat et à son évolution drastique ont déjà été largement évoquées précédemment.

Dans le cadre de l'évolution du lit sur un temps long (50-100 ans), les incertitudes et biais vont se cumuler. En effet, au fil des crues, le cours d'eau évolue. Les paramètres d'entrée doivent donc être mis à jour au fil de chaque crue ou à minima entre chaque crue : morphologie de la section, pente du cours d'eau, granulométrie, rugosité (liée à la végétalisation et à la granulométrie). Or, l'évolution de ces paramètres est complexe voire impossible à prévoir.

4.3.2 Incertitudes liées aux formules de transport solide

Les formules de transport solide permettent de calculer une capacité théorique maximale de transport solide. Cette capacité de transport est potentielle puisqu'elle dépend de la disponibilité en matériaux provenant de l'amont, du lit et des versants. Elle dépend également fortement de la nature des matériaux injectés (connexion versants-lit, érosion des berges) matériaux grossiers ou fins (type cendres volcaniques).

Les formules de transport solide ne sont pas adaptées aux secteurs en gorges ou lit d'incision (ex : amont proche du pont de la RN2). En effet, les formules sont calibrées pour être utilisées sur des sections alluviales et non contraintes.

Ces formules ne sont pas adaptées notamment au fonctionnement des cônes alluviaux qui sont multichenalisés et qui ont une morphologie très évolutive au fil des crues. Dans les zones multichenalisées, les chenaux secondaires sont notamment exclus des calculs du transport solide (cf. partie incertitudes de l'approche calculatoire 2.5.5.6.2 p.164). Or, sur le cône de la Rivière du Mât, il est possible d'observer plusieurs chenaux de tailles similaires qui peuvent donc contribuer au transport solide à niveau équivalent.

4.3.3 Incertitudes liées à l'approche calculatoire appliquée sur une période de temps longue

L'analyse de l'évolution du lit sur plusieurs crues va entraîner un cumul d'incertitudes liées aux :

- Paramètres d'entrée fixes (1)
- Chronologie des crues (2)
- Apports amonts (3)
- Apports et impacts liés aux érosions (4)
- Fonctionnement du cône de déjection (5)

4.3.3.1 Paramètres d'entrée fixes

Les calculs de transport solide ont été effectués sous Bedloadweb profil par profil, en renseignant les caractéristiques de chaque section une par une. Pour améliorer la précision des résultats, il faudrait donc modifier les paramètres d'entrée entre chaque crue (pente, rugosité, morphologie et granulométrie).

Or, prédire l'évolution de certains paramètres n'est pas possible (granulométrie, morphologie, rugosité). Concernant la pente, il est possible d'estimer une nouvelle pente d'équilibre en fonction des volumes déposés et incisés. Toutefois, ce travail est particulièrement chronophage car il devrait être effectué manuellement sur un linéaire de plusieurs kilomètres et sur 12 crues. De plus, réévaluer 12 fois les pentes risquerait également d'accentuer le cumul d'incertitudes.

Les incertitudes étant déjà élevées (incertitudes liées aux données d'entrées, à l'application des formules, à l'évolution non prédictible de certaines données), il a été décidé de **conserver les mêmes paramètres d'entrée au fil des 12 crues**.

4.3.3.2 Chronologie des crues

Une autre source importante d'incertitudes et de biais est liée à la chronologie et à l'intensité des crues. En effet, le transport solide réel variera en fonction de l'ordre des crues et de leur proximité ou espacement dans le temps.

Par exemple, si une crue Q100 a lieu peu de temps avant une crue Q20, elle réactivera une bande active large qui facilitera le transport solide lors de la Q20. Si de plusieurs années se passent sans crue morphogènes entre la Q100 et la Q20, le lit se végétalisera progressivement, rendant plus difficile la remobilisation des matériaux.

Dans notre cas, les paramètres d'entrée des calculs de transport solide étant fixes (pente, rugosité, morphologie et granulométrie), la chronologie des crues n'est donc pas prise en compte malgré l'impact important qu'elle peut avoir sur le transport solide.



La prise en compte de cette chronologie serait toutefois impossible car il n'est absolument pas possible de prédire le rythme et l'intensité des crues qui auront lieu sur une période de temps donnée.

4.3.3.3 Apports amonts

Les formules de transport solide n'étant pas adaptées aux morphologies en gorges, les apports solides provenant des gorges ont été calculés en fonction des capacités de charriage de la rivière du Mât amont et de la rivière des Fleurs Jaunes (tronçons alluviaux en amont des gorges).

4.3.3.4 Apports et impacts liés aux érosions de berge

Les phénomènes d'érosion de berge peuvent impacter la morphologie du lit, la granulométrie, le niveau du fond du lit, la rugosité, notamment lors d'événements extrêmes type Q500 ou Hyacinthe.

Toutefois, les érosions de berge ne sont pas prises en compte dans l'approche calculatoire (dans certains cas elles peuvent plus ou moins fortement impacter la granulométrie en lit par exemple si un effondrement massif conduit à des apports de matériaux fins). En effet, leur prise en compte et l'évaluation de leurs impacts est impossible à prédire scientifiquement.

4.3.3.5 Fonctionnement du cône de déjection

Les calculs de transport solide ne permettent pas de prendre en compte toute la complexité du fonctionnement des cônes alluviaux (évolution de la bande active, mobilité des chenaux, phénomènes d'avulsion, zones de dépôts...).

Dans le cadre de notre méthode, la morphologie et la rugosité du lit n'ont pas été modifiée au cours et entre les hydrogrammes de crues. En effet, cet exercice est beaucoup trop complexe notamment sur un cône alluvial, la bande active et les chenaux peuvent évoluer très fortement et de manière imprévisible d'une crue à une autre voire même lors d'une crue.

Pour calculer les hauteurs d'exhaussement, nous avons choisi arbitrairement (compte-tenu de l'impossibilité de la prévoir) une surface de bande active fixe et sous-estimée (pour appliquer un coefficient de sécurité). Or, comme expliqué précédemment, sur un cône, la surface de bande active peut se déplacer au fil du temps, se végétaliser entre deux crues ou s'élargir très fortement après une crue morphogène, réduisant d'autant la pertinence de la démarche.

Modélisation de l'évolution du fond du lit : une méthode peu adaptée au contexte de la Rivière du Mât

Une modélisation du transport solide sous HEC-Ras ou ICM aurait pu permettre de faire évoluer certains paramètres d'entrée au fil des crues (notamment la pente ou la rugosité). Toutefois, ces modélisations présentent aussi de nombreuses incertitudes en commun avec l'approche calculatoire (incertitudes des données d'entrées et des formules utilisées, limites de modélisation dans les secteurs type cône alluvial).

De plus, les formules de transport solide disponibles sur ces logiciels sont principalement adaptées à des matériaux fins (sables voire graviers) et uniformes alors que les matériaux de la Rivière du Mât présentent des granulométries étendues et une proportion de matériaux grossiers importante.



La formule dont le domaine de validité se rapproche le plus de la granulométrie de la Rivière du Mât est la formule de Meyer-Peter-Muller. Or, cette formule est adaptée à un D50 compris entre 0.4 et 29 mm. Entre la sortie des gorges et Bengalis (zone d'analyse de l'évolution du profil en long sur 50 à 100 ans), le D50 est compris entre 10 et 250 mm. Sur 19 granulométries, il ne correspond que deux fois au domaine de validité de Meyer-Peter-Muller (cf. partie granulométrie 2.5.4 p.131).



4.4 RESULTATS

Les résultats ont été moyennés et sont présentés en deux grands secteurs : Sortie des gorges-Bengalis et Bengalis-océan.

Tableau 30 : Evolution du fond du lit sur un temps long – approche calculatoire

Secteur	Volume déposé/incisé (m³) [min ; max]	Hauteur moyenne exhaussée/incisée (m) [min ; max]
Sortie des gorges – Bengalis	Recking : [-972 000 ; +2 214 000] Lefort : [+5 696 000 ; +7 673 000]	Recking : [-1.7 ; +3.8] Lefort : [+9.7 ; +13.1]
Bengalis – Océan	Recking : [+1 600 000 ; +3 967 000] Lefort : [+2 003 000 ; +7 117 000]	Recking : [+1.1 ; +3.5] Lefort : [+1.3 ; +4.8]

Comme les paramètres d'entrée des calculs sont fixes (pente, granulométrie, etc.), les tendances d'évolution entre chaque profil restent les mêmes au cours des 12 crues. On obtient alors des biefs qui s'incisent ou s'exhaussent très fortement, et un profil en long qui ne serait pas réaliste morphologiquement.

Les résultats ont donc été moyennés sur de grands tronçons pour donner une tendance potentielle d'évolution. Cependant, **le cumul d'incertitudes évoqué précédemment montre que cette approche présente de nombreux biais.**

D'après les calculs, l'évolution du profil en long sur une période de 50 à 100 ans semblerait tendre vers un exhaussement général. Seul un résultat (Recking), indique un risque d'incision en amont de Bengalis.

L'exhaussement entre la sortie des gorges et Bengalis est entièrement **tributaire des apports solides provenant de l'amont du bassin**. En effet, nous avons considéré que le volume de matériaux provenant de l'amont des gorges était de 2.7 Mm³ pour les résultats associés à la formule de Recking et de 8.5 Mm³ pour la formule de Lefort (soit une variation de 215 %) Si les apports amont sont beaucoup plus faibles, le secteur entre la sortie des gorges et l'Escalier sera en incision quelle que soit la formule.

De l'aval de Bengalis à l'océan, les résultats indiquent un exhaussement compris entre +1.1 m et +4.8 m. Toutefois un tel exhaussement sera probablement différencié en fonction des secteurs : lit d'incision, zone de méandre - qui pourrait s'élargir et se multichenaliser et redevenir l'amont du cône-, amont du cône, secteur du cône contraint par la digue de la carrière, aval du cône.

☞ *Attention, la hauteur d'exhaussement entre Bengalis et l'océan a été calculée en prenant en compte une surface de bande active réduite (hypothèse sécuritaire basée sur la surface active du cône entre 2007 et 2017). Selon la chronologie des crues, la surface active pourra être beaucoup plus large. L'exhaussement final pourrait donc être plus diffus au niveau du cône.*

Il est possible de supposer qu'un exhaussement important du lit aura lieu en partie amont du cône. En effet, l'élargissement du lit entraîne la diminution des capacités de charriage et donc le dépôt d'une partie des matériaux. Cet exhaussement entraînera également un exhaussement régressif du lit (exhaussement du tronçon en amont dont le point bas a été modifié).

Cet **exhaussement régressif** pourrait entraîner une remontée du niveau du lit en amont du pont de la RN2. Au vu des volumes de matériaux en jeu (un à plusieurs millions de mètres cubes), un retour au niveau du lit de 1978 voire 1952 pourrait éventuellement être possible.



Dans la partie du cône contrainte par la digue en rive droite, si la digue reste en place, une incision localisée pourrait avoir lieu car la bande active est réduite à cause de la présence de la digue. Si la digue cède, un piégeage important des matériaux aura lieu dans les bassins de la carrière et un nouveau chenal d'écoulement devrait se créer comme lors de la crue de 2006.

Sur la partie aval du cône, si la Rivière du Mât n'est pas capturée par la carrière, un exhaussement devrait avoir lieu. Cet exhaussement sera probablement associé à une avancée du trait du cône après les crues les plus importantes.



Conclusion : Evolution du profil en long sur un temps long

Rappel : la méthode mise en œuvre présente de nombreuses incertitudes et biais qui se cumulent et les résultats obtenus doivent donc être interprétés avec la plus grande prudence. La chronologie des crues (impossible à connaître) et surtout le changement climatique peuvent conduire à des situations radicalement différentes.

Les résultats obtenus concernent **l'évolution du profil en long sur un période de 50 à 100 ans subissant plusieurs crues exceptionnelles** (Q500 et crue type Hyacinthe). C'est une **hypothèse relevant plutôt d'une approche sécuritaire mais n'intégrant pas l'évolution drastique du climat** qui entraîne donc de fortes évolutions du lit.

Les résultats tendent vers un **exhaussement du profil en long** de la sortie des gorges à l'océan. Toutefois, **ces résultats dépendent directement des apports solides amont** dont l'évaluation présente également des incertitudes très importantes.

En aval de Bengalis, l'exhaussement du cône pourrait entraîner une forte hausse du niveau du lit en amont du pont de RN2. En cas d'apports amont important, un retour à un profil et une morphologie type 1978 ou 1952 est possible.

Malgré les incertitudes et biais cumulés de notre approche, il nous semble important de ne pas exclure la possibilité d'un retour à profil type 1978 ou 1952 en cas de succession de plusieurs crues exceptionnelles. Il serait donc intéressant de proposer un scénario de modélisation hydraulique basé sur le profil 1978 ou 1952 dans le cadre de la phase 3.

L'utilisation de ces profils dans le cadre des modélisations serait certainement plus pertinente car elle est basée sur des éléments concrets : levés topographiques (1978) et analyse des terrasses anciennes (1952).

L'utilisation d'un profil estimé à partir de l'approche calculatoire ou à partir de l'approche RTM semble au contraire moins intéressante du fait des nombreuses incertitudes associées à ces deux méthodes.

L'utilisation des résultats ci-dessus est donc soumise à la connaissance et à l'acceptation des limites (incertitudes et biais) liés à la méthode ainsi qu'à l'évolution drastique du climat dans les décennies voire les années prochaines.

5 ESPACE DE MOBILITE

L'espace de mobilité ou l'espace de liberté d'un cours d'eau est défini comme l'espace du lit majeur à l'intérieur duquel le ou les chenaux fluviaux assurent des translations latérales pour permettre une mobilisation des sédiments ainsi que le fonctionnement optimum des écosystèmes aquatiques et terrestres (SDAGE, 1996).

☞ Les espaces de mobilité ont été remplacés par la notion d'espaces de bon fonctionnement (EBF) en 2016. La délimitation des EBF diffère de celle des espaces de mobilité. Toutefois, les espaces de mobilité proposent des périmètres plus parlants que les EBF : espace de divagation historique, zones d'érosion à 50 ans, surfaces nécessaires au transport solide, etc. La délimitation des espaces de mobilité selon la méthode de 1998 est donc particulièrement intéressante.

5.1.1 Emprise de définition de l'espace de mobilité

La détermination des espaces de mobilité **s'applique uniquement aux rivières mobiles ou potentiellement mobiles à notre échelle de temps** (Guide technique n°2, Détermination de l'espace de liberté des cours d'eau, 1998).

Sur le bassin de la Rivière du Mât, tout le linéaire de cours d'eau n'est pas mobile. **Les secteurs mobiles sont les suivants :**

- **Certaines ravines ou tronçons de cours d'eau qui progressent vers l'amont ou évoluent latéralement par érosion des versants.** Ces phénomènes concernent généralement des tronçons s'écoulant sur ou contre des formations bréchiques plus sensibles à l'érosion, aux glissements ou aux arrachements.
- **L'aval de la rivière du Mât** qui méandre à partir du pont de l'escalier puis qui forme un cône alluvial multichenalisé dans sa partie aval.

Dans le Guide 1998, la délimitation des espaces de mobilité en secteur torrentiel n'est pas abordée. La méthode se concentre sur les styles fluviaux de plaine alluviale (méandres et tressages).

Dans le Guide de détermination des Espaces de Bon Fonctionnement (EBF) (2016), une méthode délimitation des EBF existe pour les cours d'eau rectilignes à forte pente. Toutefois, cette méthode revient à définir en tant qu'EBF le bassin de production sédimentaire du torrent. Cette méthode ne semble pas adaptée au fonctionnement des ravines ou tronçons mobiles situés en amont du bassin. Ces derniers sont caractérisés par une érosion parfois relativement rapide, la définition d'un bassin de production figé ne semble donc pas intéressante.

Nous déterminerons donc les espaces de mobilité uniquement sur la partie aval de la Rivière du Mât du pont de l'Escalier jusqu'à l'océan (tronçons M5 et M6).

5.1.2 La méthode du guide de la DIREN (1998)

L'espace de mobilité d'un cours d'eau (au sens du SDAGE, 1996, et de la DIREN, 1998) est composé de **trois enveloppes principales** :

- **L'espace de mobilité maximal (EMAX) :** cette enveloppe représente l'ensemble du fond de vallée (dépôts holocènes ou fini-pléistocène). C'est l'espace balayé par la rivière à l'échelle des derniers millénaires.

- **L'espace de mobilité fonctionnel (EFONC)** : sa délimitation se base sur des critères essentiellement géomorphologiques et sédimentologies. Les contraintes socio-économiques majeures sont sorties de cette enveloppe (zones urbanisées, routes nationales ou départementales, etc.). Par contre, les contraintes socio-économiques secondaires (gravières de volume restreint, puits de captage, réseau routier communal) n'entraînent pas d'ajustement du périmètre et sont intégrées à EFONC. En effet, on considère que les enjeux secondaires peuvent être déplacés hors de cet espace (rachat de maison isolée ; déplacement des puits de captage...).
- **L'espace de mobilité minimal (EMIN)** : il correspond à **la surface et à l'amplitude indispensables pour ne pas accentuer les dysfonctionnements** hydrologiques, sédimentologies et écologiques observés. Cet espace est défini comme la restriction locale de l'espace fonctionnel avec un argumentaire adapté.

5.1.3 Délimitation de l'espace de mobilité maximal (EMAX)

Cette délimitation est la première étape de la méthodologie employée. **EMAX correspond à l'enveloppe qui permet au cours d'eau de disposer de l'ensemble de l'espace nécessaire à l'ajustement morphodynamique à long terme.** Ce sera donc l'enveloppe la plus vaste ; celle-ci peut être prise équivalente à la plaine alluviale déterminée par approche hydrogéomorphologique.

Cet espace maximal correspond sensiblement au **corps sédimentaires et couches alluvionnaires issues du quaternaire.**

L'enveloppe EMAX a été déterminée en fusionnant les couches géologiques Fz (alluvions actuelles) et Fy2 (alluvions anciennes indifférenciées). Nous avons également utilisé la carte des niveaux de terrasses définis par le CETE Méditerranée en 2011 (cf. Figure ci-dessous).

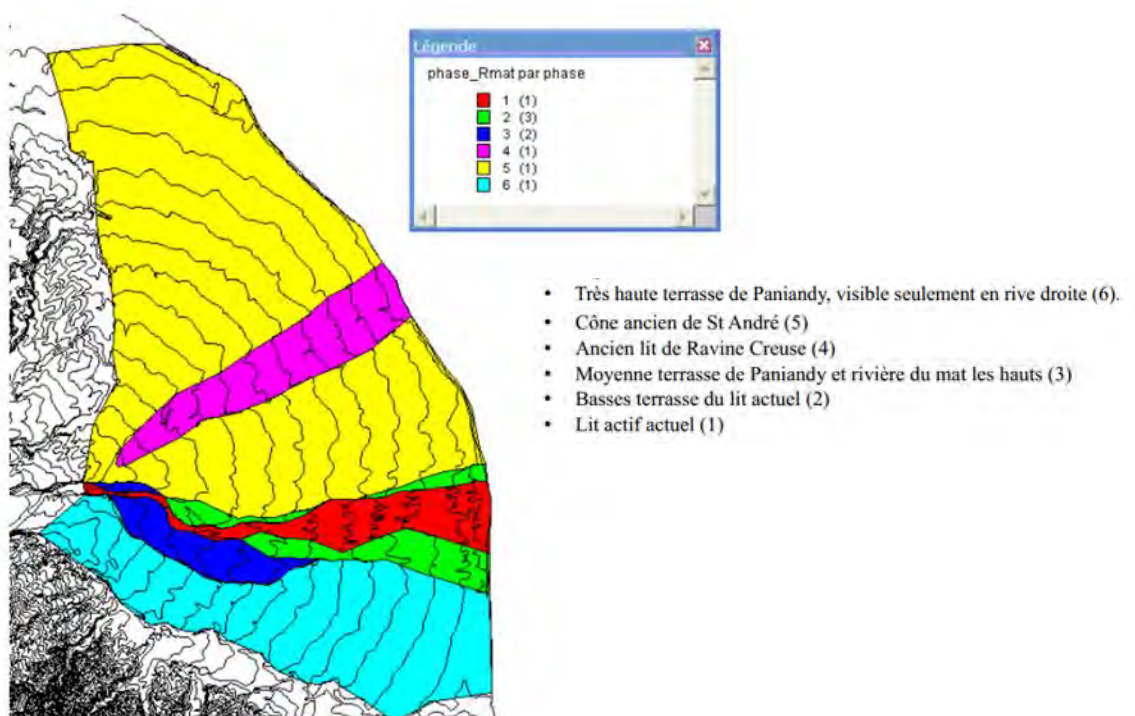


Figure 143 : Six étapes d'encaissement de la rivière dans son cône alluvial (CETE Méditerranée, 2011)

L'emprise d'EMAX permet de constater la forte divagation à l'échelle des temps géologiques du cône alluvionnaire. Cette zone de divagation s'étend du sud de Bras-Panon à Cambuston au nord sur une largeur de 13 km (pour rappel le cône alluvial actuel mesure 1200 m de large).

La quasi-totalité des alluvions anciennes ne sont plus remobilisables par la Rivière du Mât actuelle car elles sont trop éloignées. De plus, le chenal d'écoulement actuel de la Rivière du Mât est très encaissé dans ses alluvions. La mobilité latérale de la rivière est donc limitée et s'opère principalement par érosion de berge. Les phénomènes d'avulsion qui existent sur certains cônes de déjection semblent donc peu probables en l'état actuel des choses. Il faudrait que le lit de la rivière s'exhausse de plusieurs mètres pour que ce phénomène soit facilité en amont du cône actuel (dont l'apex est situé plus de 2 km en aval du pont de la RN2).

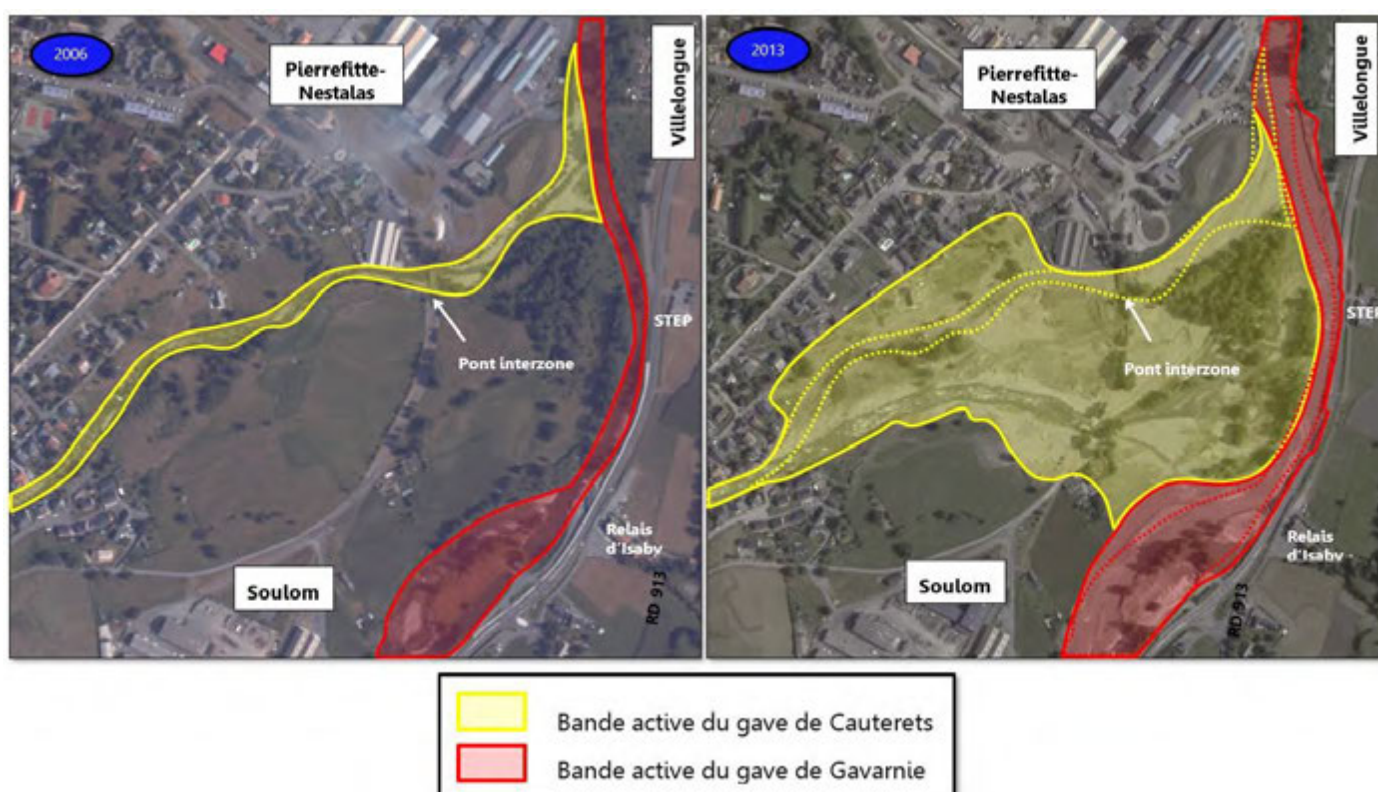


Figure 144 : Exemple d'avulsion sur le cône de déjection résiduel du Gave de Cauterets lors de la crue de 2013 (Hautes-Pyrénées)

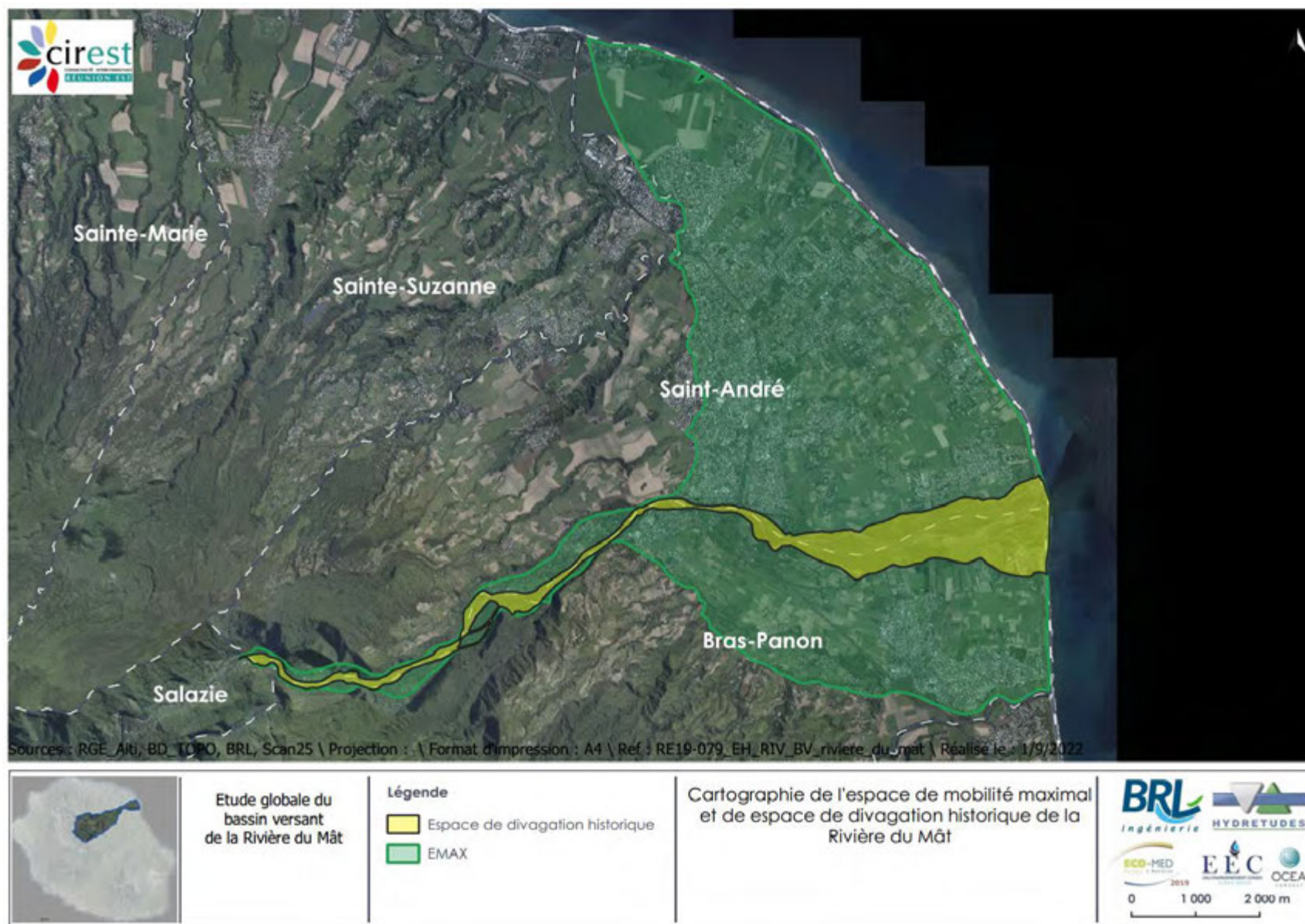


Figure 145 : EMAX et espace de divagation historique (1950-2022)

5.1.4 Délimitation de l'espace de mobilité fonctionnel (EFONC)

EFONC est généralement l'espace le plus complexe à définir. Pour ce faire, nous avons appliqué les étapes décrites ci-après :

- **Délimitation de l'enveloppe d'amplitude d'équilibre du cours d'eau** : d'après le guide de la DIREN, l'amplitude d'équilibre du cours d'eau à méandre correspond à une enveloppe théorique égale à **10 fois la largeur de pleins bords**. Sa détermination constitue la première approche de l'espace fonctionnel. Le lit mineur du cours d'eau constitue le centre de l'enveloppe. Son tracé doit tenir compte des aménagements anthropiques. Ceux-ci peuvent ponctuellement restreindre l'espace de cette enveloppe.

