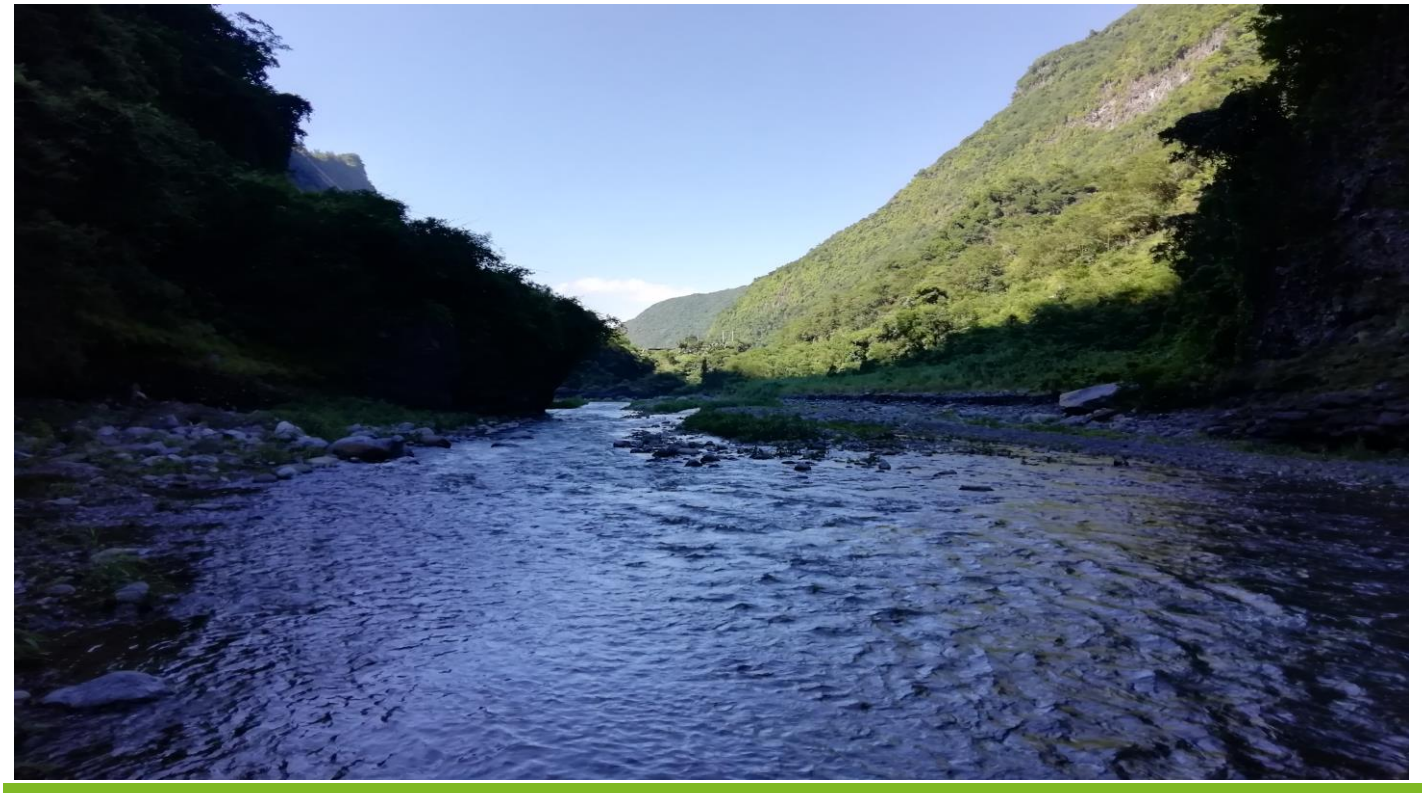
Sécurisation de la RN5 – Route du Cilaos

Secteur Les Aloès / Îlet Furcy

PR6+000 au PR12+200

Mission Complémentaire n°1 : Actualisation de l'étude hydraulique (MC1) -

APSIQ 2010 et analyse des variantes



ROOF02402

Décembre 2019

Informations qualité

Contrôle qualité

Version	Date	Rédigé par	Visé par :
Rapport provisoire	15 avril 2019	Clément Chetoui	Christophe Lescoulier
Rapport définitif	10 mai 2019	Clément Chetoui	Christophe Lescoulier
Rapport définitif V2	12 juillet 2019	Clément Chetoui	Christophe Lescoulier
Rapport définitif V3	12 décembre 2019	Clément Chetoui	Christophe Lescoulier

Destinataires

Envoyé à :		
Nom	Organisme	Envoyé le :
	Région Réunion	12 juillet 2019

Copie à :		
Nom	Organisme	Envoyé le :

Sommaire

1. Contexte et objectifs de l'étude hydraulique 15

2. Analyse et synthèse des données existantes 18

2.1 Inventaire des études réalisées 18

2.2 Inventaire des données cartographiques et topographiques disponibles 20

2.3 Analyse des études antérieures 21

2.4 Analyse des données cartographiques et topographiques 22

3. Etat des lieux pluridisciplinaire de la rivière 24

3.1 Enjeux humains et matériels 24

3.2 Protections existantes contre les crues 26

3.3 Géologie des terrains du Bras de Cilaos 27

4. Analyse historique 32

5. Analyse hydrologique 39

5.1 Description générale du bassin versant 39

5.2 Analyse des pluies 41

5.2.1 Postes pluviométriques étudiés 41
5.2.2 Ajustements statistiques 43
5.2.3 Pivots retenus et groupes de stations homogènes 44
5.2.4 Pluies journalières caractéristiques 47
5.2.5 Comparaison de la station de Cilaos avec les autres stations 47

5.3 Débits caractéristiques de crue 49

5.3.1 Estimation des débits de pointe de crue 49

5.4 Modélisation pluie-débit 53

5.4.1 Découpage en sous-bassins versants 53
5.4.2 Données pluviographiques utilisées 55
5.4.3 Pluviométrie affectée aux différents sous bassins versant 56
5.4.4 Données de calage disponibles (SOGREAH, 2009) 57
5.4.5 Fonctions de production et de transfert adoptées 58
5.4.6 Fonction de propagation 60
5.4.7 Synthèse des résultats pour les évènements recensés 60

6. Evolution morphodynamique 63

6.1 Caractérisation et principes de l'évolution morphodynamique 63

6.2 Les phénomènes d'embâcle et de laves torrentielles dans le bras de Cilaos 64

6.2.1 Les phénomènes historiques 64
6.2.2 Les secteurs propices à la formation d'embâcle 64
6.2.3 Scénario de rupture d'une retenue d'eau 65

6.3 Evolution en plan des berges et des chenaux principaux 67

6.4 Evolution altimétrique du lit 70

6.4.1 Evolution du profil en long des fonds extrêmes 70
6.4.2 Evolution du profil en long des fonds moyens 74

6.5 Evolution de la topographie du lit 79

7. Transport solide et bilan sédimentologique 83

7.1 Origine des matériaux 83

7.1.1 Les zones d'érosion 83
7.1.2 Les mouvements de terrain 85

7.2 Caractérisation des extractions 89

7.3 Bilan volumétrique 90

7.4 Comportement du fond du lit en crue 91

7.5 Sectorisation en tronçons homogènes 92

7.6 Granulométrie du lit 94

7.7 Estimation du débit solide 98

7.8 Evaluation des volumes solides transportés 99

7.9 Modélisation du transport solide 100

7.9.1 Type de modèle utilisé 100
7.9.2 Emprise du modèle 100
7.9.3 Données sédimentaires des profils 101
7.9.4 Conditions aux limites 101
7.9.5 Paramètres de modélisation, tests de sensibilité 103
7.9.6 Calage du modèle 104
7.9.7 Résultats de la modélisation à fond mobile 106
7.9.8 Conclusions et hypothèses retenues 109

8. Analyse hydraulique de l'état actuel 111

8.1 Objectifs de l'analyse 111

8.2 Analyse des bras vifs 112

8.3 Modélisation hydraulique 113

8.3.1 Type de modèle utilisé 113
8.3.2 Emprise du modèle 113
8.3.3 Hypothèses de modélisation 114
8.3.4 Calage du modèle 116

8.4 Résultats de la modélisation hydraulique 117

8.4.1 Crue décennale 118
8.4.2 Crue trentennale 130
8.4.3 Crue centennale 142
8.4.4 Crue millénale 154

8.5 Analyse et description des résultats 166

8.5.1 Secteur Ilet Alcide 166
8.5.2 Secteur Rampe des Sables 167
8.5.3 Secteur Ilet Long 169
8.5.4 Secteur Ilet Furcy 171
8.5.5 Secteur Ilet Rond 172
8.5.6 Secteur Bas du Ruisseau 174
8.5.7 Secteur Aloès 175

9. Analyse hydraulique du projet APSIQ 2010 177

9.1 Description du projet 177

9.2 Analyse préliminaire des ouvrages à réaliser 179

9.2.1 Route digue entre les Aloès et Bas du Ruisseau 179
9.2.2 Ouvrage de franchissement de la route digue créée au Bas du Ruisseau (OA1) 179
9.2.3 Ouvrage de franchissement au niveau de l'Ilet Rond (OA2) 179
9.2.4 Route digue au niveau de l'Ilet Furcy 180
9.2.5 Ouvrage de franchissement entre l'Ilet Furcy et l'Ilet Long (OA3) 180

9.3 Impact des travaux 181

9.3.1 Crue centennale 182
9.3.2 Crue millénale 194
9.3.3 Analyse et description des résultats 206

9.4 Conclusion 207

10. Analyse des variantes 208

10.1 Variantes VN1 209

10.2 Variantes VN2 213

10.3 En amont des variantes VN2 218

10.4 Conclusions 219
10.4.1 Analyse des variantes VN1B et VN1C 219
10.4.2 Analyse des variantes VN2A, VN2B et VN2C 219
10.4.3 Axes VN2.1 (Ilet Furcy) et VN2.2 220

11. Principes de dimensionnement retenus 224

11.1 Principes retenus pour le calage altimétrique du tracé routier et des ouvrages 224

11.2 Principes de calcul des cotes de fondation des appuis 226
11.2.1 Profil en long pris en compte 226
11.2.2 Méthodologie du calcul des affouillements 226
11.2.3 Quantification du niveau d'aléa 231

11.3 Recommandations générales 232
11.3.1 Protection des piles et des culées 232
11.3.2 Origine des matériaux 232
11.3.3 Pérennité des ouvrages 232

ANNEXES 233

Annexe 1 : Fiches descriptives des différents postes pluviométriques 234

Annexe 2 : Résultats de la modélisation Pluie-Débit 240

Figures

Figure 1 : Localisation de la zone d'étude 15
Figure 2 : Fuseaux des tracés proposés au stade de la concertation 16
Figure 3 : Aménagements de la proposition figurant dans l'APSIQ de 2010 (Planche 1) 17
Figure 4 : Aménagements de la proposition figurant dans l'APSIQ de 2010 (Planche 2) 17
Figure 5 : Localisation des points kilométriques 22
Figure 6 : Erodabilité des terrains du Bras de Cilaos 28
Figure 7 : Représentation sur un profil en long la composition géologique estimée à proximité du Bras de Cilaos via les sondages effectuées 29
Figure 8 : Profil en long de la rive droite du Bras de Cilaos (SOGREAH,2009) 30
Figure 9 : Profil en long de la rive gauche du Bras de Cilaos (SOGREAH,2009) 31
Figure 10 : Photographie aérienne IGN de 1950 33
Figure 11 : Carte IGN de 1957 (1/50 000) 34
Figure 12 : Etat de la protection de berge en rive droite (2019) 36
Figure 13 : Hydrographie du Bras de Cilaos 40
Figure 14 : Localisation des stations pluviométriques 42
Figure 15 : Ajustement des Pluies journalières maximales annuelles (SOGREAH, 2009) 43
Figure 16 : Ajustement des Pluies journalières maximales annuelles pour les stations du Cirque de Cilaos (SOGREAH, 2009) 45
Figure 17 : Ajustement des Pluies journalières maximales annuelles pour la station de Bras Long (SOGREAH, 2009) 46
Figure 18 : Ajustement selon une loi de Gümbel des débits de pointe au Pavillon 51
Figure 19 : Ajustement selon une loi de Gümbel des débits de pointe au Ouaki 51
Figure 20 : Découpage en sous-bassins versants pour la modélisation pluie-débit 54
Figure 21 : Mobilité en plan des berges 69
Figure 22 : Evolution du profil en long du Bras de Cilaos des fonds extrêmes (1/3) 71
Figure 23 : Evolution du profil en long du Bras de Cilaos des fonds extrêmes (2/3) 72
Figure 24 : Evolution du profil en long du Bras de Cilaos des fonds extrêmes (3/3) 73
Figure 25 : Evolution du profil en long du Bras de Cilaos des fonds moyens (1/3) 75
Figure 26 : Evolution du profil en long du Bras de Cilaos des fonds moyens (2/3) 76
Figure 27 : Evolution du profil en long du Bras de Cilaos des fonds moyens (3/3) 77
Figure 28 : Comparaison entre les deux modèles numériques de terrain de 2016 et 2018 (1/3) 80
Figure 29 : Comparaison entre les deux modèles numériques de terrain de 2016 et 2018 (2/3) 81
Figure 30 : Comparaison entre les deux modèles numériques de terrain de 2016 et 2018 (3/3) 82
Figure 31 : Paysage caractéristique du Bras de Cilaos 83
Figure 32 : Carte de synthèse de l'aléa érosion (BRGM, 2002) 84
Figure 33 : Localisation des éboulis depuis 2009 - Section 1 (source : BRGM) 87
Figure 34 : Localisation des éboulis depuis 2009 - Section 2 (source : BRGM) 88
Figure 35 : Représentation schématique des antidunes 91
Figure 36 : Sectorisation hydromorphologique du secteur d'étude 92
Figure 37 : Localisation des relevés granulométrique et blocométrique 94
Figure 38 : Distributions par fraction selon la classification de Wentworth 95
Figure 39 : Distributions par fréquences cumulées 96
Figure 40 : Distributions par taille des éléments selon le relevé linéaire de surface 96
Figure 41 : Emprise du modèle sédimentaire 100

Figure 42 : Hydrogramme et sédimentogramme injectés dans le modèle sédimentaire pour la crue centennale 102
Figure 43 : Graphique représentant l'évolution du fond extrême selon le calage réalisé 105
Figure 44 : Graphique représentant la tendance probable d'évolution du profil en long du fond extrême selon les différentes simulations (Partie amont) 107
Figure 45 : Graphique représentant la tendance probable d'évolution du profil en long du fond extrême selon les différentes simulations (Partie aval) 108
Figure 46 : Graphique représentant les niveaux maximal et minimal du lit 110
Figure 47 : Effondrement de l'ouvrage d'art aval sur la Rivière Saint Etienne suite à une attaque d'un bras vif .. 112
Figure 48 : Emprise du modèle hydraulique 114
Figure 49 : Assemblage du modèle numérique terrestre de Sintegra avec les levés terrestres sur le lit mineur . 115
Figure 50 : Hydrogrammes de crues caractéristiques 116
Figure 51 : Localisation des ouvrages de franchissement envisagés 117
Figure 52 : Profil en long du Bras de Cilaos en état actuel - 10 ans 119
Figure 53 : Cartographie des hauteurs d'eau maximales pour la crue décennale en état actuel (1/3) 120
Figure 54 : Cartographie des hauteurs d'eau maximales pour la crue décennale en état actuel (2/3) 121
Figure 55 : Cartographie des hauteurs d'eau maximales pour la crue décennale en état actuel (3/3) 122
Figure 56 : Cartographie des vitesses d'écoulement maximales pour la crue décennale en état actuel (1/3) 123
Figure 57 : Cartographie des vitesses d'écoulement maximales pour la crue décennale en état actuel (2/3) 124
Figure 58 : Cartographie des vitesses d'écoulement maximales pour la crue décennale en état actuel (3/3) 125
Figure 59 : Cartographie des forces tractrices maximales pour la crue décennale en état actuel (1/3) 126
Figure 60 : Cartographie des forces tractrices maximales pour la crue décennale en état actuel (2/3) 127
Figure 61 : Cartographie des forces tractrices maximales pour la crue décennale en état actuel (3/3) 128
Figure 62 : Cartographie du régime d'écoulement pour la crue décennale en état actuel 129
Figure 63 : Profil en long du Bras de Cilaos en état actuel - 30 ans 131
Figure 64 : Cartographie des hauteurs d'eau maximales pour la crue trentennale en état actuel (1/3) 132
Figure 65 : Cartographie des hauteurs d'eau maximales pour la crue trentennale en état actuel (2/3) 133
Figure 66 : Cartographie des hauteurs d'eau maximales pour la crue trentennale en état actuel (3/3) 134
Figure 67 : Cartographie des vitesses d'écoulement maximales pour la crue trentennale en état actuel (1/3) 135
Figure 68 : Cartographie des vitesses d'écoulement maximales pour la crue trentennale en état actuel (2/3) 136
Figure 69 : Cartographie des vitesses d'écoulement maximales pour la crue trentennale en état actuel (3/3) 137
Figure 70 : Cartographie des forces tractrices maximales pour la crue trentennale en état actuel (1/3) 138
Figure 71 : Cartographie des forces tractrices maximales pour la crue trentennale en état actuel (2/3) 139
Figure 72 : Cartographie des forces tractrices maximales pour la crue trentennale en état actuel (3/3) 140
Figure 73 : Cartographie du régime d'écoulement pour la crue trentennale en état actuel 141
Figure 74 : Profil en long du Bras de Cilaos en état actuel - 100 ans 143
Figure 75 : Cartographie des hauteurs d'eau maximales pour la crue centennale en état actuel (1/3) 144
Figure 76 : Cartographie des hauteurs d'eau maximales pour la crue centennale en état actuel (2/3) 145
Figure 77 : Cartographie des hauteurs d'eau maximales pour la crue centennale en état actuel (3/3) 146
Figure 78 : Cartographie des vitesses d'écoulement maximales pour la crue centennale en état actuel (1/3) 147
Figure 79 : Cartographie des vitesses d'écoulement maximales pour la crue centennale en état actuel (2/3) 148
Figure 80 : Cartographie des vitesses d'écoulement maximales pour la crue centennale en état actuel (3/3) 149
Figure 81 : Cartographie des forces tractrices maximales pour la crue centennale en état actuel (1/3) 150
Figure 82 : Cartographie des forces tractrices maximales pour la crue centennale en état actuel (2/3) 151
Figure 83 : Cartographie des forces tractrices maximales pour la crue centennale en état actuel (3/3) 152
Figure 84 : Cartographie du régime d'écoulement pour la crue centennale en état actuel 153

Figure 85 : Profil en long du Bras de Cilaos en état actuel - 1000 ans 155
Figure 86 : Cartographie des hauteurs d'eau maximales pour la crue millénale en état actuel (1/3) 156
Figure 87 : Cartographie des hauteurs d'eau maximales pour la crue millénale en état actuel (2/3) 157
Figure 88 : Cartographie des hauteurs d'eau maximales pour la crue millénale en état actuel (3/3) 158
Figure 89 : Cartographie des vitesses d'écoulement maximales pour la crue millénale en état actuel (1/3) 159
Figure 90 : Cartographie des vitesses d'écoulement maximales pour la crue millénale en état actuel (2/3) 160
Figure 91 : Cartographie des vitesses d'écoulement maximales pour la crue millénale en état actuel (3/3) 161
Figure 92 : Cartographie des forces tractrices maximales pour la crue millénale en état actuel (1/3) 162
Figure 93 : Cartographie des forces tractrices maximales pour la crue millénale en état actuel (2/3) 163
Figure 94 : Cartographie des forces tractrices maximales pour la crue millénale en état actuel (3/3) 164
Figure 95 : Cartographie du régime d'écoulement pour la crue millénale en état actuel 165
Figure 96 : Observation du sous-cavement sur le secteur Rampe des Sables 169
Figure 97 : Observations du matériau meuble de la berge en rive droite 170
Figure 98 : Berge alluviale de l'Ilet Rond 174
Figure 99 : Aménagements de la proposition figurant dans l'APSIQ de 2010 (Planche 1) 178
Figure 100 : Aménagements de la proposition figurant dans l'APSIQ de 2010 (Planche 2) 178
Figure 101 : Profil en long du Bras de Cilaos en état projet APSIQ 2010 - 100 ans 183
Figure 102 : Cartographie des hauteurs d'eau maximales pour la crue centennale en état projet (1/3) 184
Figure 103 : Cartographie des hauteurs d'eau maximales pour la crue centennale en état projet (2/3) 185
Figure 104 : Cartographie des hauteurs d'eau maximales pour la crue centennale en état projet (3/3) 186
Figure 105 : Cartographie des vitesses d'écoulement maximales pour la crue centennale en état projet (1/3) 187
Figure 106 : Cartographie des vitesses d'écoulement maximales pour la crue centennale en état projet (2/3) 188
Figure 107 : Cartographie des vitesses d'écoulement maximales pour la crue centennale en état projet (3/3) 189
Figure 108 : Cartographie des forces tractrices maximales pour la crue centennale en état projet (1/3) 190
Figure 109 : Cartographie des forces tractrices maximales pour la crue centennale en état projet (2/3) 191
Figure 110 : Cartographie des forces tractrices maximales pour la crue centennale en état projet (3/3) 192
Figure 111 : Cartographie du régime d'écoulement pour la crue centennale en état projet 193
Figure 112 : Profil en long du Bras de Cilaos en état projet APSIQ 2010 - 1000 ans 195
Figure 113 : Cartographie des hauteurs d'eau maximales pour la crue millénale en état projet (1/3) 196
Figure 114 : Cartographie des hauteurs d'eau maximales pour la crue millénale en état projet (2/3) 197
Figure 115 : Cartographie des hauteurs d'eau maximales pour la crue millénale en état projet (3/3) 198
Figure 116 : Cartographie des vitesses d'écoulement maximales pour la crue millénale en état projet (1/3) 199
Figure 117 : Cartographie des vitesses d'écoulement maximales pour la crue millénale en état projet (2/3) 200
Figure 118 : Cartographie des vitesses d'écoulement maximales pour la crue millénale en état projet (3/3) 201
Figure 119 : Cartographie des forces tractrices maximales pour la crue millénale en état projet (1/3) 202
Figure 120 : Cartographie des forces tractrices maximales pour la crue millénale en état projet (2/3) 203
Figure 121 : Cartographie des forces tractrices maximales pour la crue millénale en état projet (3/3) 204
Figure 122 : Cartographie du régime d'écoulement pour la crue millénale en état projet 205
Figure 123 : Variantes à l'étude au stade de la concertation 208
Figure 124 : Représentation des hauteurs d'eau et des vitesses d'écoulement sur le linéaire du tracé VN1 (crue centennale) 210
Figure 125 : Localisation des ouvrages de franchissement 211
Figure 126 : Localisation des protections contre le risque de l'affouillement 211
Figure 127 : Représentation des hauteurs d'eau et des vitesses d'écoulement sur le linéaire du tracé VN2 (crue centennale) 214
Figure 128 : Localisation des ouvrages de franchissement 215

Figure 129 : Localisation des protections contre le risque de l'affouillement pour la variante 2A 216
Figure 130 : Synthèse des modifications proposées 223
Figure 131 : Profil en long permettant le dimensionnement du tracé routier et des ouvrages 225
Figure 38 : Quantification du niveau d'aléa, CEREMA, 2019 231
Figure 132 : Modélisation pluie-débit de l'évènement Giselle 243
Figure 133 : Modélisation pluie-débit de l'évènement Hyacinthe 245
Figure 134 : Modélisation pluie-débit de l'évènement du 5 au 8 février 1986 247
Figure 135 : Modélisation pluie-débit de l'évènement Clotilda 249
Figure 136 : Modélisation pluie-débit de l'évènement Firinga 251
Figure 137 : Modélisation pluie-débit de l'évènement Colina 253
Figure 138 : Modélisation pluie-débit de l'évènement du 28 au 30 janvier 2000 255
Figure 139 : Modélisation pluie-débit de l'évènement Dina 257
Figure 140 : Modélisation pluie-débit de l'évènement Hary 259
Figure 141 : Modélisation pluie-débit de l'évènement Diwa 261
Figure 142 : Modélisation pluie-débit de l'évènement Gamède 263
Figure 143 : Modélisation pluie-débit de l'évènement Dumile 265
Figure 144 : Modélisation pluie-débit de l'évènement Feeleng 267
Figure 145 : Modélisation pluie-débit de l'évènement Bejisa 269
Figure 146 : Modélisation pluie-débit de l'évènement Haliba 271
Figure 147 : Modélisation pluie-débit de l'évènement Daya 273
Figure 148 : Modélisation pluie-débit de l'évènement Berguitta 275
Figure 149 : Modélisation pluie-débit de l'évènement Dumazile 277
Figure 150 : Modélisation pluie-débit de l'évènement Fakir 279

Tableaux

Tableau 1 : Enjeux humains recensés 24
Tableau 2 : Enjeux matériels recensés 25
Tableau 3 : Ouvrages de protection contre les crues recensées sur la zone d'étude 26
Tableau 4 : Classes d'érodabilité des terrains du Bras de Cilaos 27
Tableau 5 : Quantiles de pluies journalières estimés (SOGREAH, 2009) 47
Tableau 6 : Corrélation équifréquences (SOGREAH, 2009) 48
Tableau 7 : Rapport entre la pluviométrie du bassin versant et la pluviométrie à Cilaos 50
Tableau 8 : Estimation des débits caractéristiques (SOGREAH, 2009) 50
Tableau 9 : Estimation du débit de pointe de la crue millénale 52
Tableau 10 : Caractéristiques des sous-bassins versants pour la modélisation pluie-débit 53
Tableau 11 : Données pluviographiques utilisées 56
Tableau 12 : Pluviométrie affectée aux différents sous-bassins versant (SOGREAH, 2009) 57
Tableau 13 : Débits de pointe estimés au Pavillon (SOGREAH, 2009) 57
Tableau 14 : Débits de pointe estimés à la Rampe des Sables (SOGREAH, 2009) 58
Tableau 15 : Relations retenues pour le calcul des pertes initiales et du Curve Number (SOGREAH, 2009) 59
Tableau 16 : Fonction de transfert des sous-bassins versants (SOGREAH, 2009) 60
Tableau 17 : Paramètres de propagation dans les biefs (SOGREAH, 2009) 60
Tableau 18 : Evènements modélisés à l'aide du modèle pluie-débit 61
Tableau 19 : Synthèse des débits de pointe et volumes de crue pour les évènements modélisés 62
Tableau 20 : Listing des mouvements de terrain survenus sur la zone d'étude depuis 2009 86