La délimitation de cette enveloppe a été réalisée en prenant en compte une **largeur de pleins bords de 50 m (du pont de l'Escalier à la zone de méandres), soit un tampon de 500 m** de largeur autour de la Rivière du Mât.

A partir du cône alluvionnaire cette méthode n'est plus applicable car le style fluvial change. L'application de la méthode pour un style à méandres ne serait pas adaptée à la dynamique locale. De plus, l'emprise obtenue serait beaucoup trop importante (13 km de largeur au niveau de l'océan). **Il a été choisi de reporter les largeurs maximales historiques au droit de 10 transects (chacun espacés de 400 m) et d'appliquer des tampons de largeur progressive de l'amont vers l'aval (380 m de largeur en amont jusqu'à 1260 avant l'océan).**

Cette enveloppe a ensuite été recoupée par EMAX (la largeur des alluvions est inférieure à 500 m de largeur en sortie des gorges).

Un second recoupage prenant en compte les enjeux majeurs (carrière, routes, zones urbanisées) est également appliqué.

- **Délimitation des surfaces nécessaires vis-à-vis de la capacité de transport** : afin de réaliser cette étape, le guide propose une analyse des capacités de charriage annuelles afin d'évaluer le volume de matériaux nécessaires au cours d'eau pour éviter l'incision. Cependant, si le stock alluvial est insuffisant, il est difficile de savoir si le cours d'eau va s'inciser ou éroder ses berges. Il paraît donc difficile de tracer les surfaces nécessaires au transport solide. Nous proposons donc plutôt de présenter les espaces qui risquent de s'inciser et au droit desquels il faut impérativement éviter de réduire l'espace de mobilité.

Au total, nous avons identifié 4 grands secteurs à risque d'incision.

Le premier secteur s'étend de l'amont du méandre de Bras Citronnier à l'actuel barrage de Bengalis. L'arasement du barrage entraînera une érosion régressive du RRS qui s'étend sur environ 1 200 m. De plus, les capacités de charriage calculées mettent en avant un risque d'incision au niveau du méandre de Bras Citronnier et sur les 500 m en aval du méandre. Sur ce secteur il faudra préserver l'espace de mobilité.

Le second secteur est situé entre le seuil naturel de Bengalis et le pont de la RN2. Il est caractérisé par une morphologie très étroite causée par une incision très forte depuis les années 1980. Ce secteur est encadré par de nombreux enjeux (habitations, pont de la RN2). Une incision plus prononcée n'est pas souhaitable mais un exhaussement pourrait également accentuer le risque inondation. Dans ce secteur, l'espace résiduel encadrant le cours d'eau devra être gelé. De plus, un suivi du site sera indispensable afin d'anticiper les évolutions topographiques du lit.

Le troisième secteur concerne l'aval du tronçon M6. Les capacités de charriage sont plus élevées qu'en amont il y a donc un risque d'incision ou d'érosion accru pour que le cours d'eau puisse satisfaire sa capacité de charriage. L'espace de mobilité devra donc être préservé.

Enfin, le quatrième secteur concerne la zone du cône située au droit de la carrière Holcim. Les capacités de charriage augmentent dans ce secteur. La présence du bassin endigué de la carrière Holcim réduit la bande active et favorise donc l'augmentation des capacités de charriage. Il faudrait donc soit restaurer l'espace de mobilité du côté de la carrière Holcim mais cela nécessiterait de combler le bassin jusqu'au niveau du lit, soit favoriser la mobilité du chenal principal vers la rive gauche (maintien de bras de rive gauche ouverts, travail de la végétation en lit).

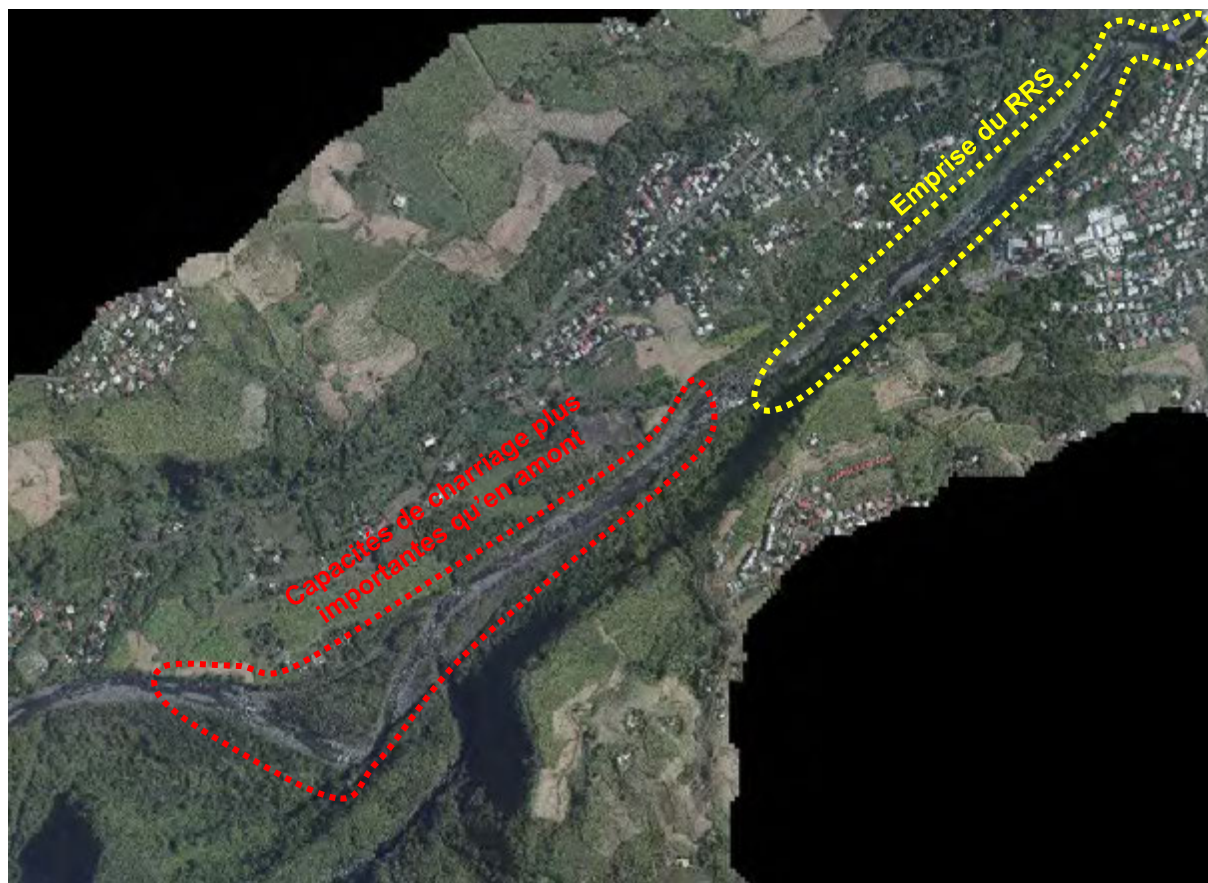


Figure 146 : Secteur 1 – Bras Citronnier-Bengalis

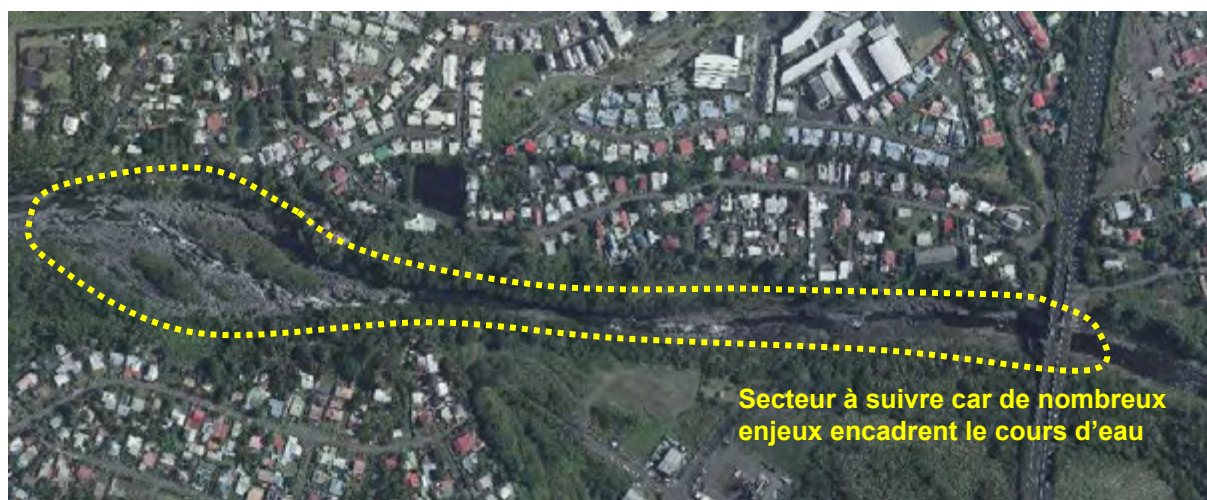


Figure 147 : Secteur 2 : Seuil naturel-Pont de la RN2

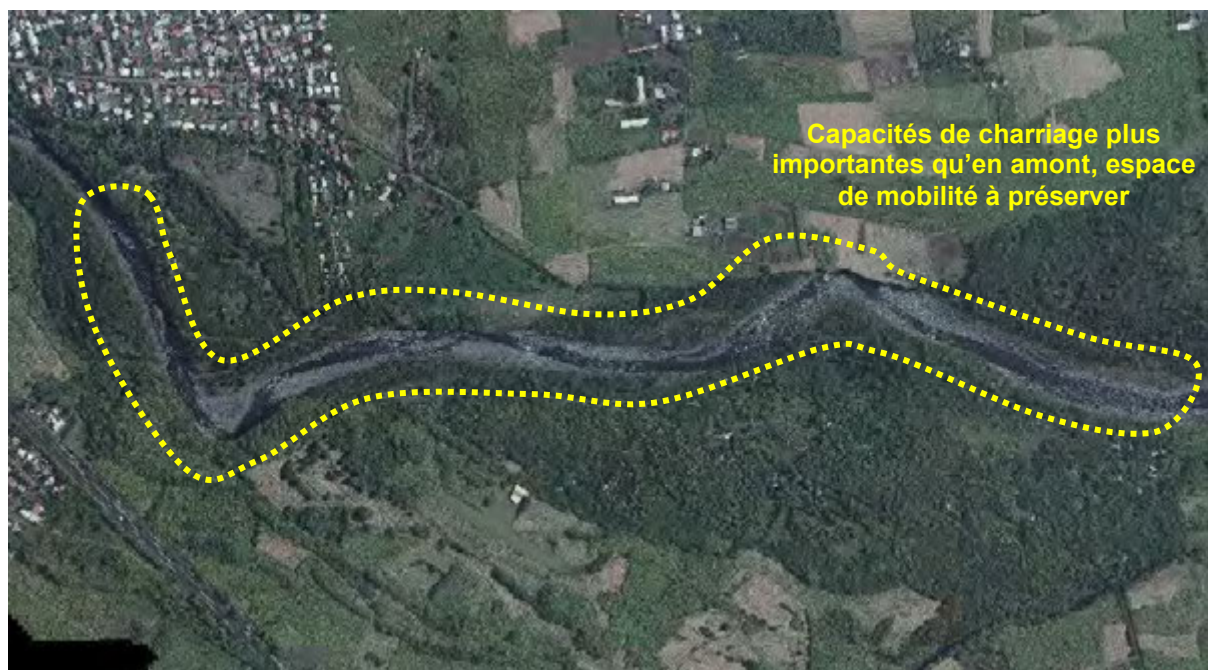


Figure 148 : Secteur 3 – Fin du tronçon M6



Figure 149 : Secteur 4 - Carrière Holcim

- **Espace de divagation historique** : l'espace de divagation historique est déterminé par observation des différentes positions du lit mineur/de la **bande active au cours des 70 dernières années**.

La détermination de l'espace de divagation historique est réalisée en fusionnant les bandes actives de 1950 à 2021. Les bandes actives historiques ont été tracées lors de l'analyse de la diachronie en plan.

- **Espace de divagation résiduel** : il constitue la **portion d'espace maximale disponible pour l'érosion latérale**. C'est un espace qui n'est pas inclus systématiquement dans l'espace historique dans la mesure où des érosions peuvent se produire au-delà de cette limite. Cet espace sera délimité à partir de la localisation des structures naturelles ou artificielles pouvant faire obstacle à la dynamique latérale (protections de berges, digues, ponts...).

Cet espace est relativement similaire à l'amplitude d'équilibre du cours d'eau car il prend en compte les enjeux anthropiques. En amont les zones où l'espace de divagation résiduel dépasse l'enveloppe d'amplitude du cours d'eau sont en rive droite (terrasse ancienne d'Ilet Payet, terrasse au pied du Cap Argile). En aval les surfaces agricoles des deux côtés de la Rivière du Mât constituent des surfaces potentielles à la divagation du cours d'eau.

- **Zones d'érosion à 50 ans** : Elles correspondent aux **espaces pour lesquels un risque d'érosion existe à l'échelle des 50 prochaines années**.

Pour définir cet espace, **une dizaine de secteurs touchés par une érosion très active (recul de berge significatif) ont été identifiées en aval de la Rivière du Mât** (cf. Figure 150). Au droit de chaque secteur, le recul maximum et la vitesse de recul ont été calculés (cf. partie 2.5.3.2.1 p.119).

Lorsque les secteurs sont en érosion depuis 1950, la vitesse de recul est calculée depuis 70 ans. Lorsque l'érosion est nouvelle, la vitesse est calculée avec le nombre d'années d'érosion.

A noter que **certains secteurs ne sont plus actifs aujourd'hui mais il n'est pas impossible d'imaginer une reprise de ces érosions** (Bras Citronnier et centre d'enfouissement notamment). Les zones d'érosion à 50 ans sont ensuite déterminées à l'aide de **tampons dont la largeur est égale au taux d'érosion annuel multiplié par 50**. Les zones probables d'érosion à 50 ans ont été ensuite interpolées entre elles et ajustées en fonction du secteur. Actuellement la dynamique est l'incision du lit, toutefois si la dynamique s'inversait, les érosions seraient plus conséquentes.

Le tronçon M5 est relativement épargné par les érosions avec recul de berge, la Rivière du Mât étant **globalement rectiligne**. La rive gauche, au niveau de Bras Citronnier est la plus menacée (érosions n°5, 7 et 8). Quelques érosions en rive droite sont constatées, mais elles ne présentent pas d'enjeux majeurs (érosions n°6, 9 et 10).

Le tronçon M6 est le secteur plus touché, en aval du pont RN2 des érosions récentes ont fait reculer les berges de rive droite de plus de **100 m en 20 ans seulement** (érosion n°3 et 4). **La poursuite de ces érosions est très probable** étant donné que les berges sont toujours actives. Si la dynamique actuelle se poursuit, les reculs en rive droite pourraient atteindre 100 à 200 m en 50 ans. A noter que pour l'érosion n°4, il a été considéré une réactivation du bras secondaire qui entraînerait alors la poursuite de l'érosion dans les terrasses anciennes (scénario plus sécuritaire). La rive gauche est également menacée d'un recul de 50 à 100 (érosion n°1).

La berge accueillant le centre d'enfouissement (érosion n°2) n'est pas active en 2022, il n'est cependant pas impossible de la voir reculer à nouveau. L'érosion n°1 en rive gauche au niveau du dernier méandre devrait se poursuivre sur 100 m d'ici 50 ans.

Il est **difficile d'estimer les zones d'érosion à 50 ans du cône alluvionnaire** (tronçon M7) à cause de la **multichenalisation**. Les différents bras devraient continuer à évoluer au sein de l'emprise récente du cône (terrasses récentes végétalisées ou non).

En rive gauche du cône, aucune zone d'érosion n'est présente dans les terrasses anciennes et la bande active du cône est plutôt déportée vers la rive droite. On peut donc supposer que le risque d'érosion de la rive gauche d'ici 50 ans est limité à l'érosion des terrasses les plus récentes.

En rive droite du cône, le secteur de la carrière HOLCIM est toutefois menacé d'érosion. Le bassin amont de la carrière est d'ailleurs protégé par une digue longée par un des bras principaux de la Rivière du Mât, ce qui indique bien l'existence d'un risque. Une rupture de la digue avait d'ailleurs eu lieu en 2006, entraînant l'inondation de la carrière.

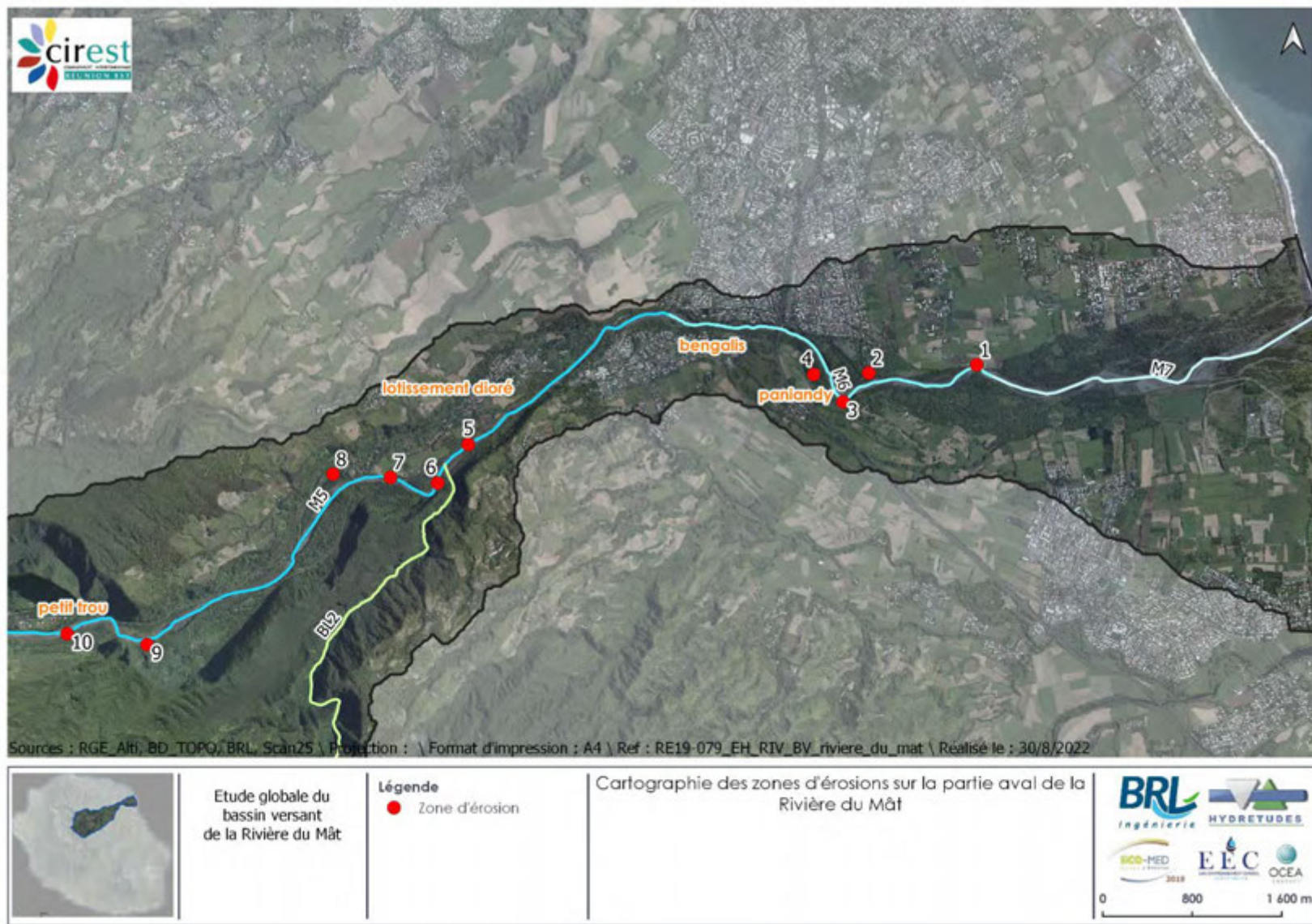


Figure 150 : Localisation des secteurs en érosions

- **Délimitation de l'enveloppe externe de l'espace de mobilité fonctionnel** : Cette sous-étape est une étape de synthèse. Elle aboutit à l'enveloppe externe de l'espace de mobilité fonctionnels. **Elle comprend les enveloppes délimitées précédemment. Elle doit également contenir les zones d'intérêt écologique potentiel** dont l'existence est liée au rétablissement de la dynamique du cours d'eau.

La fusion de l'enveloppe d'amplitude d'équilibre, la divagation historique et les zones d'érosion à 50 ans a permis de créer l'enveloppe externe de l'espace de mobilité fonctionnel. Cette enveloppe ne prend pas en compte les enjeux anthropiques.

Cette enveloppe permet déjà de prendre en compte les **enjeux « faune aquatique »** actuels qui se situent dans le lit mineur du cours d'eau. Elle permet également de prendre en compte les enjeux « faune aquatique » potentiels puisqu'elle intègre les zones potentielles de divagation et d'érosion du cours d'eau.

Cette enveloppe intègre aussi de **nombreuses de zones de ripisylve et des annexes alluviales** qui constituent des habitats spécifiques directement lié au cours d'eau.

Elle intègre également une partie de la ZNIEFF de type II¹⁴ « Salazie et sa vallée » (040030022) et une partie de la zone cœur du Parc National de la Réunion.

- **Délimitation finale de EFONC** : Elle consiste à **croiser avec l'ensemble des enjeux socio-économiques l'enveloppe externe précédemment déterminée**, puis à y ajouter les éventuelles zones de divagation résiduelles qu'il peut être judicieux d'intégrer à l'enveloppe finale d'EFONC.

Les différentes enveloppes ont été cartographiées et sont présentées dans l'atlas cartographique.

5.1.5 Délimitation de l'EMIN

L'espace de mobilité minimal constitue l'**ajustement de l'EFONC** précédemment déterminée. Ces ajustements sont nécessaires pour **prendre en compte certaines contraintes anthropiques secondaires** comme les axes de communication communaux, certaines gravières au volume restreint ou encore certaines habitations isolées.

La détermination de cette enveloppe est l'occasion de définir l'espace de maintien de la capacité de translation aval des méandres. C'est un concept très important qui permet notamment d'assurer la préservation de l'équilibre global du cours d'eau.

Nous proposons un premier périmètre EMIN qui nous semble pertinent, celui-ci pourra être discuté et ajusté par la suite en fonction des enjeux à sortir du périmètre ou pouvant être intégrés.

L'atlas EMIN est présenté dans l'atlas cartographique.

¹⁴ Grands ensembles naturels riches et peu modifiés, offrant des potentialités biologiques importantes.

ANNEXES

Annexe 1. Synthèse de l'analyse critique des données collectées relatives aux prélèvements

0 - Aucune donnée ou documentation existante
1 - Données et éléments de connaissance très disparates et/ou peu pertinents
2 - Données et éléments de connaissance partiels
3 - Données et éléments de connaissance développés mais hétérogènes selon les zones du bassin
4 - Données et éléments de connaissances suffisants à ce stade. Il reste une marge de manœuvre pour approfondir le sujet.
5 - Sujet parfaitement documenté et données de qualité. Absence de besoin en approfondissement à court ou moyen terme

Sectorisation hydromorphologique		5	Données RHUM, topographiques et hydromorphologiques suffisantes pour sectoriser le bassin
	Extractions et curages	2	Manque de données concernant les extractions récentes ou antérieures à 1979
	Compartimentage	4	Plusieurs études abordent la continuité longitudinale des cours d'eau du bassin : les ouvrages anthropiques (barrages et seuils) sont bien recensés contrairement aux perturbateurs naturels de la continuité longitudinale (cascades, chutes)
	Corsetage	1	Peu de données relatives aux ouvrages de protections de berges
	Signaux faibles d'incision	2	Zones d'affleurement de la roche mère citées ponctuellement dans la bibliographie. Le terrain permettra de réaliser une cartographie plus complète de ces signaux et d'analyser leur lien ou non avec un phénomène d'incision des lits fluviaux
	Analyse diachronique en plan	4	Analyse diachronique en plan relativement complète, notamment sur le cône alluvial. Nous irons plus loin en cartographiant sous SIG plusieurs bande actives anciennes et récentes. Il nous manquera toutefois une orthophotographie géoréférencée récente pour prendre en compte sous SIG les dernières évolutions des bandes actives.
	Analyse diachronique verticale	3	Plusieurs comparaisons de profil en long ont déjà été réalisées. Elles concernent principalement la partie aval de la rivière du Mât entre 1978 et 2017. Nous synthétiserons ces données puis nous les compléterons par des données de terrain (analyse de signaux faibles d'incision et des singularité du profil en long. Il nous manquera cependant de la topographie récente pour prendre en compte les dernières évolutions verticales du profil en long.
Fonctionnement dynamique	Production sédimentaire : apports des versants	2	La cartographie de l'aléa "érosion" constitue une base pour analyser les apports des versants. Elle devra toutefois être croisée avec les données géologiques, les données de terrain, l'analyse diachronique.
	Production sédimentaire : apports des affluents	3	Les apports des affluents sont notamment abordés dans l'étude du BRGM (2008). Ces données seront complétées par l'analyse des orthophotos et par du terrain.
	Recharge sédimentaire : apports des berges	2	Certaines études abordent la question des érosions de berges mais pas sous l'angle de la recharge sédimentaire. Nous ajouterons donc ce volet à notre analyse.
	Stock alluvial	3	Dans la bibliographie, le stock alluvial est principalement analysé dans le cône alluvial.
	Granulométrie	3	Plusieurs granulométries effectuées notamment dans l'étude du BRGM (2008). Cependant la granulométrie peut évoluer dans le temps. Nous proposons de remesurer la granulométrie sur les sites BRGM et nous réaliserons également 4 relevés complémentaires.
	Transport solide	4	Etude du BRGM (2008) très détaillée : calcul des capacités de charriage et de trois bilans sédimentaires du cône (2002-2006, 2002-2007 et 2006-2007). Nous confronterons les capacités de charriages BRGM calculées à partir de la formule de Lefort 1991 aux capacités de charriage que nous calculerons avec une formule plus récente, la formule de Recking 2013. Nous réaliseront également un bilan sédimentaire du cône en utilisant le LiDAR 2017. Il nous manquera toutefois un levé LiDAR actuel pour prendre en compte les dernières évolutions (notamment cyclone Batsirai).
Espace de mobilité		2	Espace de mobilité proposé sur le cône dans le cadre de l'étude Cerema 2018. Toutefois, l'espace proposé n'est basé que sur l'analyse de la couche Fz et sur la diachronie en plan de 3 années (1950-2007-2017). Nous suivrons les différentes étapes du guide de l'espace de mobilité (1998).

Annexe 2. Données bibliographiques à exploiter dans le cadre de l'analyse hydromorphologique

Nom de la source	Auteur(s)	Année	Informations
Cartes			
Carte géologique	BRGM	-	Formations géologiques
Carte des ressources. Schéma départemental des carrières de la Réunion.	BRGM	2010	Types de matériaux et des zones de carrières
Données SIG			
Données Renov Risk	Renov Risk	1997-2003-2007	Couches alluvions/substratum, géologie, érosions, glissements
RHUM	Office de l'eau Réunion	2017	Sectorisation hydromorphologique
Données topographiques			
Profils en long ou en travers sur la Rivière du Mât	Sources variables	1966-2007	Différentes données topographiques parfois issues d'analyses photogrammétriques et exploitées dans le cadre des études antérieures

Nom de la source	Auteur(s)	Année	Informations
Litto 3D 5m	IGN	2016	
LiDAR 1m	Sintegra	2017	
Profils en travers topographiques de la Rivière du Mât	Sintegra	2017	Profils en travers terrestres levés entre le lieu-dit Cap Argile et l'océan
Profil en long Ravine Roche à Jacquot	Artelia	2019	
Plans topographiques Carrière Canabady	GEOLAB	2021	Bathymétrie des plans d'eau, cote des digues de protection
Photographies aériennes			
Orthophotographies « Remonter le Temps »	IGN	1949-2011	Diachronie en plan
BD Ortho	IGN	2013 et 2017	Diachronie en plan
Google Earth	Google	1985-2021	Précision faible, intéressant pour observer les grands changements de morphologie au niveau du cône alluvial
Sentinel Hub	Sentinel Hub	Une photo tous les 10 j environ	Précision très faible, intéressant pour observer les grands changements de morphologie au niveau du cône alluvial
Documents de base			

Nom de la source	Auteur(s)	Année	Informations
Détermination de l'Espace de liberté des cours d'eau	EPTEAU	1998	Guide technique de définition des espaces de liberté ou mobilité
Dictionnaire de géomorphologie	C. G. Genest	2000	
La restauration hydromorphologique des cours d'eau : concepts et principes de mise en œuvre	J-R. Malavoi et P. Adam	2007	
Éléments d'hydromorphologie fluviale	J-R. Malavoi et J-P. Bravard	2010	
Éléments de connaissances pour la gestion du transport solide	J-R. Malavoi <i>et al</i>	2011	
Délimiter l'Espace de Bon Fonctionnement des cours d'eau	B. Terrier et al	2016	Guide technique de définition des EBF
Guide pour l'élaboration de suivis d'opérations de restauration hydromorphologique en cours d'eau	A. Vivier, M. Roland-Meynard, Y. Reyjol	2019	
Les rivières en tresses - Éléments de connaissance	B. Terrier et al	2019	
Guide technique pour la mesure et la modélisation du transport solide	B. Camenen et G. Melun	2021	
Études antérieures			

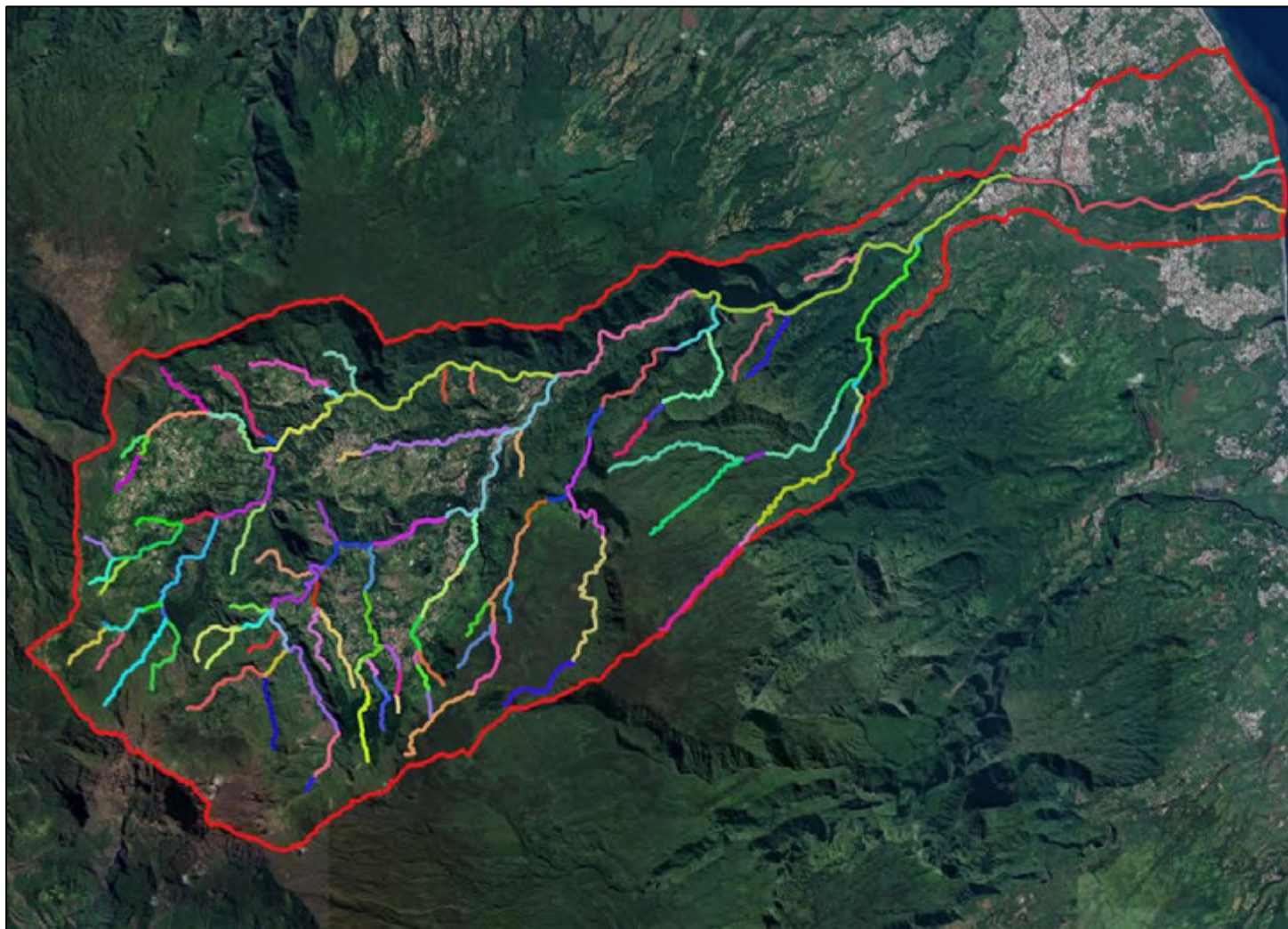
Nom de la source	Auteur(s)	Année	Informations
Cartographie de l'aléa "érosion des sols" à La Réunion. Phase 1 : caractérisation et cartographie des phénomènes érosifs	BRGM	2001	Description et cartographie des phénomènes érosifs en jeu sur le bassin
Etude hydrogéomorphologique de la Rivière du Mât et propositions de solutions de gestion - Volume 2/5 : Evolution géomorphologique	BRGM	2008	Sectorisation hydromorphologique, diachronie 1966-2007, relevés granulométriques
Etude hydrogéomorphologique de la Rivière du Mât et propositions de solutions de gestion - Volume 4/5 : Estimation du transport solide	BRGM	2008	Estimation des capacités de transport annuelles et lors d'événements exceptionnels, fonctionnement global du transport solide à l'échelle du bassin, bilan volumétrique du transport solide
Etude hydrogéomorphologique de la Rivière du Mât et propositions de solutions de gestion Volume 5/5 : Analyse de risque	BRGM - SOGREAH	2008	Profil en long objectif, types de protections ou d'actions adaptées à la Rivière du Mât, proposition de solutions de gestion
Analyse de solutions de prévention contre les risques d'inondation et d'érosion de berges	BRGM	2009	Comparatif des scénarios d'aménagement et de gestion proposés dans les rapports SOGREAH et BRGM de 2008
Les zones humides de la Réunion	Conservatoire Botanique National Mascarin	2009	Description des zones humides (types de sols, espèces, fonctions, menaces...)
Photo-interprétation géomorphologique des clichés IGN 1950	CETE Méditerranée	2011	Photo-interprétation du cône alluvial de la Rivière du Mât d'après les données 1950
Évaluation de la continuité écologique des 13 rivières pérennes de la Réunion	HYDRETTUES, ECOGEA, OCEA, Antea Group	2011	Continuité écologique de la Rivière du Mât



Nom de la source	Auteur(s)	Année	Informations
Contribution des processus hydrologiques et hydrogéologiques aux glissements de terrain de grande ampleur. Application au contexte tropical de la Réunion.	Pierre BELLE	2014	Analyse géologique et fonctionnement du glissement de Grand Ilet
Confortement de l'ouvrage franchissant la Rivière du Mât sur la RN2 au PR 33+239	Artelia, Géolithe	2015	Eléments géologiques et géotechniques concernant la Rivière du Mât
Carrière de roches alluvionnaires : Site « Canabady », Rivière du Mât, HOLCIM - Diagnostic géotechnique de stabilité des talus et des berges -Mission de type G5	SEGC	2016	Données géologiques
Etude hydraulique de la carrière Canabady – Rivière du Mât – Bras Panon	HYDRETUDES	2016	Fonctionnement hydraulique au niveau de la carrière
Opération d'arasement du seuil de Bengalis – Mission de Maitrise d'œuvre	BRLi	2018	Diagnostic du seuil de Bengalis et de la zone sous influence du seuil, propositions d'arasement, analyses complémentaires proposées
Actualisation du profil d'équilibre de la Rivière du Mât. Analyse des évolutions morphologiques depuis 2007	Cerema	2018	Mise à jour du profil d'équilibre
Evaluation des pressions et des impacts liés aux altérations hydromorphologiques sur les cours d'eau	Office de l'eau Réunion	2019	L'analyse du risque d'altération hydromorphologique est basée sur les données du RHUM

Nom de la source	Auteur(s)	Année	Informations
Evaluation des pressions et des impacts associés à la continuité écologique.	Office de l'eau Réunion	2019	Mise à jour des obstacles à la continuité écologique, liste précise avec niveau d'impact sur les groupes d'espèces
Analyse prospective des évolutions des pressions et des enjeux à l'horizon 2027	Office de l'eau Réunion	2019	Eléments d'évolution climatique
Suivi sismologique de l'impact des cyclones sur la charge de fond de la Rivière des Pluies et de la Rivière du Mât à La Réunion	Alicia Gonzalez	2020	Analyse granulométrique
Actualisation des principes de protection du secteur « Roche à Jacquot » + avis BRGM-DEAL	Artelia, ETRM, Mascareignes Géologie, Géolithe	2021	Géologie, mouvements de terrain de Grand Ilet, historique des travaux, crues et cyclones, analyse du transport solide, propositions d'aménagement liées à une problématique d'enfoncement du lit de la ravine

Annexe 3. Tronçons hydromorphologiques du RHUM sur le bassin de la Rivière du Mât



(Sources : RHUM, orthophotographie Google 2021)

Annexe 4. Justification de la sectorisation

Les tronçons résultant d'une fusion de plusieurs tronçons du RHUM sont les suivants :

- Le tronçon M_2, il résulte de la fusion de deux tronçons RHUM de sinuosité différente mais tous deux contraints par les versants et de pente homogène ;
- Le tronçon RJ_2 est composé de deux tronçons très encaissés et contraints par le relief. Le second tronçon présente une zone de dépôt en aval liée à un élargissement local de la vallée juste avant la confluence avec la rivière des Fleurs Jaunes. Cette particularité étant limitée en longueur, nous avons décidé de regrouper les deux tronçons RHUM.

Un tronçon a été ajouté (non inclus dans le RHUM), le tronçon d'une ravine active en rive gauche du Bras Sec (RAV_1). Cette ravine est progressivement devenue le principal contributeur sédimentaire de la partie aval du Bras Sec.

La sectorisation respecte la plupart du temps le RHUM. Toutefois nous avons parfois modifié les limites des différents tronçons. Le choix des limites de tronçons est justifié dans le tableau suivant

JUSTIFICATION DES LIMITES DE TRONÇONS			
Limite des tronçons	Localisation	Correspondance avec le RHUM	Justification
M_1	Passerelle suspendue	Oui	Changement de faciès (cascade et step-pool > alternance radier-plat courant et zones de rapides)
M_1-2	Confluence avec le Bras Sec	Oui	Changement de faciès/style fluvial (alternance radier-plat courant et zones de rapides > tresses) + confluence
M_2-3	Début des gorges (350 m en amont du pont de la Savane)	Oui	Changement de style fluvial (tresses > gorges)
M_3-4	Confluence avec la Rivière des Fleurs Jaunes	Oui	Confluence et gorges moins étroites
M_4-5	Aval du pont de l'Escalier	Oui	Elargissement de la bande active avec présence de larges atterrissements.
M_5-6	Seuil naturel de Bengalis (affleurement de basalte)	Oui	Rupture de pente au niveau de l'affleurement de basalte en aval du seuil de Bengalis. Le seuil de Bengalis est quant à lui en cours d'arasement. son impact sur le profil en long est donc amené à diminuer voire disparaître.
BS_1	Confluence Ravine Trois Cascades	Oui	Confluence avec une ravine et pont
RAV_1	Impasse des Grenadines - Ilet à Vidot	Non (tronçon RAV_1 inexistant dans le RHUM)	Tronçon RAV_1 rajouté car cette ravine est active et fournit des matériaux au cours d'eau. Limite amont au niveau de la partie haute du lit de la ravine.

JUSTIFICATION DES LIMITES DE TRONÇONS			
Limite des tronçons	Localisation	Correspondance avec le RHUM	Justification
BS_1 - BS_2 - RAV_1	Confluence la ravine sans nom	Non (tronçon RAV_1 inexistant dans le RHUM)	Rupture de pente entre la ravine et le lit du Bras Sec et ouverture brutale de la bande active à partir de la confluence avec la ravine sans nom
BS_2 - M_2	Confluence avec la Rivière du Mât	Oui	Confluence et début d'une zone de tressage sur la rivière du Mât.
FJ_1	Lieu-dit Le Grand Sable	Non (limite décalée 290 m en aval au niveau d'une cascade)	Rupture de pente (cascade) puis léger élargissement de la bande active et présence de plusieurs zones de connexion versant-lit.
FJ_1-2	Confluence avec la Ravine Camp Pierrot	Oui	Confluence et élargissement léger de la bande active. Historiquement, le tronçon FJ_2 présentait une bande active beaucoup plus large avec un tressage dans sa moitié aval.
FJ_2-3	Lieu-dit Le Mathurin	Oui	Confluence + bande active relativement large et présentant des atterrissements conséquents mais fortement contrainte par le relief
FJ_3-4	Lieu-dit Le Grand Bord	Oui	Changement de faciès (alternance radier-plat courant > cascades/step-pool), gorges beaucoup plus étroites avec encaissement du lit dans les basaltes.
FJ_4/M_4	Confluence avec la Rivière du Mât	Oui	Confluence et gorges moins étroites
RJ_1	Pont Îlet Roche à Jacquot	Non (décalée en aval)	La limite a été décalée en pied de versant. au droit d'un pont et au niveau de la zone où la bande active commence à s'élargir
RJ_1-2	Confluence avec la Ravine Blanche	Oui	Confluence et cascade formant une rupture de pente
RJ_2 - FJ_3	Confluence avec la Rivière des Fleurs Jaunes	Oui	Confluence
RB_1	Îlet Roche à Jacquot	Non (décalée vers l'aval en pied de versant)	La limite a été décalée en pied de versant, au niveau de la zone où le cours d'eau présente une bande active qui s'élargie et une connexion versant-lit
RB_1 - RJ_2	Confluence avec la Ravine Roche à Jacquot	Oui	Confluence et cascade formant une rupture de pente
BC_1	Confluence ravine Mazerin	Oui	Confluence et cascade formant une rupture de pente
BC_1 - BC_2	Amont Ilet du Bras de Caverne	Non (deux tronçons fusionnés et limite décalée de 130 m en amont)	Les deux tronçons fusionnés sont des tronçons contraints en gorges. La limite a été légèrement décalée pour se placer au niveau de la zone où les gorges s'élargissent

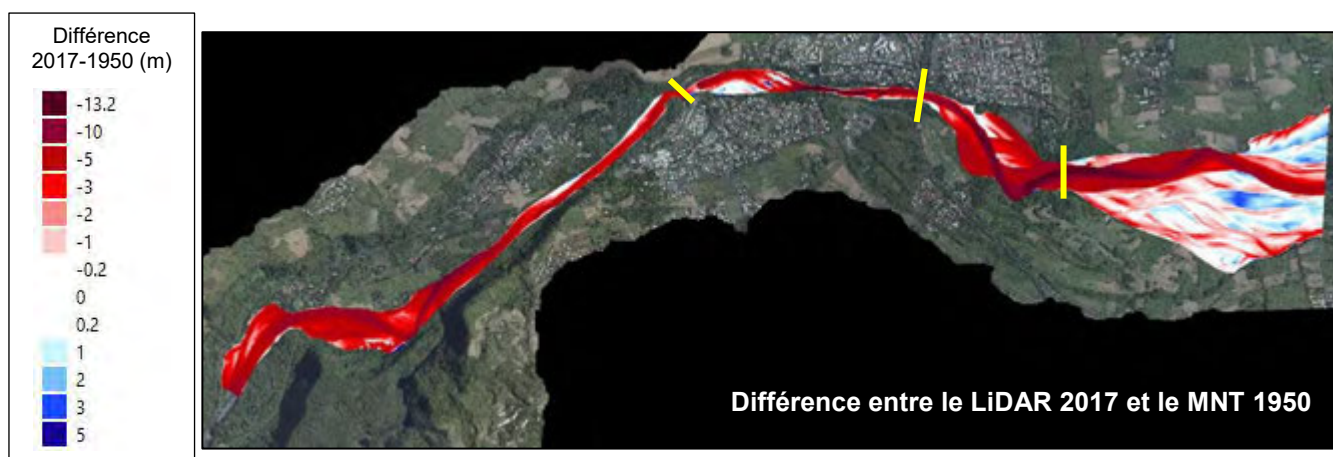
JUSTIFICATION DES LIMITES DE TRONÇONS			
Limite des tronçons	Localisation	Correspondance avec le RHUM	Justification
BC_2 - M_5	Confluence avec la Rivière du Mât	Oui	Confluence
BL_1	Bassin lieu-dit Grand Rein	Non	Tronçon réduit par rapport au RHUM, il commence en aval de la confluence avec une ravine et en aval d'une cascade de 10 m de haut
BL_1 - BL_2	Cascade du Chien	Non (deux tronçons fusionnés et limite décalée 100 m en aval)	Les deux tronçons fusionnés ont un style fluvial similaire (alternance de bassins, petites cascades, affleurement de roche mère). La limite a été fixée au droit de la cascade du Chien (environ 110 m de haut)
BL_2 - M_5	Confluence avec la Rivière du Mât	Oui	Confluence
BP_1	Succession de 3 cascades	Non	Tronçon réduit par rapport au RHUM, il commence en aval de la confluence avec une ravine et en aval d'une succession de 3 cascades d'une hauteur totale d'environ 60 m
BP_1 - BP_2	Cascade Bras Piton	Non (décalée 430 m en amont)	La limite a été décalée en amont au droit d'une cascade de 170 m de haut.
BP_2 - BL_2	Confluence avec le Bras des Lianes	Oui	Confluence

Annexe 5. Bilan sédimentaire 1950-2017

Afin de réaliser ce bilan sédimentaire, un MNT a été extrapolé à partir du niveau des terrasses anciennes datant de 1950. Une estimation des volumes érodés et incisés pendant cette période a ensuite pu être effectuée par comparaison du MNT 1950 avec le LiDAR 2017.

Les résultats obtenus sont présentés dans le tableau ci-dessous. Le nombre de terrasses datant de 1950 étant limité, ces valeurs sont seulement des estimations, elles permettent de donner un ordre de grandeur des volumes érodés.