Tableau 21 : Caractéristiques des tronçons homogènes 93
Tableau 22 : Volumes solides associés aux crues récentes 99
Tableau 23 : Distributions granulométriques de la charge de fond injectée en condition limite amont 102
Tableau 24 : Débits de pointe des différentes crues simulées 111
Tableau 25 : Caractéristiques des conditions d'écoulement au niveau des ouvrages de franchissement envisagés pour la crue décennale 118
Tableau 26 : Caractéristiques des conditions d'écoulement au niveau des ouvrages de franchissement envisagés pour la crue trentennale 130
Tableau 27 : Caractéristiques des conditions d'écoulement au niveau des ouvrages de franchissement envisagés pour la crue centennale 142
Tableau 28 : Caractéristiques des conditions d'écoulement au niveau des ouvrages de franchissement envisagés pour la crue millénale 154
Tableau 29 : Caractéristiques des conditions d'écoulement au niveau du secteur Ilet Alcide pour la crue décennale 166
Tableau 30 : Caractéristiques des conditions d'écoulement au niveau du secteur Ilet Alcide pour la crue trentennale 166
Tableau 31 : Caractéristiques des conditions d'écoulement au niveau du secteur Ilet Alcide pour la crue centennale 166
Tableau 32 : Caractéristiques des conditions d'écoulement au niveau du secteur Ilet Alcide pour la crue millénale 167
Tableau 33 : Caractéristiques des conditions d'écoulement au niveau du secteur Rampe des Sables pour la crue décennale 167
Tableau 34 : Caractéristiques des conditions d'écoulement au niveau du secteur Rampe des Sables pour la crue trentennale 168
Tableau 35 : Caractéristiques des conditions d'écoulement au niveau du secteur Rampe des Sables pour la crue centennale 168
Tableau 36 : Caractéristiques des conditions d'écoulement au niveau du secteur Rampe des Sables pour la crue millénale 168
Tableau 37 : Caractéristiques des conditions d'écoulement au niveau du secteur Ilet Long pour la crue décennale 169
Tableau 38 : Caractéristiques des conditions d'écoulement au niveau du secteur Ilet Long pour la crue trentennale 169
Tableau 39 : Caractéristiques des conditions d'écoulement au niveau du secteur Ilet Long pour la crue centennale 170
Tableau 40 : Caractéristiques des conditions d'écoulement au niveau du secteur Ilet Long pour la crue millénale 170
Tableau 41 : Caractéristiques des conditions d'écoulement au niveau du secteur Ilet Furcy pour la crue décennale 171
Tableau 42 : Caractéristiques des conditions d'écoulement au niveau du secteur Ilet Furcy pour la crue trentennale 171
Tableau 43 : Caractéristiques des conditions d'écoulement au niveau du secteur Ilet Furcy pour la crue centennale 171
Tableau 44 : Caractéristiques des conditions d'écoulement au niveau du secteur Ilet Furcy pour la crue millénale 172
Tableau 45 : Caractéristiques des conditions d'écoulement au niveau du secteur Ilet Rond pour la crue décennale 172
Tableau 46 : Caractéristiques des conditions d'écoulement au niveau du secteur Ilet Rond pour la crue trentennale 173

Tableau 47 : Caractéristiques des conditions d'écoulement au niveau du secteur Ilet Rond pour la crue centennale 173
Tableau 48 : Caractéristiques des conditions d'écoulement au niveau du secteur Ilet Rond pour la crue millénale 173
Tableau 49 : Caractéristiques des conditions d'écoulement au niveau du secteur Aloès pour la crue décennale 175
Tableau 50 : Caractéristiques des conditions d'écoulement au niveau du secteur Aloès pour la crue trentennale 175
Tableau 51 : Caractéristiques des conditions d'écoulement au niveau du secteur Aloès pour la crue centennale 175
Tableau 52 : Caractéristiques des conditions d'écoulement au niveau du secteur Aloès pour la crue millénale . 176
Tableau 53 : Caractéristiques des conditions d'écoulement au niveau des ouvrages envisagés pour la crue centennale 182
Tableau 54 : Caractéristiques des conditions d'écoulement au niveau des ouvrages envisagés pour la crue millénale 194
Tableau 55 : Analyse des variantes VN1 212
Tableau 56 : Analyse des variantes VN2 217
Tableau 57 : Paramètres du modèle pluie-débit pour Giselle 242
Tableau 58 : Débit de pointe et volume de la crue estimés pour Giselle 242
Tableau 59 : Paramètres du modèle pluie-débit pour Hyacinthe 244
Tableau 60 : Débit de pointe et volume de la crue estimés pour Hyacinthe 244
Tableau 61 : Paramètres du modèle pluie-débit pour l'évènement du 5 au 8 février 1986 246
Tableau 62 : Débit de pointe et volume de la crue estimés pour l'évènement du 5 au 8 février 1986 246
Tableau 63 : Paramètres du modèle pluie-débit pour Clotilda 248
Tableau 64 : Débit de pointe et volume de la crue estimés pour Clotilda 248
Tableau 65 : Paramètres du modèle pluie-débit pour Firinga 250
Tableau 66 : Débit de pointe et volume de la crue estimés pour Firinga 250
Tableau 67 : Paramètres du modèle pluie-débit pour Colina 252
Tableau 68 : Débit de pointe et volume de la crue estimés pour Colina 252
Tableau 69 : Paramètres du modèle pluie-débit pour l'évènement du 28 au 30 janvier 2000 254
Tableau 70 : Débit de pointe et volume de la crue estimés pour l'évènement du 28 au 30 janvier 2000 254
Tableau 71 : Paramètres du modèle pluie-débit pour Dina 256
Tableau 72 : Débit de pointe et volume de la crue estimés pour Dina 256
Tableau 73 : Paramètres du modèle pluie-débit pour Hary 258
Tableau 74 : Débit de pointe et volume de la crue estimés pour Hary 258
Tableau 75 : Paramètres du modèle pluie-débit pour Diwa 260
Tableau 76 : Débit de pointe et volume de la crue estimés pour Diwa 260
Tableau 77 : Paramètres du modèle pluie-débit pour Gamède 262
Tableau 78 : Débit de pointe et volume de la crue estimés pour Gamède 262
Tableau 79 : Paramètres du modèle pluie-débit pour Dumile 264
Tableau 80 : Débit de pointe et volume de la crue estimés pour Dumile 264
Tableau 81 : Paramètres du modèle pluie-débit pour Feeleng 266
Tableau 82 : Débit de pointe et volume de la crue estimés pour Feeleng 266
Tableau 83 : Paramètres du modèle pluie-débit pour Bejisa 268
Tableau 84 : Débit de pointe et volume de la crue estimés pour Bejisa 268
Tableau 85 : Paramètres du modèle pluie-débit pour Haliba 270

Tableau 86 : Débit de pointe et volume de la crue estimés pour Haliba 270
Tableau 87 : Paramètres du modèle pluie-débit pour Daya 272
Tableau 88 : Débit de pointe et volume de la crue estimés pour Daya 272
Tableau 89 : Paramètres du modèle pluie-débit pour Berguitta 274
Tableau 90 : Débit de pointe et volume de la crue estimés pour Berguitta 274
Tableau 91 : Paramètres du modèle pluie-débit pour Dumazile 276
Tableau 92 : Débit de pointe et volume de la crue estimés pour Dumazile 276
Tableau 93 : Paramètres du modèle pluie-débit pour Fakir 278
Tableau 94 : Débit de pointe et volume de la crue estimés pour Fakir 278

Annexes

Annexe 1 : Fiches descriptives des différents postes pluviométriques 234
Annexe 2 : Résultats de la modélisation Pluie-Débit 240

1. Contexte et objectifs de l'étude hydraulique

La mission consiste à vérifier et actualiser les contraintes hydrauliques existantes dans le cadre du projet de sécurisation de la RN5 sur le secteur compris entre le Petit Serré et Les Aloès.

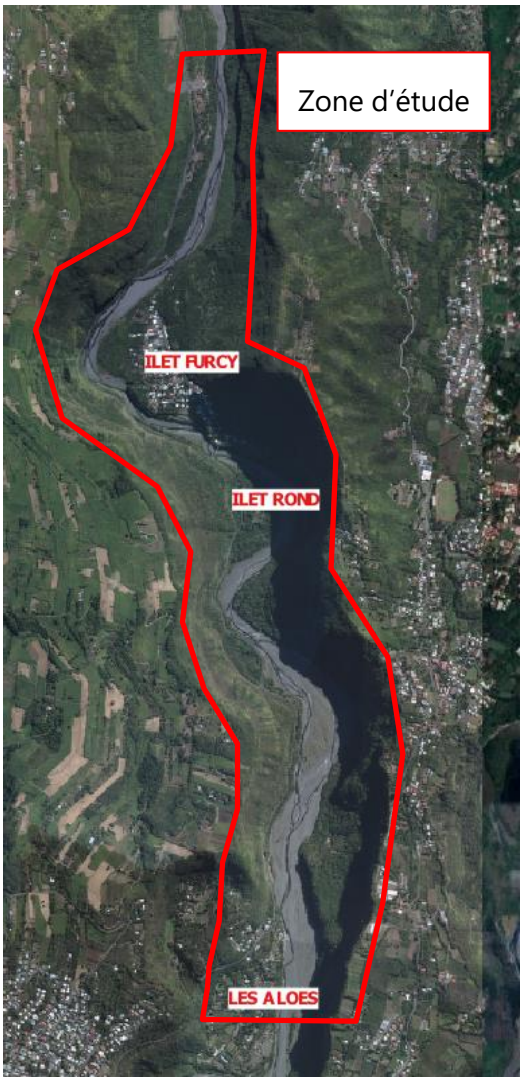


Figure 1 : Localisation de la zone d'étude

Il s'agit de préciser, sur la base des études antérieures et d'investigations complémentaires spécifiques au projet, le fonctionnement hydrologique, hydraulique et hydrosédimentaire du Bras de Cilaos dans l'objectif de proposer des aménagements hydrauliques résilients au risque inondation.

La mission hydraulique comprend :

- La caractérisation des débits de crue du Bras de Cilaos,
- La caractérisation de son fonctionnement hydrosédimentaire,
- La détermination des conditions d'écoulement au droit des ouvrages.

Sa finalité sera la fourniture de :

- La cote de calage de la sous-poutre des ouvrages de franchissement ;
- La définition des cotes d'affouillement généralisées et localisées au droit des ouvrages de protection ;
- La définition de dispositions constructives pour les appuis en rivière : protection contre l'abrasion, forme des piles… ;
- L'impact de l'aménagement sur les zones inondables, le transport solide et de manière plus générale sur le risque inondation présent sur la zone d'étude.

Dans le présent rapport, les éléments fournis permettent de caractériser hydrauliquement le projet établi dans l'APSIQ de 2010 et d'effectuer une analyse préliminaire concernant les variantes proposées au stade de la concertation.

Les variantes proposées au stade de la concertation figurent sur le plan ci-dessous :

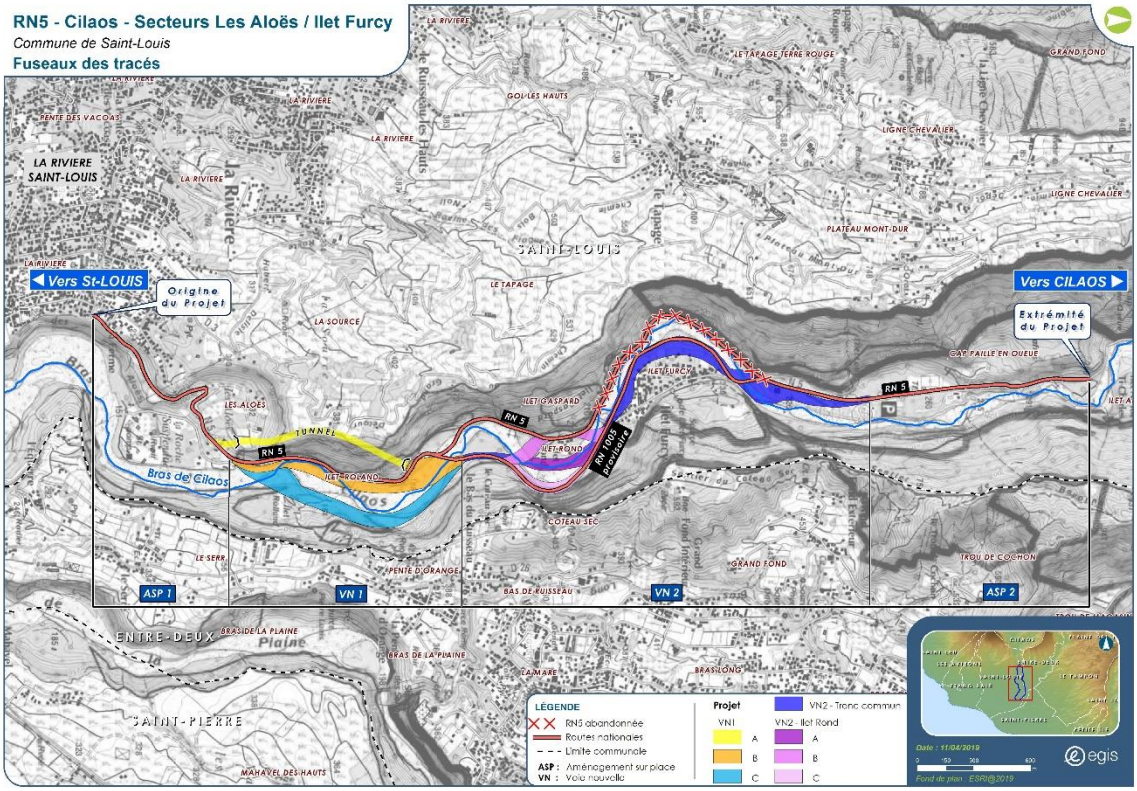


Figure 2 : Fuseaux des tracés proposés au stade de la concertation

Les variantes proposées dans l'APSIQ de 2010 sont présentées sur les figures suivantes :

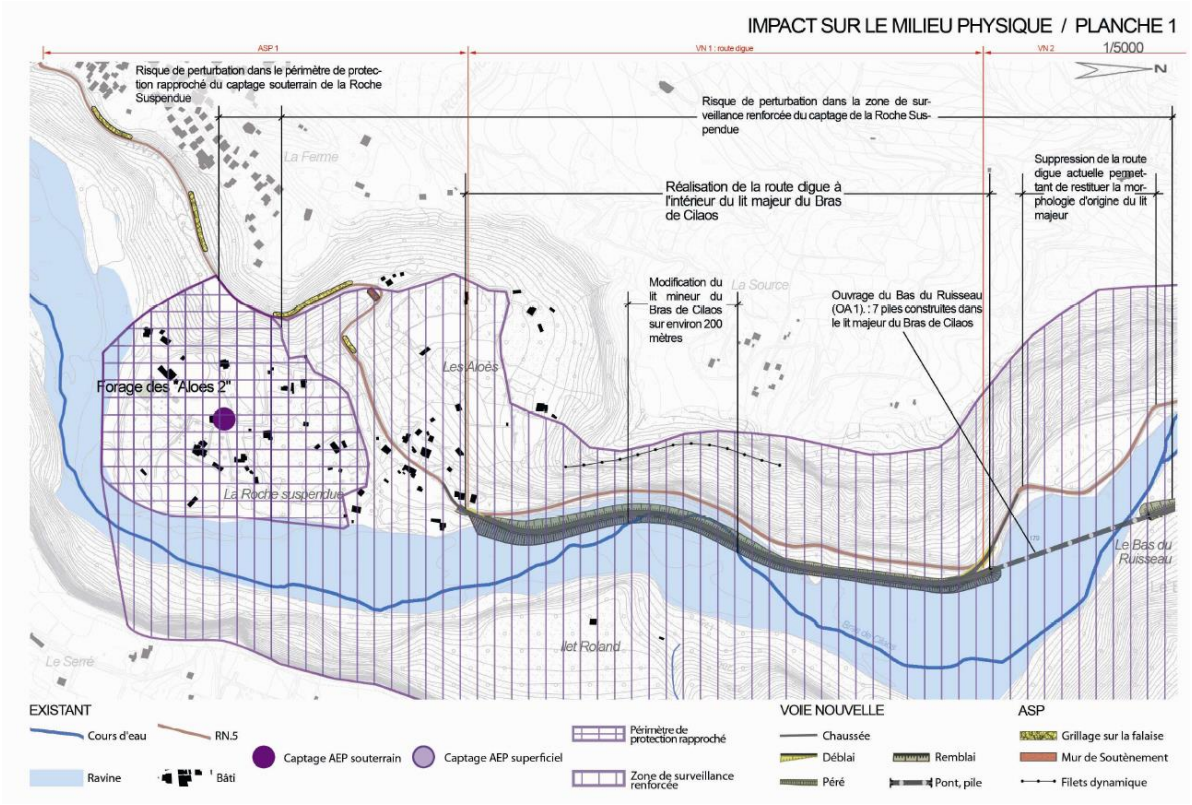


Figure 3 : Aménagements de la proposition figurant dans l'APSIQ de 2010 (Planche 1)

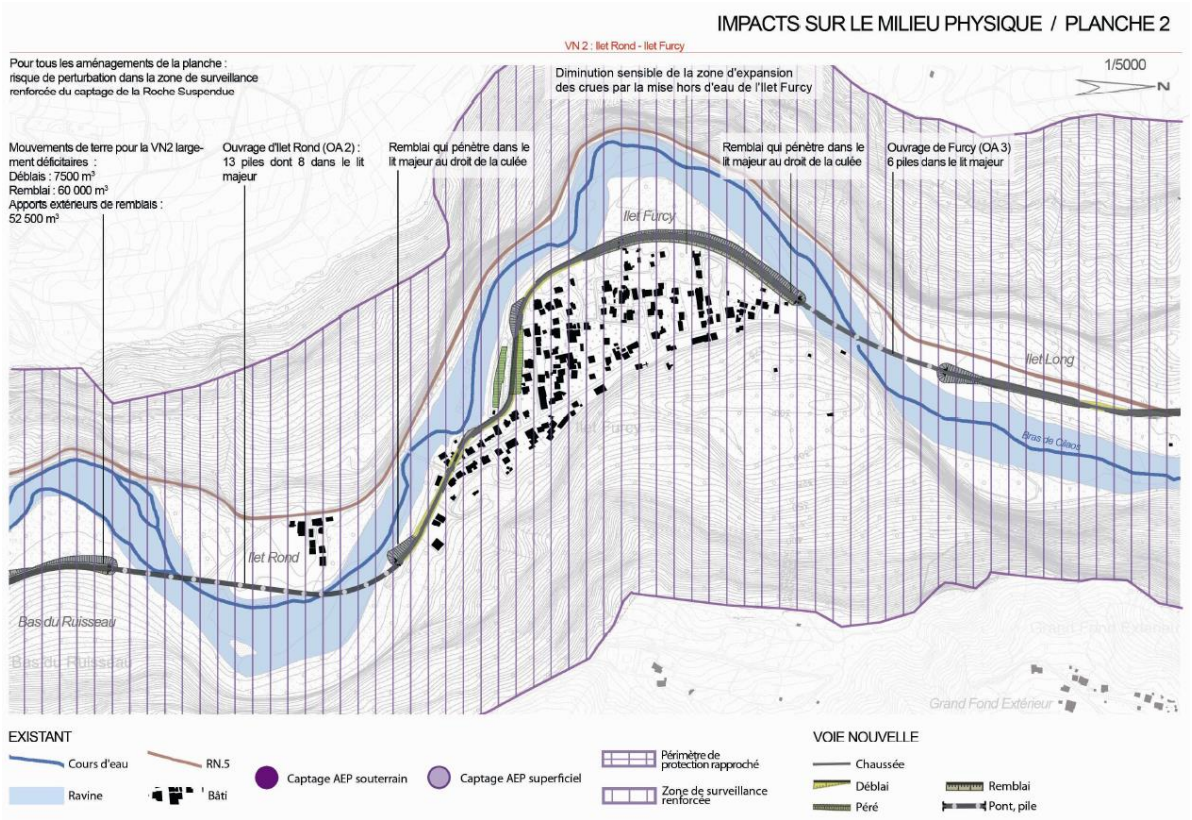


Figure 4 : Aménagements de la proposition figurant dans l'APSIQ de 2010 (Planche 2)

2. Analyse et synthèse des données existantes

2.1 Inventaire des études réalisées

La liste suivante recense les études disponibles sur le bassin versant du Bras de Cilaos :

- RN5 – Aménagement d'itinéraire - Tonnage, gabarit, points d'arrêts – Proposition d'aménagement (Décembre 1994),
- Étude d'impact - Aménagement de la Route Nationale 5 entre la Rivière Saint Louis et Cilaos – PR6+000 à PR36+120 (groupement Médiaterre / Zone UP) – 1995,
- Aménagement d'itinéraire – Tonnage – Gabarits – Points d'arrêt (DDE) - Mai 1995,
- Potentialité de la route de Cilaos – Proposition pour sa mise en valeur (DDE – SHAU Sud) - Avril 2000,
- Aménagements paysagers de la RN5 (M.B. PRUD'HOMME) - Mai 2001,
- Dossier de réparation des dégâts du cyclone Dina – 2002,
- Exposition de la RN5 aux phénomènes naturels / Etat des Connaissances et définition des programmes des études à mener (BRGM) - Décembre 2002,
- Dossier d'enquête publique – Améliorations sur place (DDE) -Notice descriptive - Avril 2003,
- Études d'Avant-Projet Sommaire d'Itinéraire Qualitatif – Phase 1 – Études techniques, synthèse des diagnostics, propositions d'aménagement, études socio-économiques, environnementales et paysagères (groupement ARCADIS / ECEP / SECMO) - Avril 2004,
- APSIQ – Phase 1 – Synthèse des diagnostics et propositions d'aménagement – Études socio-économiques, environnementales et paysagères (groupement ARCADIS / ECEP / SECMO) - Mai 2004,
- APSIQ – Phase 2 - Synthèse des diagnostics et propositions d'aménagements - Études socio-économiques, environnementales et paysagères (groupement ARCADIS / ECEP / SECMO) - Juin 2005,
- APSIQ – Phase 2 : Études préliminaires, étude de variante et de faisabilité des ouvrages – Cahier 8 : Études complémentaires – Synthèse des propositions d'aménagement (groupement ARCADIS / ECEP / SECMO) - Février 2006,

- APSIQ – Phase 2 : Études préliminaires, étude de variante et de faisabilité des ouvrages – Observations sur les propositions du MO et compléments d'études (groupement ARCADIS / ECEP / SECMO) - Mars 2006,
- APSIQ – Phase 2 : Études préliminaires, étude de variante et de faisabilité des ouvrages – Programme des études complémentaires pour la phase APS (groupement ARCADIS / ECEP / SECMO) - Mars 2006,
- Différents rapports d'Inspection héliportée de 2000 à 2008 (BRGM) – 2008,
- Campagne de reconnaissance géotechnique sur la RN5 – Prospection géophysique par sismique réfraction (CEBTP SOLEN) - Septembre 2008,
- Campagne de reconnaissance géotechnique sur la RN5 – Sondages destructifs (CEBTP SOLEN) - Septembre 2008,
- APSIQ – Etude hydraulique du bras de Cilaos (SOGREAH) - Mars 2009,
- APSIQ – Études trajectographiques + rapport + annexes (ARCADIS / GIPEA) - Juin 2009,
- APSIQ – Phase 3 – Études de la solution retenue (y/c 1ère étude d'impact) (groupement ARCADIS / ECEP / SECMO) – 2009/2010,
- Dossier d'enquête préalable à la DUP (ECEP en groupement avec ARCADIS / SECMO) – 2012,
- Étude globale d'exposition aux risques d'éboulements et de chute de blocs sur le site de l'îlet Furcy – (GÉOLITHE) – Mars 2016,
- Les études du PPR multirisques « inondation et mouvements de terrain » de Saint-Louis approuvé le 22 décembre 2016,
- Réalisation de l'accès au CTVD en passant sous le pont de la Rivière Saint-Etienne, Étude hydraulique (Juillet 2017 – Réf. 4702235-C),
- Etude du Pont Bailey au niveau de l'Ilet Furcy - Mai 2018.

2.2 Inventaire des données cartographiques et topographiques disponibles

Les données cartographiques et topographiques, classées de la plus récente à la plus ancienne, sont les suivantes:

- Fond IGN – 1950,
- Plans topographiques au droit des prises d'eau Saphir (Cabinet VEYLAND) – Octobre 2005,
- Carte géologique de la Réunion (BRGM) – 2006,
- Plan topographique de l'aval du Bras de Cilaos (AIGL Développement) – Mars 2007,
- Plans photogrammétriques de l'itinéraire au 1/1000 ème et 1/5000 ème (SINTEGRA) - Juin 2008,
- APSIQ – Cartographie géologique RN5 (ARCADIS) - Octobre 2008,
- APSIQ – Cartographie géologiques des zones d'ouvrages projetés (ARCADIS) - Octobre 2008,
- APSIQ – Etude hydraulique du bras de Cilaos (SOGREAH) - Mars 2009,
- Données Litto 3D (IGN + SHOM), 2016,
- Levés topographiques terrestres sur le lit mineur du Bras de Cilaos - Décembre 2018,
- Modèle Numérique de Terrain (SINTEGRA) – Décembre 2018,
- Données géotechniques (GINGER) – Décembre 2018,
- Orthophotos - 2018,
- Données cartographiques et concernant les mouvements de terrain (BRGM),
- Données Google Earth à travers le temps,
- Récolement Voie provisoire DEER 2018,
- Données SIG St-Louis Cilaos,
- Arrêtés Environnements Foncier 2018.

2.3 Analyse des études antérieures

Les études antérieures réalisées sur le bassin versant du Bras de Cilaos présentent des niveaux d'intérêt différents.

Ces études ont été analysées à partir des critères suivants :

- La zone d'étude ;
- La topographie utilisée ;
- Les items présents dans l'étude (hydrologie, hydraulique, géologie, transport sédimentaire) ;
- Les propositions d'aménagement.