Volume incisé entre 1950 et 2017 (m ³)	
Cap Argile - pont de Bengalis	2 341 661
Pont de Bengalis - pont RN2	546 148
Pont RN2 - Ancienne décharge (L.D. Les Manguiers)	1 667 195
Ancienne décharge – 1.75 km en aval	2 103 650
Total	6 658 655

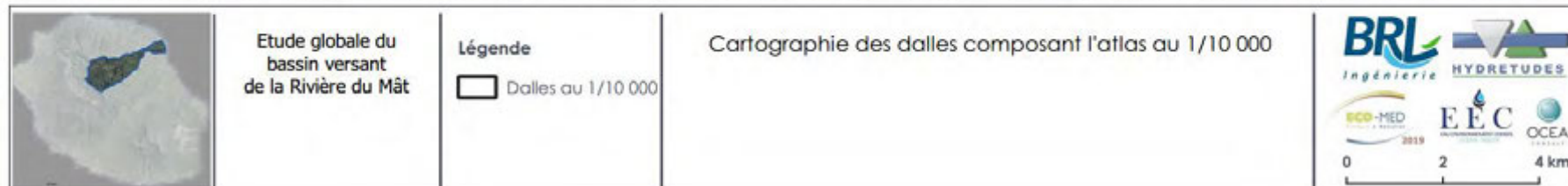
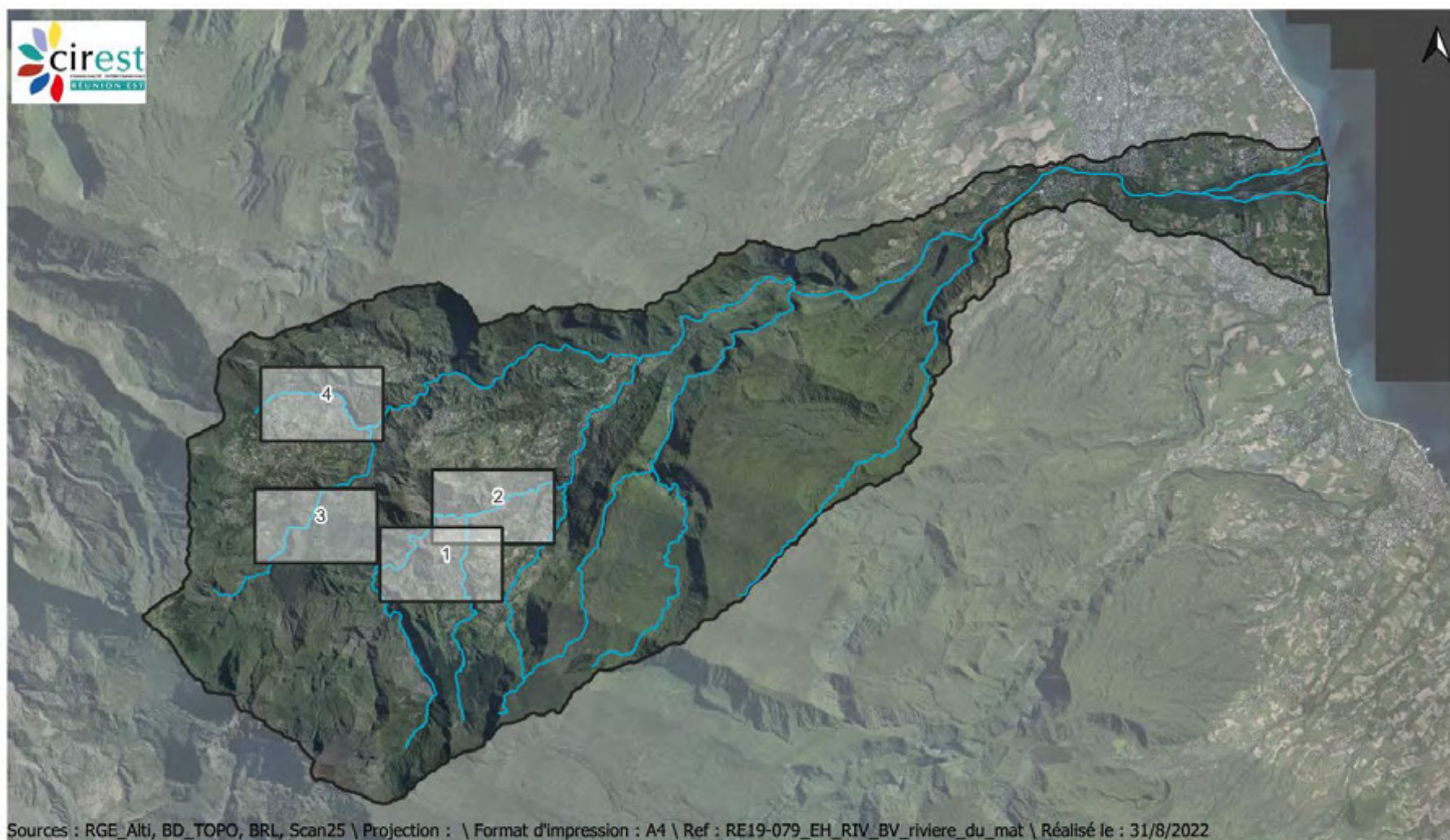


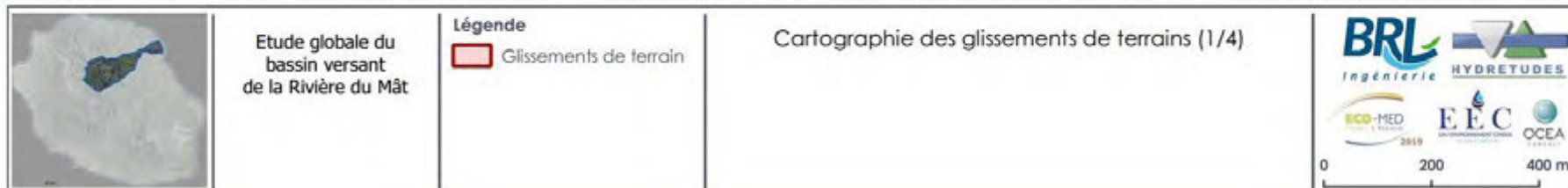
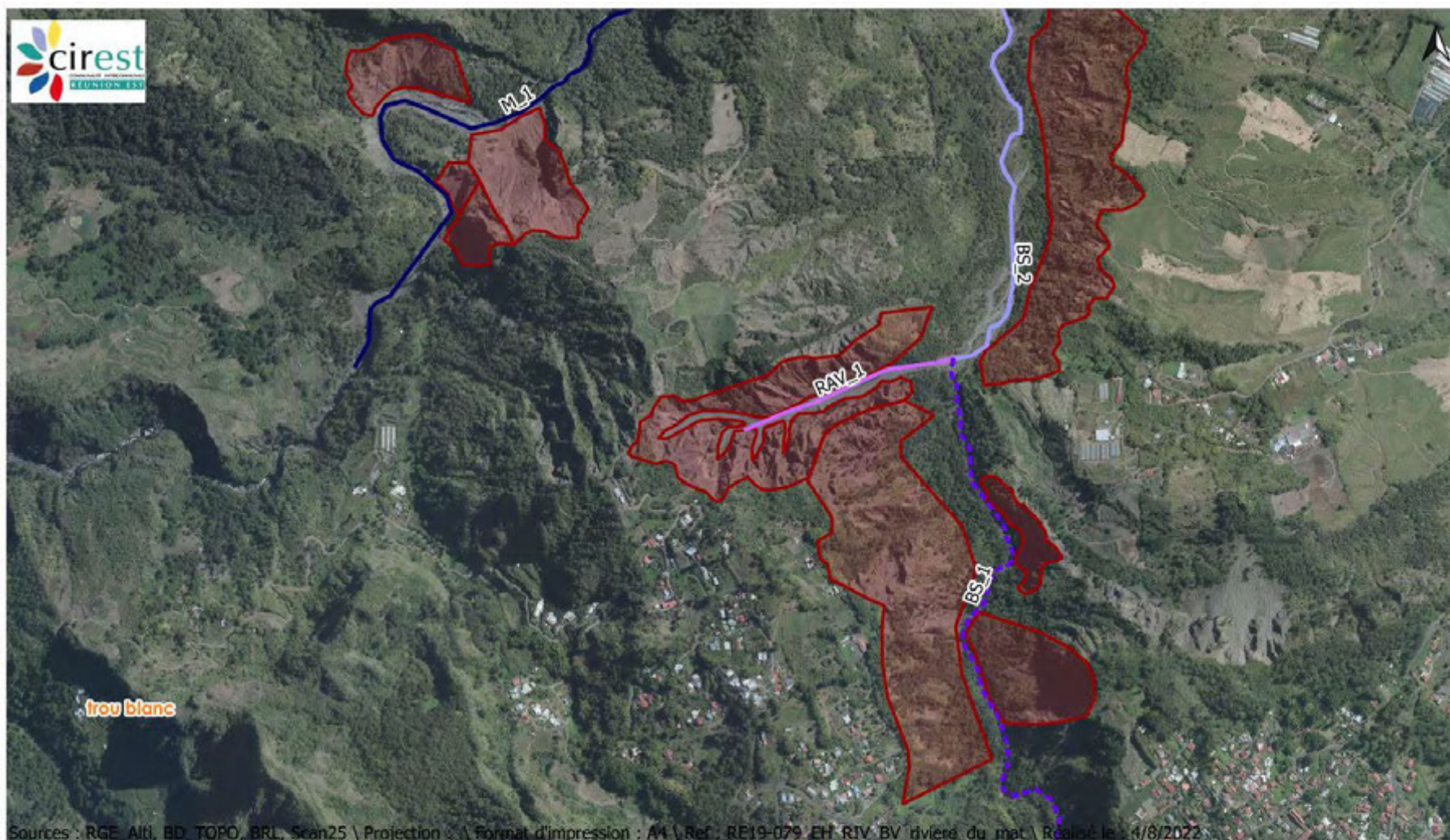
Le volume de matériaux total érodé est d'environ 6.7 Mm³. Ce volume est du même ordre de grandeur que les extractions réalisées en lit mineur sur le cône alluvial (1980-2000 ≈ 5Mm³, sachant que des extractions avaient aussi lieu avant 1980). Ces extractions sont probablement à l'origine -au moins en partie- de l'incision observée entre 1950 et 2017 (phénomène d'incision régressive).

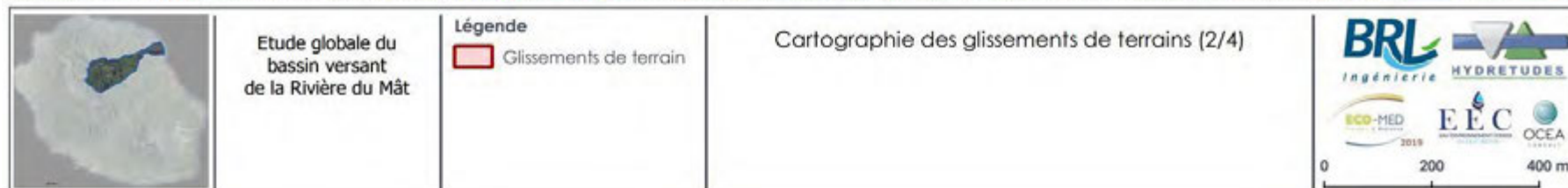
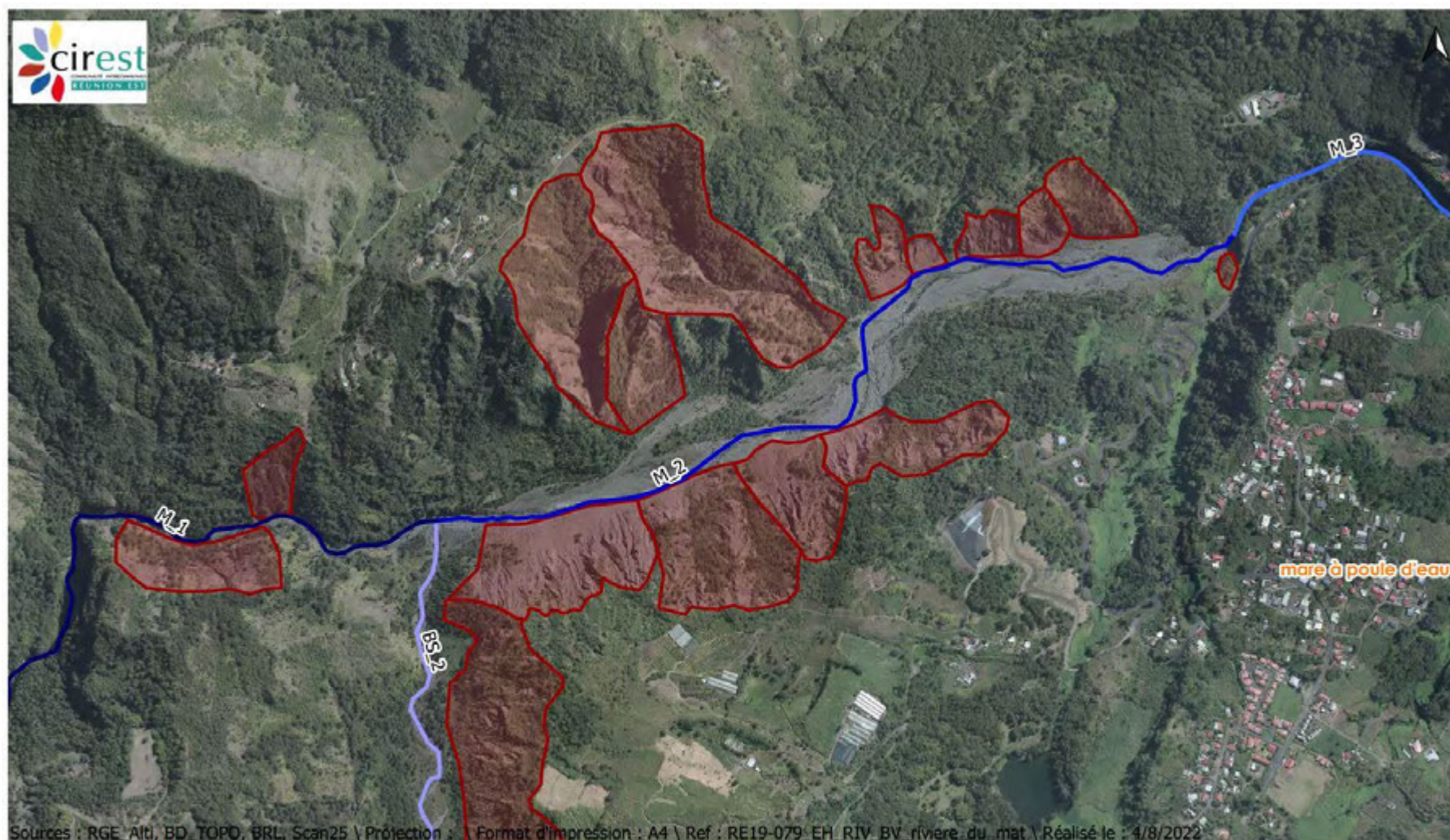


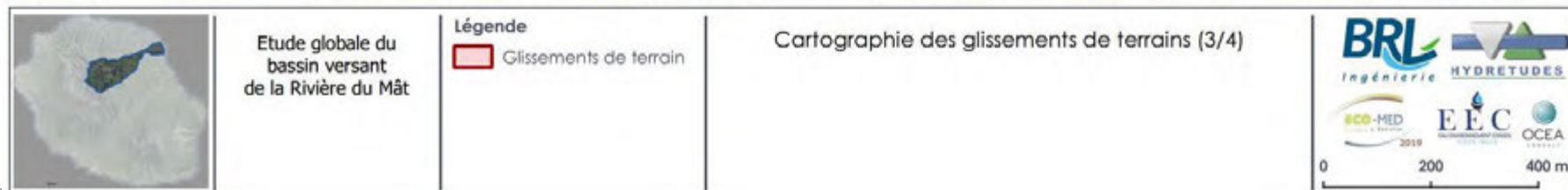
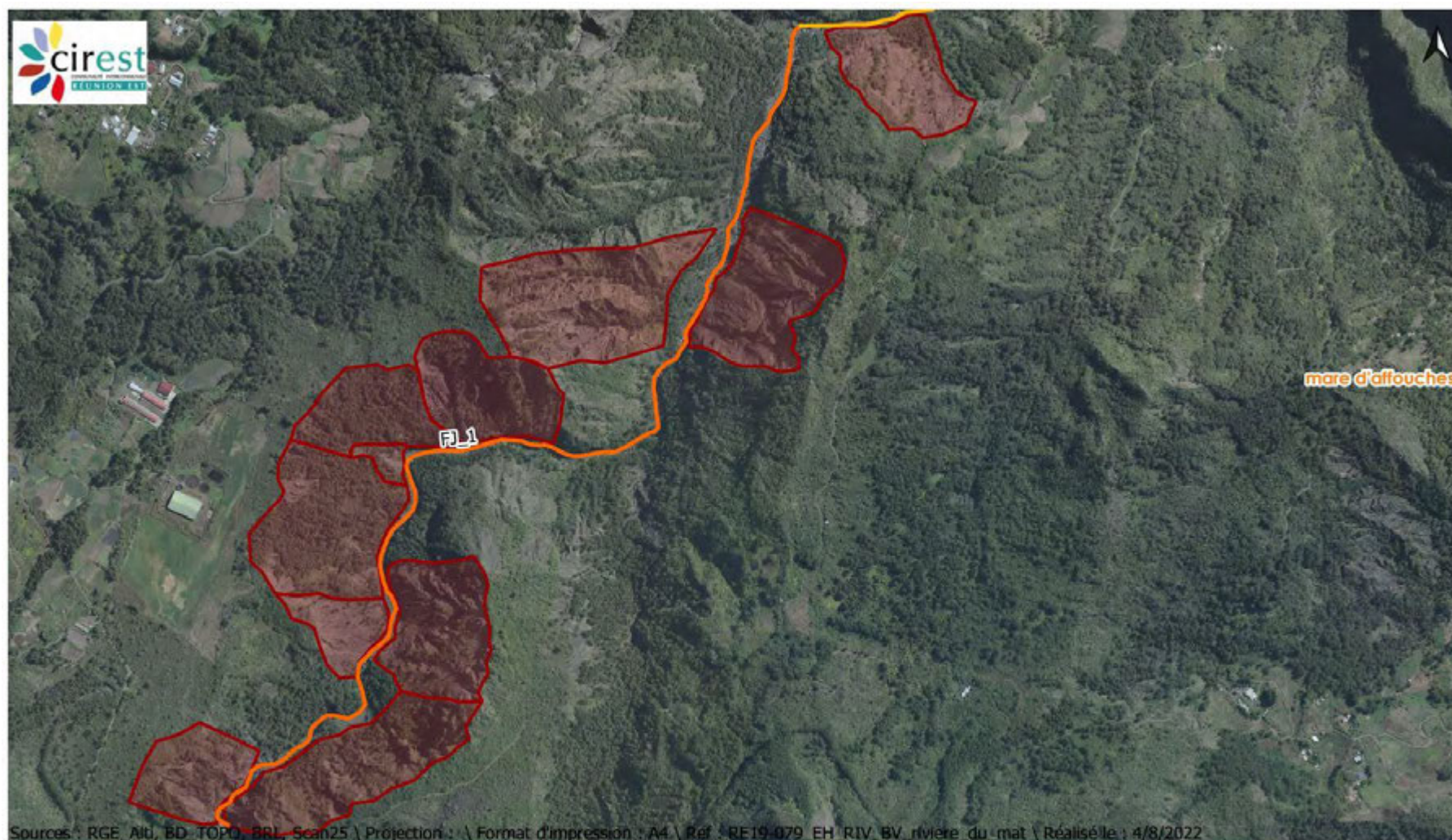
Annexe 6. Cartographie des glissements rapides et déboulés actifs en 2022

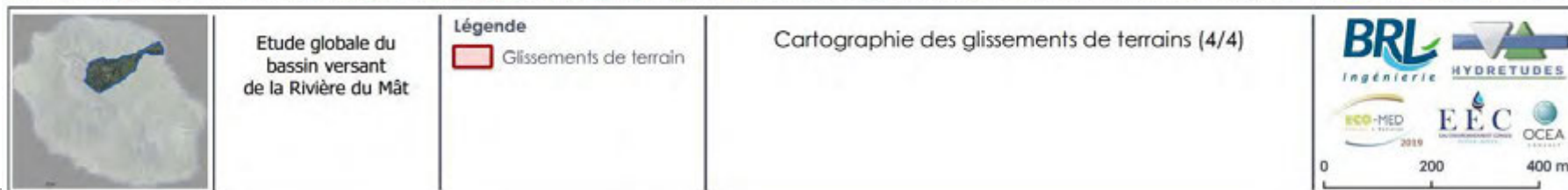
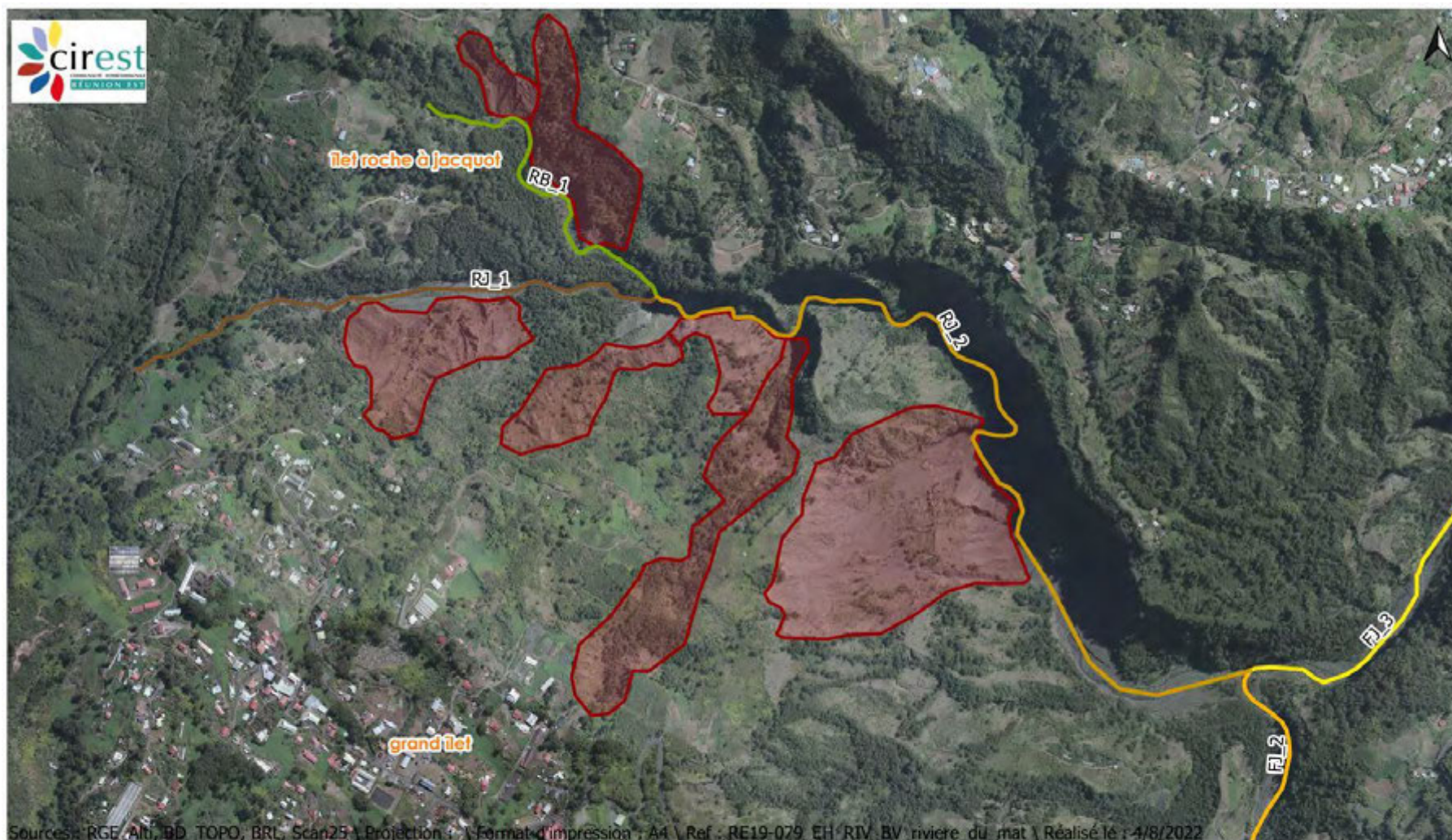
Rappel : les glissements rapides ont été cartographiés, d'après l'orthophotographie Bing 2021, les relevés de terrain avril-mai 2022 et les vidéos drone avril-mai 2022. Seuls les glissements les plus actifs (les moins végétalisés) ont été recensés.



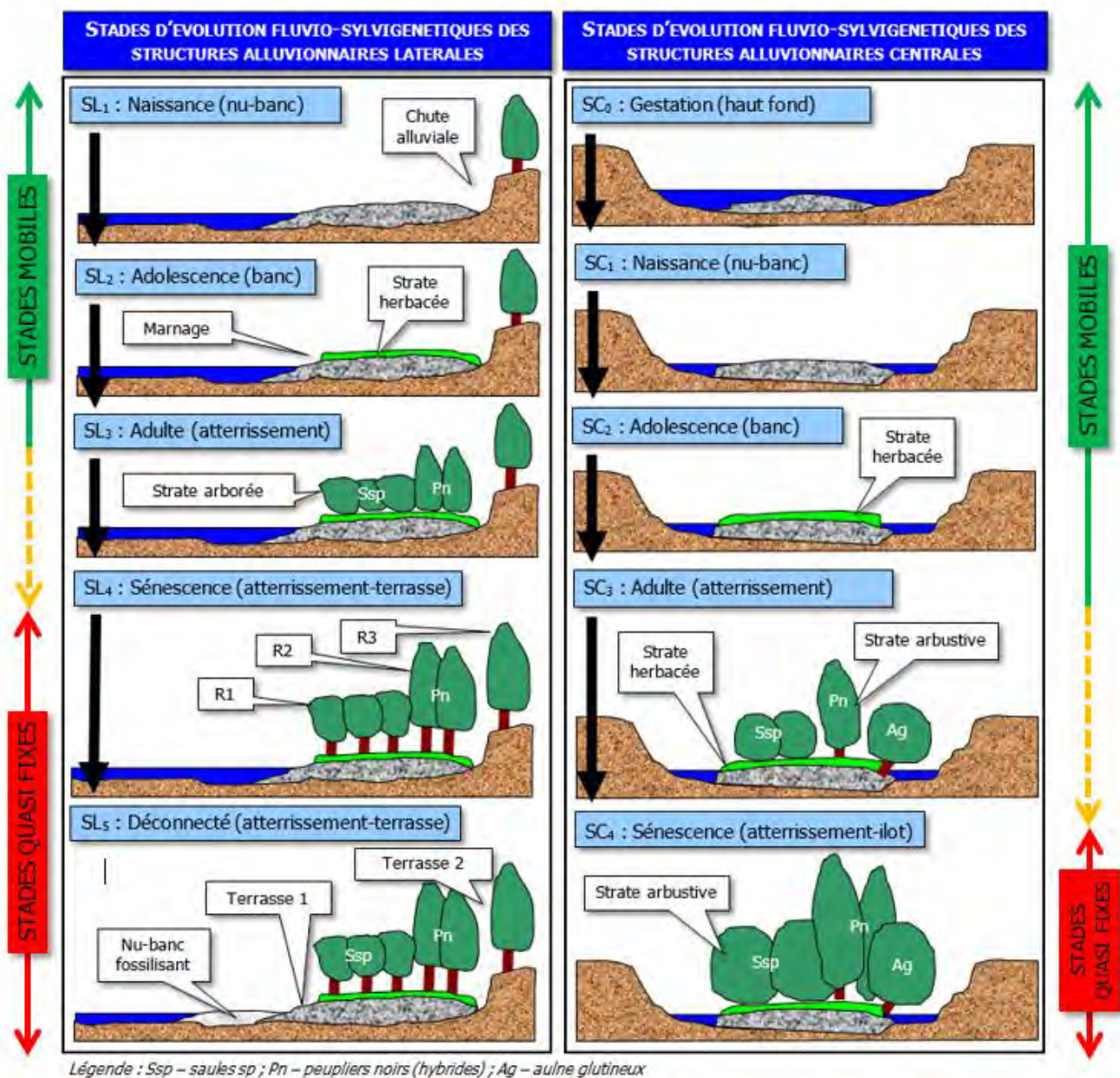








Annexe 7. Mobilité des structures alluvionnaires



Annexe 8. Vitesse de propagation de la charge solide

■ Vitesse de propagation des matériaux réinjectés en lit à partir de données bibliographiques estimées

Radio-identification par PIT-tags

La radio-identification permet de récupérer des données à distance en utilisant des marqueurs appelés PIT-tags.

Un PIT tag est constitué d'une micro-puce et d'un solénoïde encapsulé dans un étui en verre biocompatible.

On recherche les PIT-tags avec un émetteur de radiofréquences qui active les marqueurs en leur fournissant de l'énergie. Le marqueur renvoie un signal qui permet ainsi de l'identifier.

En premier lieu, on peut passer rapidement sur les **estimations** (= non mesures) de vitesses moyennes de transfert de charge, provenant de la littérature scientifique donnent des temps de transfert de l'ordre de **100 à 200 m par an** (Tricart & Vogt, 1967 ; Anguenot, 1972 ; Salvador, 1991).

Ces données sont anciennes et antérieures au traçage par pit-tags (cf. ci-contre). De plus, elles concernent des cours d'eau méditerranéens ou alpins ce qui correspond assez peu au fonctionnement de cours d'eau réunionnais.

Il est à noter que Terrier *et al.*, 2019 dans la méthode concernant les apports sédimentaires des tressages indiquent une distance de transit moyenne de **500 m par an**.

■ Vitesse de propagation des matériaux réinjectés en lit à partir de données mesurées par PIT-Tag

Il est à noter que les **mesures** disponibles sont actuellement relativement limitées, les premières mesures par transpondeurs datant de 2005 et ont été effectuées sur un petit cours d'eau canadien (Lamarre, 2005).

Le dernier article de synthèse relatif à la métrologie du transport solide (à notre connaissance) date de 2016 (Piégay, *et al.*) concerne 17 cours d'eau (Canada, USA, Porto-Rico, Suisse, Belgique et France). Quelques-unes des données de l'article sont présentées ci-dessous.

QUELQUES DONNEES CONCERNANT LE DEPLACEMENT DES MATERIAUX PUCES DANS COURS D'EAU ALPINS									
Source	Cours d'eau	Largeur bande active [m]	Q _{pleinbord} [m³/s]	D ₅₀ (lit) [mm]	D ₅₀ tags [mm]	Tags injectés	Taux retour [%]	Q _{max} [m³/s]	Distance Max [m]
Camenen <i>et al.</i> 2010	Arc	70	-	-	40-300	300	80-12	500	> 100
Liébault <i>et al.</i> 2012	Bouinenc	24	2,5	20	53	451	89-45	41	> 2 229
Chapuis <i>et al.</i> 2015	Durance	290	170	40	49	232	40	1156	668

Les seules données ramenées à une unité de temps qui sont actuellement disponibles ont donné des résultats de déplacements moyens annuels de :

- 390 m pour l'Ain (Rollet, 2007)
- 270 m pour le Rhin pour une crue Q15, les déplacements moyens sur le Rhin relevés étant de 1020 m (Arnaud, 2012).

En complément d'autres données existent comme celles acquises sur l'Argent-Double, un cours d'eau méditerranéen (Michler *et al.*, 2016).

Le tableau suivant synthétise les éléments de déplacement des grains pucés sur l'Argent-Double dans le département de l'Aude :

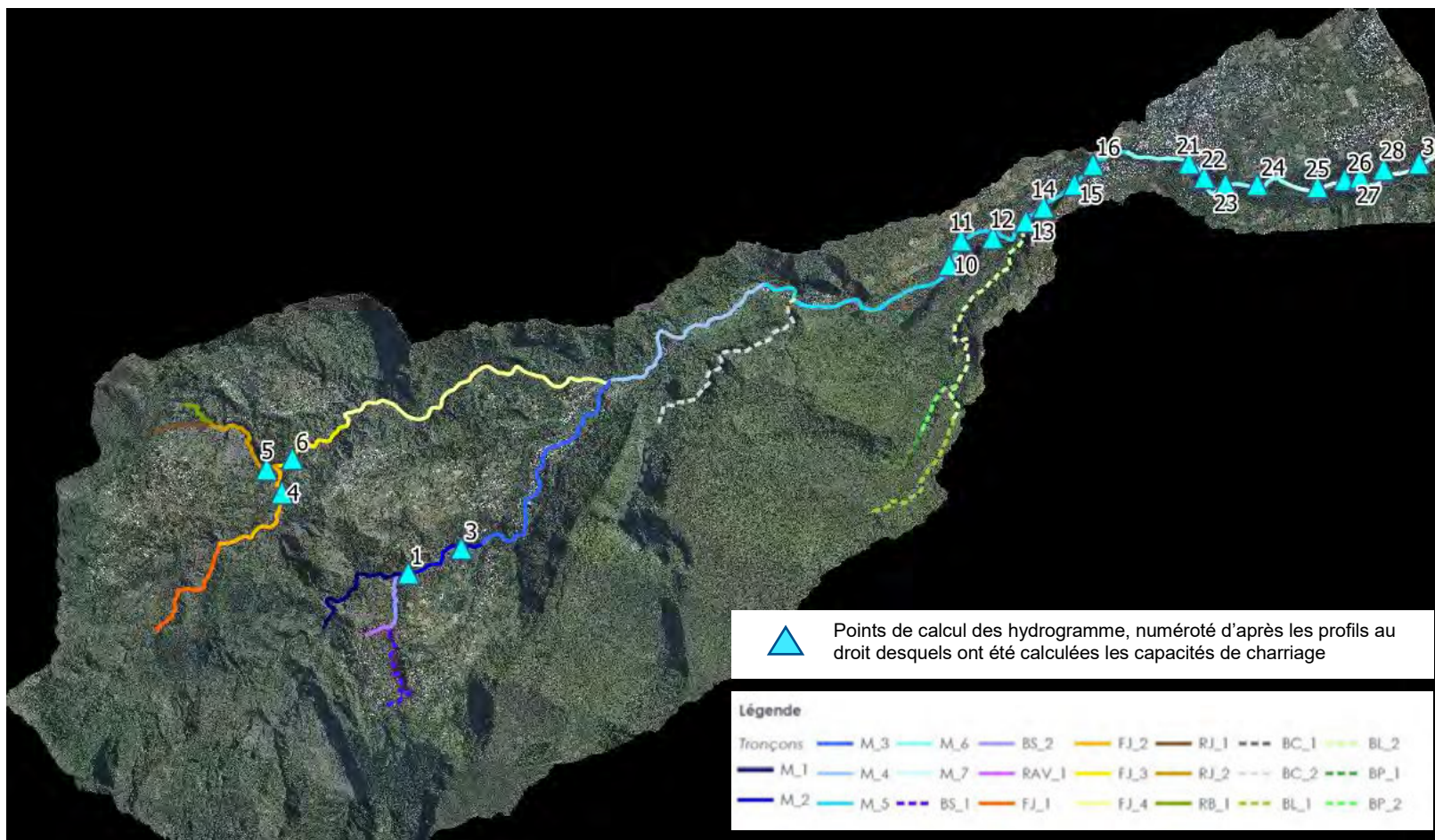
VITESSE DE DEPLACEMENT SUR L'ARGENT DOUBLE			
Distance parcourue en mètres			
Sur 17 mois		Ramené à 12 mois	
Moy	Max	Moy	Max
151	441	107	311

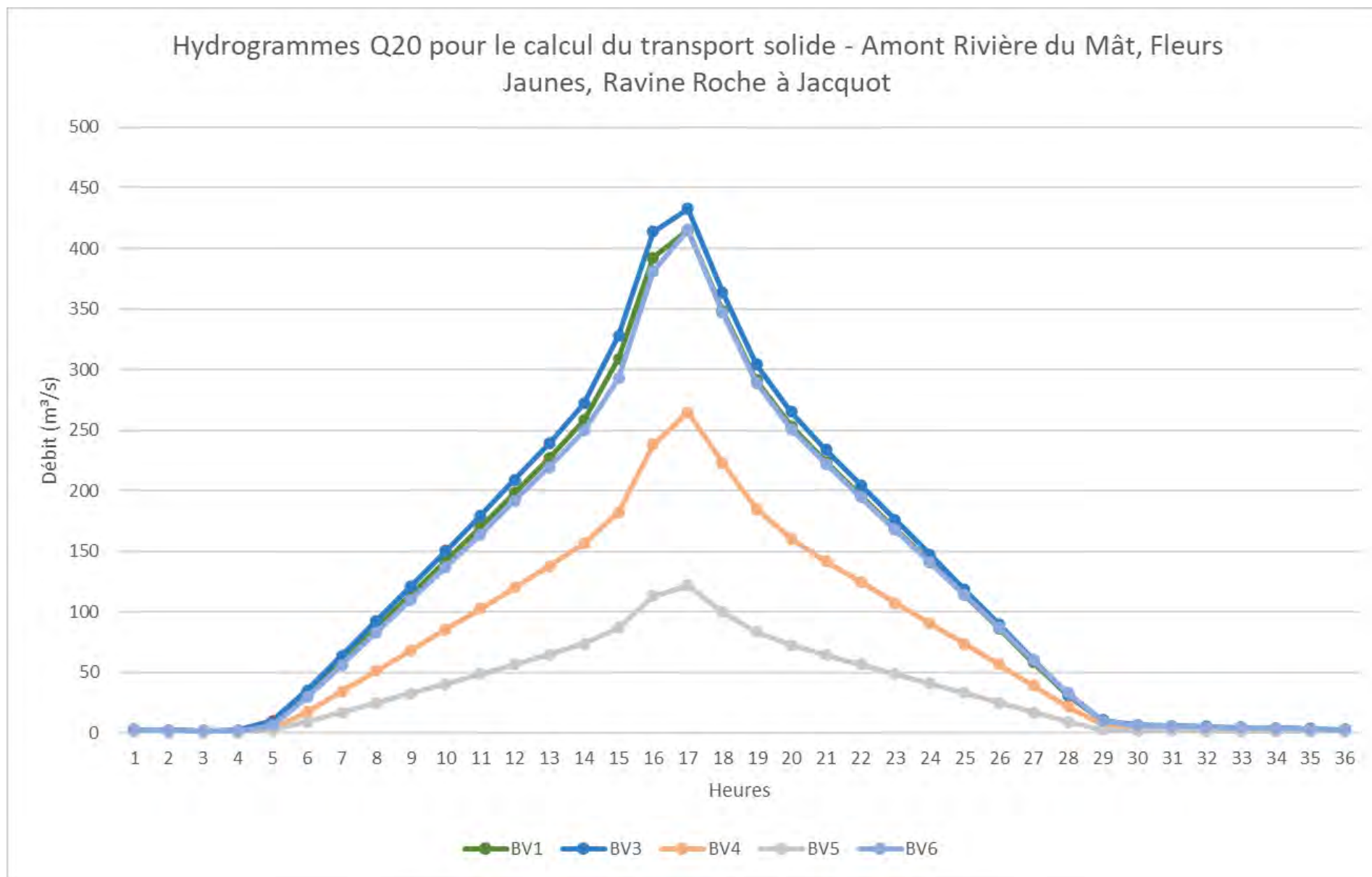
Tableau 31 : Vitesses de déplacement de la charge solide sur l'Argent-Double

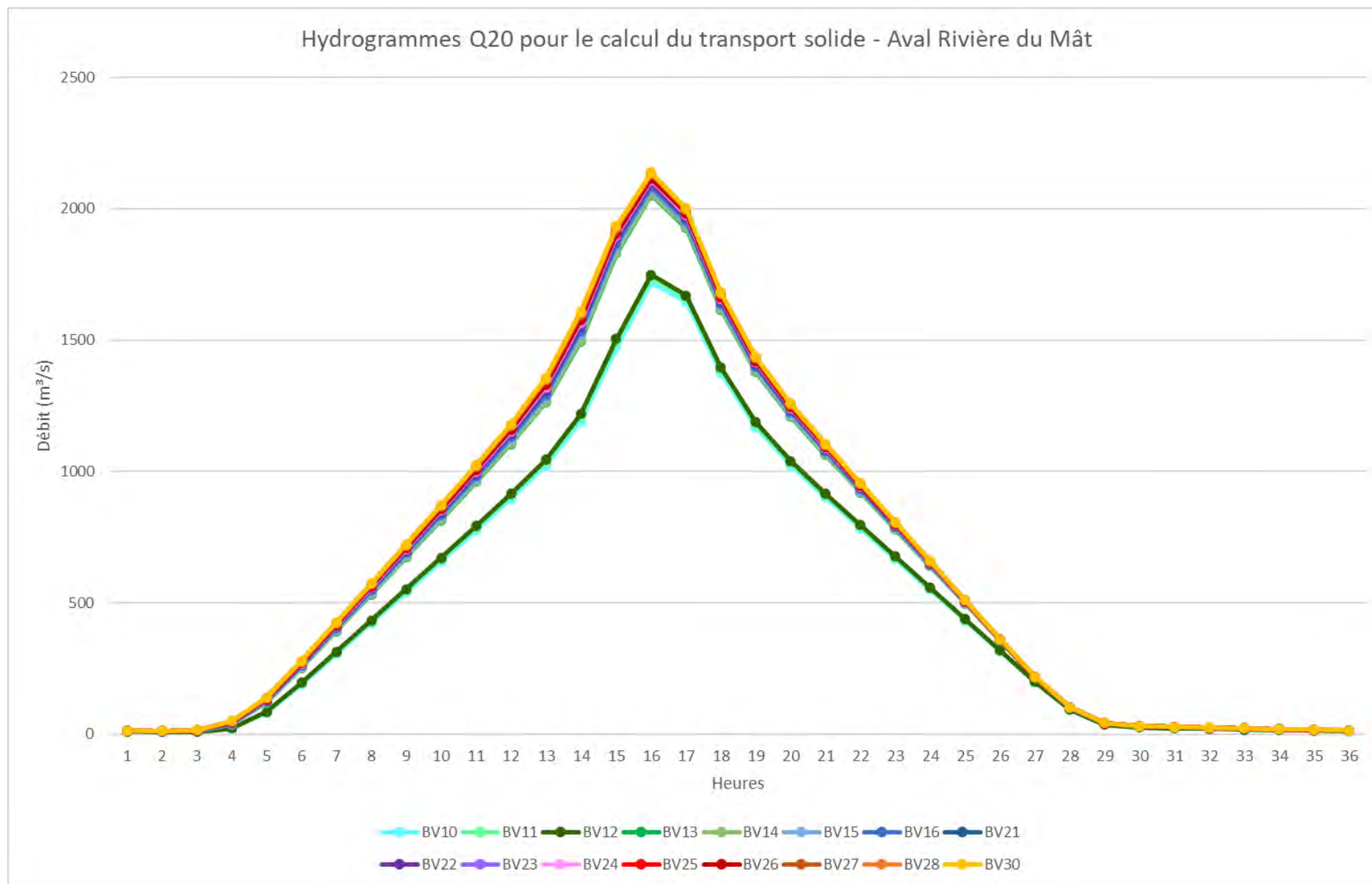
Les vitesses de déplacement mesurées et proposées dans la bibliographie sont globalement du même ordre de grandeur. **Toutefois, les cours d'eau concernés sont très différents de la Rivière du Mât.**

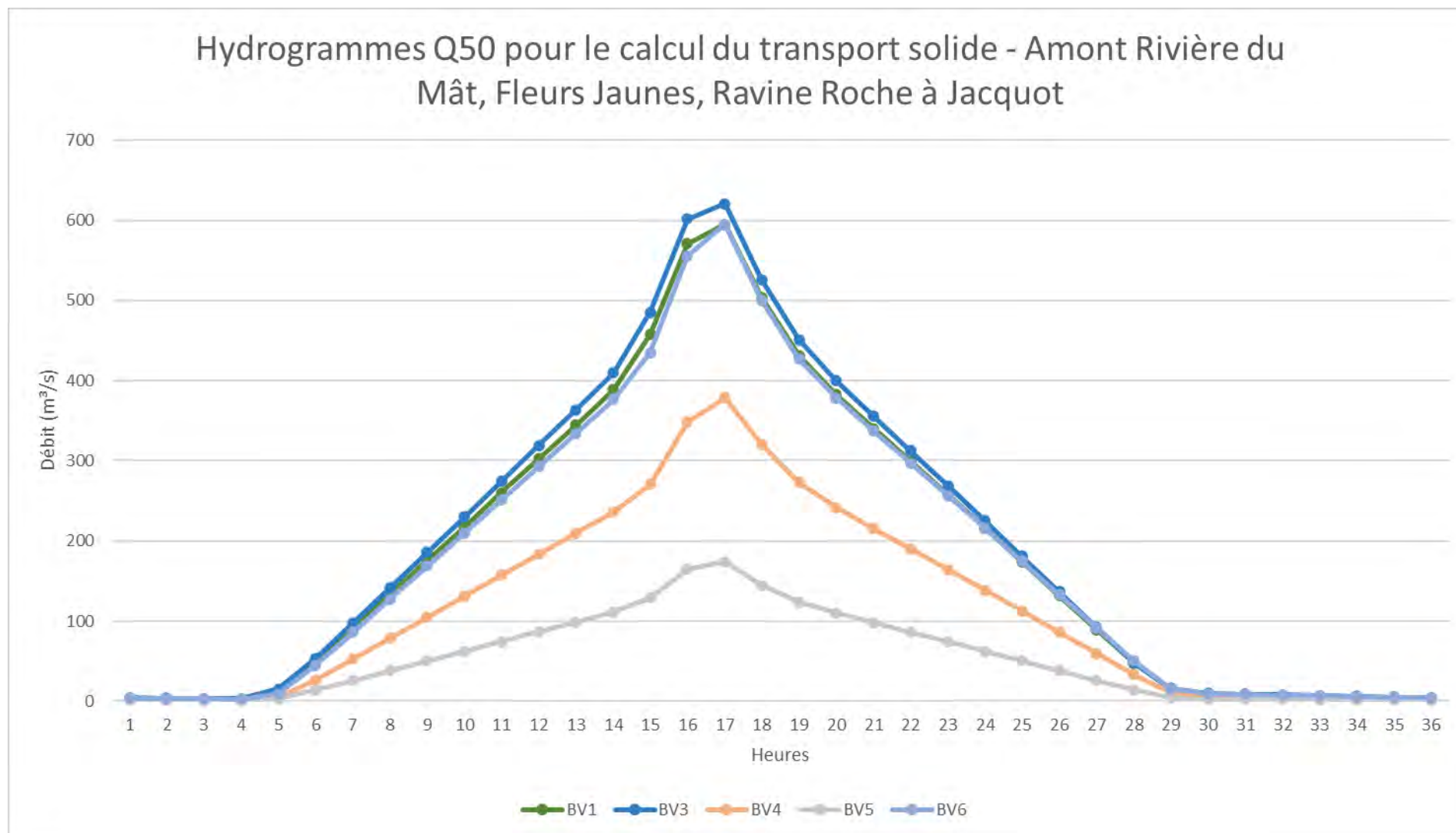
Annexe 9. Hydrogrammes Q20, Q50, Q100 et Q500

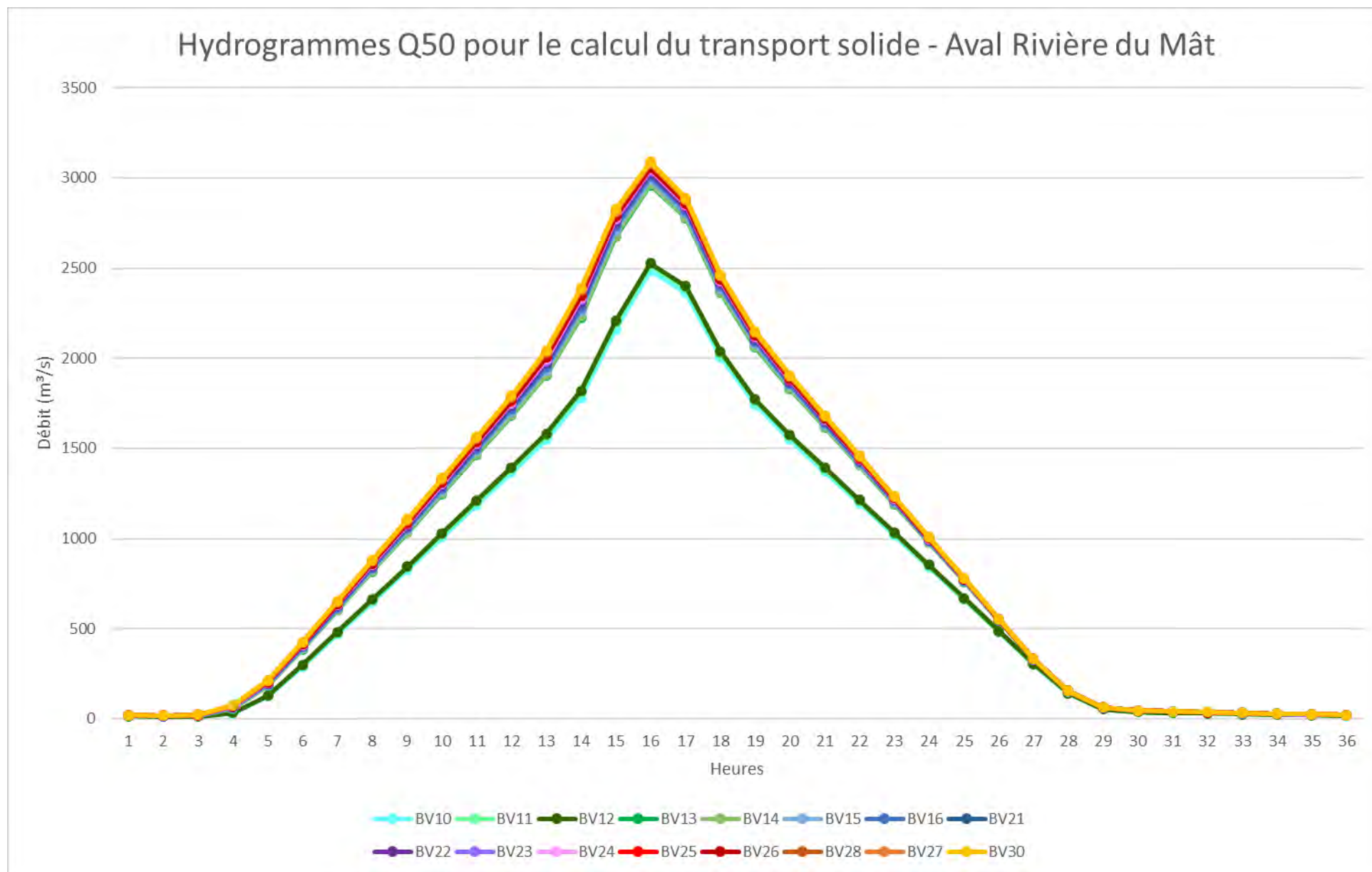
Les hydrogrammes de crue Q20, Q50, Q100 et Q500 ont été extraits du modèle MESRI. Pour chaque période de retour, le modèle MESRI a permis de modéliser 20 hydrogrammes correspondant chacun à un point de calcul du transport solide sur le bassin.