Les études présentant un fort intérêt sont :

- APSIQ – Etude hydraulique du bras de Cilaos (SOGREAH) - Mars 2009, cette étude sera actualisée à partir des nouvelles données,
- Etude du Pont Bailey au niveau de l'Ilet Furcy - Mai 2018, cette étude présente des relevés granulométriques et les éléments de dimensionnement du Pont Bailey provisoire (hydraulique, crue de dimensionnement).

2.4 Analyse des données cartographiques et topographiques

Les données cartographiques et topographiques ont été analysées en fonction de :

- Leur localisation ;
- Leur pertinence ;
- Leur précision.

Afin de faciliter le repérage, des points kilométriques ont été instaurés. Le zéro des PK a été calé au niveau du pont amont de la RN1. Celui-ci correspond sensiblement au point de confluence du Bras de Cilaos avec le Bras de la Plaine.

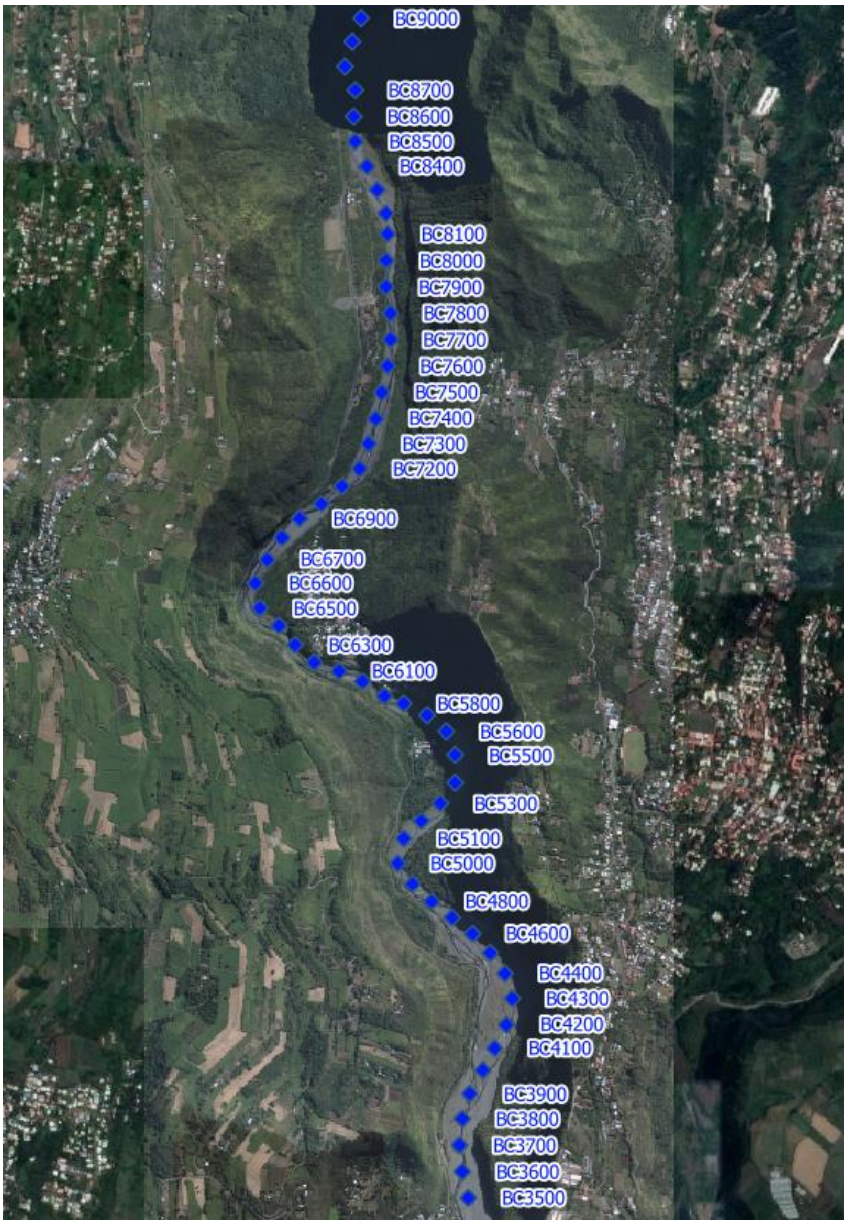


Figure 5 : Localisation des points kilométriques

La zone d'étude se situe entre les PK BC9000 et BC3500.

Au niveau des éléments cartographiques, les éléments présentant un intérêt fort pour l'étude présente sont :

- APSIQ – Etude hydraulique du bras de Cilaos (SOGREAH) - Mars 2009 présentant de nombreux éléments cartographiques intéressants pour l'étude,
- Orthophotos – 2018 qui sera utilisé comme fond de plan pour les cartographies,
- Données du BRGM permettant de localiser les mouvements de terrains (écroulements) et la géologie du bassin du Bras de Cilaos,
- Données Google Earth utilisées dans la caractérisation de l'évolution morphodynamique,
- Données SIG St-Louis Cilaos et Arrêtés Environnements Foncier 2018 utilisés dans l'état des lieux,

Pour les éléments topographiques, la localisation, la précision et la fréquence des points sont primordiales. Les éléments présentant un intérêt sont :

- APSIQ – Etude hydraulique du bras de Cilaos (SOGREAH) - Mars 2009 qui serviront de comparaison avec les données actuelles,
- Données Litto 3D (IGN + SHOM), 2016 qui serviront de comparaison avec les données actuelles et d'éléments de calage,
- Levés topographiques terrestres sur le lit mineur du Bras de Cilaos - Décembre 2018 qui représenteront le lit mineur de l'état actuel,
- Modèle Numérique de Terrain (SINTEGRA) – Décembre 2018 qui servira pour la modélisation sédimentaire et la modélisation hydraulique.

3. Etat des lieux pluridisciplinaire de la rivière

3.1 Enjeux humains et matériels

Les enjeux humains sur la zone d'étude qui peuvent être concernés par un phénomène d'inondation ou un phénomène d'érosion ont été recensés.

Ils sont listés dans le tableau suivant.

Enjeux	Description	Rive	PK	Berge
Habitations	2 maisons au niveau des Aloès	D	BC3400	Protection naturelle en basalte alliée à une protection en enrochements libres
	12 maisons au niveau de l'Ilet Rond	D	BC5700 à BC5500	Protection naturelle (coulée de basalte) discontinue + Terrasse alluviale soumise à une érosion active
Habitations et établissement public ou religieux	1 église, 1 établissement scolaire et 130 maisons au niveau de l'Ilet Furcy	G	BC7100 à BC5700	Protection naturelle (basalte et coulée de débris) + Protection de berge en enrochement bétonné
Habitations	5 habitations au niveau de l'Ilet Long	D	BC8300	Eperon rocheux soumis à de fortes vitesses
	3 habitations au niveau de l'Ilet Alcide	G	BC9700 à BC9300	Terrasse alluviale haute

Tableau 1 : Enjeux humains recensés

Les enjeux matériels étant en bordure du cours d'eau ont été dénombrés et listés dans le tableau suivant.

Enjeux	Description	Rive	PK	Berge
Voirie et Ouvrage de franchissement	RN5 (route de Cilaos)	D et G	BC9700 à BC3400	- Protection naturelle discontinue en basalte - Protection de berges en maçonnerie ou en enrochements
	Passerelle d'accès à l'Ilet Furcy	D et G	BC5900	Protection naturelle en basalte
Réseau AEP	Les Aloès et Ilet Furcy	D et G	BC7000 à BC3400	- Protection naturelle discontinue en basalte - Protection de berges en maçonnerie ou en enrochements
Ligne EDF	Ilet Long	D	BC9000 à BC7000	Protection naturelle (coulées de débris) et terrasse alluviale

Tableau 2 : Enjeux matériels recensés

3.2 Protections existantes contre les crues

Un recensement des protections existantes contre les crues a été effectué sur le linéaire de la zone d'étude.

Les protections observées sont de types suivants :

- Enrochements liés ;
- Murs de soutènement.

Lieu	Description	PK	Rive
Rampe des Sables	Enrochements liés + Semelle béton	BC8900 à BC8700	D
Ilet Furcy	Mur de soutènement	BC6900	D
Ilet Furcy	Enrochement bétonné	BC6500 à BC6200	D
Bas Ruisseau	Enrochements liés	BC4900 à BC4700	D
Bas Ruisseau	Mur de soutènement	BC4400 à BC4100	G
Aloès	Présence de murs de soutènement	BC4000 à BC3600	D
Aloès	Enrochements liés	BC3300 à BC3200	D

Tableau 3 : Ouvrages de protection contre les crues recensées sur la zone d'étude

Les ouvrages concernent essentiellement la route de Cilaos RN5.

Des tronçons de la RN5 sont concernés par des érosions actives et ne disposent pas de protection.

3.3 Géologie des terrains du Bras de Cilaos

Des observations géologiques au niveau des terrains du Bras de Cilaos ont été effectuées en 2009 par le bureau d'études Mascareignes Géologie.

Ces observations montrent des disparités concernant l'encaissant du cours d'eau : des coulées de basalte qui résistent aux chocs de blocs (érosion lente) comme des alluvions sablo-graveleuse qui sont en proie à des érosions actives.

Trois classes ont été définies en fonction de leur nature érodable.

Type de matériaux	Indice	Sous-indice	Formations géologiques
Matériaux rocheux résistants à l'érosion	1	1a	Coulées de lave basaltiques dures et compactes
		1b	Coulées de lave avec des lits scoriacés Laves fracturées et/ou altérées
Matériaux cohésifs érodables mais peu affouillables	2	2a	Pyroclastites soudées (tufs soudés) Coulées de débris dures et compactes
		2b	Alluvions grossières à blocs bien cimentées Coulées de débris à matrice fine tendre
Matériaux meubles très facilement affouillable	3	3a	Alluvions légèrement cimentées
		3b	Alluvions meubles Eboulis, colluvions

Tableau 4 : Classes d'érodabilité des terrains du Bras de Cilaos

La cartographie établie à partir d'un indice d'érodabilité permet de visualiser le comportement des berges de la rivière. Les points d'érosion sont localisés dans les formations meubles (classe 3) ou érodables (classe 2). Cependant, les formations rocheuses résistantes à l'érosion (classe 1) constituent les points durs qui contraignent l'écoulement du cours d'eau.

La cartographie concernant l'érodabilité des terrains, la représentation sur un profil en long la composition géologique estimée sous le lit du Bras de Cilaos via les sondages effectués et les profils en long sur les rives du Bras de Cilaos réalisés par SOGREAH sont présents sur les pages suivantes.

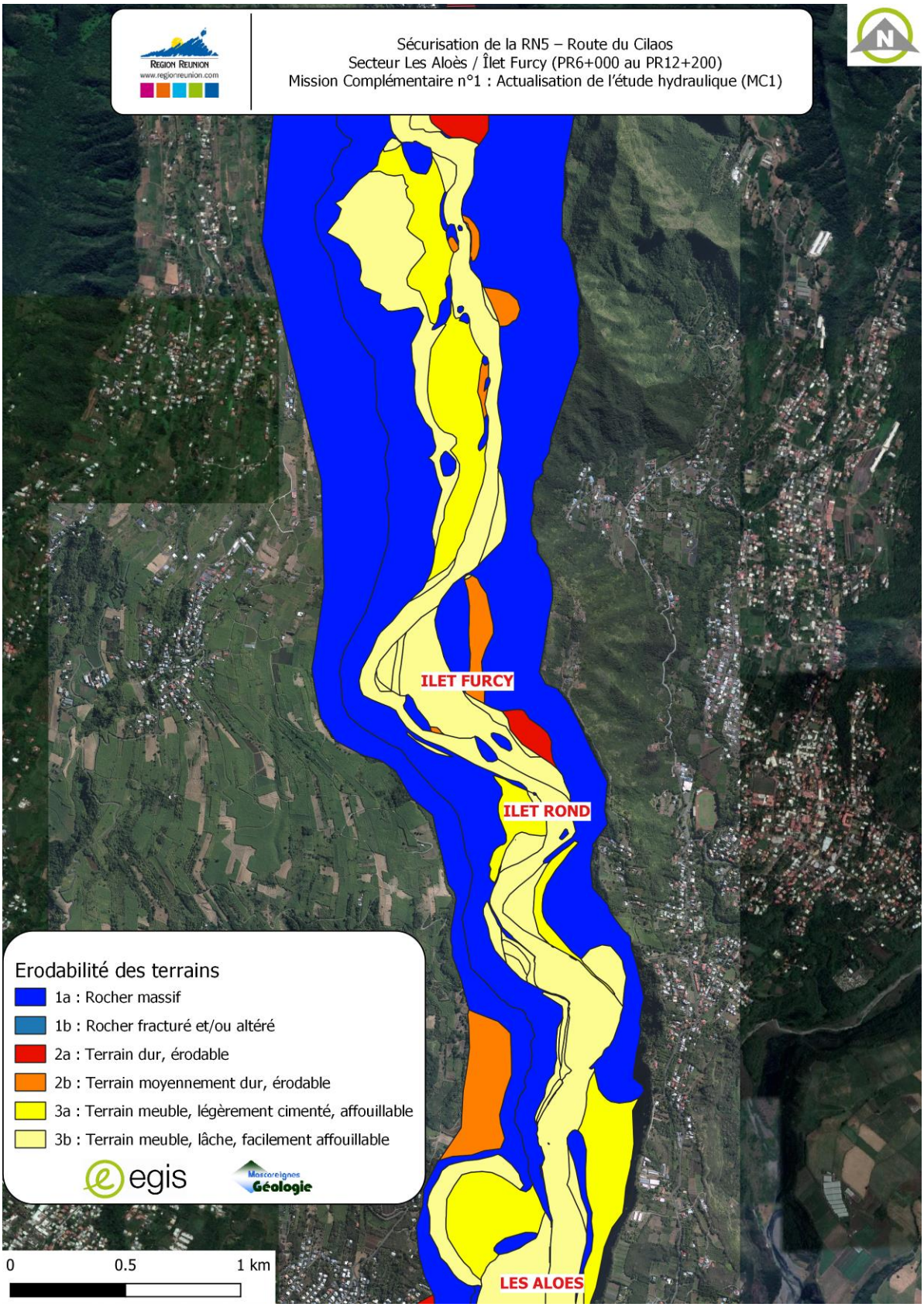


Figure 6 : Erodabilité des terrains du Bras de Cilaos

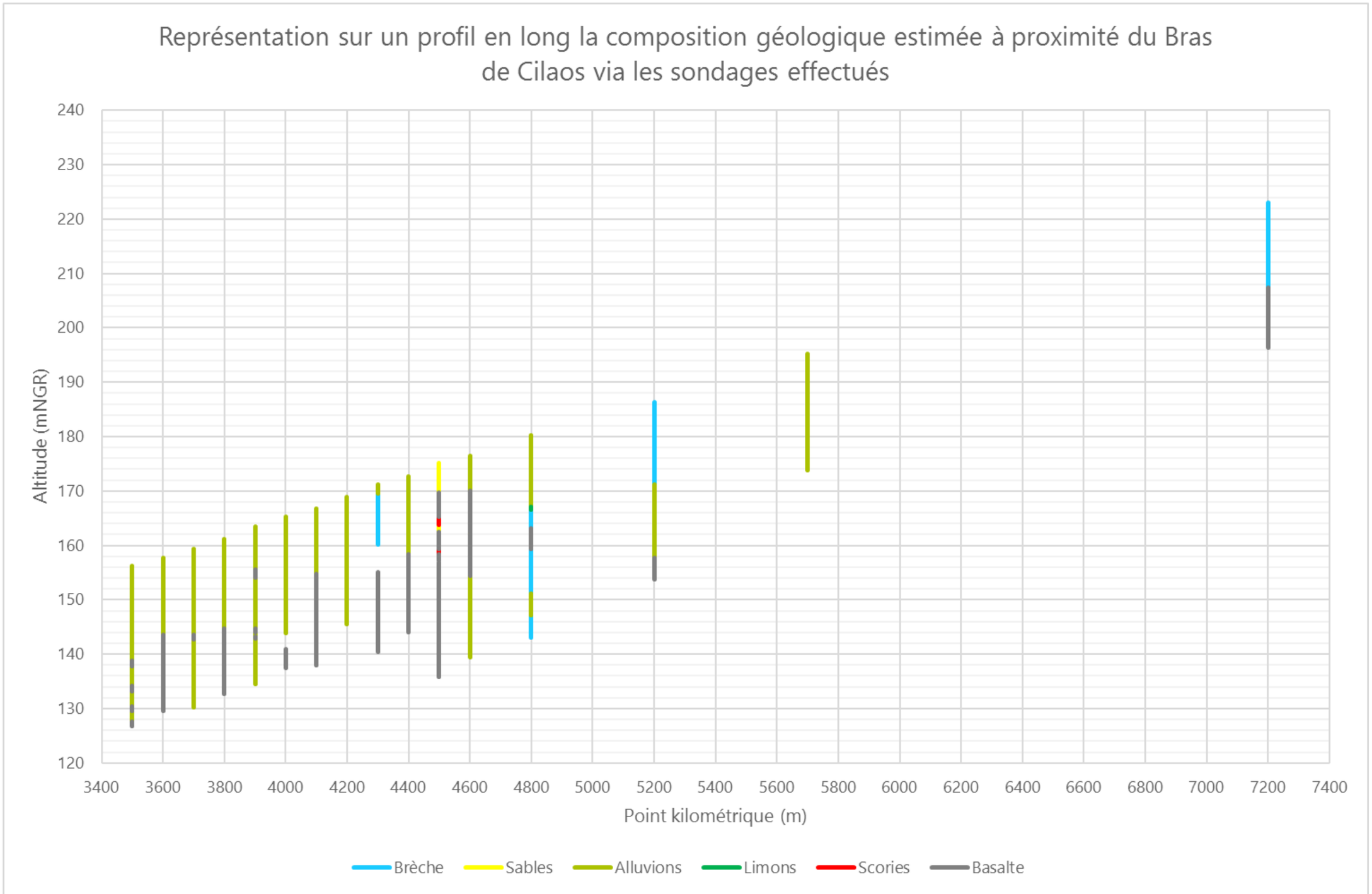


Figure 7 : Représentation sur un profil en long la composition géologique estimée à proximité du Bras de Cilaos via les sondages effectuées

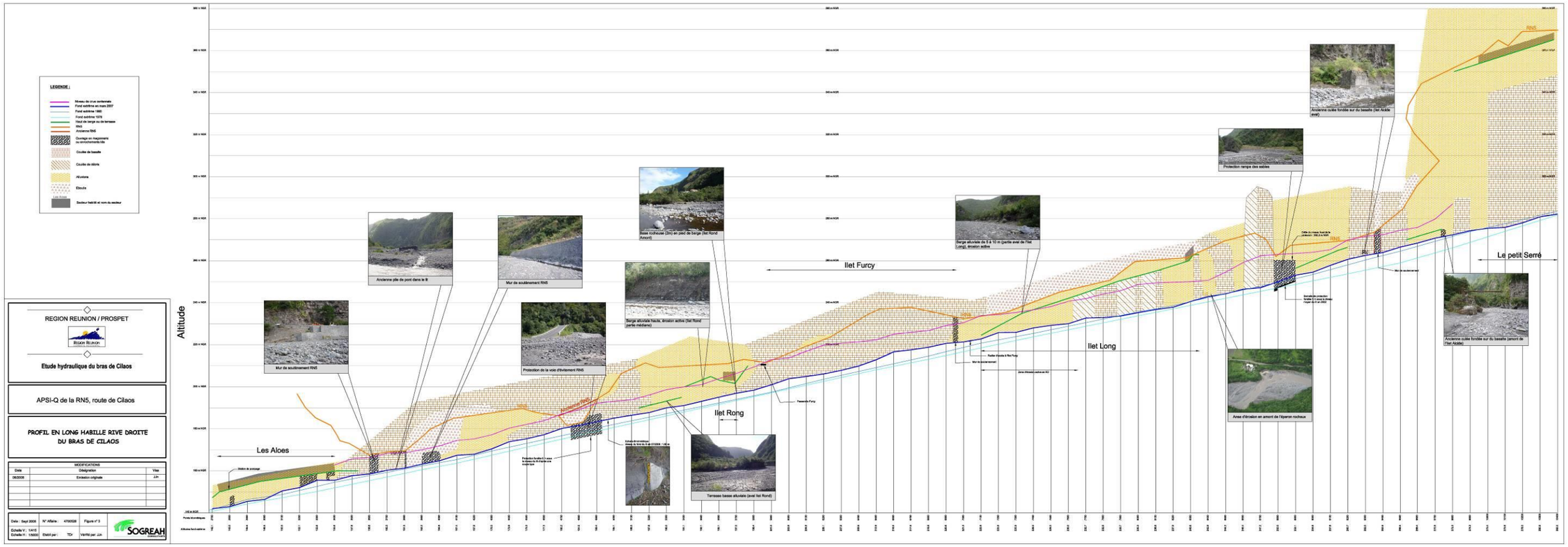


Figure 8 : Profil en long de la rive droite du Bras de Cilaos (SOGREAH,2009)

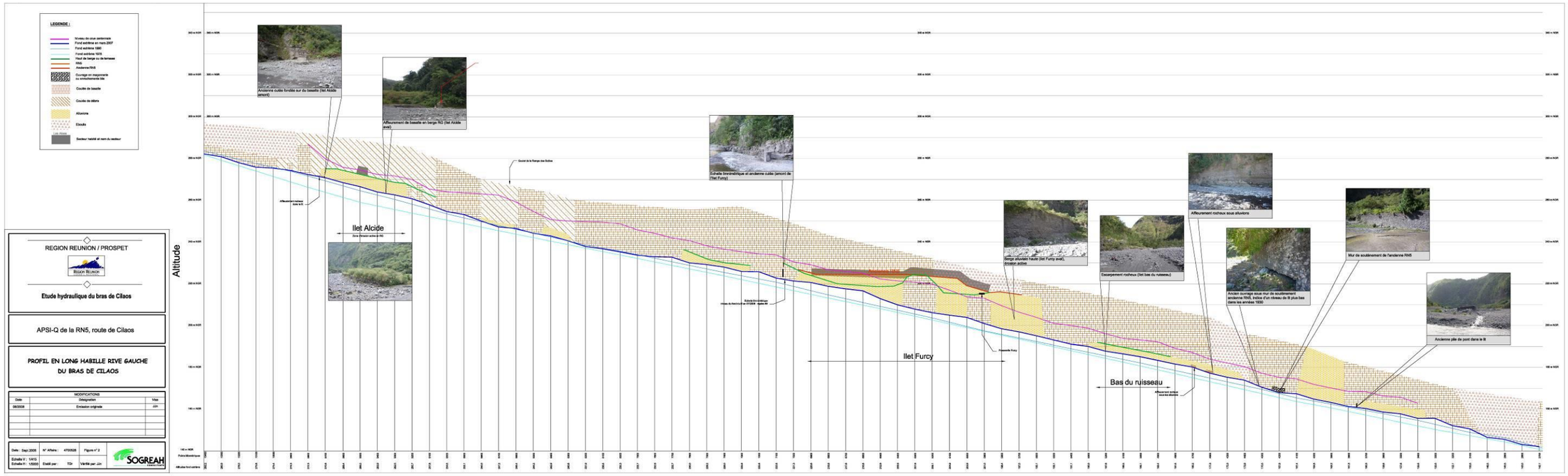


Figure 9 : Profil en long de la rive gauche du Bras de Cilaos (SOGREAH,2009)

4. Analyse historique

L'analyse historique a pour but de mettre en évidence les conséquences des évènements majeurs sur la zone d'étude. Cette analyse historique complète l'analyse effectuée par SOGREAH en 2009.

- 1938 : Eboulement du Cap Paille en Queue sur le Bras de Cilaos

Dans les gorges du Bras de Cilaos, au niveau du Cap Paille en Queue (PK BC9200), un pan de muraille conséquent s'est effondré, obstruant toute la largeur du lit et formant un barrage. Un lac s'est formé en amont d'une profondeur estimée à 10 m. Les matériaux effondrés ont été emportés au fil du temps par la ravine sans occasionner de dégâts.

La route fut déviée sur quelques centaines de mètres à cause de l'effondrement créant une paroi verticale. Elle passe ainsi de la rive droite à la rive gauche avant de revenir à la rive droite via deux ponts construits dans l'année de l'effondrement.

- 1948 : Passage du cyclone tropical des 26 et 27 janvier 1948

Le cyclone tropical fut extrêmement destructeur lors de son passage : les ouvrages situés dans les gorges du Bras de Cilaos sont emportés. L'ancienne route, qui passait en rive gauche depuis l'ilet des Aloès jusqu'à l'Ilet Furcy, n'est accessible que par des radiers fréquemment détruits par les crues. Cette situation durera 4 ans avant la reconstruction de la route en rive droite. L'ilet Furcy est ainsi isolé par cette construction.

- 1950 et 1957 : Premières photographies et première carte IGN

Les photographies IGN permettent de distinguer la terrasse de l'Ilet Furcy peu habitée à cette époque. Un chenal d'une largeur de 30 à 40 m est observé coupant la terrasse. Ce chenal a probablement été activé lors de la crue liée au cyclone de 1948.

Figure 10 : Photographie aérienne IGN de 1950

La première carte IGN édité au 1/50 000 permet de mettre en évidence :

- L'emprise du lit alluvial qui ne présente pas d'évolution notable par rapport à la situation actuelle ;
- La route RN5 présente un tracé passant par la rive droite du Bras de Cilaos. L'ancienne route passant en rive gauche est dessinée en pointillés sur la carte ;
- L'ilet Furcy présente des habitations sur sa terrasse ;
- Un tunnel était emprunté par la route RN5 au niveau de l'Ilet Furcy.