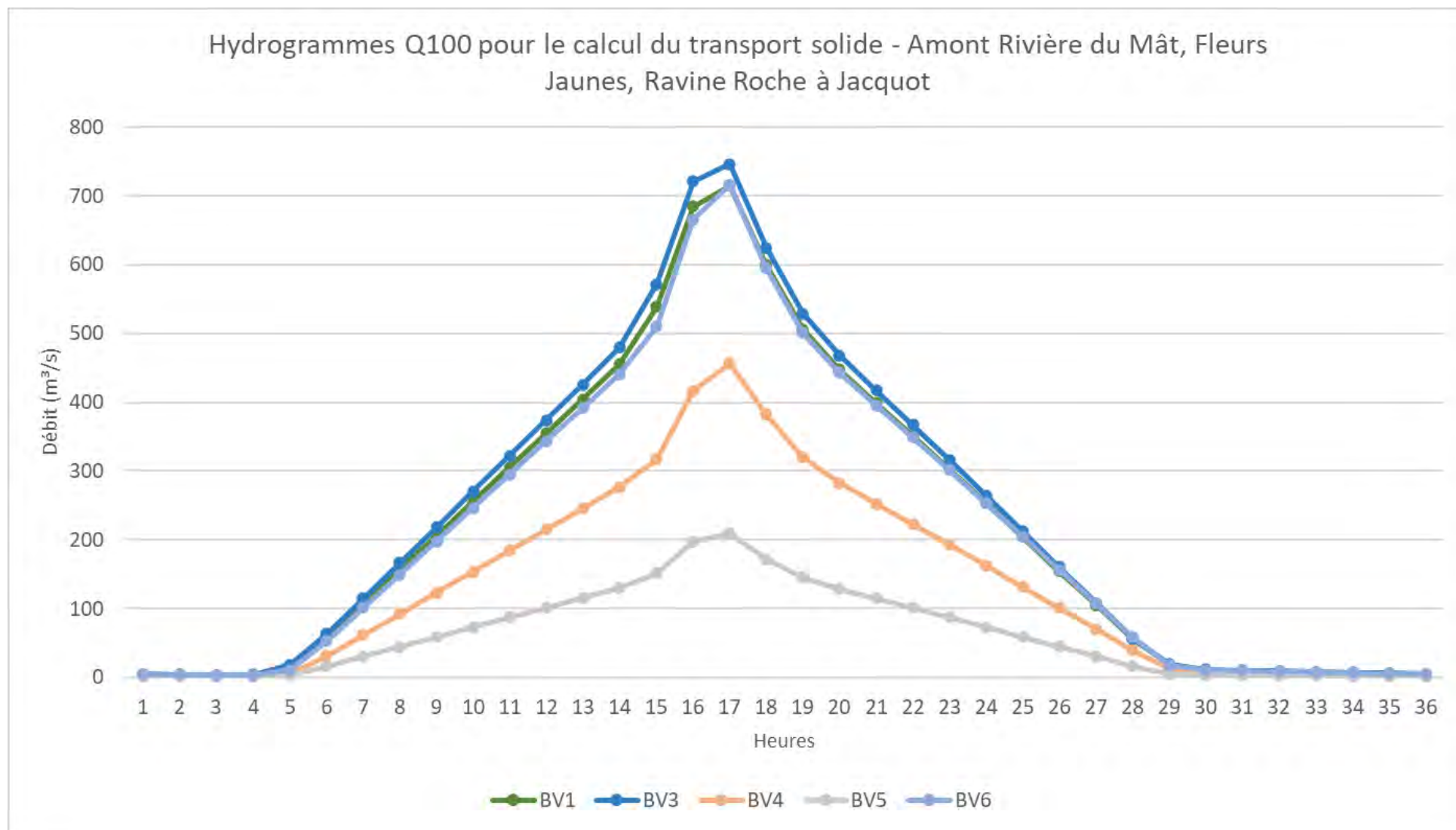


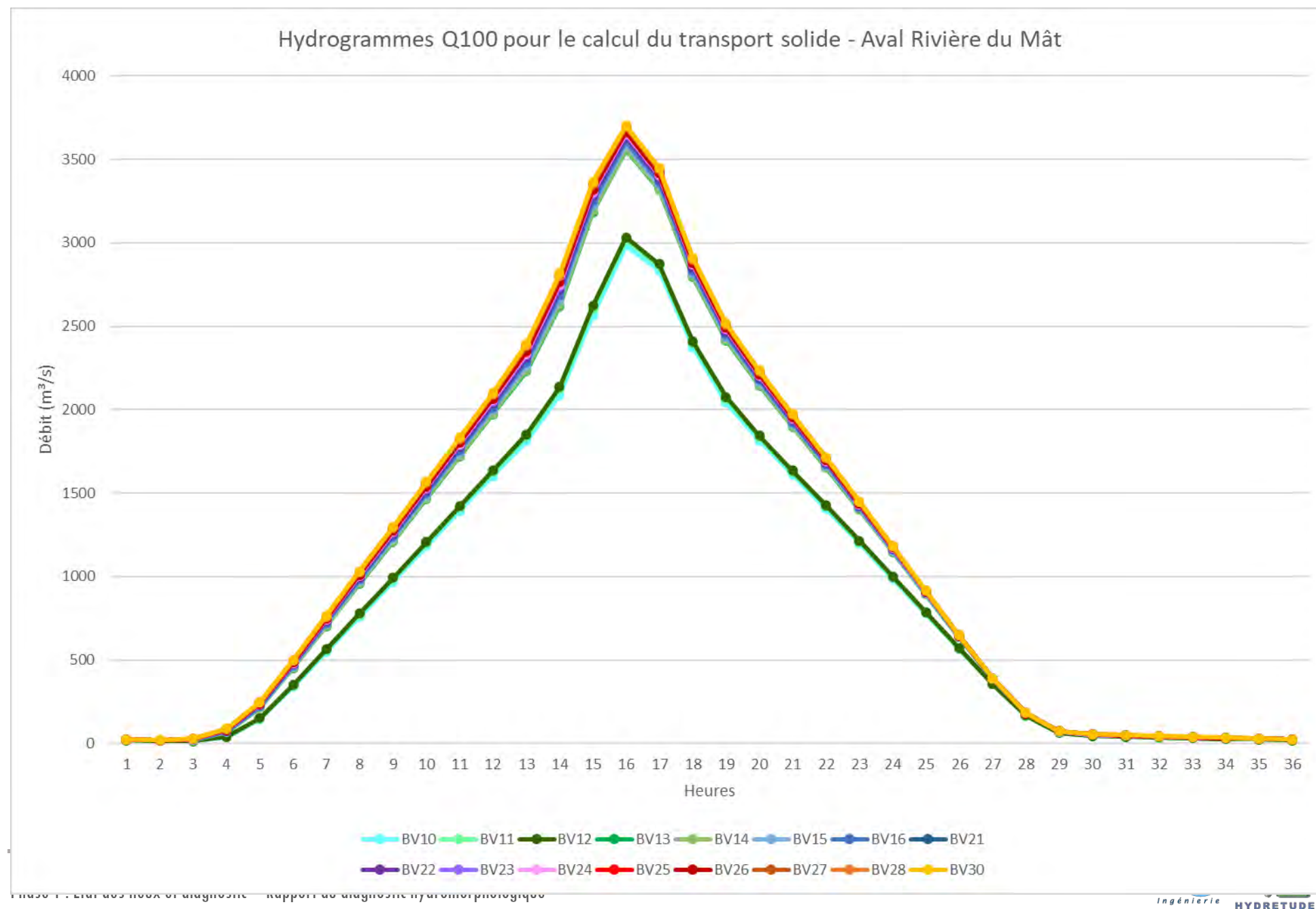


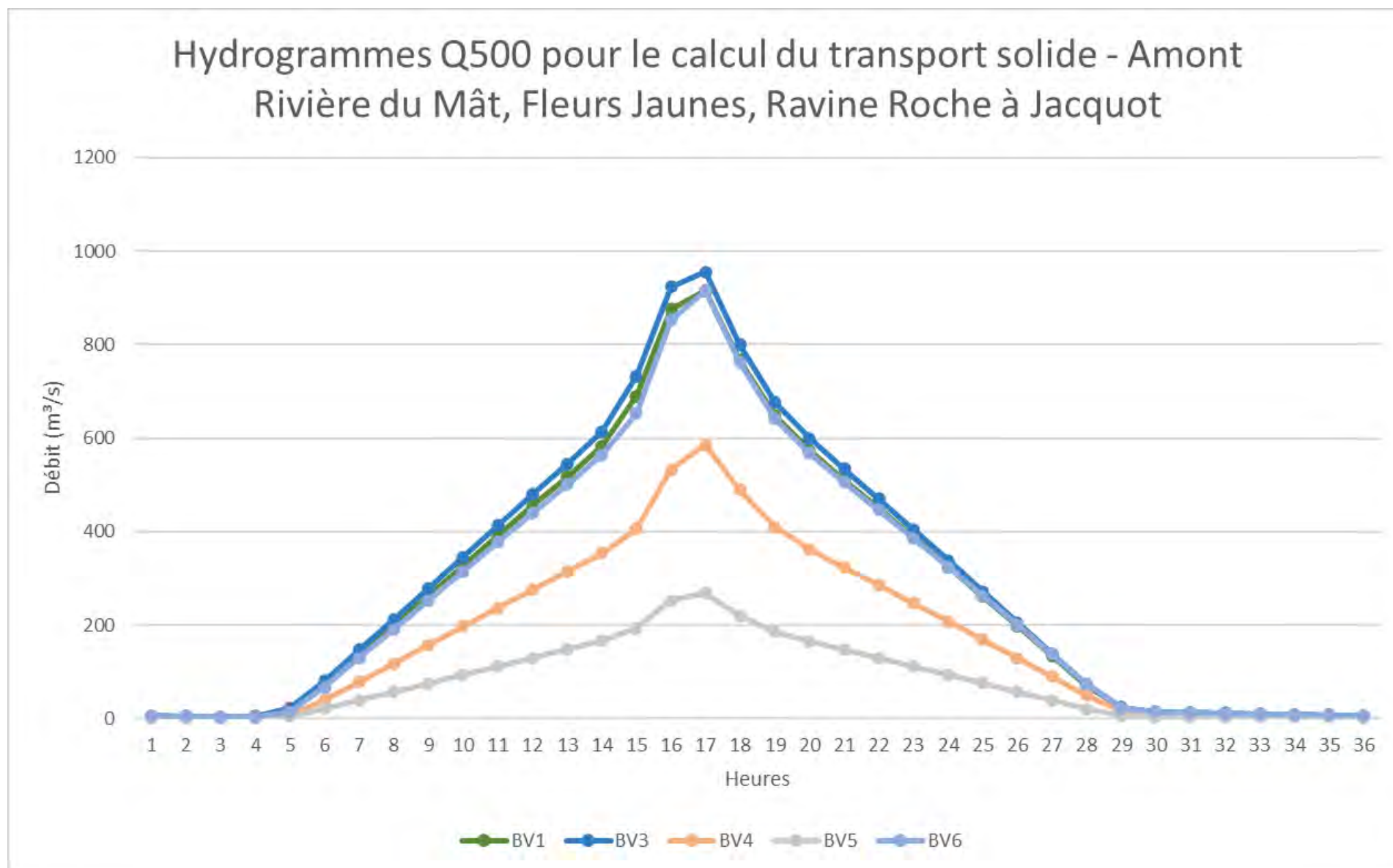


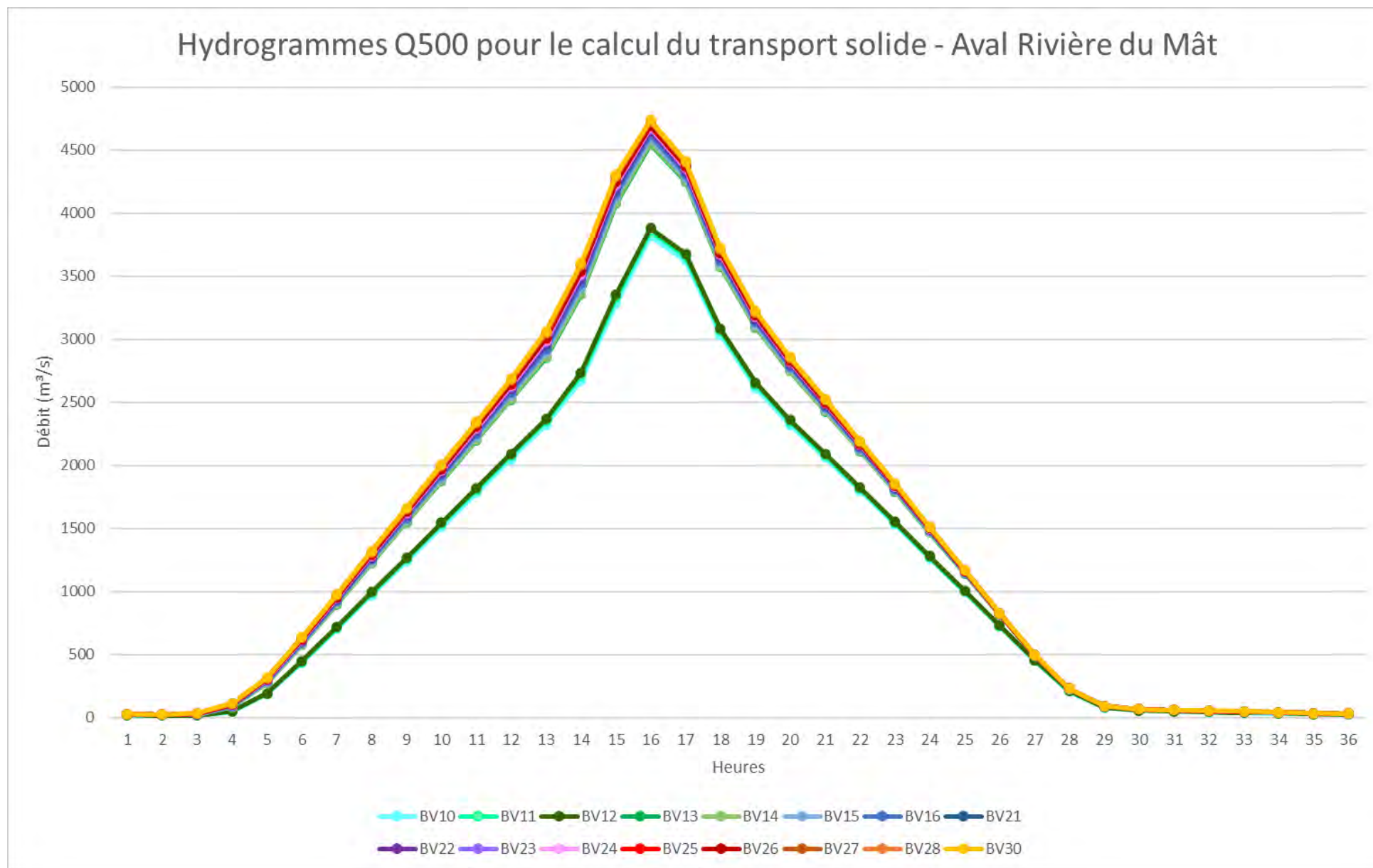












Annexe 10. Hydrogrammes Hyacinthe - 1980 (BRGM (2008) et ajusté par BRLi pour obtenir un pic de crue à 2500 m³)

Le calcul des capacités de charriage lors du cyclone Hyacinthe a été réalisé avec l'hydrogramme ajusté par BRLi. Un hydrogramme

Hydrogramme BRGM (2008) :

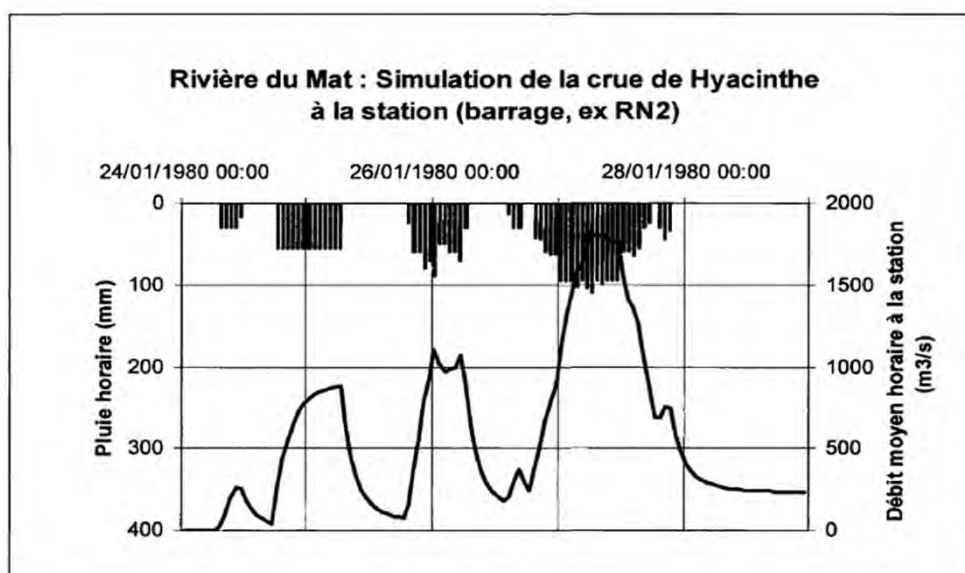
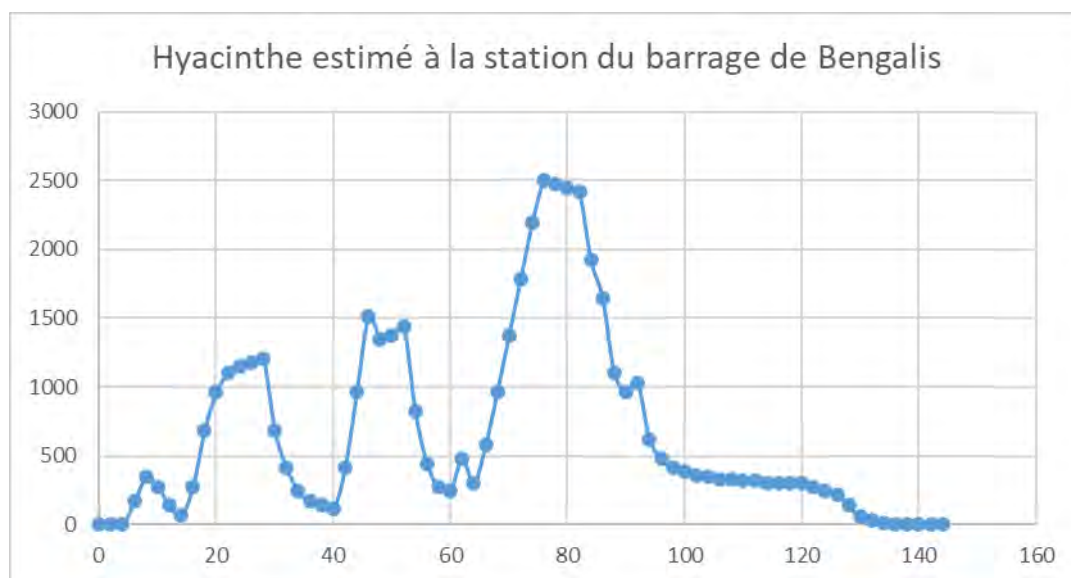


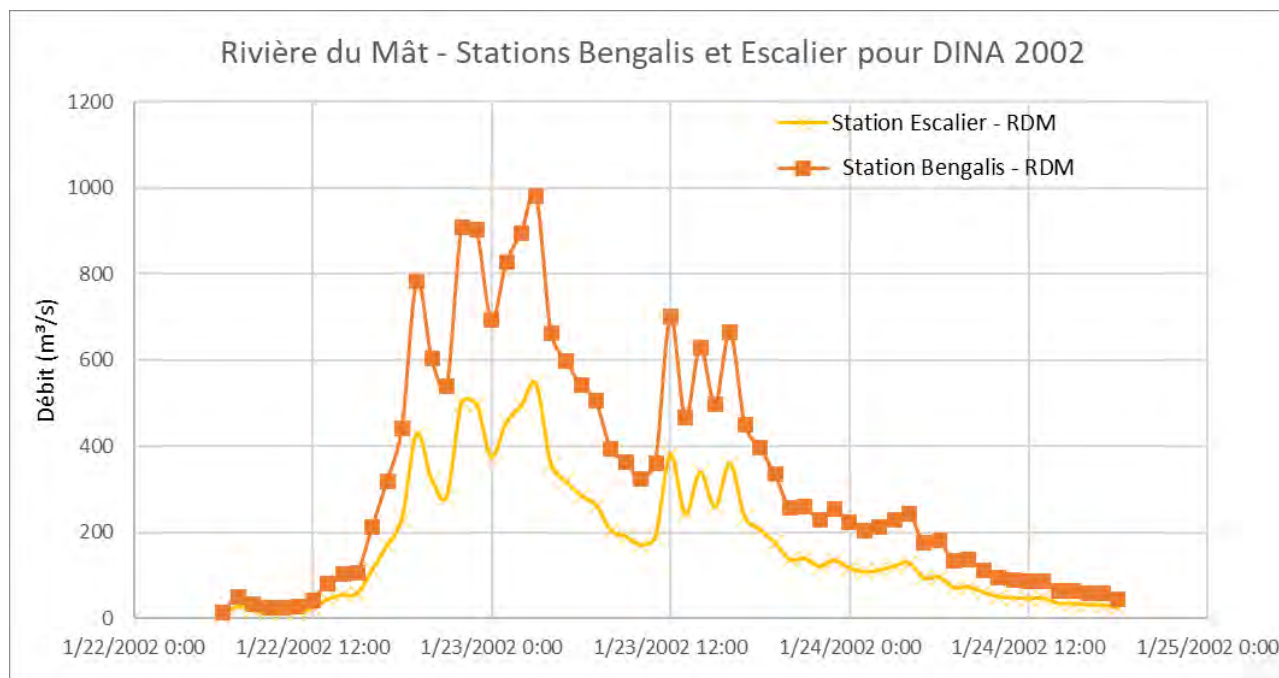
Illustration 38 : HYACINTHE : Hydrogramme simulé à partir d'un ietogramme reconstitué

Hydrogramme ajusté par BRLi :

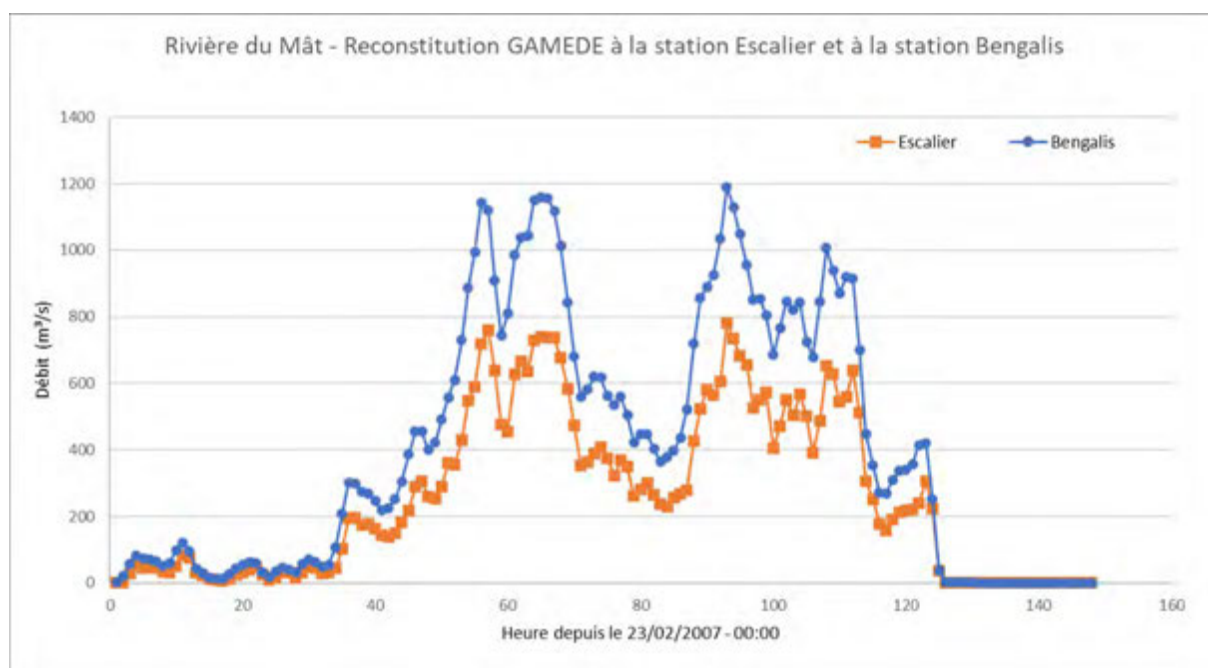
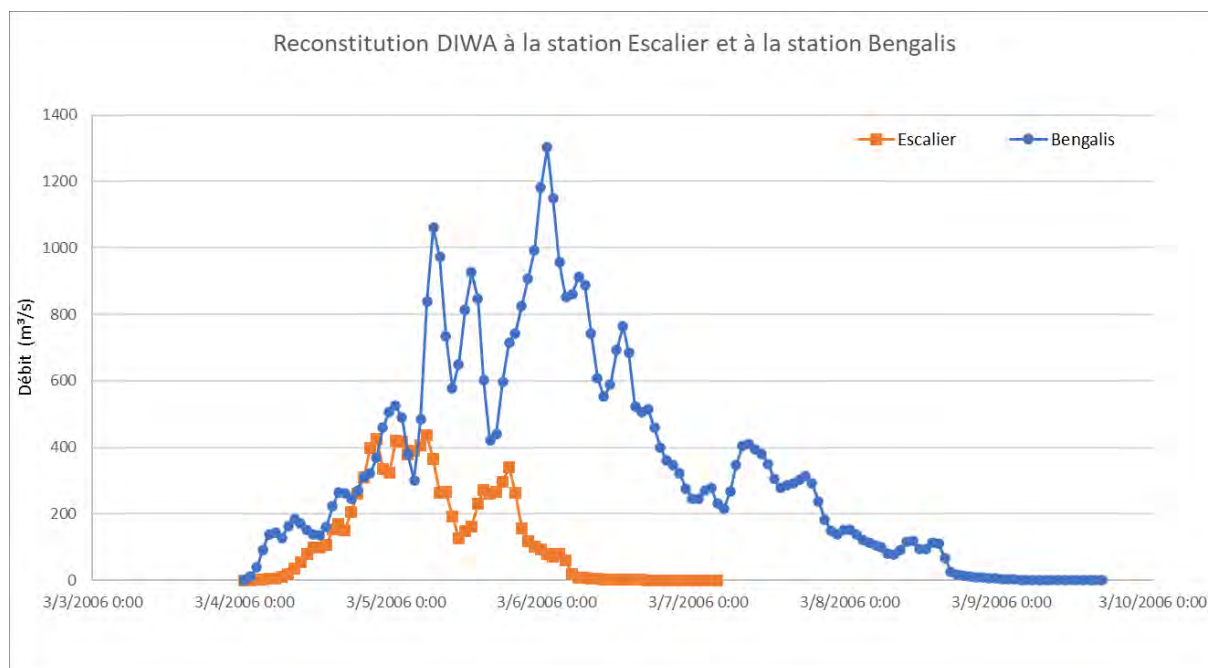