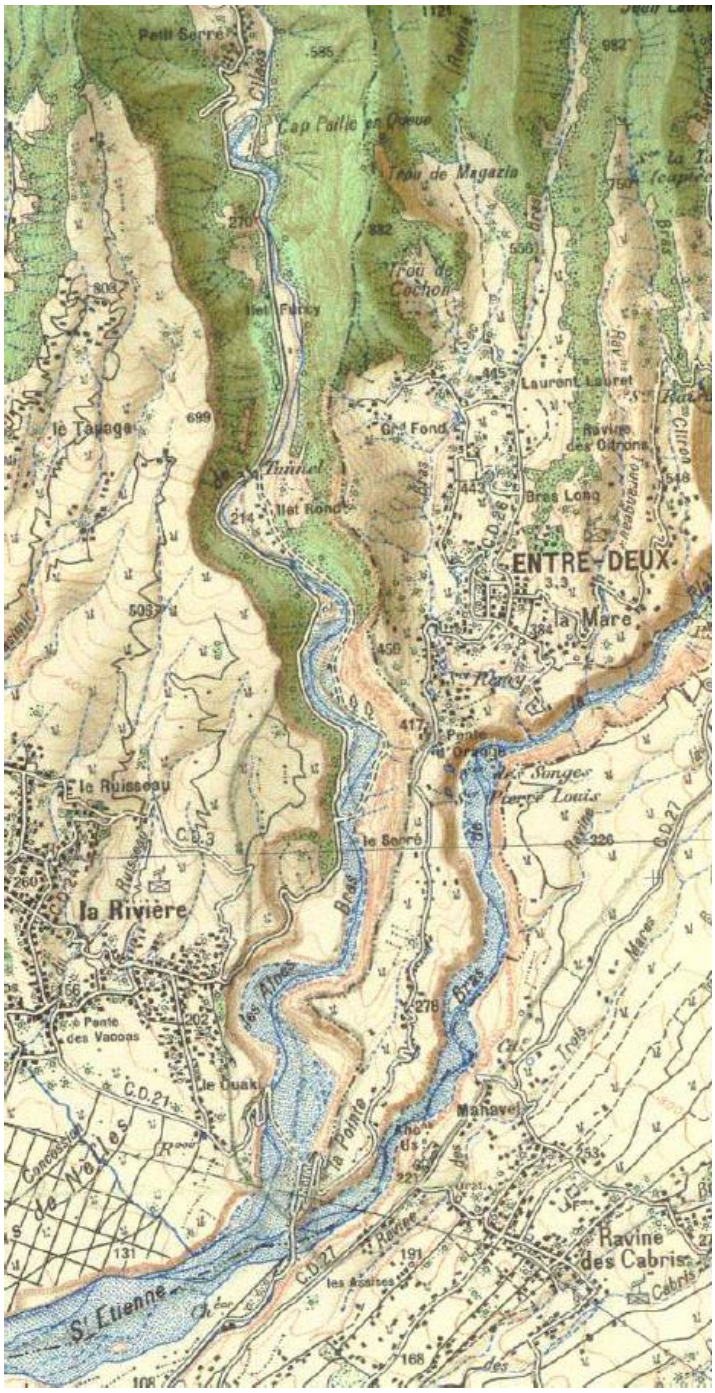


Figure 11 : Carte IGN de 1957 (1/50 000)

- 1964 : Le cyclone Giselle

Le cyclone Giselle ayant eu lieu entre le 27 Février et le 1er Mars 1964 présente une crue conséquente estimée à 2100 m^3/s (crue d'occurrence d'environ 30 ans).

- 1966 : Le cyclone Denise

Le cyclone Denise ayant eu lieu entre le 7 et le 8 Janvier 1966 présente une crue évaluée à une crue décennale sur la Rivière Saint-Etienne.

- 1978 : Construction de la passerelle d'accès à l'Ilet Furcy

L'Ilet devient accessible en période de crue grâce à la réalisation de cette passerelle d'accès.

- 1980 : Le cyclone Hyacinthe

Le passage du cyclone Hyacinthe a généré des précipitations continues entre le 18 et le 27 Janvier 1980.

Le volume de la crue générée par le cyclone est important. Il a été estimé à plus de 200 Mm^3.

Lors de cet évènement, l'érosion au niveau du cirque de Cilaos fut importante apportant des matériaux massifs par éboulement.

- 1987 : Le cyclone Clotilda

La crue liée au passage du cyclone a été évaluée à 1 140 m^3/s et est évaluée à une crue décennale.

- 1993 : Le cyclone Colina

La crue a été évaluée à une crue quinquennale (Q = 600 m^3/s).

- 1998 : Interdiction des extractions dans le lit du Bras de Cilaos

Malgré l'interdiction, des extractions dans le lit vif sont poursuivis.

- 2002 : Passages des cyclones Dina et Hary

La crue liée au passage du cyclone Dina est évaluée à une crue d'occurrence 20 ans (Q = 1400 m3/s). Elle est considérée comme la plus forte crue recensée depuis Giselle (1964).

Lors de cet évènement, la berge en rive droite et la route au niveau de la Rampe des Sables (PK BC8800) furent emportées sur environ 150 m.

En fin d'année 2002, une protection en enrochements liés dimensionnée pour une crue décennale à trentennale est mise en place. Cette protection est toujours en place à l'heure actuelle.

Figure 12 : Etat de la protection de berge en rive droite (2019)

- 2002 : Eboulement sur la RN5 au PK BC4800

Au niveau du Bas du Ruisseau, le rempart rive droite du Bras de Cilaos s'est effondré en avril 2002 sur la route RN5. Une voie d'évitement est réalisée en bordure de lit ainsi qu'une protection en enrochements liés.

- 2006 : Le cyclone Diwa

La crue liée au passage de Diwa est évaluée à 800 m^3/s et a engendré des dégâts conséquents :

- Détérioration de la voie d'évitement au niveau du Bas du Ruisseau (Réparation en fin d'année 2006) ;
- Comblement des fosses d'extraction dans la boucle de l'Equerre du Bras de Cilaos ;
- Destruction du radier du Ouaki.

- 2007 : Le cyclone Gamède

Entre le 24 et le 28 Février 2007, le passage du cyclone Gamède a engendré de fortes pluies. La crue qui lui est liée a été évaluée à 1 200 m^3/s (crue supérieure à 10 ans).

Lors cet évènement, le pont aval de la Rivière Saint-Etienne a été détruit.

Suite à cet évènement, la protection au niveau de la voie d'évitement a été confortée et un mur de soutènement a été réalisée au PK BC3600.

- 2007 : Photogrammétrie du Bras de Cilaos

La topographie couvre l'ensemble de la zone d'étude à l'échelle 1/5000ème. La précision de cette topographie donne une bonne tendance du comportement du cours d'eau en 2007.

- 2013 : Le cyclone Dumile

Le passage du cyclone Dumile entre le 1er et le 3 Janvier 2013 a généré une crue quinquennale (Q = 600 m^3/s) d'après la modélisation pluie-débit.

Lors de cet évènement, le radier du Ouaki a été emporté.

- 2014 : Le cyclone Bejisa

Suite au passage du cyclone Bejisa, la route RN5 a subi de nombreux éboulements, glissements de terrain et coulées de boues qui ont bloqué la route et isolé les habitants du cirque du Cilaos pendant 3 jours.

La crue liée au cyclone a été évaluée à une crue supérieure à une crue quinquennale (Q = 780 m^3/s).

Lors de cet évènement, le radier du Ouaki a été emporté.

- 2016 : Litto3D

Cette topographie, réalisée par le SHOM et l'IGN en 2016, présente une densité de données d'un point par m^2. Cette précision meilleure qu'une photogrammétrie permet d'avoir une représentation optimale du cours d'eau en 2016.

- 2018 : Successions d'évènement majeurs (Berguitta, Dumazile, Fakir)

Le début de l'année 2018 (janvier à avril) fut durement impacté par les tempêtes tropicales Berguitta, Dumazile et Fakir. Les dépressions tropicales accompagnées de fortes précipitations ont généré la destruction du radier du Ouaki et la coupure définitive de la route RN5 isolant toute la partie amont habitée du Bras de Cilaos (Cilaos et ses ilets).

Afin de répondre à l'urgence, la région Réunion a réalisé les travaux d'urgence suivants durant près de 4 mois :

- Le déblaiement de chaussées et autres curages d'ouvrages hydrauliques suite aux nombreux éboulis
- La réparation d'ouvrages endommagés
- Le confortement de murs de soutènement
- Les réparations de chaussées
- La création d'une piste en rivière puis sa pérennisation (réhausse, enrochements liés, travaux de renforcement de chaussées)
- La création d'un ouvrage d'art de type Bailey à l'Ilet à Furcy
- Deux radiers ont été réalisés en urgence et repris après chaque événement, pour permettre le franchissement de la rivière

- 2018 : Modèle Numérique de Terrain

La topographie, réalisée par SINTEGRA dans le cadre de cette étude, couvre l'ensemble de la zone d'étude avec une densité de données d'un point par m². Cette topographie réalisée en décembre 2018 est considérée comme représentative de l'état actuel de la rivière au vu la saison cyclonique 2019 plutôt clémente.

5. Analyse hydrologique

5.1 Description générale du bassin versant

Le bassin versant du Bras de Cilaos est décomposé en deux secteurs distincts : le cirque de Cilaos et les gorges du Bras de Cilaos entre le Pavillon et la confluence avec le bras de la Plaine.

La surface du bassin versant est répartie de la façon suivante :

- 85 km² pour le cirque de Cilaos ;
- 15 km² pour les gorges du Bras de Cilaos.

La superficie totale du bassin est ainsi de 100 km².

En amont, trois affluents du Grand Bras de Cilaos sont observés : le Bras Rouge, le Bras de Benjoin et le Bras de Saint Paul :

- Le Bras Rouge provient des reliefs créés par le Piton des Neiges et se distingue par son tracé sinueux et sa succession de seuils rocheux ;
- Le Bras de Benjoin récupère la partie nord-est du cirque et les plateaux habités de Cilaos et de Bras Sec ;
- Le Bras de Saint Paul incise la partie ouest du cirque, depuis le rempart jusqu'au village d'Ilet à Cordes.

En aval, le Grand Bras de Cilaos conflue avec le Petit Bras de Cilaos pour former le Bras de Cilaos.

Le Petit Bras de Cilaos draine la partie sud-est du cirque entre la crête du Gros Morne de Gueule Rouge et le rempart.

Le point haut du bassin versant se situe au niveau du Piton des Neiges à 3069 m NGR.

En aval du radier du Ouaki, le Bras de Cilaos et le Bras de la Plaine confluent pour former la Rivière Saint Etienne.

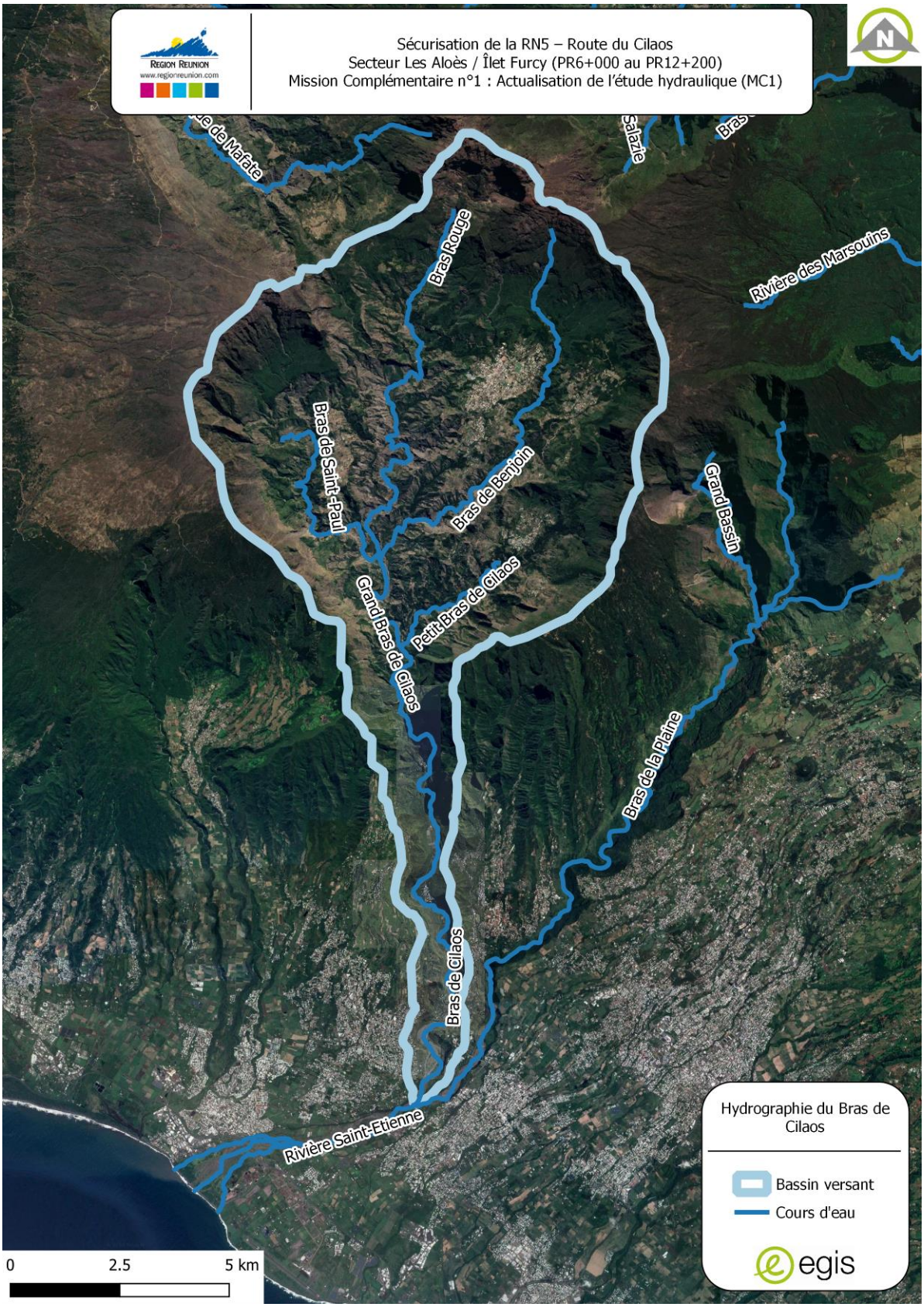


Figure 13 : Hydrographie du Bras de Cilaos

5.2 Analyse des pluies

Une analyse des pluies sur le secteur du Bras de Cilaos a été établie par le bureau d'études SOGREAH en 2009 dans le cadre de l'étude hydraulique de l'APSI-Q de la RN5, Route de Cilaos.

Cette analyse est reprise et actualisée dans la présente étude.

5.2.1 Postes pluviométriques étudiés

Trois stations pluviométriques sont situées dans le cirque de Cilaos (Ilet à Cordes, Palmiste Rouge et Cilaos), ainsi que la station de Bras Long qui par sa localisation en plan et altitude est plus représentative des gorges du Bras de Cilaos. La station des plaines des Cafres est également prise en compte pour comparer les données horaires de Cilaos.

Le tableau ci-dessous présente les caractéristiques des stations retenues. Elles sont localisées sur la page suivante.

Poste	Numéro de poste	Type	Fréquence	Altitude (m NGR)	Fin de la mesure	Nombre d'années disponibles	Remarques
Bras-Long	974 03 440	4	Journalière	430	En service	52	
Cilaos	974 24 410	1	Horaire	1 197	En service	67	Station synoptique depuis 06/1989
Ilet à Cordes	974 24 450	2	Journalière	1 067	En service	41	Station synoptique depuis 04/2013
Palmiste Rouge	974 24 460	4	Journalière	830	En service	57	
Plaine des Cafres	974 22 440	1	Horaire	1 560	En service	71	Station synoptique depuis 01/1965

Les stations de type 1 et 2 sont des stations synoptiques Météo France et les stations de type 4 sont des postes bénévoles.

Les fiches descriptives des différents postes pluviométriques sont disponibles en Annexe.

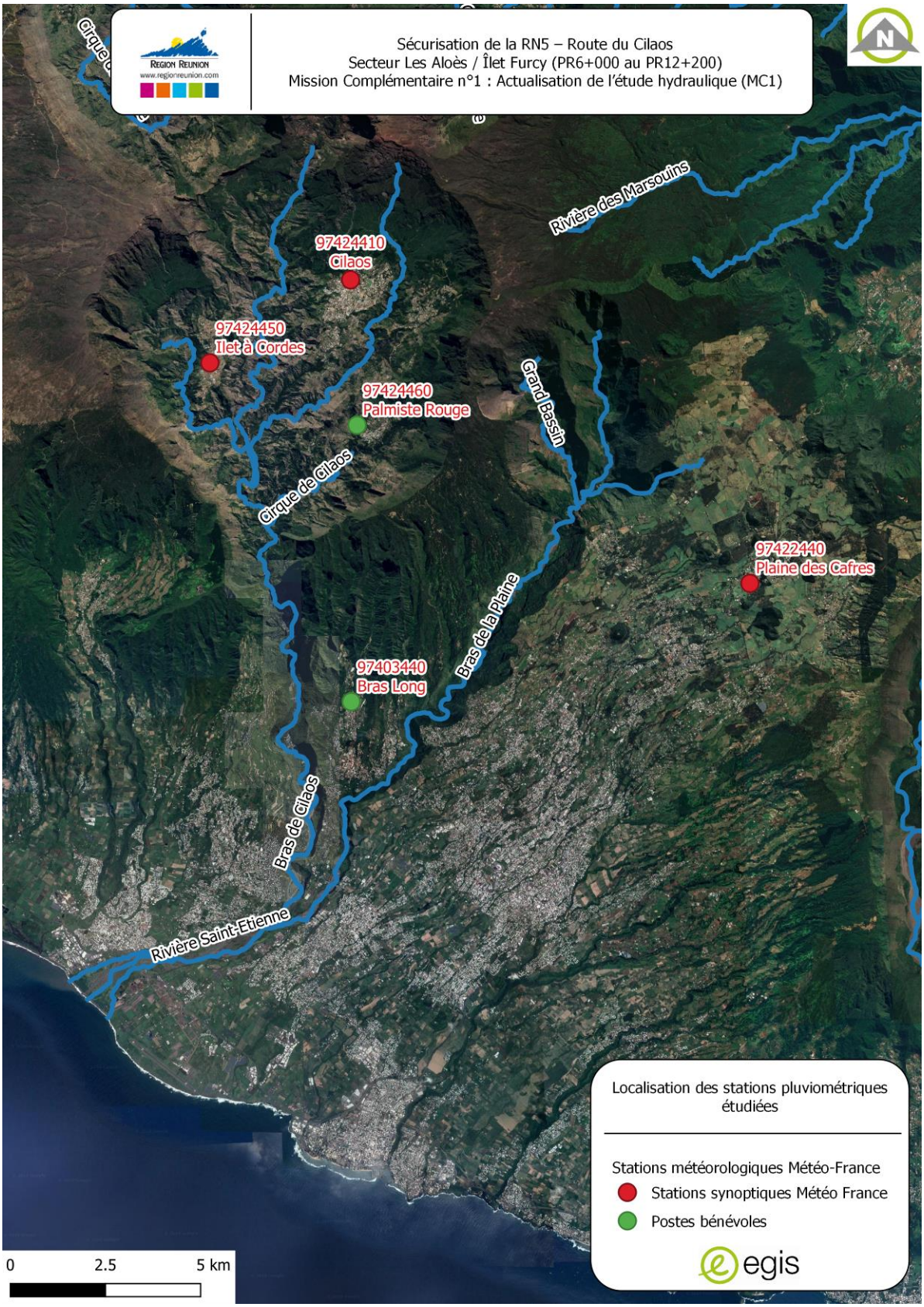


Figure 14 : Localisation des stations pluviométriques

5.2.2 Ajustements statistiques

Les pluies journalières maximales annuelles ont fait l'objet d'ajustements statistiques selon une loi de Gumbel. La figure ci-après présente l'ensemble de ces ajustements.

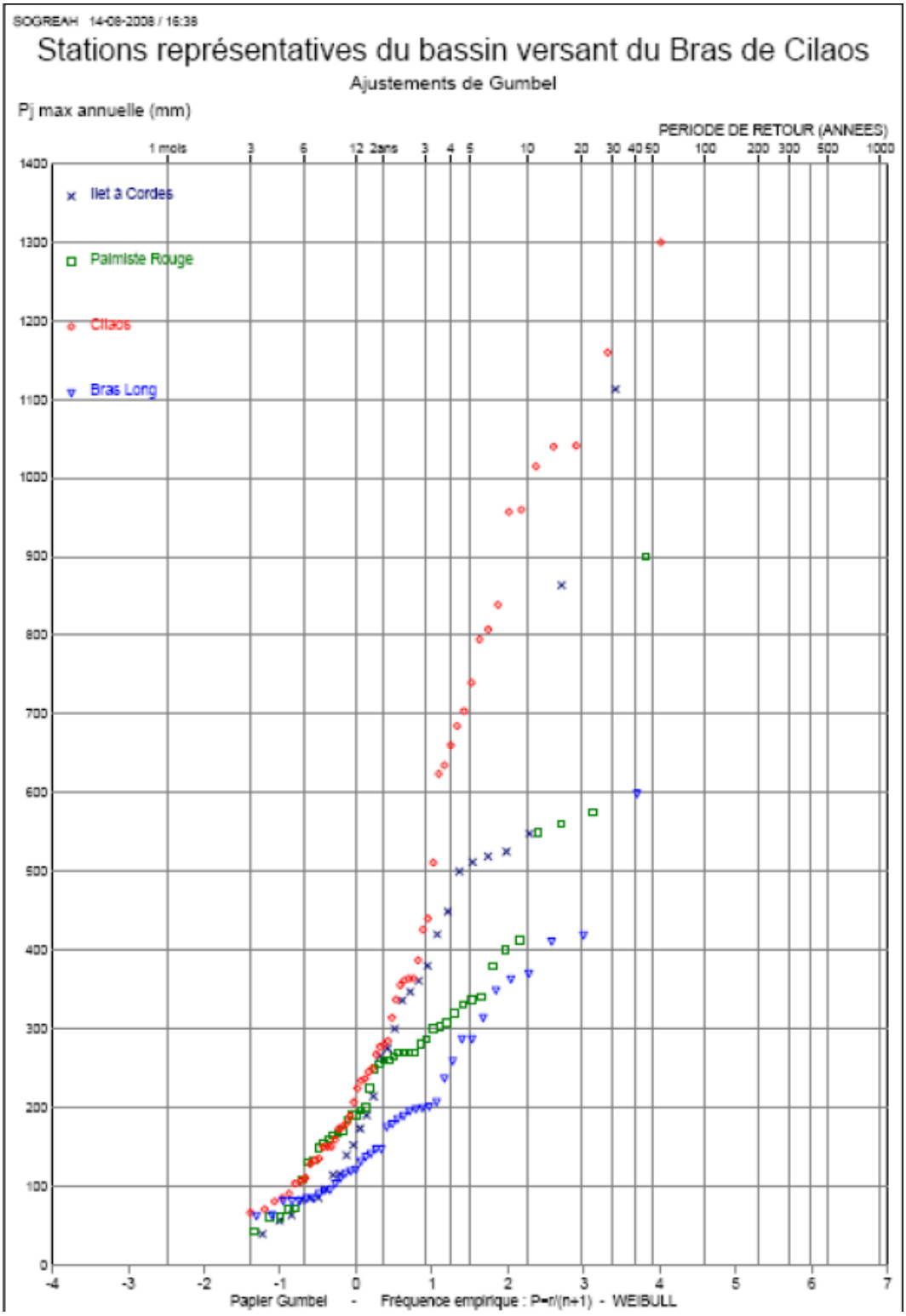


Figure 15 : Ajustement des Pluies journalières maximales annuelles (SOGREAH, 2009)

Ces ajustements présentent systématiquement une cassure intervenant pour une période de retour comprise entre six mois et un an pour la plupart des stations.

L'étude de la répartition des pluies à La Réunion a permis d'expliquer cette cassure par le fait que des phénomènes différents peuvent être à l'origine des maximums annuels de pluie :

- Les pluies d'origine cyclonique directe ;
- Les autres pluies.

5.2.3 Pivots retenus et groupes de stations homogènes

Le pivot correspond à la valeur de la fréquence empirique correspondant au point d'intersection de la droite d'ajustement avec l'axe des abscisses. Ce pivot est théoriquement associé au nombre moyen d'événements générant les maximums annuels.

La cassure de la droite d'ajustement permet de distinguer deux pivots distincts. Il traduit le fait que le nombre moyen d'événements générant les maximums annuels est différent si l'on considère les pluies cycloniques et les autres pluies.

Une vérification sur les droites d'ajustement a été établie. Elle consiste à confirmer si les droites d'ajustement présentaient des pivots communs, indiquant une certaine homogénéité entre les postes, quant à la nature des phénomènes générant les fortes pluies.

De cette analyse, il découle qu'une certaine homogénéité existe à l'échelle du cirque de Cilaos, permettant de regrouper les 3 stations, alors que la station de Bras Long présente des pivots différents :

- Stations du cirque de Cilaos (Cilaos, Ilet à Cordes et Palmiste Rouge) :

Les pivots sont les suivants :

- $Y_0 - 1 = -2$
- $Y_0 - 2 = -0.7$

L'ajustement est relativement satisfaisant pour les stations de Cilaos et Ilet à Cordes (cassure entre 6 mois et 1 an) et moins satisfaisant pour Palmiste Rouge (cassure vers 3 ans)

- Station de Bras Long :

Les pivots sont les suivants :

- $Y_0 - 1 = -3$
- $Y_0 - 2 = -1.4$

L'ajustement est satisfaisant et présente ainsi une cassure entre 6 mois et 1 an.

Les graphiques des deux ajustements réalisés sont présents sur les pages suivantes.