Annexe 11. Hydrogrammes Dina – 2002 – mesurés aux stations Escalier et Bengalis

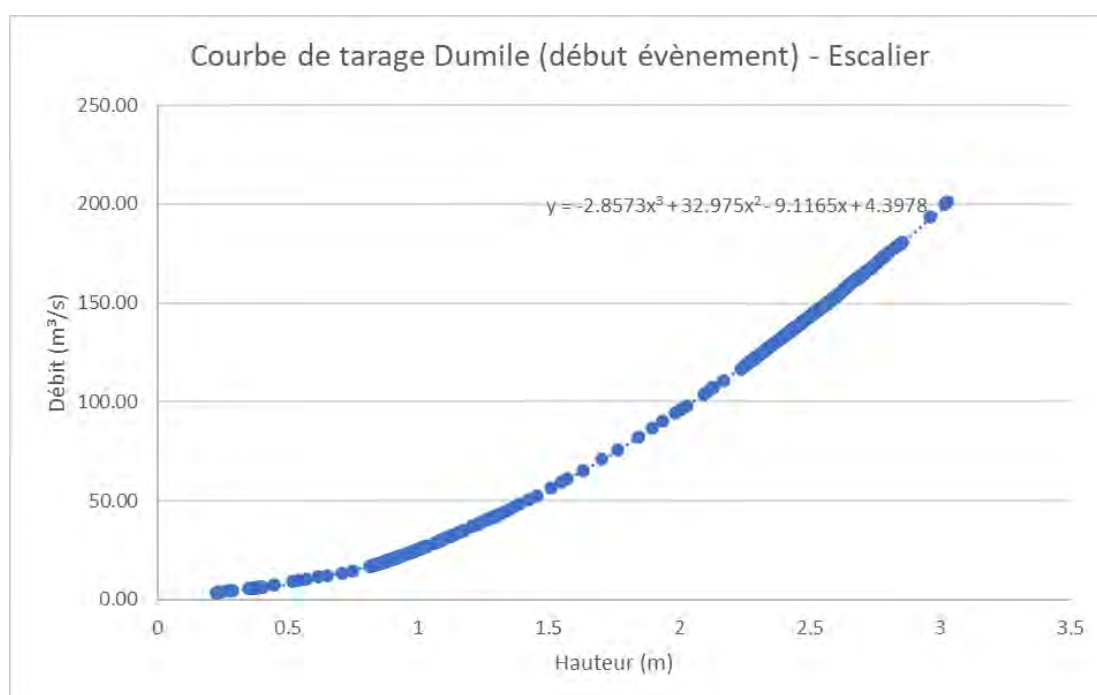
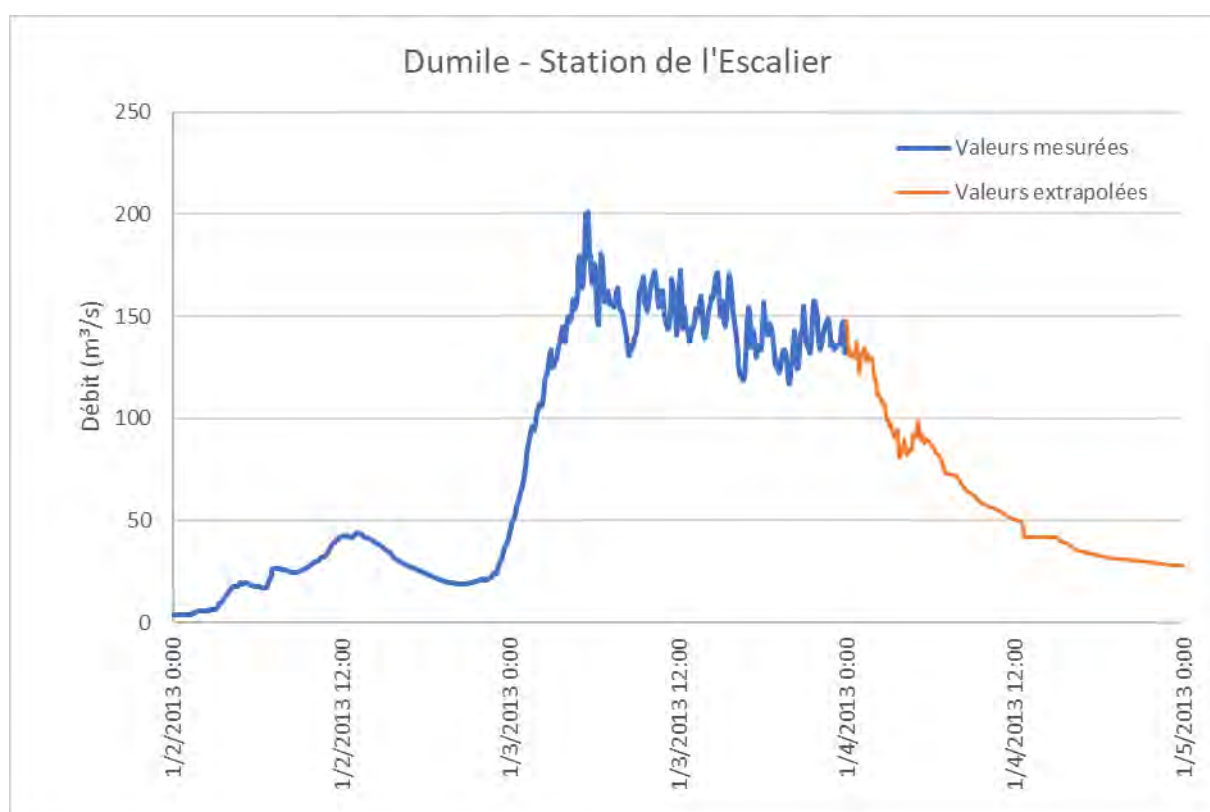
272

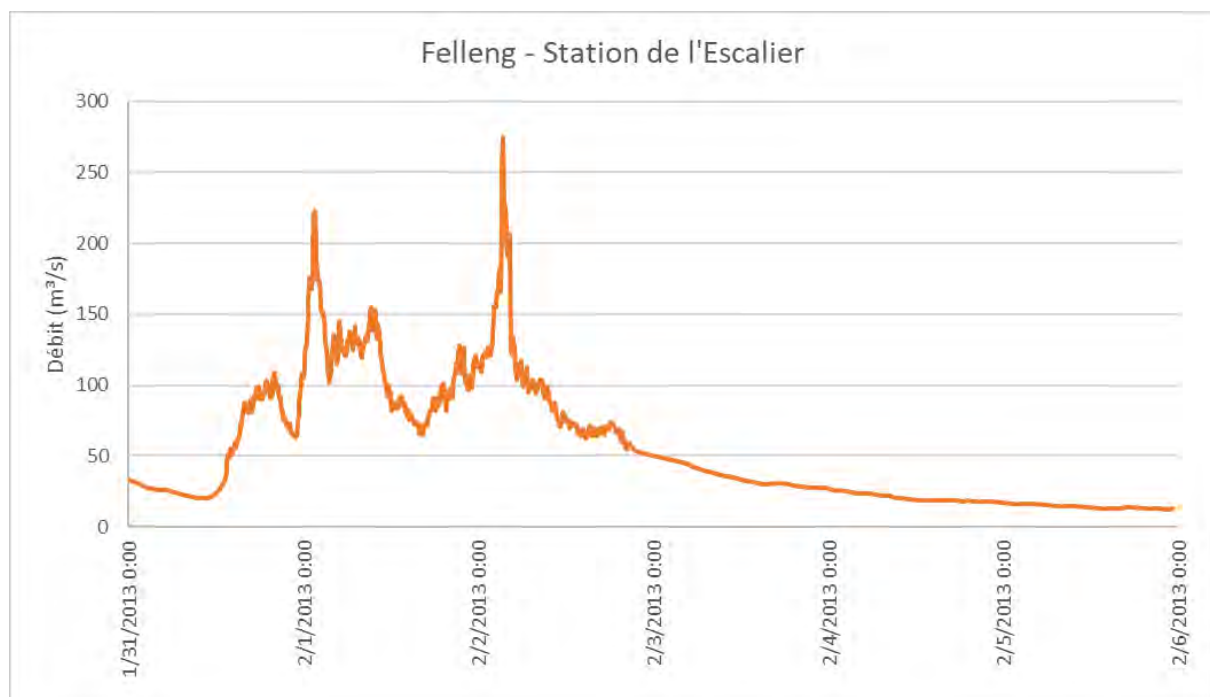
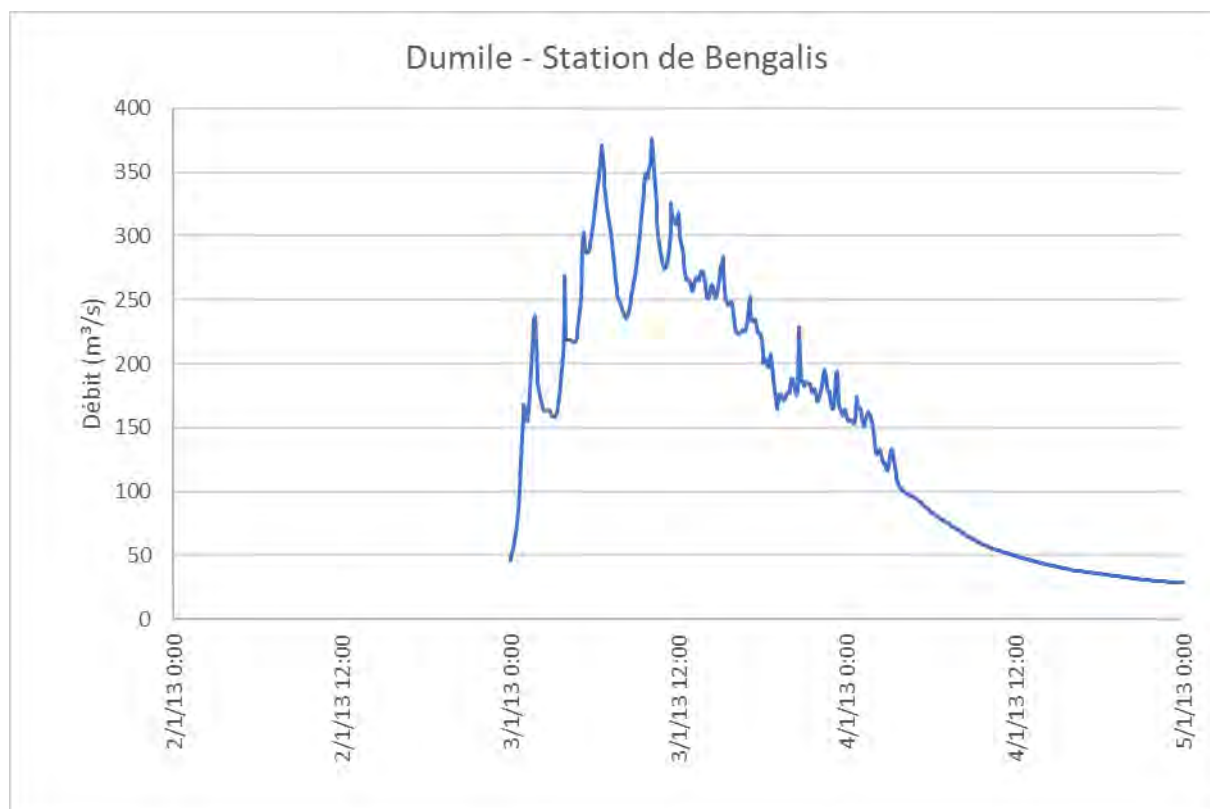


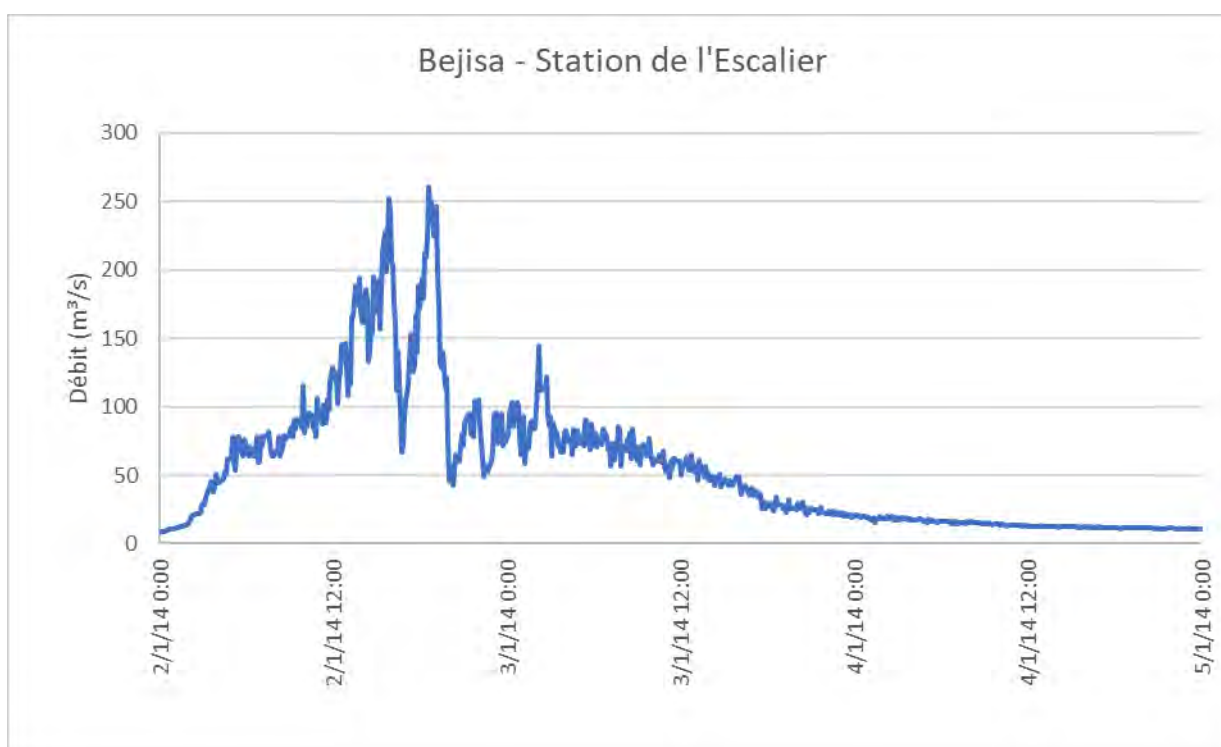
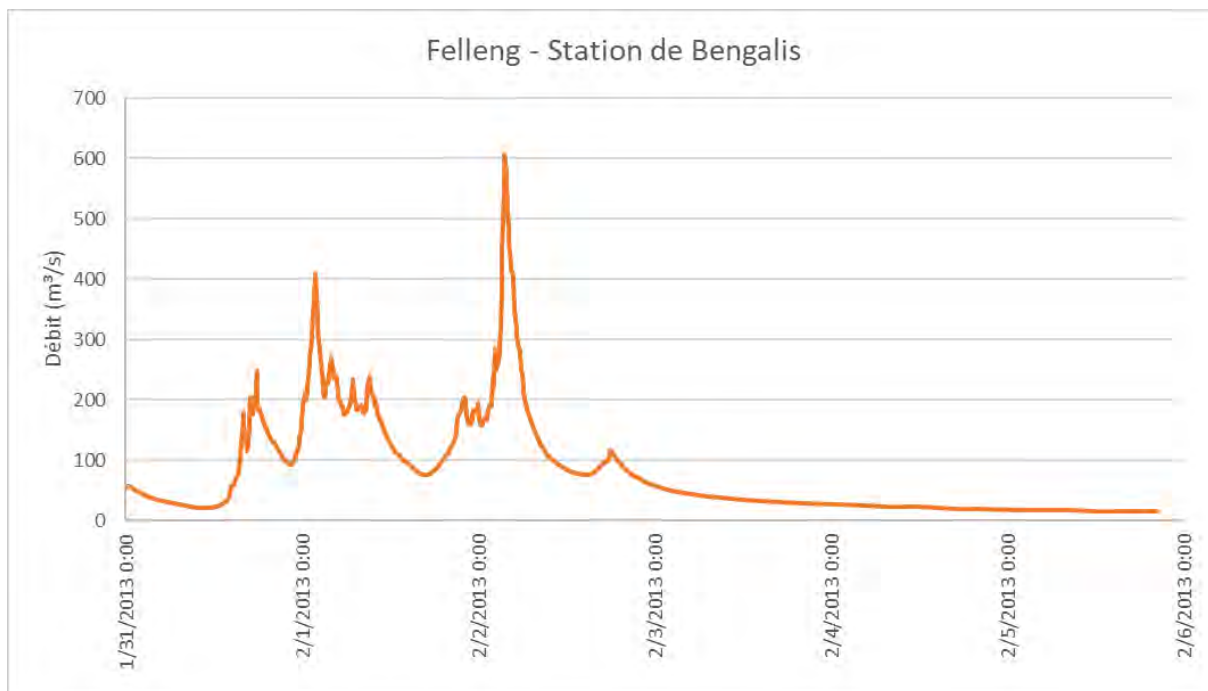
Annexe 12. Hydrogrammes Diwa et Gamède — mars 2006 et février 2007 — reconstitution MESRI aux stations Escalier et Bengalis

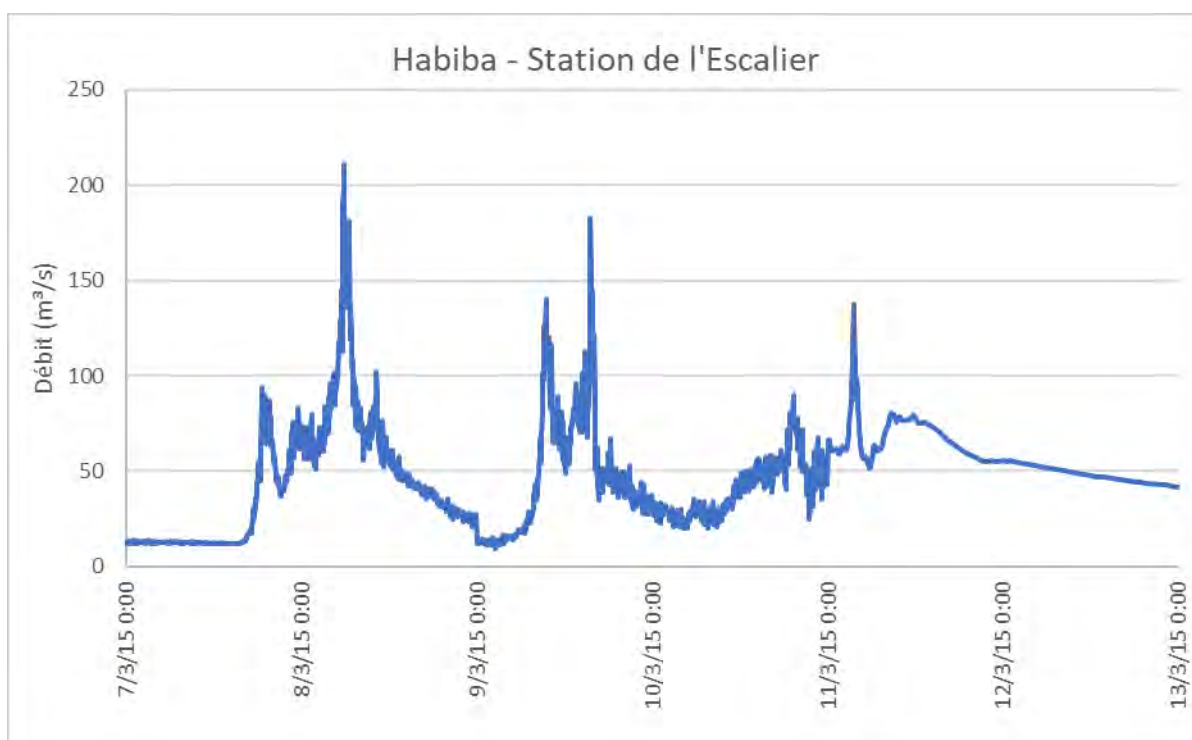
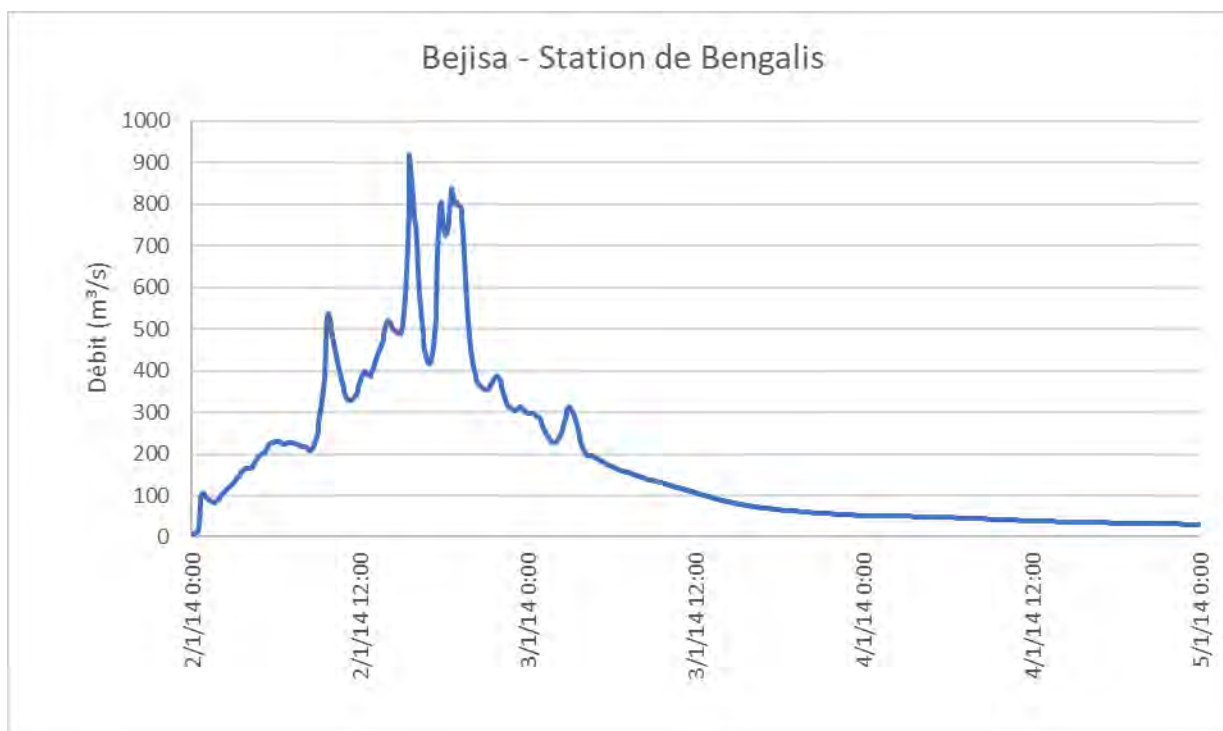


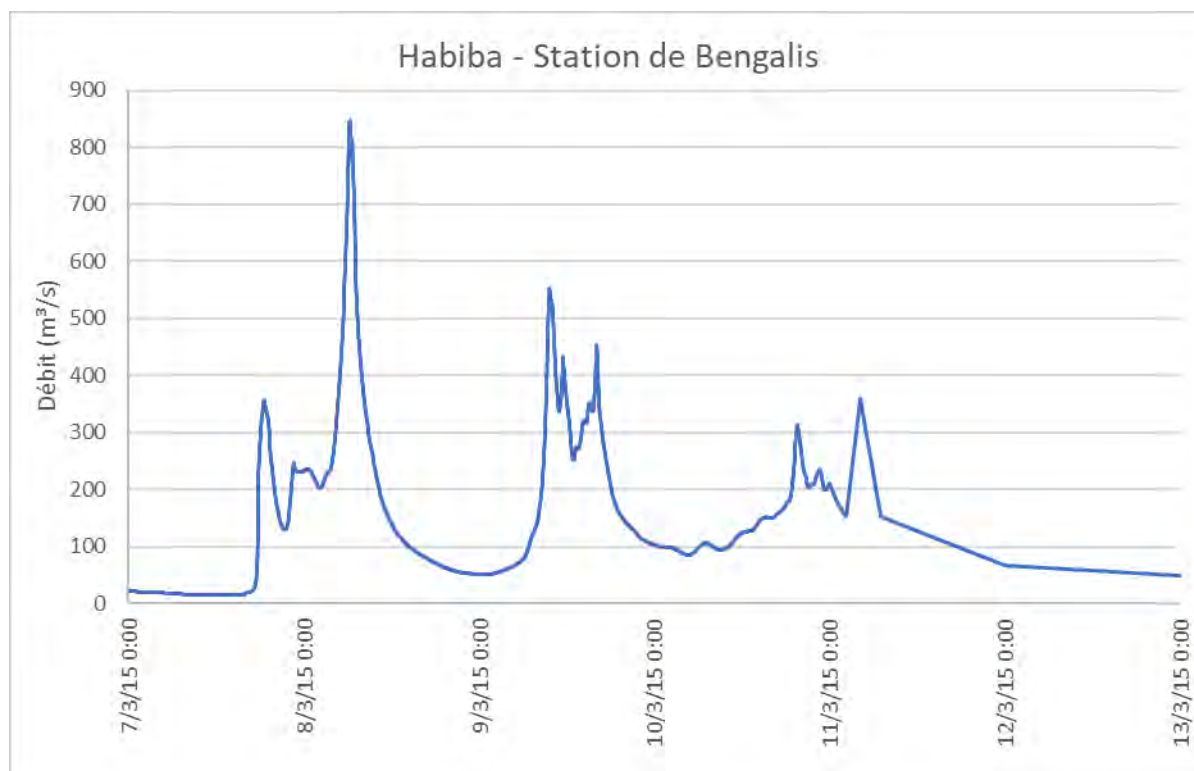
Annexe 13. Hydrogrammes Dumile, Felleng, Bejisa et Habiba – 2013, 2014 et 2015 –stations Escalier et Bengalis













Annexe 14. Capacités maximales de transport



CAPACITES MAXIMALES DE TRANSPORT – RECKING 2013												
Tronçon	Données d'entrée				Q20		Q50		Q100		Q500	
	Granulométrie	Hydrogramme de crue	Profil en travers	Pente	V réel (m3)	V apparent (m3)	V réel (m3)	V apparent (m3)	V réel (m3)	V apparent (m3)	V réel (m3)	V apparent (m3)
M2	MIX BRGM+HYDRETTES+ GONZALEZ	HYD23	PT1	0.029	30 761	40 758	62 591	82 933	82 492	109 301	122 281	162 022
	HYDRETTES M2	HYD23	PT1	0.029	90 784	120 289	158 521	210 040	198 708	263 288	276 840	366 813
	MIX BRGM+HYDRETTES+ GONZALEZ	HYD23	PT2	0.028	20 930	27 732	47 707	63 211	65 571	86 882	102 492	135 802
	HYDRETTES M2	HYD23	PT2	0.028	72 970	96 685	132 351	175 365	168 662	223 477	240 517	318 685
	MIX BRGM+HYDRETTES+ GONZALEZ	HYD22	PT3	0.033	25 137	33 307	49 522	65 617	63 438	84 056	89 261	118 271
	HYDRETTES M2	HYD22	PT3	0.033	84 108	111 443	139 417	184 728	169 242	224 245	223 383	295 983
FJ2	HYDRETTES aval FJ2	HYD25	PT4	0.052	185 390	245 642	322 931	427 883	403 974	535 265	557 174	738 256
	BRGM15	HYD25	PT4	0.052	7 138	9 458	18 042	23 905	26 140	34 635	43 336	57 420
RJ2	HYDRETTES aval RJ2	HYD26	PT5	0.034	1 629	2 159	4 099	5 432	6 147	8 144	11 023	14 605
	BRGM16	HYD26	PT5	0.034	881	1 167	2 298	3 045	3 523	4 668	6 561	8 693
FJ3	HYDRETTES amont FJ3	HYD24	PT6	0.037	56 218	74 489	85 601	113 421	102 164	135 368	133 484	176 866
	MIX BRGM+HYDRETTES	HYD24	PT6	0.037	36 439	48 282	59 779	79 207	72 764	96 413	97 349	128 988