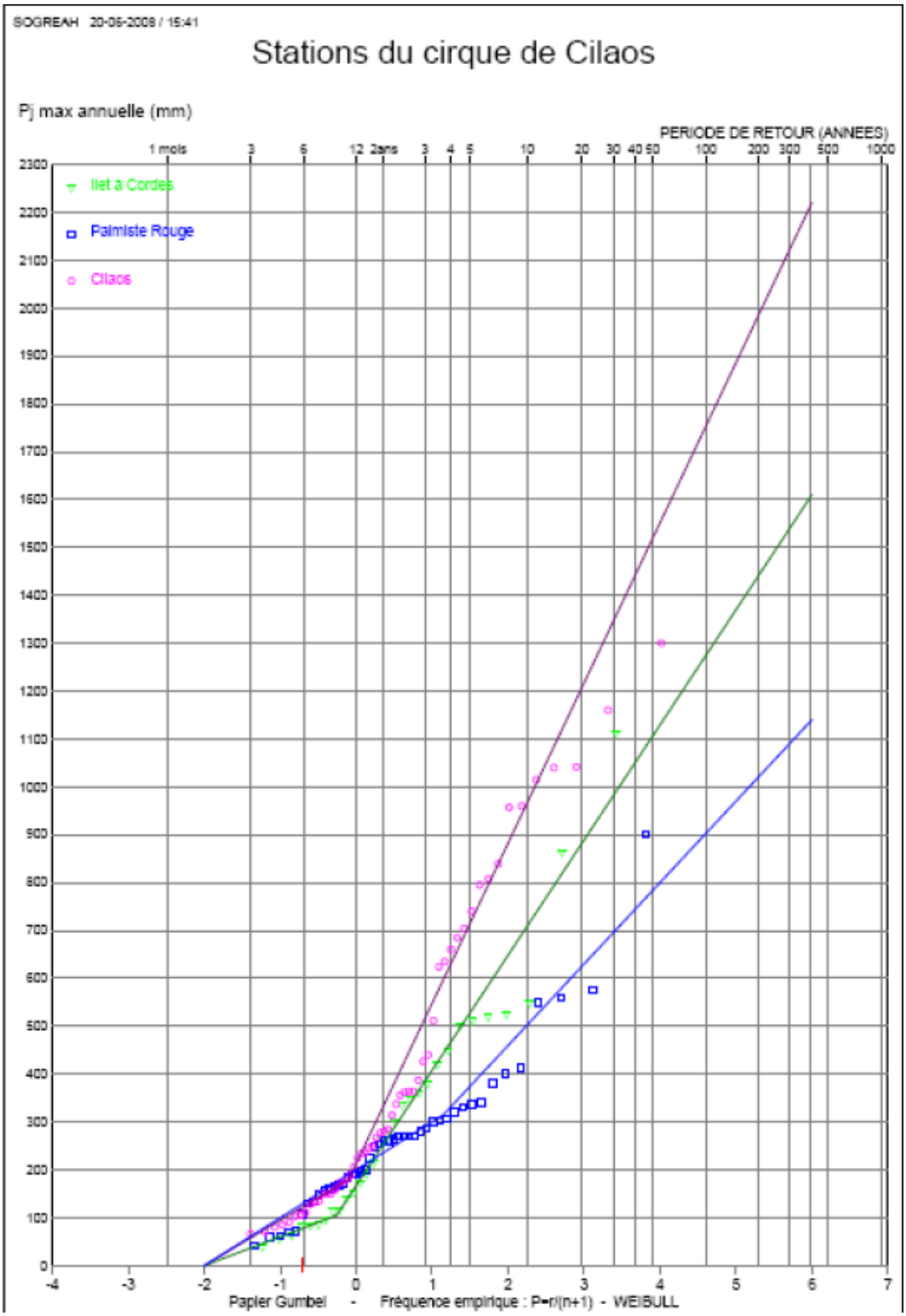


Figure 16 : Ajustement des Pluies journalières maximales annuelles pour les stations du Cirque de Cilaos (SOGREAH, 2009)

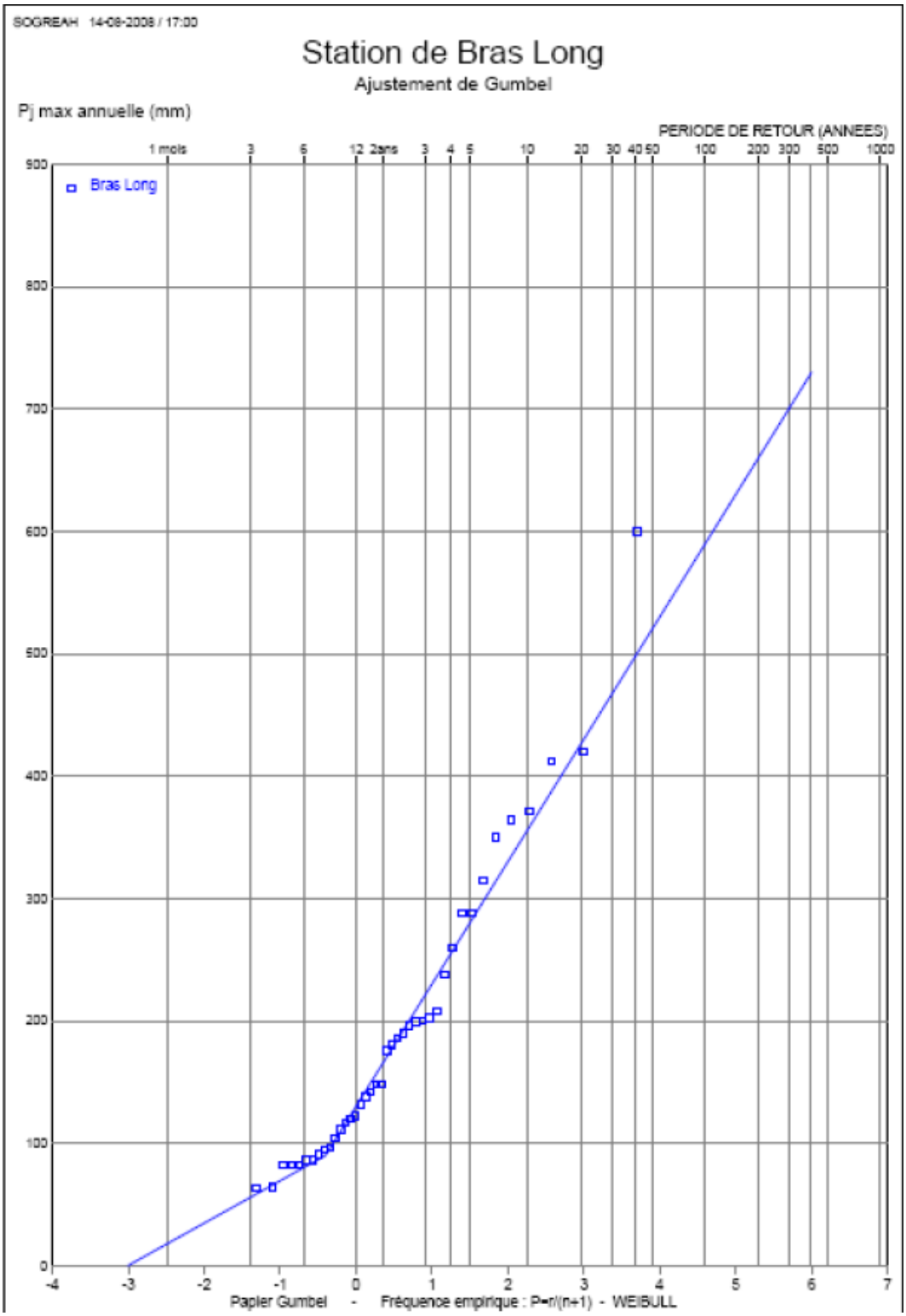


Figure 17 : Ajustement des Pluies journalières maximales annuelles pour la station de Bras Long (SOGREAH, 2009)

5.2.4 Pluies journalières caractéristiques

Les quantiles de pluies journalières ont été estimés à partir des ajustements réalisés.

Station	Altitude (m NGR)	Pj2 (mm)	Pj5 (mm)	Pj10 (mm)	Pj30 (mm)	Pj100 (mm)	Pj500 (mm)
Bras Long	430	170	280	360	470	590	760
Palmiste Rouge	830	240	380	500	690	900	1 180
Ilet à Cordes	1 067	260	530	710	980	1 280	1 660
Cilaos	1 197	330	710	970	1 340	1 750	2 390

Tableau 5 : Quantiles de pluies journalières estimés (SOGREAH, 2009)

L'altitude influe considérablement dans la répartition des pluies. Cependant, une étude précédente réalisée sur le bassin versant de la Rivière Saint-Etienne met en évidence que ce facteur n'est pas déterminant pour les stations les plus arrosées dans une approche globale à l'échelle du bassin versant.

La mauvaise corrélation entre l'altitude et la pluviométrie peut s'explique par deux type de phénomènes :

- Un "effet de cuvette", déjà mis en évidence dans d'autres vallées de l'île, où on observe une pluviométrie maximale similaire en fond de vallée et en sommet de rempart ;
- Des phénomènes orographiques liés à la configuration en cirque des deux têtes de bassin versant venant renforcer cet effet de cuvette.

5.2.5 Comparaison de la station de Cilaos avec les autres stations

Afin d'estimer les débits de crue par des méthodes basées sur la pluviométrie, la station de Cilaos est utilisée comme station de référence sur le bassin versant. Elle est intéressante car elle dispose de la plus longue chronique parmi les stations situées sur le bassin.

Une comparaison par équifréquence (séries de maximums annuels journaliers classés sur une période précise) est proposée pour estimer la qualité de la corrélation.

Les relations obtenues entre les pluies maximales à Cilaos et celles des autres stations sont synthétisées dans le tableau suivant.

Station	Corrélation Pj max à la station (Pjms) / Pj max à Cilaos (PjmC)	Qualité de la corrélation
Palmiste Rouge	Pjms = 0.592 x PjmC	Médiocre
Ilet à Cordes	Pjms = 0.752 x PjmC	Moyenne
Bras Long	Pjms = 0.385 x PjmC +52	Très bonne

Tableau 6 : Corrélation équifréquences (SOGREAH, 2009)

La qualité générale des corrélations permet de retenir la station de Cilaos comme représentative du bassin versant.

5.3 Débits caractéristiques de crue

Les débits de pointe de crue pour les occurrences 2 ans, 5 ans, 10 ans, 30 ans, 100 ans et 500 ans sont tirées de l'étude hydraulique de SOGREAH réalisée en 2009 dans le cadre de l'APSI-Q de la RN5, Route de Cilaos.

Le débit de pointe de la crue millénale sera déterminé par un ajustement selon une loi de Gümbel à partir des valeurs de l'étude de SOGREAH.

5.3.1 Estimation des débits de pointe de crue

En l'absence de données hydrométriques sur le bassin versant, l'estimation des débits de pointe de crue repose nécessairement sur des méthodes basées sur la pluviométrie.

La méthodologie établie lors de l'élaboration de la monographie de la Rivière Saint Etienne en 1988 et révisée en 2007 a été conservée, en actualisant chacun des termes des formules employées à partir des données actuellement disponibles. Elle consiste aux étapes de calcul suivantes :

- Détermination des pluies maximales journalières sur les bassins pour une longue période d'observation ;
- Leur extension à des durées inférieures à la journée grâce aux travaux de M. DURET pour la DDE de la Réunion ;
- Leur conversion en débits par le biais de la méthode rationnelle.

Cette méthodologie a été appliquée au bassin versant du Bras de Cilaos.

Le temps de concentration retenu est égal à 4 heures. Il a établi par la monographie pour la Bras de Cilaos au Pavillon. Il a été vérifié via les formules classiquement utilisées en hydrologie (Passini, Ventura et Turraza). Elles fournissent une estimation voisine de 4 heures.

Dans le cadre de la modélisation pluie/débit, les hyétogrammes disponibles associés aux principaux évènements pluvieux survenus ces 50 dernières années ont été acquis auprès de Météo France.

Il s'agit soit de données horaires soit de mesures à pas de temps variable qui ont fait l'objet d'une transformation en données horaires.

Ces données ont permis de préciser le rapport entre les pluies de courte durée et les pluies journalières.

La valeur moyenne obtenue après analyse de 23 hyétogrammes associés à 4 stations pluviométriques (Cilaos, Plaine des Cafres, Ilet à Cordes et Bras Sec) sont les suivantes :

$$\frac{P4h}{Pj} = 0.32$$

Cette valeur moyenne de rapport des pluies courtes aux pluies journalières est retenue car elle est jugée représentative du bassin versant.

En fonction du découpage en sous bassins versants et de la pondération des postes pluviométriques associés à chaque sous bassin, une comparaison a été établie entre le calcul de la pluviométrie à un bassin versant donné pour plusieurs évènements pluvieux importants et de la pluviométrie mesurée pour ces mêmes évènements à la station de Cilaos.

Les valeurs obtenues de ratio moyen entre la pluviométrie du bassin versant et la pluviométrie à Cilaos.

Bassin versant	Ratio moyen entre la pluviométrie associée au bassin et la pluviométrie à Cilaos
Bassin versant du Bras de Cilaos au Pavillon	0.89
Bassin versant du Bras de Cilaos au Ouaki	0.85

Tableau 7 : Rapport entre la pluviométrie du bassin versant et la pluviométrie à Cilaos

Les débits caractéristiques de crue pour le Bras de Cilaos sont estimés et synthétisés dans le tableau suivant.

		Période de retour					
		2 ans	**5 ans**	**10 ans**	**30 ans**	**100 ans**	**500 ans**
Bras de Cilaos au Pavillon (85 km²)	**Débit de pointe (m^3/s)**	**130**	**590**	**1100**	**2030**	**2650**	**3620**
	Débit spécifique ($m^3/s/km^2$)	1.5	6.9	12.9	23.9	31.2	42.5
Bras de Cilaos au Ouaki (100 km²)	**Débit de pointe (m^3/s)**	**140**	**660**	**1240**	**2290**	**2990**	**4090**
	Débit spécifique ($m^3/s/km^2$)	1.4	6.6	12.4	22.9	29.9	40.8

Tableau 8 : Estimation des débits caractéristiques (SOGREAH, 2009)

Afin d'estimer la crue millénale au Pavillon et au Ouaki, un ajustement selon une loi de Gümbel à partir des valeurs estimées de SOGREAH a été retenu.

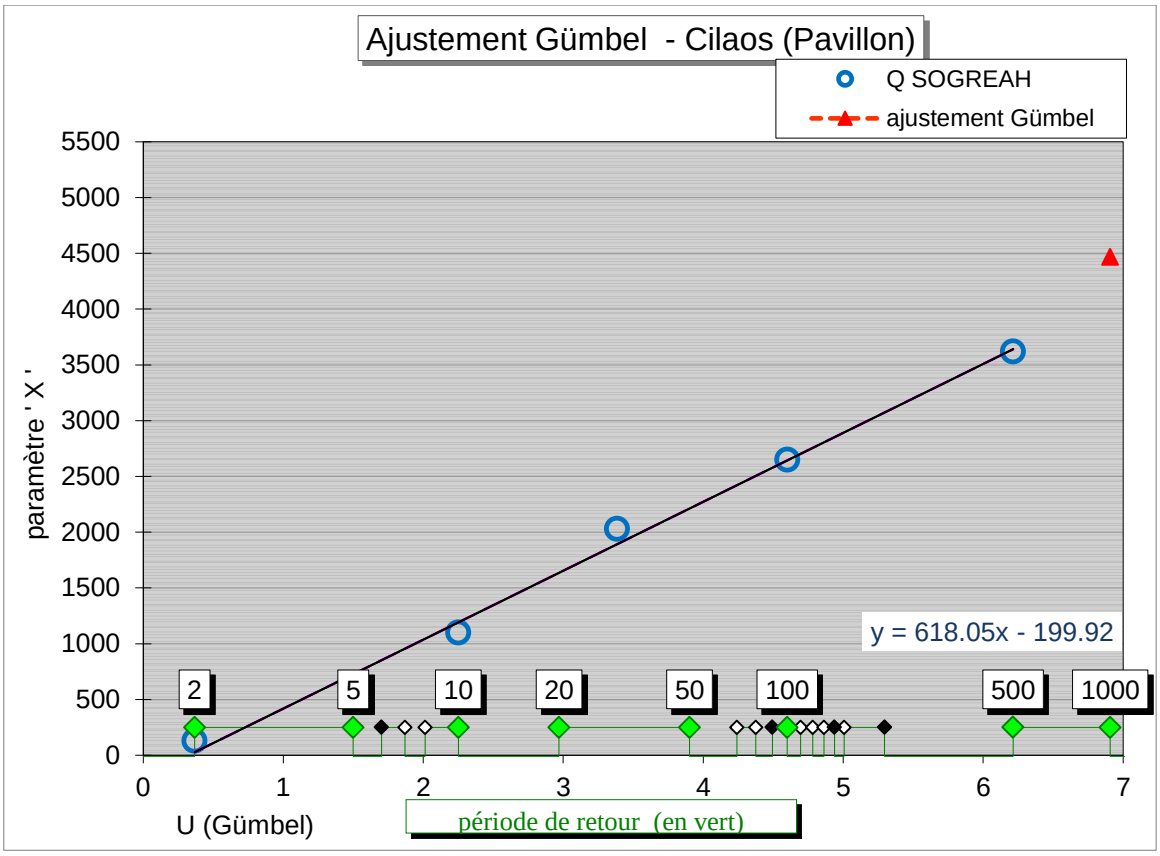


Figure 18 : Ajustement selon une loi de Gümbel des débits de pointe au Pavillon

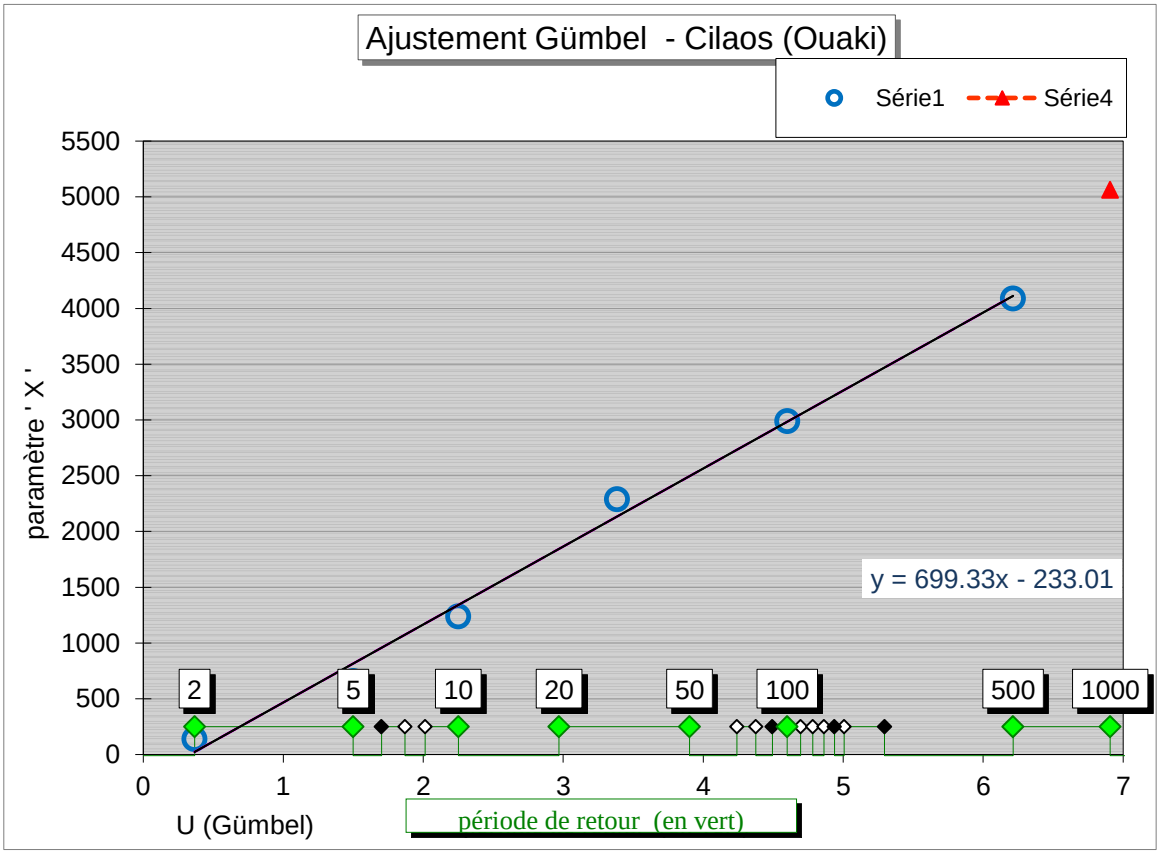


Figure 19 : Ajustement selon une loi de Gümbel des débits de pointe au Ouaki

Les débits de pointe pour la crue millénale aux différents points de calcul sont synthétisés dans le tableau ci-dessous.

		Période de retour
		1000 ans
Bras de Cilaos au Pavillon (85 km²)	**Débit de pointe (m³/s)**	**4470**
	Débit spécifique (m³/s/km²)	52.6
Bras de Cilaos au Ouaki (100 km²)	**Débit de pointe (m³/s)**	**5070**
	Débit spécifique (m³/s/km²)	50.6

Tableau 9 : Estimation du débit de pointe de la crue millénale

5.4 Modélisation pluie-débit

La modélisation pluie débit inclut les évènements pluvieux observés depuis 2009. Elle a pour objectif de mieux comprendre la genèse des crues et de reconstituer le plus grand nombre d'hydrogrammes de crue afin modéliser le transport solide.

5.4.1 Découpage en sous-bassins versants

Le bassin versant du Bras de Cilaos a été découpé en 3 sous-bassins versants pour la modélisation pluie-débit.

Deux sous-bassins versants correspondent au cirque de Cilaos (bassin versant amont) et un sous-bassin versant correspond aux gorges du Bras de Cilaos, entre Pavillon et Ouaki.

Le bassin versant amont a été découpé en deux du point de vue de leur géologie : sous-bassins versants BC_cirque_ilets et BC_cirque_remparts.

Les caractéristiques des sous-bassins versants sont disponibles dans le tableau ci-dessous.

Sous-bassin versant	Description	Exutoire	Superficie (km^2)	Altitude médiane (m NGR)
BC_cirque	Cirque de Cilaos	Pavillon	85.1	1257
BC_cirque_ilets	Partie des formations détritiques (arbitrairement pentes < 100%)		63.8	
BC_cirque_remparts	Partie des formations basaltiques (arbitrairement pentes >= 100%)		21.4	
BC_gorges	Gorges du Bras de Cilaos	Radier du Ouaki	15.3	452

Tableau 10 : Caractéristiques des sous-bassins versants pour la modélisation pluie-débit

Le découpage en sous versants est disponible sur la figure à la page suivante.

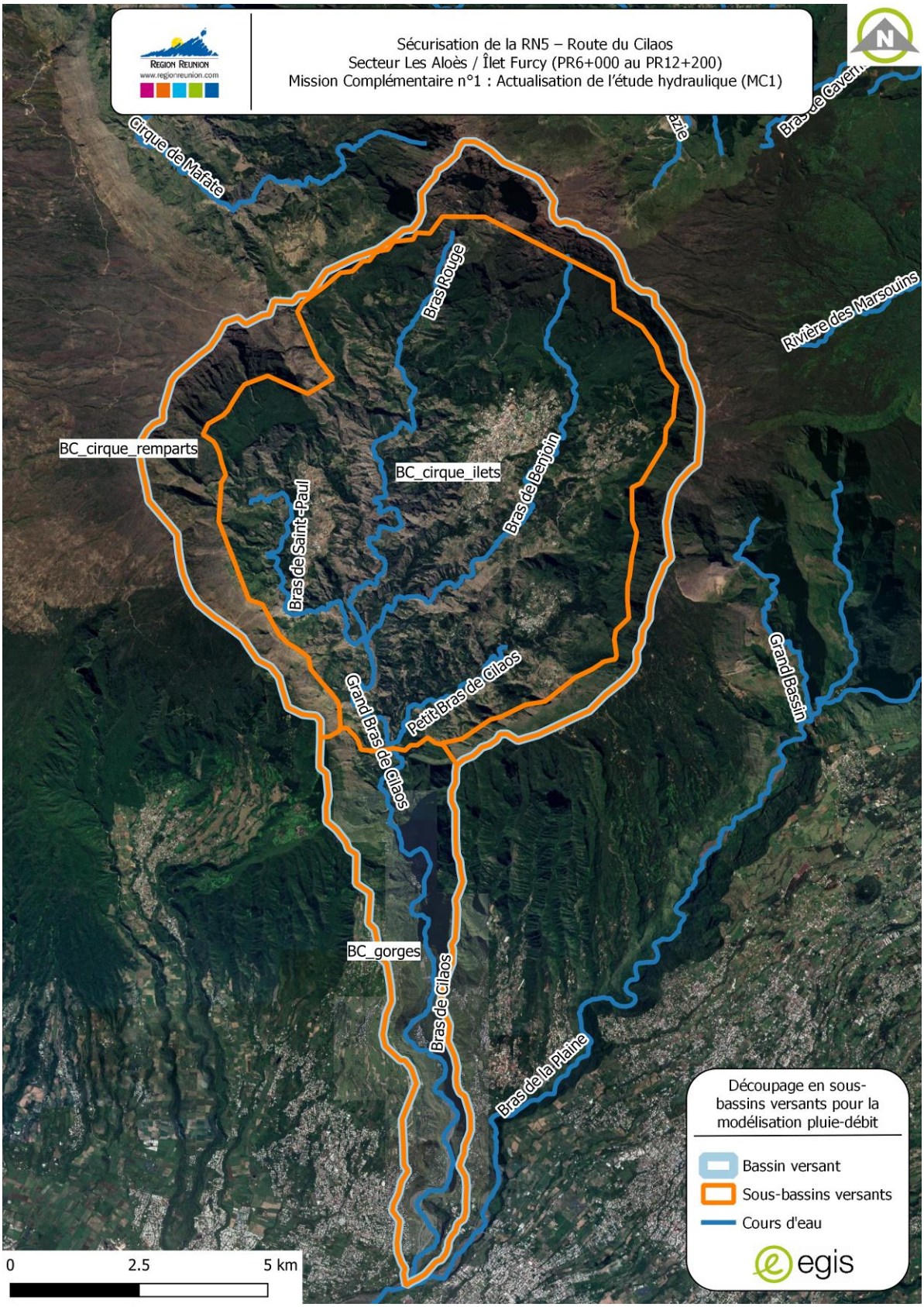


Figure 20 : Découpage en sous-bassins versants pour la modélisation pluie-débit

5.4.2 Données pluviographiques utilisées

La modélisation pluie-débit d'un épisode pluvieux nécessite de données horaires ou inférieur à la journée.

Parmi les stations pluviométriques recensées pour l'étude, trois stations fournissent des données horaires : Cilaos (Station synoptique depuis 06/1989), Ilet à Cordes (Station synoptique depuis 04/2013) et Plaine des Cafres (Station synoptique depuis 01/1965).

La station Ilet à Cordes dispose des données horaires antérieures au statut station synoptique. En effet, la station bénévole de l'époque fournissait des données horaires ou des données « à pas de temps variable » qui ont fait l'objet d'une transformation en données horaires.