CAPACITES MAXIMALES DE TRANSPORT – LEFORT 2017												
Tronçon	Données d'entrée				Q20		Q50		Q100		Q500	
	Granulométrie	Hydrogramme de crue	Profil en travers	Pente	V réel (m3)	V apparent (m3)	V réel (m3)	V apparent (m3)	V réel (m3)	V apparent (m3)	V réel (m3)	V apparent (m3)
M2	MIX BRGM+HYDRETTES+ GONZALEZ	HYD23	PT1	0.029	111 347	147 535	196 065	259 786	243 571	322 731	331 767	439 591
	HYDRETTES M2	HYD23	PT1	0.029	198 103	262 487	317 118	420 181	384 964	510 077	508 097	673 229
	MIX BRGM+HYDRETTES+ GONZALEZ	HYD23	PT2	0.028	91 677	121 472	160 092	212 122	199 418	264 229	273 766	362 740
	HYDRETTES M2	HYD23	PT2	0.028	181 506	240 495	282 958	374 920	339 107	449 317	443 438	587 555
	MIX BRGM+HYDRETTES+ GONZALEZ	HYD22	PT3	0.033	82 692	109 567	134 911	178 758	162 088	214 766	210 867	279 399
	HYDRETTES M2	HYD22	PT3	0.033	163 299	216 371	242 235	320 962	282 532	374 355	353 447	468 317
FJ2	HYDRETTES aval FJ2	HYD25	PT4	0.052	414 381	549 055	654 085	866 663	781 810	1 035 899	1 009 892	1 338 106
	BRGM15	HYD25	PT4	0.052	124 036	164 348	225 750	299 119	282 868	374 799	388 659	514 973
RJ2	HYDRETTES aval RJ2	HYD26	PT5	0.034	50 749	67 243	93 749	124 218	118 228	156 652	163 038	216 025
	BRGM16	HYD26	PT5	0.034	40 498	53 659	75 369	99 864	95 092	125 997	131 503	174 241
FJ3	HYDRETTES amont FJ3	HYD24	PT6	0.037	284 720	377 254	412 834	547 005	477 790	633 071	593 583	786 497
	MIX BRGM+HYDRETTES	HYD24	PT6	0.037	164 730	218 267	251 382	333 081	296 182	392 441	378 117	501 005

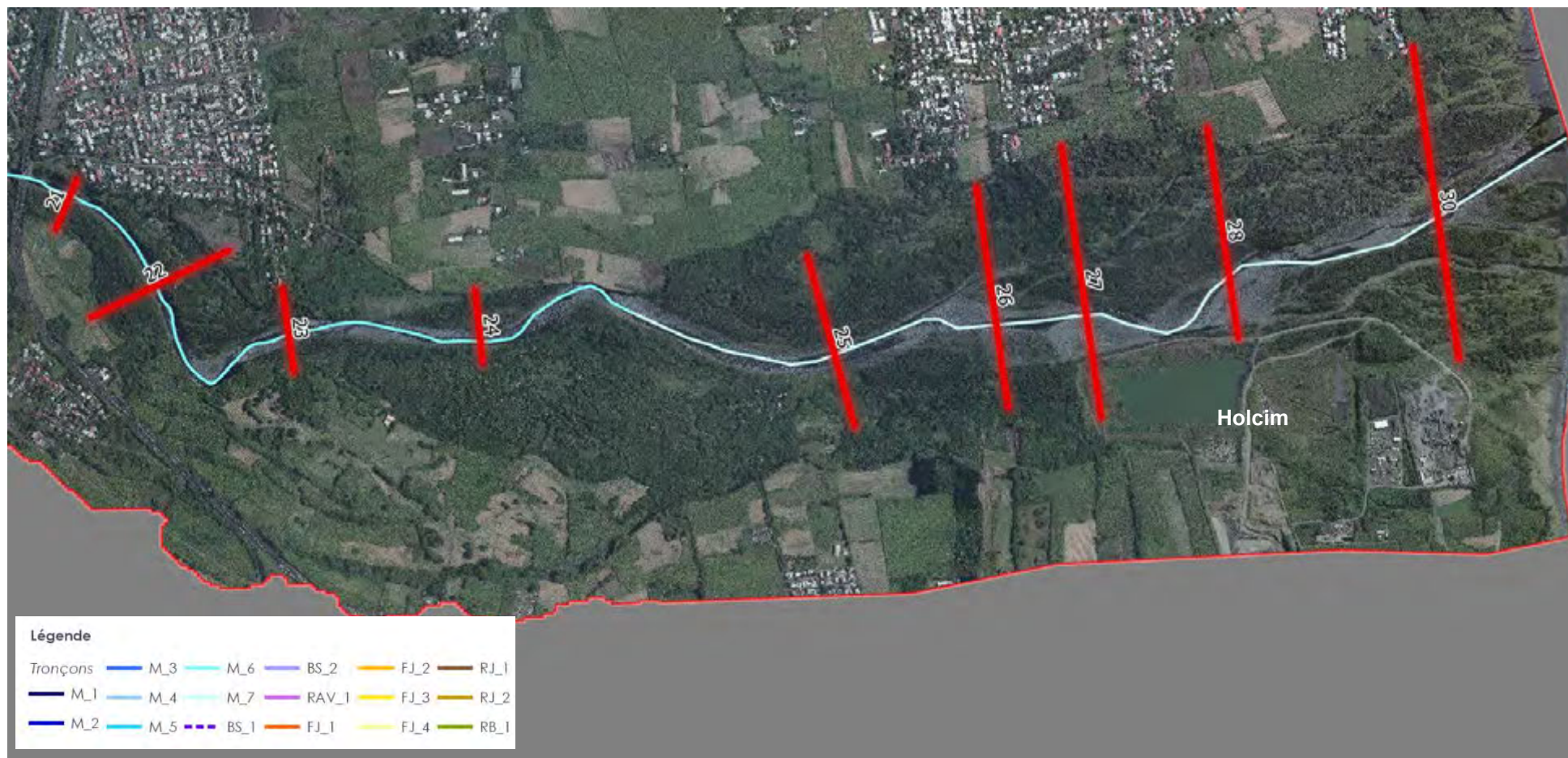


CAPACITES MAXIMALES DE TRANSPORT – RECKING 2013															
Tronçon	Données d'entrée					Annuel		Q20		Q50		Q100		Q500	
	Granulométrie	Débits classés	Hydrogramme de crue	Profil en travers	Pente	V réel (m3)	V apparent (m3)	V réel (m3)	V apparent (m3)	V réel (m3)	V apparent (m3)	V réel (m3)	V apparent (m3)	V réel (m3)	V apparent (m3)
M5 sans arasement Bengalis	BRGM 10_b	Escalier	HYD21	PT8	0.014	6 699	8 876	70 859	93 888	114 081	151 158	137 704	182 457	183 865	243 621
	BRGM 10_b	Escalier	HYD21	PT9	0.012	3 732	4 944	49 570	65 680	76 339	101 149	90 407	119 789	115 893	153 558
	BRGM 8-9	Escalier	HYD21	PT10	0.014	60 351	79 965	36 355	48 170	59 125	78 341	72 572	96 158	98 556	130 587
	HYDRETTUDES centre M5 (fine+grossière)	Escalier	HYD21	PT10	0.014	48 938	64 843	128 255	169 938	217 664	288 404	271 981	360 375	379 629	503 009
	BRGM 8-9	Escalier	HYD20	PT11	0.015	45 014	59 644	40 387	53 512	63 380	83 979	76 581	101 469	101 922	135 046
	HYDRETTUDES centre M5 (fine+grossière)	Escalier	HYD20	PT11	0.015	25 158	33 335	143 275	189 840	242 288	321 032	299 853	397 305	411 385	545 084
	BRGM 8-9	Escalier	HYD19	PT12	0.015	52 933	70 137	42 186	55 896	65 973	87 415	79 259	105 018	103 469	137 097
	HYDRETTUDES centre M5 (fine+grossière)	Escalier	HYD19	PT12	0.015	32 276	42 766	153 891	203 906	256 060	339 280	317 214	420 308	432 844	573 519
	BRGM 8-9	Bengalis	HYD18	PT13	0.015	112 816	149 481	56 705	75 134	84 406	111 838	98 905	131 050	125 019	165 650
	HYDRETTUDES centre M5 (fine+grossière)	Bengalis	HYD18	PT13	0.015	120 410	159 543	226 278	299 819	361 924	479 550	434 846	576 171	568 947	753 854
	HYDRETTUDES centre M5 (fine+grossière)	Bengalis	HYD17	PT14	0.013	70 243	93 072	182 964	242 427	314 888	417 227	394 170	522 276	549 752	728 422
	HYDRETTUDES aval M5	Bengalis	HYD17	PT14	0.013	6 422	8 509	76 670	101 587	133 841	177 339	167 779	222 307	233 705	309 659
	HYDRETTUDES aval M5	Bengalis	HYD16	PT15	0.010	4 064	5 385	46 721	61 906	78 314	103 767	95 076	125 976	125 652	166 489
	HYDRETTUDES aval M5	Bengalis	HYD15	PT16	0.012	7 879	10 439	49 949	66 182	79 221	104 968	95 425	126 439	127 111	168 422

CAPACITES MAXIMALES DE TRANSPORT – RECKING 2013															
Tronçon	Données d'entrée					Annuel		Q20		Q50		Q100		Q500	
	Granulométrie	Débits classés	Hydrogramme de crue	Profil en travers	Pente	V réel (m3)	V apparent (m3)	V réel (m3)	V apparent (m3)	V réel (m3)	V apparent (m3)	V réel (m3)	V apparent (m3)	V réel (m3)	V apparent (m3)
M5 avec arasement Bengalis et équilibre sur 4.2 km	BRGM 10_b	Escalier	HYD21	PT8	0.014	6 699	8 876	70 859	93 888	114 081	151 158	137 704	182 457	183 865	243 621
	BRGM 10_b	Escalier	HYD21	PT9	0.012	3 732	4 944	49 570	65 680	76 339	101 149	90 407	119 789	115 893	153 558
	BRGM 8-9	Escalier	HYD21	PT10	0.017	80 615	106 815	52 586	69 677	85 235	112 936	104 557	138 538	141 988	188 134
	HYDRETUDES centre M5 (fine+grossière)	Escalier	HYD21	PT10	0.017	68 522	90 792	183 644	243 328	311 102	412 210	387 871	513 930	541 242	717 146
	BRGM 8-9	Escalier	HYD20	PT11	0.017	51 740	68 555	51 442	68 161	80 740	106 981	97 435	129 101	129 562	171 669
	HYDRETUDES centre M5 (fine+grossière)	Escalier	HYD20	PT11	0.017	31 075	41 174	180 183	238 742	305 604	404 926	378 394	501 372	519 276	688 041
	BRGM 8-9	Escalier	HYD19	PT12	0.017	61 545	81 547	53 767	71 242	84 192	111 554	101 061	133 906	132 290	175 284
	HYDRETUDES centre M5 (fine+grossière)	Escalier	HYD19	PT12	0.017	39 525	52 370	194 692	257 968	323 191	428 228	400 493	530 653	547 473	725 402
	BRGM 8-9	Bengalis	HYD18	PT13	0.017	137 791	182 574	72 804	96 465	108 682	144 004	127 259	168 618	161 009	213 337
	HYDRETUDES centre M5 (fine+grossière)	Bengalis	HYD18	PT13	0.017	149 817	198 508	286 944	380 200	461 110	610 971	555 053	735 445	726 398	962 478
	HYDRETUDES centre M5 (fine+grossière)	Bengalis	HYD17	PT14	0.017	112 002	148 403	298 137	395 032	513 412	680 271	642 874	851 808	897 652	1 189 390
	HYDRETUDES aval M5	Bengalis	HYD17	PT14	0.017	10 269	13 606	125 197	165 886	218 789	289 895	274 499	363 712	383 055	507 548
	HYDRETUDES aval M5	Bengalis	HYD16	PT15	0.017	11 028	14 613	126 219	167 240	213 972	283 513	263 520	349 164	353 942	468 973
	HYDRETUDES aval M5	Bengalis	HYD15	PT16	0.017	14 271	18 910	94 287	124 930	149 171	197 652	179 770	238 195	237 642	314 875

CAPACITES MAXIMALES DE TRANSPORT – LEFORT 2017															
Tronçon	Données d'entrée					Annuel		Q20		Q50		Q100		Q500	
	Granulométrie	Débits classés	Hydrogramme de crue	Profil en travers	Pente	V réel (m3)	V apparent (m3)	V réel (m3)	V apparent (m3)	V réel (m3)	V apparent (m3)	V réel (m3)	V apparent (m3)	V réel (m3)	V apparent (m3)
M5 sans arasement Bengalis	BRGM 10_b	Escalier	HYD21	PT8	0.014	40 336	53 446	231 523	306 768	358 400	474 880	423 797	561 531	541 804	717 890
	BRGM 10_b	Escalier	HYD21	PT9	0.012	5 247	6 953	98 979	131 148	148 711	197 043	174 043	230 607	219 276	290 541
	BRGM 8-9	Escalier	HYD21	PT10	0.014	382	506	96 301	127 599	169 804	224 990	212 194	281 157	293 286	388 605
	HYDRETTUDES centre M5 (fine+grosnière)	Escalier	HYD21	PT10	0.014	46 758	61 954	212 841	282 014	324 684	430 206	385 496	510 782	498 267	660 204
	BRGM 8-9	Escalier	HYD20	PT11	0.015	153	203	77 819	103 110	145 948	193 382	185 517	245 809	260 951	345 760
	HYDRETTUDES centre M5 (fine+grosnière)	Escalier	HYD20	PT11	0.015	39 618	52 494	218 605	289 652	340 897	451 689	407 279	539 645	529 554	701 659
	BRGM 8-9	Escalier	HYD19	PT12	0.015	177	234	91 058	120 652	161 077	213 428	199 651	264 538	270 716	358 699
	HYDRETTUDES centre M5 (fine+grosnière)	Escalier	HYD19	PT12	0.015	31 439	41 657	225 526	298 822	348 537	461 811	414 298	548 944	532 484	705 541
	BRGM 8-9	Bengalis	HYD18	PT13	0.015	6 006	7 959	167 845	222 394	265 602	351 923	317 325	420 456	411 329	545 011
	HYDRETTUDES centre M5 (fine+grosnière)	Bengalis	HYD18	PT13	0.015	134 465	178 167	336 016	445 221	497 632	659 362	579 959	768 445	725 990	961 937
	HYDRETTUDES centre M5 (fine+grosnière)	Bengalis	HYD17	PT14	0.013	56 361	74 678	232 557	308 139	370 720	491 203	447 410	592 818	590 840	782 863
	HYDRETTUDES aval M5	Bengalis	HYD17	PT14	0.013	11 418	15 129	166 427	220 515	277 798	368 083	340 794	451 552	459 801	609 236
	HYDRETTUDES aval M5	Bengalis	HYD16	PT15	0.010	6 273	8 312	102 767	136 166	171 443	227 162	209 591	277 708	279 947	370 929
	HYDRETTUDES aval M5	Bengalis	HYD15	PT16	0.012	14 204	18 821	137 223	181 821	216 343	286 655	258 593	342 636	335 839	444 987

CAPACITES MAXIMALES DE TRANSPORT – LEFORT 2017															
Tronçon	Données d'entrée					Annuel		Q20		Q50		Q100		Q500	
	Granulométrie	Débits classés	Hydrogramme de crue	Profil en travers	Pente	V réel (m3)	V apparent (m3)	V réel (m3)	V apparent (m3)	V réel (m3)	V apparent (m3)	V réel (m3)	V apparent (m3)	V réel (m3)	V apparent (m3)
M5 avec arasement Bengalis et équilibre sur 4.2 km	BRGM 10_b	Escalier	HYD21	PT8	0.014	40 336	53 446	231 523	306 768	358 400	474 880	423 797	561 531	541 804	717 890
	BRGM 10_b	Escalier	HYD21	PT9	0.012	5 247	6 953	98 979	131 148	148 711	197 043	174 043	230 607	219 276	290 541
	BRGM 8-9	Escalier	HYD21	PT10	0.017	628	832	156 740	207 680	267 112	353 924	329 952	437 186	449 066	595 012
	HYDRETTUDES centre M5 (fine+grossière)	Escalier	HYD21	PT10	0.017	80 752	106 996	311 323	412 503	470 090	622 869	555 864	736 520	714 473	946 677
	BRGM 8-9	Escalier	HYD20	PT11	0.017	212	282	109 901	145 619	200 421	265 558	252 257	334 240	350 430	464 319
	HYDRETTUDES centre M5 (fine+grossière)	Escalier	HYD20	PT11	0.017	60 726	80 462	280 786	372 042	434 722	576 006	518 134	686 527	671 517	889 760
	BRGM 8-9	Escalier	HYD19	PT12	0.017	240	319	127 163	168 491	220 040	291 554	270 684	358 656	363 937	482 216
	HYDRETTUDES centre M5 (fine+grossière)	Escalier	HYD19	PT12	0.017	47 155	62 481	288 397	382 127	443 604	587 776	526 351	697 414	675 181	894 614
	BRGM 8-9	Bengalis	HYD18	PT13	0.017	8 247	10 928	228 145	302 292	356 629	472 533	423 750	561 468	545 467	722 743
	HYDRETTUDES centre M5 (fine+grossière)	Bengalis	HYD18	PT13	0.017	184 438	244 381	427 287	566 155	632 064	837 484	736 058	975 277	919 913	1 218 885
	HYDRETTUDES centre M5 (fine+grossière)	Bengalis	HYD17	PT14	0.017	120 900	160 192	385 864	511 270	607 490	804 924	729 666	966 808	957 451	1 268 623
	HYDRETTUDES aval M5	Bengalis	HYD17	PT14	0.017	34 157	45 259	289 286	383 304	472 341	625 852	574 970	761 836	767 774	1 017 301
	HYDRETTUDES aval M5	Bengalis	HYD16	PT15	0.017	60 967	80 781	314 321	416 475	501 661	664 701	604 275	800 664	793 536	1 051 435
	HYDRETTUDES aval M5	Bengalis	HYD15	PT16	0.017	49 178	65 161	270 625	358 578	417 820	553 611	495 794	656 927	637 208	844 301



CAPACITES MAXIMALES DE TRANSPORT – RECKING 2013															
Tronçon	Données d'entrée					Annuel		Q20		Q50		Q100		Q500	
	Granulométrie	Débits classés	Hydrogramme de crue	Profil en travers	Pente	V réel (m3)	V apparent (m3)	V réel (m3)	V apparent (m3)	V réel (m3)	V apparent (m3)	V réel (m3)	V apparent (m3)	V réel (m3)	V apparent (m3)
M6	HYDRETTUDES centre M6	Bengalis	HYD10	PT21	0.016	5 183	6 867	59 251	78 507	94 784	125 589	114 634	151 890	152 109	201 545
	BRGM 5	Bengalis	HYD9	PT22	0.011	1 782	2 361	27 467	36 393	43 756	57 976	52 106	69 040	66 712	88 393
	HYDRETTUDES centre M6	Bengalis	HYD9	PT22	0.011	1 466	1 942	27 535	36 483	44 304	58 667	52 916	70 114	68 021	90 128
	BRGM 5	Bengalis	HYD8	PT23	0.014	3 091	4 096	50 785	67 290	78 448	103 944	95 210	126 153	128 632	170 437
	HYDRETTUDES centre M6	Bengalis	HYD8	PT23	0.014	2 573	3 409	50 519	66 937	78 811	104 424	95 999	127 199	130 262	172 597
	BRGM 3-4	Bengalis	HYD8	PT23	0.014	12 955	17 166	55 156	73 082	82 902	109 846	99 120	131 335	131 172	173 803
	BRGM 5	Bengalis	HYD7	PT24	0.016	5 237	6 939	72 450	95 996	118 712	157 294	143 426	190 040	188 510	249 775
	BRGM 3-4	Bengalis	HYD7	PT24	0.016	19 352	25 642	74 069	98 142	116 656	154 569	139 333	184 616	180 799	239 559
M7	HYDRETTUDES amont M7	Bengalis	HYD6	PT25	0.015	24 214	32 083	88 047	116 662	145 239	192 441	178 316	236 269	241 857	320 460
	BRGM 2	Bengalis	HYD6	PT25	0.015	11 060	14 655	64 656	85 669	106 592	141 235	130 599	173 044	176 165	233 418
	HYDRETTUDES amont M7	Bengalis	HYD5	PT26	0.017	3 382	4 481	40 642	53 850	73 093	96 848	91 919	121 793	127 621	169 098
	BRGM 2	Bengalis	HYD5	PT26	0.017	808	1 070	16 895	22 385	35 860	47 515	47 901	63 469	71 658	94 947
	HYDRETTUDES amont M7	Bengalis	HYD4	PT27	0.017	7 369	9 764	27 277	36 142	43 437	57 554	54 917	72 766	79 365	105 159
	BRGM 2	Bengalis	HYD4	PT27	0.017	1 512	2 004	7 372	9 767	14 904	19 747	21 258	28 167	35 592	47 159
	HYDRETTUDES centre M7	Bengalis	HYD3	PT28	0.017	4 954	6 565	107 338	142 223	167 830	222 375	196 863	260 843	246 162	326 165
	BRGM 1	Bengalis	HYD3	PT28	0.017	1 139	1 510	53 813	71 302	90 614	120 064	108 807	144 170	140 073	185 597
	HYDRETTUDES centre M7	Bengalis	HYD1	PT30	0.015	8 334	11 043	21 080	27 932	38 396	50 874	48 033	63 643	67 012	88 791
	BRGM 1	Bengalis	HYD1	PT30	0.015	1 427	1 891	5 989	7 936	12 811	16 975	17 435	23 102	27 285	36 153

CAPACITES MAXIMALES DE TRANSPORT – LEFORT 2017															
Tronçon	Données d'entrée					Annuel		Q20		Q50		Q100		Q500	
	Granulométrie	Débits classés	Hydrogramme de crue	Profil en travers	Pente	V réel (m3)	V apparent (m3)	V réel (m3)	V apparent (m3)	V réel (m3)	V apparent (m3)	V réel (m3)	V apparent (m3)	V réel (m3)	V apparent (m3)
M6	HYDRETTES centre M6	Bengalis	HYD10	PT21	0.016	4 903	6 496	127 461	168 885	203 243	269 297	243 268	322 331	315 697	418 299
	BRGM 5	Bengalis	HYD9	PT22	0.011	520	689	63 074	83 572	102 568	135 903	122 715	162 597	158 015	209 370
	HYDRETTES centre M6	Bengalis	HYD9	PT22	0.011	369	489	50 037	66 299	82 106	108 725	98 503	130 517	127 340	168 726
	BRGM 5	Bengalis	HYD8	PT23	0.014	1 422	1 885	164 849	218 425	259 921	344 395	309 689	410 338	400 188	530 249
	HYDRETTES centre M6	Bengalis	HYD8	PT23	0.014	1 009	1 336	131 848	174 698	209 335	277 368	249 960	331 197	323 910	429 180
	BRGM 3-4	Bengalis	HYD8	PT23	0.014	1 270	1 682	178 901	237 043	292 545	387 622	349 917	463 640	454 124	601 714
	BRGM 5	Bengalis	HYD7	PT24	0.016	7 222	9 570	180 578	239 265	282 290	374 034	334 650	443 412	428 067	567 189
	BRGM 3-4	Bengalis	HYD7	PT24	0.016	3 845	5 094	198 049	262 415	312 046	413 461	370 873	491 407	476 019	630 725
M7	HYDRETTES amont M7	Bengalis	HYD6	PT25	0.015	5 034	6 670	210 076	278 351	340 023	450 531	408 940	541 846	532 489	705 548
	BRGM 2	Bengalis	HYD6	PT25	0.015	1 734	2 297	220 566	292 250	359 561	476 418	433 244	574 048	565 493	749 279
	HYDRETTES amont M7	Bengalis	HYD5	PT26	0.017	4 227	5 600	108 960	144 372	173 278	229 594	207 994	275 593	271 513	359 755
	BRGM 2	Bengalis	HYD5	PT26	0.017	1 367	1 811	109 578	145 191	177 672	235 415	214 586	284 326	282 510	374 326
	HYDRETTES amont M7	Bengalis	HYD4	PT27	0.017	24 620	32 622	170 434	225 825	236 670	313 588	272 447	360 992	340 406	451 038
	BRGM 2	Bengalis	HYD4	PT27	0.017	15 364	20 357	159 610	211 483	226 937	300 692	265 461	351 736	338 010	447 864
	HYDRETTES centre M7	Bengalis	HYD3	PT28	0.017	123 910	164 180	334 853	443 680	469 305	621 828	530 682	703 154	631 975	837 367
	BRGM 1	Bengalis	HYD3	PT28	0.017	23 627	31 306	253 793	336 276	362 880	480 817	412 958	547 169	496 229	657 504
	HYDRETTES centre M7	Bengalis	HYD1	PT30	0.015	71 144	94 266	151 500	200 738	224 798	297 857	262 379	347 652	328 794	435 652
	BRGM 1	Bengalis	HYD1	PT30	0.015	9 068	12 015	95 665	126 756	151 055	200 147	180 167	238 721	232 537	308 112