Le listing des données pluviographiques utilisées est disponible dans le tableau ci-dessous.

Date	Cilaos		Ilet à Cordes		Palmiste Rouge		Bras Long		Plaine des Cafres	
	97424410		97424450		97424460		97403440		97422440	
	H	Q	H	Q	H	Q	H	Q	H	Q
28 Févr. 1964		X				X			X	
1 Mars 1964										
16 Janv. 1980	X			X		X				
28 Janv. 1980										
5 Févr. 1986		X	X			X		X		
8 Févr. 1986										
11 Févr. 1987		X				X		X	X	
14 Févr. 1987										
28 Janv. 1989		X	X			X		X		
30 Janv. 1989										
19 Janv. 1993	X			X		X		X		
20 Janv. 1993										
28 Janv. 2000	X			X		X		X		
30 Janv. 2000										
21 Janv. 2002		X	X			X		X		
24 Janv. 2002										
10 Mars 2002	X			X		X		X		
12 Mars 2002										
4 Mars 2006	X			X		X		X		
7 Mars 2006										
24 Févr. 2007	X							X		
28 Févr. 2007										
1 Janv. 2013	X			X		X		X		
3 Janv. 2013										

Date	Cilaos		Ilet à Cordes		Palmiste Rouge		Bras Long		Plaine des Cafres	
	97424410		97424450		97424460		97403440		97422440	
	H	Q	H	Q	H	Q	H	Q	H	Q
31 Janv. 2013	X	X		X		X		X		
3 Févr. 2013										
1 Janv. 2014	X	X		X		X		X		
4 Janv. 2014										
7 Mars 2015	X	X	X	X		X		X		
10 Mars 2015										
5 Févr. 2016	X	X	X	X		X		X		
9 Févr. 2016										
17 Janv. 2018	X	X	X	X		X		X		
19 Janv. 2018										
3 Mars 2018	X	X		X		X		X		
6 Mars 2018										
21 Avr. 2018	X	X		X		X		X	X	
25 Avr. 2018										

	Données horaires utilisées
	Données quotidiennes utilisées
X	Données horaires avec manque de données

Tableau 11 : Données pluviographiques utilisées

5.4.3 Pluviométrie affectée aux différents sous bassins versant

Afin d'affecter à chaque sous bassin versant une pluviométrie représentative, la méthodologie du bureau d'études SOGREAH a été appliquée :

- Pondération par la méthode des polygones de Thiessen : le sous bassin est divisé en plusieurs parties, chacune étant affectée à un pluviomètre donnée en fonction de sa proximité en plan ;
- Prise en compte de l'altitude : lorsque l'altitude médiane d'une partie de sous bassin versant diffère sensiblement de l'altitude du pluviomètre associé, une correction est appliquée, basée sur une analyse de l'évolution des quantiles de pluie avec l'altitude.

Les pondérations ainsi obtenues sont les suivantes :

Sous-bassin versant	Description	Pluviométrie affectée
BC_cirque_ilets	Cirque de Cilaos, hors remparts	31% Ilet à Cordes + 26% Palmiste Rouge + 43 % Cilaos
BC_cirque_remparts	Cirque de Cilaos, remparts	Cilaos
BC_gorges	Gorges du Bras de Cilaos	Bras Long

Tableau 12 : Pluviométrie affectée aux différents sous-bassins versant (SOGREAH, 2009)

La pluie modélisée pour chaque sous-bassin versant est celle indiquée dans le tableau précédent et selon les crues, les stations de Plaine des Cafres, Cilaos ou Ilet à Cordes sont utilisées pour la répartition temporelle.

5.4.4 Données de calage disponibles (SOGREAH, 2009)

En l'absence de données hydrométriques sur le bassin versant, le calage du modèle pluie-débit de SOGREAH repose sur d'éventuelles laisses de crues permettant, à partir de calculs hydrauliques, d'estimer le débit de pointe associé à une crue donnée.

Les seules données disponibles sur le Bras de Cilaos sont :

- Deux niveaux d'eau relevés au Pavillon lors des crues associées aux cyclones Dina et Gamède ;
- Plusieurs laisses de crues au niveau de la Rampe des Sables.

Au niveau de la prise d'eau du Pavillon, les deux niveaux sont :

- 366 m NGR lors de la crue associée au cyclone Dina ;
- 365 m NGR lors de la crue associée au cyclone Gamède.

Après la construction d'un modèle simplifié sur HEC RAS et une vérification via la méthode rationnelle, les débits de pointe estimés par SOGREAH sont :

Débit de pointe au Pavillon lors de la crue associée au cyclone Gamède	1 150 m^3/s
Débit de pointe au Pavillon lors de la crue associée au cyclone Dina	1 400 m^3/s

Tableau 13 : Débits de pointe estimés au Pavillon (SOGREAH, 2009)

Concernant les niveaux de crue à la Rampe des Sables, les valeurs sont très imprécises, les valeurs sont à considérer avec une grande prudence.

Evènement	Débit de pointe à la Rampe des Sables
Dina (2002)	1 600 à 1 800
Colina (1993)	700 à 800
Firinga (1989)	800 à 1 000
Clotilda (1987)	1 300 à 1 500

Tableau 14 : Débits de pointe estimés à la Rampe des Sables (SOGREAH, 2009)

Les incertitudes de l'estimation des débits à la Rampe des Sables sont multiples :

- Le niveau levé pour Dina est fiable à 50 cm près, la marge d'erreur est nettement plus importante pour les autres événements ;
- La pente transversale de la ligne d'eau, induite par le coude de la rivière, peut être importante. Des calculs rapides montrent une dénivellation probable de 1 à 2 m entre la rive droite et la rive gauche pour Dina. La mesure en rive droite surestime donc l'évaluation du niveau moyen. Cette analyse est confirmée par une estimation du niveau de crue en rive gauche, à partir du levé topographique et des dégâts apparents à la végétation : ce niveau est estimé à 3,60 m plus bas que le niveau en rive droite ;
- L'affouillement qui se produit en crue dans le goulet modifie certainement les lignes d'eau en amont. De plus, nous avons sans doute affaire à des écoulements très complexes et fortement différenciés dans la section mouillée, du fait de la forte courbure en amont du goulet.

Les débits de pointe estimés à la Rampe des Sables seront donc considérés comme des ordres de grandeur permettant de vérifier la cohérence globale des simulations, plutôt que comme des données de calage du modèle au sens strict.

5.4.5 Fonctions de production et de transfert adoptées

Fonction de production

La fonction de production correspond à la transformation de la pluie brute à la pluie efficace à l'écoulement (pluie nette) pour chaque sous-bassin versant. Le modèle de perte « SCS » a été choisi fonction de production :

$$Pe = \frac{(P - Ia)^2}{P - Ia + S}$$

Avec :

- Pe = cumul de la pluie efficace (mm)
- P = cumul de la pluie brute (mm)
- Ia = perte initiale (mm)

- S = rétention potentielle maximale (mm)

S est fonction du Curve Number (CN) :

$$S = \frac{25\,400 - 254 * CN}{CN}$$

Cette fonction de production varie en fonction de l'état de saturation des bassins versants au démarrage du calcul.

La procédure de calage a amené à retenir des relations qui diffèrent en fonction de l'indice de pluviométrie antérieure.

Sous-bassin versant	Superficie (km^2)	Pertes initiales (mm)	Curve Number
BC_cirque_ilets	63.8	100 – P5j précédents	Ip<50 mm : CN = 25 50 mm<=Ip<150 mm : CN = 30 Ip>150 mm : CN = 40
BC_cirque_remparts	21.4	30 – P5j précédents	Ip<50 mm : CN = 40 50 mm<=Ip<150 mm : CN = 45 Ip>150 mm : CN = 60
BC_gorges	15.3	30 – P5j précédents	Ip<50 mm : CN = 40 50 mm<=Ip<150 mm : CN = 45 Ip>150 mm : CN = 60

Tableau 15 : Relations retenues pour le calcul des pertes initiales et du Curve Number (SOGREAH, 2009)

L'indice de pluviométrie antérieure est défini de la façon suivante :

$$Ip = P10j\ précédents + \frac{P30j\ précédents}{2}$$

Ce calage a été réalisée par SOGREAH en fonction des faibles données de calage.

Fonction de transfert

La fonction de transfert correspond à la transformation de la pluie efficace en débit à l'exutoire du bassin versant.

La fonction de transfert est basée sur le modèle d'hydrogramme unitaire de Clark :

- Translation du hyétogramme de pluie efficace depuis son origine jusqu'à l'exutoire du bassin versant ;
- Atténuation dans le bassin versant.

Les paramètres suivants sont invariants pour chaque sous-bassin versant. Ils ont été définis en fonction de la géologie présente.

Sous-bassin versant	Superficie (km^2)	Temps de concentration (heures)	Coefficient de stockage (heures)
BC_cirque_ilets	63.8	1.6	3.5
BC_cirque_remparts	21.4	1.5	0.7
BC_gorges	15.3	1.5	0.5

Tableau 16 : Fonction de transfert des sous-bassins versants (SOGREAH, 2009)

5.4.6 Fonction de propagation

Le modèle de l'onde cinématique qui est utilisé tient compte des pentes relativement fortes des biefs.

Les paramètres adoptés sont les suivants :

Bief	Longueur (km)	Pente (%)	Coefficient de rugosité Ks ($m^{1/3}/s$)	Largeur du fond (m)	Pente des berges
Gorges du Bras de Cilaos	13.5	2	30	10	10

Tableau 17 : Paramètres de propagation dans les biefs (SOGREAH, 2009)

Ils sont estimés à partir de la BD Topo de l'IGN pour les pentes et les longueurs des biefs et selon les caractéristiques générales des chenaux pour les lits alluviaux.

Le coefficient de rugosité correspond à un lit alluvial. Il est volontairement élevé pour ne pas surestimer le temps de propagation de la crue.

5.4.7 Synthèse des résultats pour les évènements recensés

Les évènements recensés depuis 1964 (année pour lesquels les données pluviographiques ont pu être collectées) sont présents dans le tableau suivant :

Date	Nom du Cyclone	Hyétogrammes utilisés
28 Février 1964 au 1er Mars 1964	Giselle	Plaine des Cafres
16 au 28 Janvier 1980	Hyacinthe	Cilaos
5 au 8 Février 1986	-	Ilet à Cordes
11 au 14 Février 1987	Clotilda	Plaine des Cafres
28 au 30 Janvier 1989	Firinga	Ilet à Cordes
19 au 20 Janvier 1993	Colina	Cilaos
28 au 30 Janvier 2000	-	Cilaos
21 au 24 Janvier 2002	Dina	Ilet à Cordes
10 au 12 Mars 2002	Hary	Cilaos

Date	Nom du Cyclone	Hyétogrammes utilisés
4 au 7 Mars 2006	Diwa	Cilaos
24 au 28 Février 2007	Gamède	Cilaos
1 au 3 Janvier 2013	Dumile	Cilaos
31 Janvier au 3 Février 2013	Feeleng	Cilaos
1 au 4 Janvier 2014	Bejisa	Cilaos
7 au 10 Mars 2015	Haliba	Cilaos, Ilet à Cordes
5 au 9 Février 2016	Daya	Cilaos
17 au 19 Janvier 2018	Berguitta	Cilaos
3 au 6 Mars 2018	Dumazile	Cilaos
21 au 25 Avril 2018	Fakir	Plaine des Cafres

Tableau 18 : Evènements modélisés à l'aide du modèle pluie-débit

Les crues supérieures au seuil de 200 m^3/s (T>2 ans) au Pavillon ont été retenues dans la modélisation.

Pour chaque crue modélisée, l'analyse avec les paramètres retenus et les hydrogrammes est détaillée en annexe.

Les débits de pointe, les volumes de crue et une estimation de la période de retour (en termes de débit de pointe) pour les évènements modélisés sont synthétisées dans le tableau suivant.

Date	Nom du Cyclone	Bras de Cilaos au Pavillon		
		Débit de pointe (m^3/s)	Volume de la crue (Mm^3)	Période de retour estimée
28 Février 1964 au 1er Mars 1964	Gisele	2 100	103	30 ans
16 au 28 Janvier 1980	Hyacinthe	800	202	Entre 5 et 10 ans
5 au 8 Février 1986	-	1 020	79	10 ans
11 au 14 Février 1987	Clotilda	1 140	97	10 ans
28 au 30 Janvier 1989	Firinga	400	19	< 5 ans
19 au 20 Janvier 1993	Colina	590	30	5 ans
28 au 30 Janvier 2000	-	420	23	< 5 ans
21 au 24 Janvier 2002	Dina	1 370	102	20 ans
10 au 12 Mars 2002	Hary	410	26	< 5 ans
4 au 7 Mars 2006	Diwa	790	84	Entre 5 et 10 ans
24 au 28 Février 2007	Gamède	1 220	196	> 10 ans

Date	Nom du Cyclone	Bras de Cilaos au Pavillon		
		Débit de pointe (m^3/s)	Volume de la crue (Mm^3)	Période de retour estimée
1 au 3 Janvier 2013	Dumile	600	33	5 ans
31 Janvier au 3 Février 2013	Feeleng	360	22	< 5 ans
1 au 4 Janvier 2014	Bejisa	780	54	Entre 5 ans et 10 ans
7 au 10 Mars 2015	Haliba	340	25	< 5 ans
5 au 9 Février 2016	Daya	240	11	< 5 ans
17 au 19 Janvier 2018	Berguitta	500	26	< 5 ans
3 au 6 Mars 2018	Dumazile	490	53	< 5 ans avec un volume de crue conséquent
21 au 25 Avril 2018	Fakir	330	12	< 5 ans

Tableau 19 : Synthèse des débits de pointe et volumes de crue pour les évènements modélisés

Le débit de pointe estimé à 2 100 m^3/s de la crue du cyclone Gisèle de 1964 aurait une période de retour empirique d'environ 55 ans (plus forte crue connue de 1964 à nos jours).

6. Evolution morphodynamique

6.1 Caractérisation et principes de l'évolution morphodynamique

L'évolution morphodynamique sera caractérisée par l'analyse des items suivants :

- L'évolution en plan des berges et des chenaux principaux à partir d'éléments cartographiques et photographiques ;
- L'évolution des profils en long du fond extrême et du fond moyen ;
- De l'évolution de la topographie du lit du Bras de Cilaos par comparaison de modèles numériques de terrain disponibles.

Afin d'expliquer les différentes variations observés, l'évolution morphologique en plan (retrait, avancée des berges et évolution naturelle ou anthropique) et linéaire (variation des pentes et des profils en long) sont étudiées.

Les rivières évoluent morphologiquement en plan. Cette évolution naturelle est dépendante du degré d'érosion du bassin versant qui modifie l'équilibre de la rivière au niveau de la continuité du transport sédimentaire. Cet équilibre peut être perturbé naturellement par des éboulements venant dans le lit du cours d'eau.

Au niveau de l'évolution linéaire des cours d'eau, la topographie et la géologie jouent un rôle important. En effet, leurs singularités provoquent les effets naturels suivants sur le profil en long :

- Diminution de la pente en amont d'un rétrécissement de section d'écoulement ;
- Augmentation de la pente en aval d'un rétrécissement de section d'écoulement ;
- Diminution de la pente au niveau d'une confluence avec un autre cours d'eau ;
- Rehaussement du fond provoqué des apports de masse (éboulement).

Concernant ces différentes évolutions, l'intervention de l'homme influe fortement sur le comportement d'un cours d'eau. Les actions anthropiques pouvant influencer sur les pentes et le profil en long d'un cours d'eau sont :

- Un rétrécissement du lit du cours d'eau (mise en place de digues, piles de pont dans le lit, remblais) qui provoque une incision du lit ;
- Des extractions importantes dans le lit engendrant des abaissements locaux du fond qui provoquent de l'affouillement en amont et en aval par érosion régressive ou par érosion progressive.

6.2 Les phénomènes d'embâcle et de laves torrentielles dans le bras de Cilaos

6.2.1 Les phénomènes historiques

Les phénomènes historiques confirment que les phénomènes d'embâcle-débâcle due à des barrages naturels sont fréquents à l'amont et sur le bras de Cilaos. Les gorges étroites conjuguées à la présence de versants et de remparts de grande hauteur sont propices aux éboulements et donc à la formation d'embâcle.

Les principaux évènements d'embâcles recensés sont :

- Embâcles du Grand Serré dans le cirque de Cilaos en 1848 et 1849 : « En 1849, les eaux s'élevèrent à la hauteur prodigieuse de plus de 100 m, le barrage formé le 24 janvier ne fut détruit que le 11 février suivant par la violence du torrent impétueux qui remplit cette digue naturelle et courut à la mer, ravageant et engloutissant les îlets inférieurs dont une grande partie des terres fut emportées » - Propos tirés de l'Album de La Réunion et cités dans les travaux de Humbert en 1981,
- Embâcle du Cap Paille en Queue en 1938,
- Embâcle sur le Bras Rouge en aval de la ravine du Camp de Puces – Hyacinthe 1980,
- Embâcle du Rond de Bras Rouge en 1983 dû à un éboulement de grande ampleur dans le rond du Bras Rouge.

De plus, les phénomènes historiques confirment la présence de laves torrentielles lors des périodes de crues :

- Laves torrentielles en 1948 : La crue majeure du Bras de Cilaos a été accompagnée de laves torrentielles qui détruisit les 4 ponts de la RN5 de cette époque (pont des Aloès, pont de l'Ilet Furcy, ponts du Cap Paille en Queue),
- Laves torrentielles déclenchées lors de fortes pluies en janvier 1984 et 1985.

La présence de laves torrentielles provient, dans la plupart des cas, par la vidange brutale d'une retenue d'eau.

Ce phénomène peut être très destructeur et doit être pris en compte dans la conception du projet. En particulier les ouvrages de franchissement doivent limiter au maximum leurs appuis dans le cours d'eau.

6.2.2 Les secteurs propices à la formation d'embâcle

La morphologie du Bras de Cilaos est propice à la formation d'embâcle. Les instabilités susceptibles de se produire dans les remparts génèrent une quantité importante de matériaux aptes à obstruer le cours d'eau en plusieurs points.

Des zones d'embâcles ont été repérées :

- En aval du Petit Serré :
  - Au droit d'Ilet Furcy au niveau du méandre
  - Au droit d'Ilet Long au niveau des aires de pique-nique jusqu'à la Rampe des Sables
  - Au Cap Paille en Queue

Ces zones sont bordées de terrasses surélevées de 10 à 15 m. La hauteur des retenues provoquées par les éboulements est donc limitée à la hauteur de ces terrasses. En cas de formation d'une retenue d'eau, la terrasse jouera le rôle de surverse naturelle.

- En amont du Petit Serré :
  - L'engouffrement du Petit Serré
  - Entre la Petite Caverne et l'ilet Palmiste
  - Dans le défilé à l'est de d'ilet Palmiste

Les gorges en amont du Petit Serré présentent une section très étroite et profonde, les hauteurs des retenues d'eau peuvent supérieures à 30 m pouvant aller jusqu'à la hauteur de 100 m (Barrage du Grand Serré en 1849).

Le risque de laves torrentielles et de volume d'eau et de sédiments transportés varieront en fonction de la section de la retenue d'eau. Plus la section de la retenue d'eau est important, plus ce risque est élevé.

6.2.3 Scénario de rupture d'une retenue d'eau

La rupture d'une retenue entraîne la formation d'une onde de submersion entrainant une élévation soudaine du niveau d'eau en aval pouvant avoir des impacts plus ou moins conséquents. Cette rupture produit dans la plupart des cas une crue en aval accompagnée de laves torrentielles.

Afin d'apprécier l'ordre de grandeur du débit issu d'une rupture soudaine de barrage, la relation sommaire suivante peut être employée :

$$Q = 6.3 * H^{1.59}$$

Avec : Q le débit de pointe en m^3/s et H la hauteur de la retenue d'eau

- En aval du Petit Serré ou les hauteurs de retenue sont comprises entre 10 et 15 m, le débit de pointe variera en fonction entre 200 et 500 m^3/s. La crue en aval serait équivalente à une crue de période de retour entre 2 et 5 ans associée à des laves torrentielles.
- En amont du Petit Serré, les hauteurs de retenue peuvent varier entre 30 et 100 m, le débit de pointe peut être compris entre 1 400 et 10000 m^3/s. Dans le premier cas la crue en aval serait équivalente à une crue de période de retour supérieure à 10 ans associée à des laves torrentielles. Dans le cas exceptionnel d'une hauteur d'eau

de la retenue du Grand Serré, le débit de pointe en aval pourrait être égal à 10000 m^3/s (supérieur à une crue millénale). Tous les ilets seraient inondés. Les conséquences seraient dramatiques au niveau des vies humaines, des habitations, des activités économiques…

Le dimensionnement des aménagements du projet devra prendre en compte la présence de laves torrentielles lors de fortes crues. Cependant, il est illusoire d'éviter d'éventuels dégâts sur le futur tracé si l'évènement du Grand Serré se reproduit.

6.3 Evolution en plan des berges et des chenaux principaux

L'évolution en plan est caractérisée par une analyse de la position des berges du lit actif à partir d'éléments cartographiques et photographiques suivants :

- Les photographies aériennes disponibles (1950, 1961, 1966, 1978, 1984, 1989, 2007, 2008, 2011, 2012, 2013, 2014, 2015, 2016, 2017 et 2018) ;
- Les fonds cartographiques disponibles : scan 5000 (1978), BD Topo, orthophotos (1997, 2003, 2018).

A partir des différents éléments cartographiques et photographiques disponibles, la position des berges pour les années 1950, 1966, 1978, 1997, 2003, 2007 et 2018 a été reportée sur la figure 16.

L'emprise de la figure couvre l'ensemble de la zone d'étude.

Il est observé les évolutions suivantes :

- Au niveau d'Ilet Alcide (PK BC9700 à 9400), la berge située en rive gauche a été soumise à une érosion active lors des dernières décennies, un net recul est visible ;
- Au niveau de la Rampe des Sables (PK BC8900 à 8800), une protection contre l'érosion en rive droite a été mise en place en 2002 afin de stabiliser la berge ;
- En amont d'Ilet Long (PK BC8500 à 8300), la berge en rive droite recule fortement et est soumise à une érosion active. L'éperon rocheux au niveau des habitations résiste à l'érosion. Cependant, une anse d'érosion importante de la berge alluviale se forme en amont immédiat. Cette configuration peut menacer la route RN5 à terme et des habitations ;
- Au niveau d'Ilet Furcy (PK BC6900 à 6300), on observe un chenal coupant la terrasse située en rive gauche sur les clichés disponibles de 1950. Ce chenal n'est plus visible sur les clichés récents, il a surement été gagné par la végétation. De plus, on observe un recul de la berge en rive gauche en amont de l'Ilet Furcy. Des travaux d'urgence réalisés en 2018 sur ce secteur ont modifié en plan la localisation des berges. En effet, le nouveau tracé de la route, effectué au niveau de l'ancien chenal, a engendré des protections de berge sur la rive gauche plus rapprochées du lit en aval du coude ;
- Au niveau de l'Ilet Rond (PK BC5800 à 5200), la berge alluviale en rive droite est soumise à une érosion active. Un léger recul progressif est observé ;
- Au niveau du Bas du Ruisseau (PK BC5000 à 4600), une voie d'évitement fut créée en 2002 empiétant dans le lit du Bras de Cilaos. Elle est protégée en enrochements liés et fut réparée à plusieurs reprises ;

- Au niveau des Aloès (PK BC4000 à 3500), un recul de la berge droite au niveau de l'éperon rocheux est constaté. La berge est soumise à une érosion active sur ce tronçon. De plus, en aval de ce secteur, le recul de la berge droite est observé.

En conclusion, au fil des années, les berges constituées de matériaux meubles sont soumises à une érosion active et un recul de celles-ci est observable. Ces constatations devront être prises en compte dans le futur tracé de la route tant que les futures mesures de protection.

Concernant l'évolution des chenaux, le positionnement du chenal principal varie au cours des années. Une configuration de lit en tresses est observée au niveau des élargissements du cours d'eau.

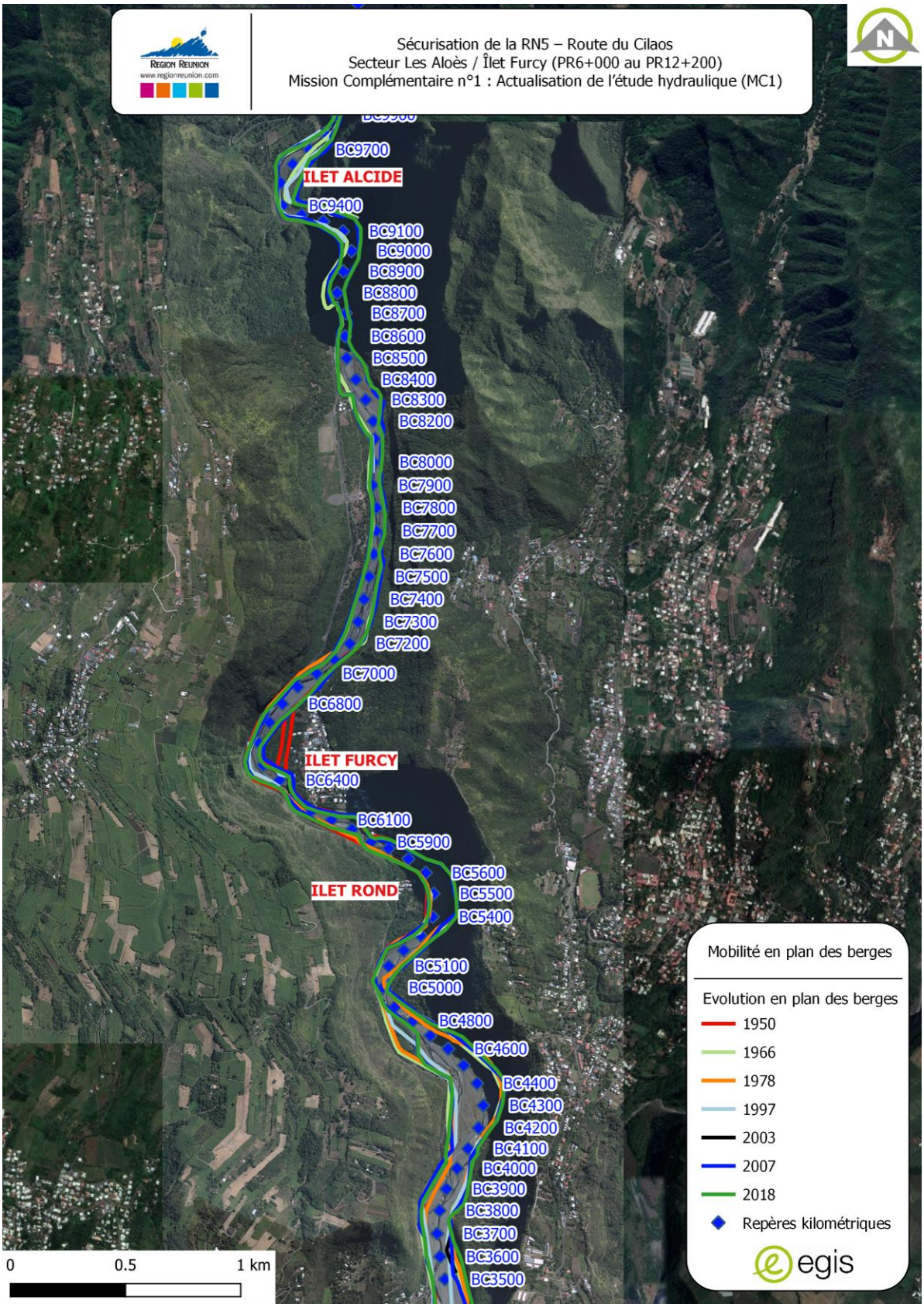


Figure 21 : Mobilité en plan des berges

6.4 Evolution altimétrique du lit

L'évolution altimétrique du lit est caractérisée par une analyse du fond extrême et du fond moyen à partir des éléments topographiques suivants :

- Les profils en long disponibles (1966, 1990, 2007)
- Les photogrammétries disponibles (1978, 1998, 2002, 2007)
- Les modèles numériques de terrain disponibles (1999, 2008, 2016, 2018)

6.4.1 Evolution du profil en long des fonds extrêmes

L'évolution du profil en long des fonds extrêmes a été analysée sur différentes périodes à partir des données topographiques suivantes :

- Le modèle numérique de terrain réalisé en 2018 par SINTEGRA ;
- Le modèle numérique altimétrique Litto3D continu terre-mer réalisé en commun par le SHOM et l'IGN en 2016
- Le levé du fil d'eau de la photogrammétrie de 2007 sur le Bras de Cilaos ;
- Le levé terrestre du fil d'eau réalisé en 1990 sur le Bras de Cilaos ;
- La photogrammétrie réalisée par l'IGN en 1978.

Les graphiques suivants présentent les différents profils en long des fonds extrêmes du Bras de Cilaos.

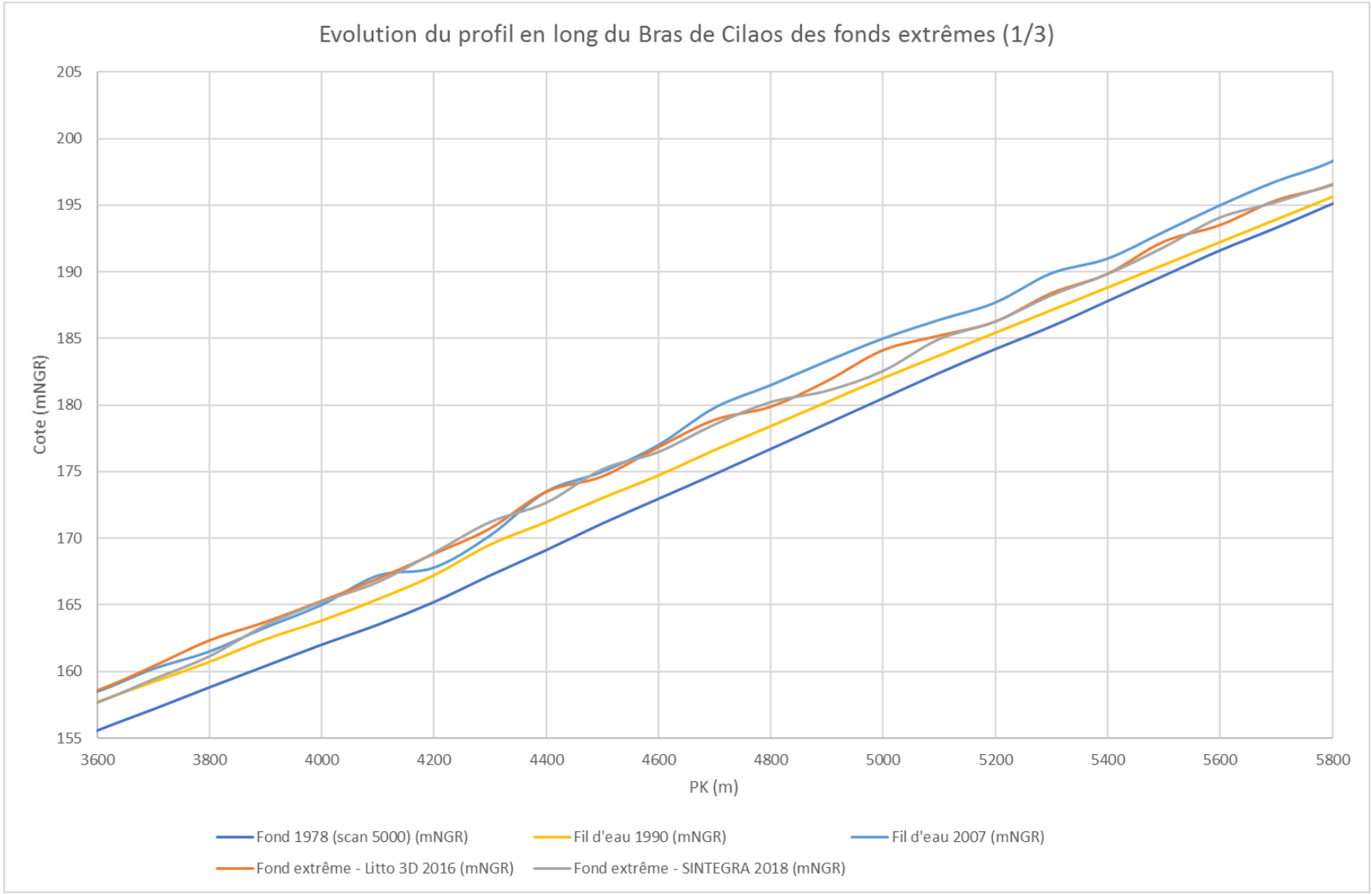


Figure 22 : Evolution du profil en long du Bras de Cilaos des fonds extrêmes (1/3)

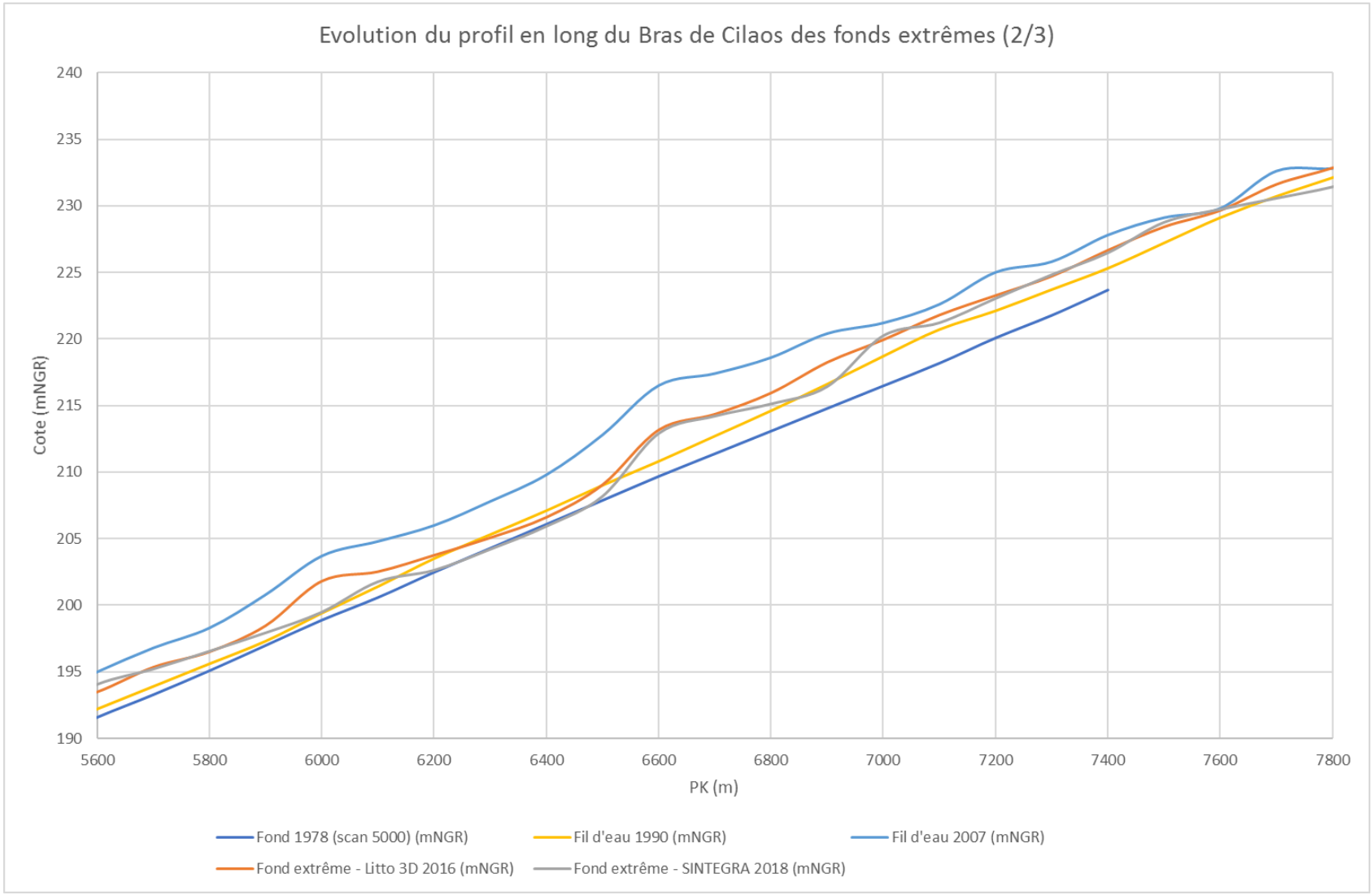


Figure 23 : Evolution du profil en long du Bras de Cilaos des fonds extrêmes (2/3)

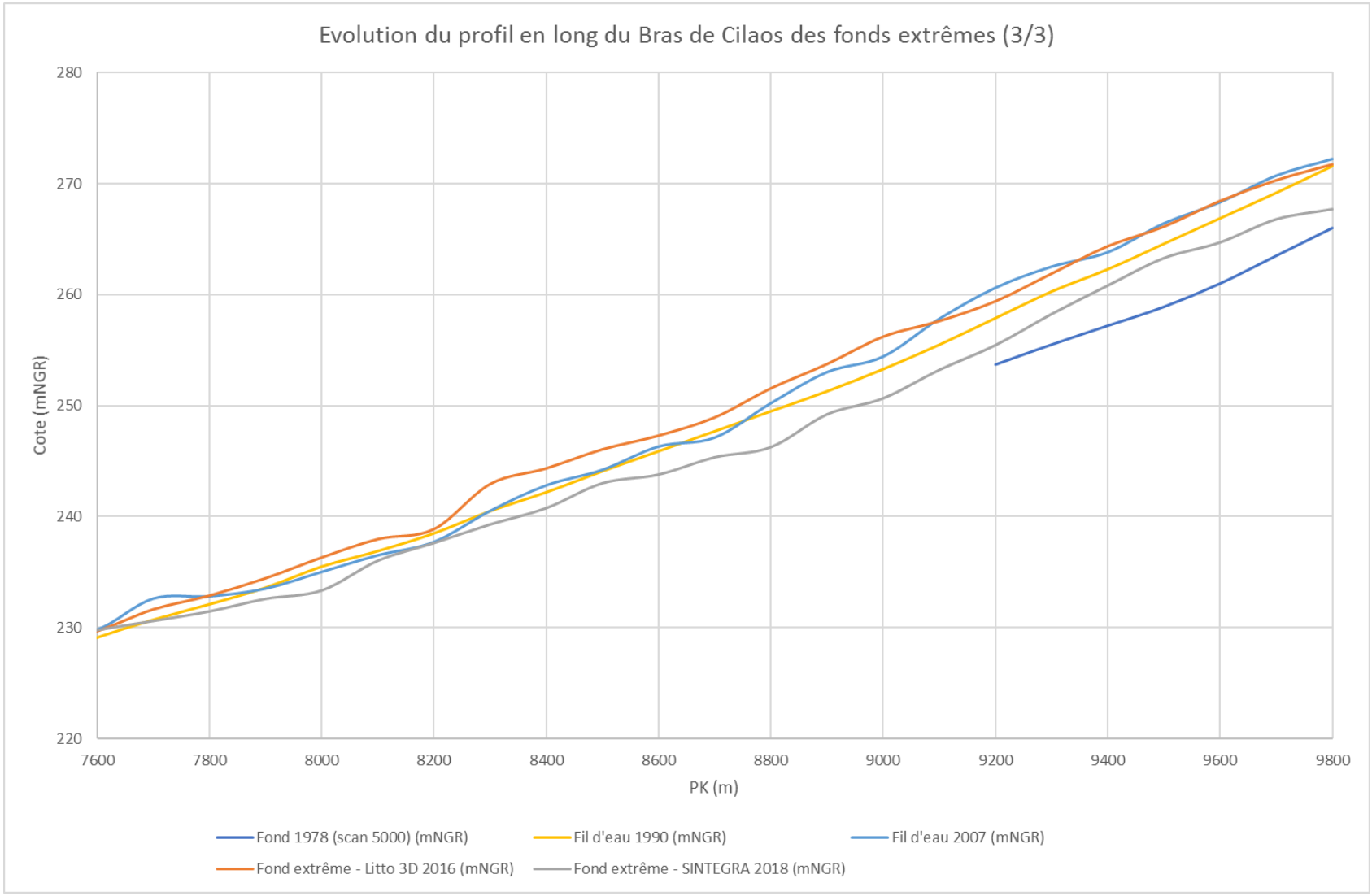


Figure 24 : Evolution du profil en long du Bras de Cilaos des fonds extrêmes (3/3)

De manière générale, un exhaussement continu est observé depuis 1978. Les exhaussements les plus importants sont localisés au niveau des zones d'élargissement du cours d'eau, c'est-à-dire :

- Du PK BC3600 au PK BC5000, élargissement du secteur des Aloès ;
- Du PK BC7000 au PK BC7400, élargissement entre l'ilet Long et l'ilet Furcy ;
- Du PK BC9200 au PK BC9800, élargissement du secteur Ilet Alcide.

Cet engraissement significatif est lié aux apports de matériaux importants sur le bassin versant venant des évènements qui se sont produits lors des 40 dernières années (érosion de berge, éboulements, glissements de terrain).

La partie amont de la zone d'étude a été concernée par un abaissement conséquent du niveau des fonds extrêmes entre 2016 et 2018. Cet abaissement peut être liée à la succession d'évènements pluviométriques importants qui se sont succédés sur cette période.

6.4.2 Evolution du profil en long des fonds moyens

L'évolution du profil en long des fonds moyens a été analysée sur différentes périodes à partir des données topographiques suivantes :

- Le modèle numérique de terrain réalisé en 2018 par SINTEGRA ;
- Le modèle numérique altimétrique Litto3D continu terre-mer réalisé en commun par le SHOM et l'IGN en 2016
- La photogrammétrie de 2007 sur le Bras de Cilaos ;

Les graphiques suivants présentent les différents profils en long des fonds moyens du Bras de Cilaos.

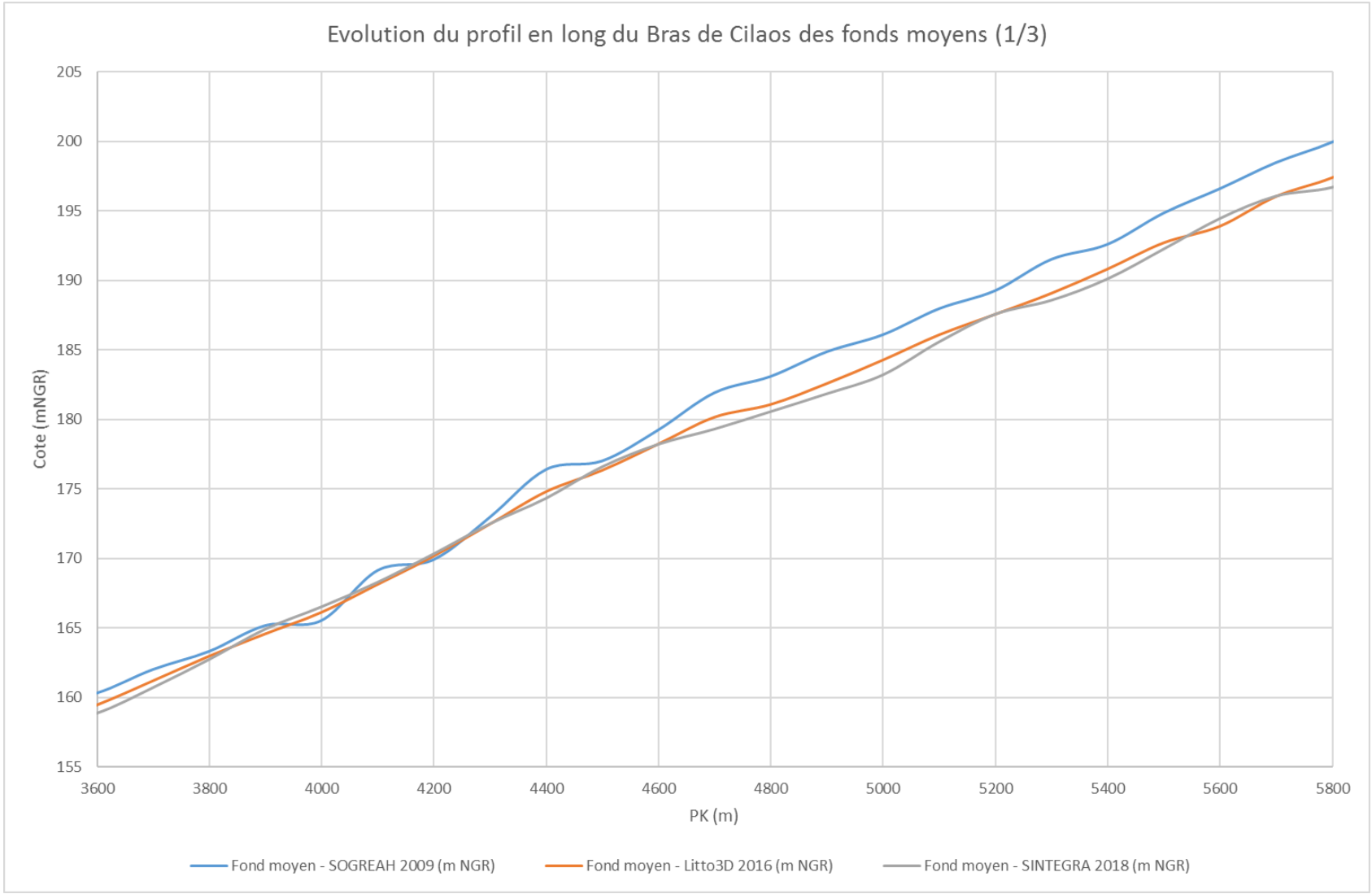


Figure 25 : Evolution du profil en long du Bras de Cilaos des fonds moyens (1/3)

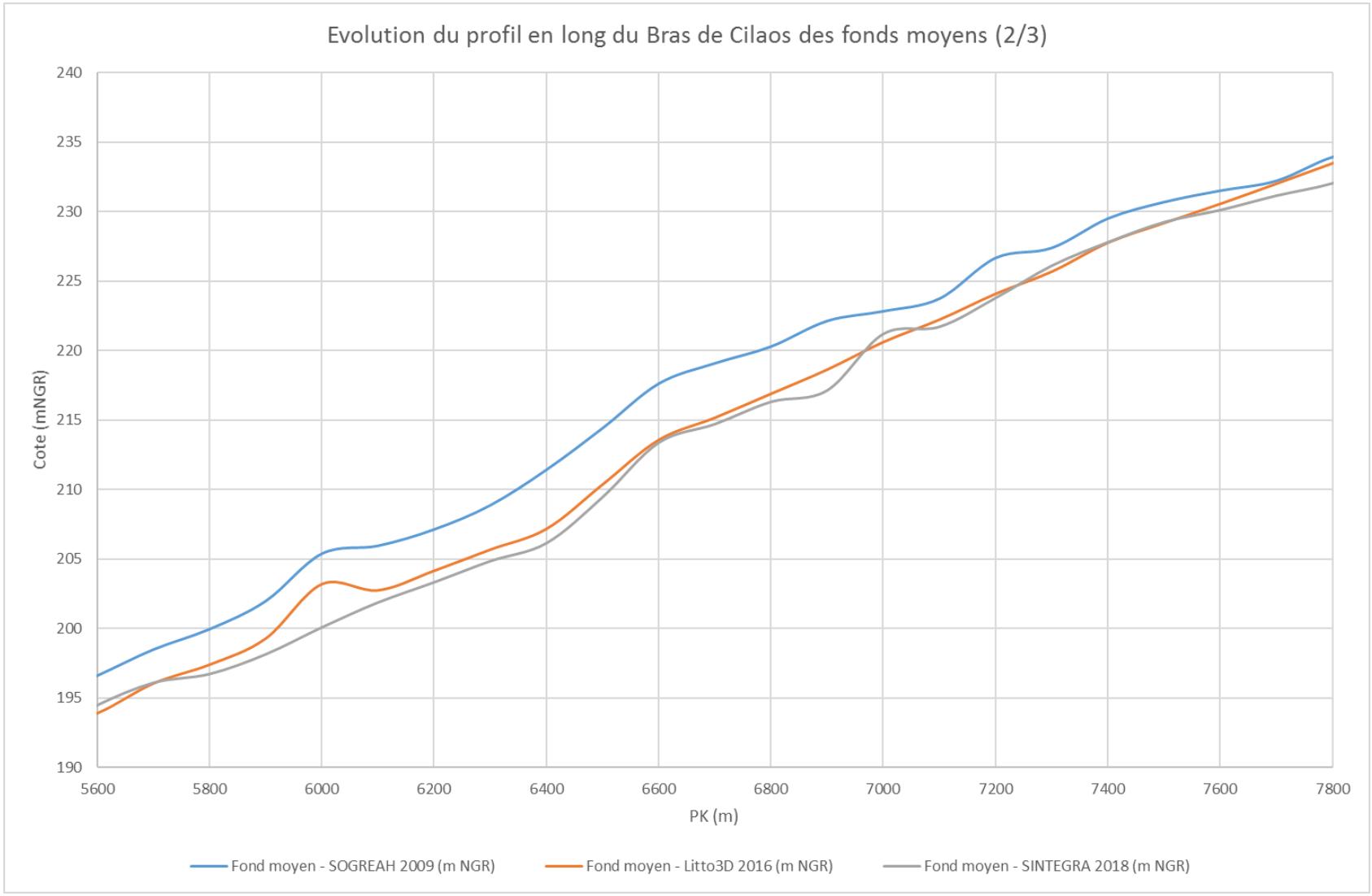


Figure 26 : Evolution du profil en long du Bras de Cilaos des fonds moyens (2/3)

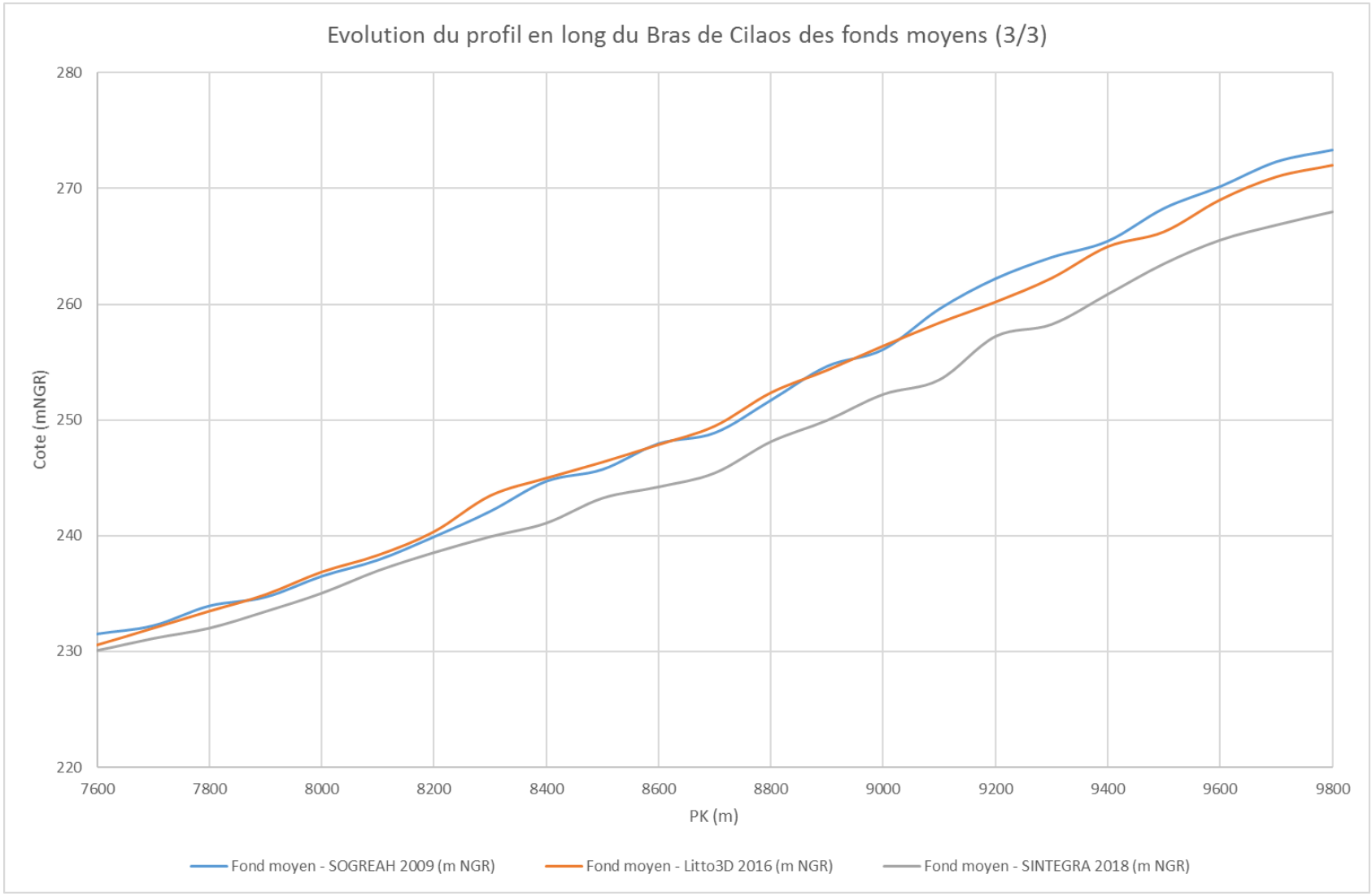


Figure 27 : Evolution du profil en long du Bras de Cilaos des fonds moyens (3/3)

De manière générale, depuis 2009, un abaissement des fonds sur le linéaire étudié est observé.

Plusieurs remarques peuvent être faites:

- Entre les PK BC3600 et PK BC4300, le niveau moyen du lit reste sensiblement stable depuis 2009 ;
- Entre les PK BC4300 et PK BC7600, un abaissement moyen de 2 m du lit est constaté entre 2009 et 2016. Cette abaissement peut s'expliquer par l'abaissement généralisé évalué sur ce secteur après une décennie active (5 évènements pluvieux significatifs recensés sur cette période) ;
- A partir les PK BC7600 jusqu'au PK BC9800, un abaissement moyen de 2 m du lit est observé entre 2016 et 2018. Cette abaissement peut provenir de la succession des évènements significatifs en 2018 (Berguitta, Dumazile et Fakir).

6.5 Evolution de la topographie du lit

L'évolution de la topographie du lit entre 2016 et 2018 a été analysée par comparaison des deux modèles numériques de terrain (Litto3D et SINTEGRA).

La précision des deux modèles numériques de terrain est de l'ordre du 1 m^2. Cette précision permet d'analyser finement l'évolution de la topographie du lit.

Sur la période 2016-2018, un abaissement généralisé du lit du Bras de Cilaos est observé. Le tronçon amont de la zone d'étude présente un abaissement très prononcé supérieur à 5 m.

Sur la zone d'étude, le lit mineur a perdu 270 000 m^3 de matériaux. Cependant, les travaux d'urgence exercés en 2018 provoquent une présence d'exhaussement important au niveau du lit majeur du Bras de Cilaos.

L'évolution de l'altitude entre 2016 et 2018 sur l'emprise totale du lit du Bras de Cilaos est présentée sur la figure suivante.

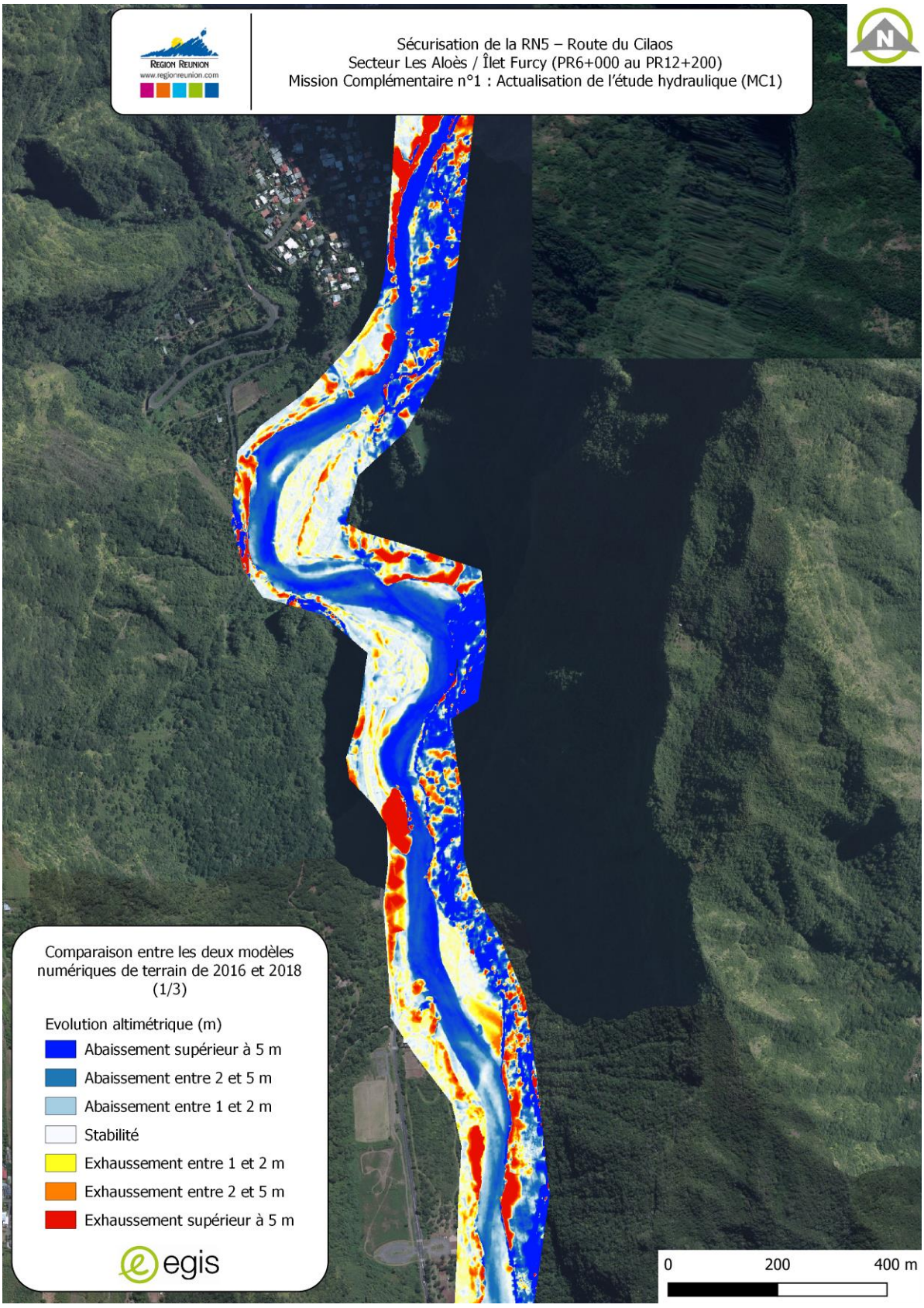


Figure 28 : Comparaison entre les deux modèles numériques de terrain de 2016 et 2018 (1/3)

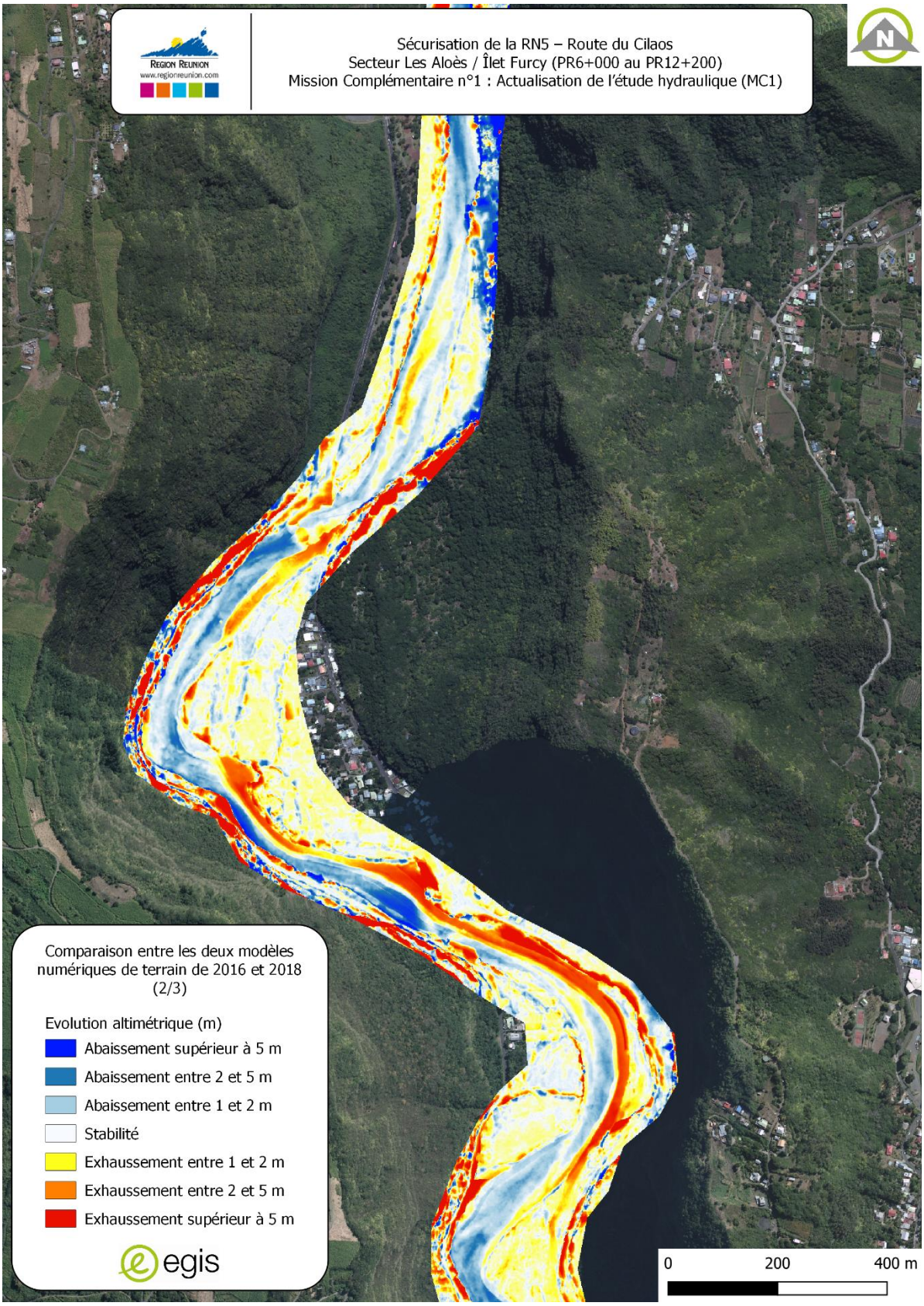


Figure 29 : Comparaison entre les deux modèles numériques de terrain de 2016 et 2018 (2/3)

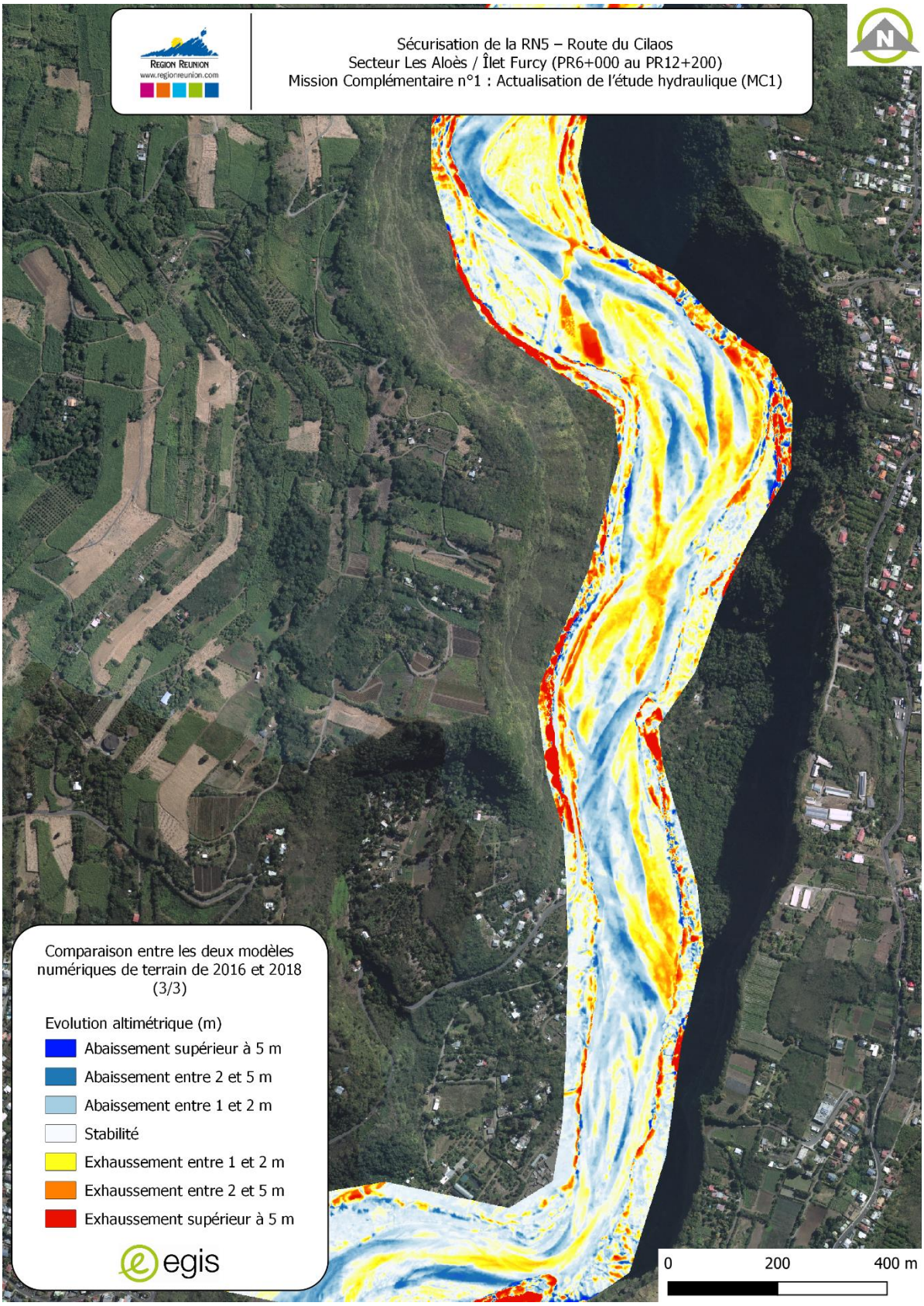


Figure 30 : Comparaison entre les deux modèles numériques de terrain de 2016 et 2018 (3/3)

7. Transport solide et bilan sédimentologique

7.1 Origine des matériaux

Les apports de matériaux proviennent des zones d'érosion au sein du bassin versant et des mouvements de terrain.

Les matériaux transitant dans le Bras de Cilaos sont des alluvions provenant du cirque de Cilaos et de l'encaissement des gorges.

7.1.1 Les zones d'érosion

Le cirque de Cilaos est un des secteurs de la Réunion le plus concerné par l'érosion active. Le paysage est caractéristique des terrains ravinés par les eaux de ruissellement.

Figure 31 : Paysage caractéristique du Bras de Cilaos

Une cartographie établie par BRGM recense l'aléa érosion au niveau du Bras de Cilaos.

A l'échelle du bassin versant, les secteurs les moins concernés par l'érosion se situent au niveau des remparts Est et aux pentes d'encaissement du Bras de Cilaos.

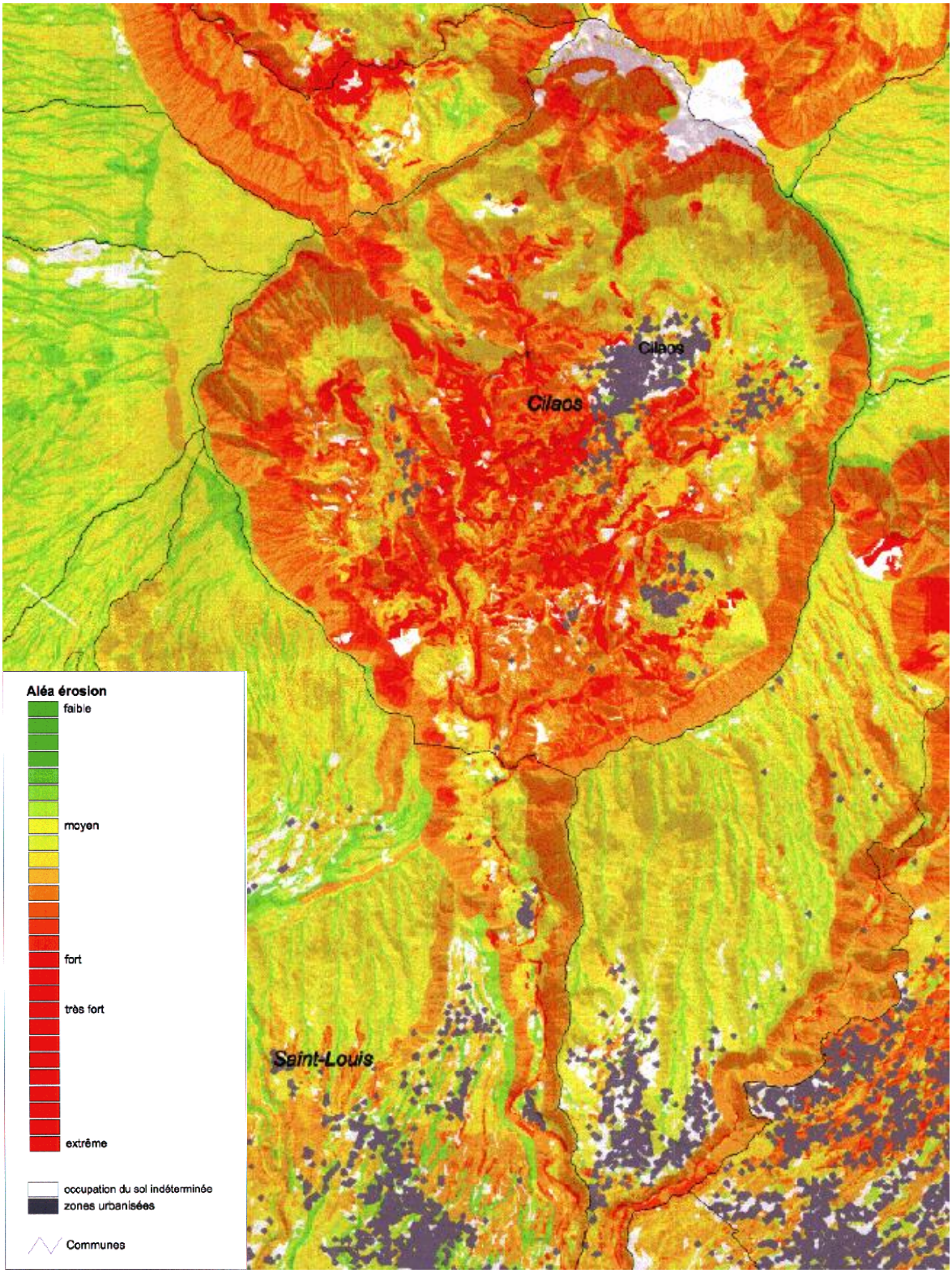


Figure 32 : Carte de synthèse de l'aléa érosion (BRGM, 2002)

Une étude conduite par l'Association de Lutte contre l'Erosion des Sols à La Réunion en 2006 concernant l'érosion des sols a retenu 1 mm par an pour valeur d'érosion moyenne. Ce taux d'érosion est élevé dans les zones dénudées comme les zones d'érosion active.

La quantité de matériau transitant dans le bras de Cilaos a été estimé à 100 000 m^3 par an, ce qui doit être considéré comme valeur minimale étant donné les caractéristiques particulières du cirque.

7.1.2 Les mouvements de terrain

Les mouvements de terrain sur le bassin du Bras de Cilaos sont conséquents et apportent des matériaux dans le cours d'eau de façon très importante. Ces volumes peuvent multiplier par 10 les apports naturels venant des phénomènes d'érosion diffuse.

Ces évènements conséquents surviennent souvent lors de fortes pluies ou de passages de cyclones.

Deux mouvements de terrain conséquents ont été recensés dans les années 1980 :

- 1980 : Mouvement de terrain hectométrique observé au niveau du cirque de Cilaos lors de la dépression tropicale Hyacinthe. L'estimation du volume mobilisé est supérieur à **1 million de mètre cube** ;
- 1983 : Eboulement dans le Rond de Bras Rouge estimé à **1.5 million de mètre cube**.

Dans les années 1980, le stock de matériau mis en mouvement au niveau du cirque de Cilaos serait supérieur à 2.5 millions de mètre cube.

Depuis cette période exceptionnelle, les mouvements de terrain sont rares. Les mouvements de terrain sont difficilement quantifiables par son fait très imprévisible.

Un listing des différents mouvements de terrain (chutes de bloc, éboulement) depuis 2009 a été établi à partir des données BRGM.

Date	Evènement	Localisation
15 avril 2009	Eboulement	Aloès
12 février 2010	Chutes de bloc	Aloès
7 mars 2010	Eboulement	Aloès
9 mars 2010	Eboulement	Ilet Furcy
28 mars 2010	Eboulement	Aloès
13 septembre 2010	Eboulement	Ilet Furcy
5 octobre 2010	Eboulement	Aloès
31 janvier 2011	Eboulement	Ilet Furcy
25 février 2011	Eboulement	Petite caverne
19 avril 2011	Eboulement	Ilet Furcy, Paille en Queue
20 avril 2011	Eboulement	Ilet Furcy, Paille en Queue
10 novembre 2011	Chutes de bloc	Aloès, Ilet Furcy
26 avril 2012	Eboulement	Cilaos
19 novembre 2012	Chutes de bloc	Ilet Furcy
8 février 2013	Chutes de bloc	Aloès
1 novembre 2013	Eboulement	Ilet Furcy
5 novembre 2013	Chutes de bloc	Ilet Furcy
9 novembre 2014	Chutes de bloc	Paille en Queue
5 décembre 2013	Chutes de bloc	Ilet Furcy
2 janvier 2014	Eboulement	Zone d'étude
9 novembre 2014	Eboulement	Aloès
8 mars 2015	Eboulement	Ilet Furcy
16 mars 2015	Eboulement	Ilet Furcy
5 septembre 2017	Chutes de bloc	Paille en Queue
20 janvier 2018 au 26 janvier 2018	Eboulement	Zone d'étude
28 février 2018	Eboulement	Ilet Furcy

Tableau 20 : Listing des mouvements de terrain survenus sur la zone d'étude depuis 2009

Une cartographie établie par BRGM recense les mouvements de terrain depuis 2009 et est disponible à la page suivante.

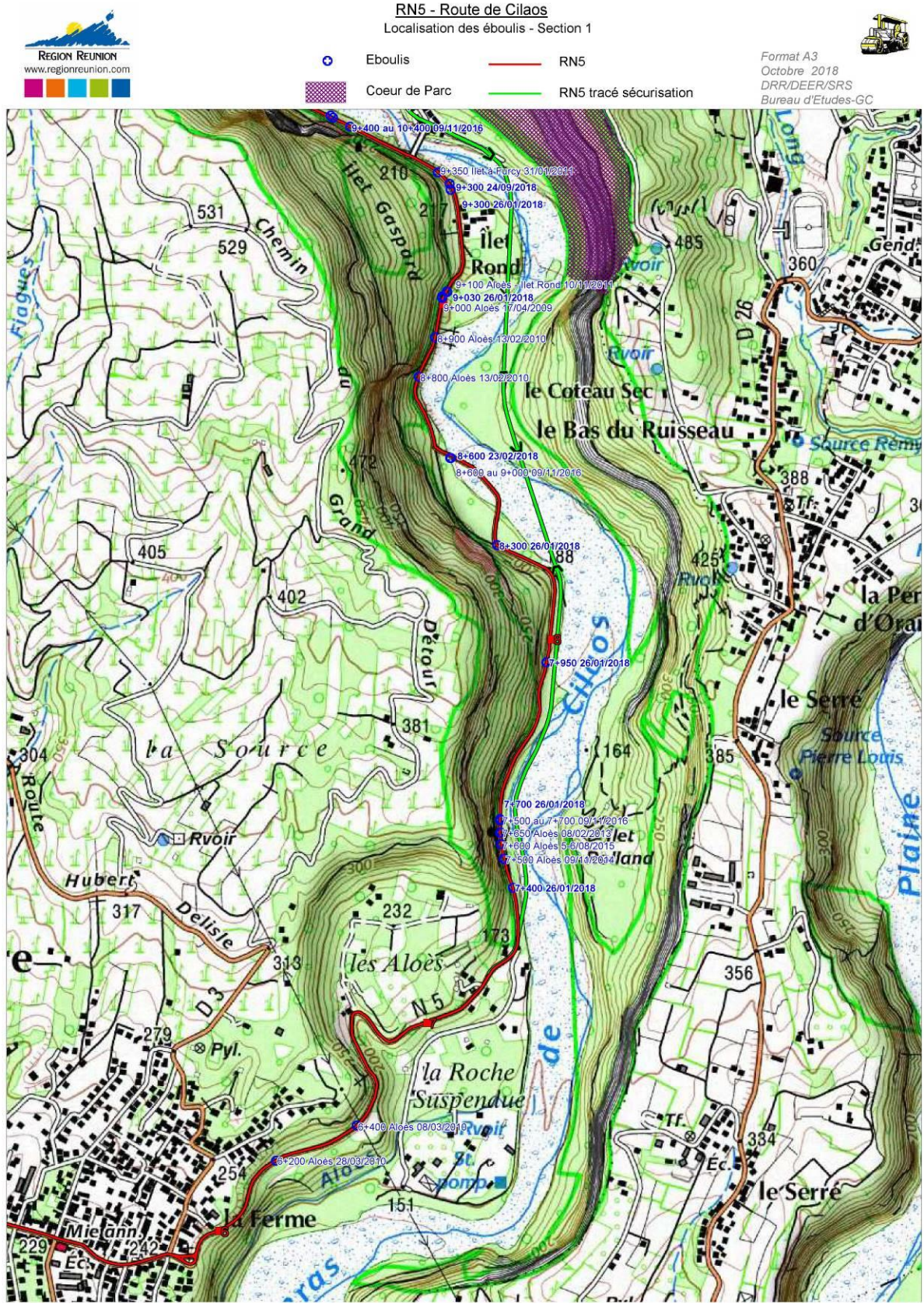


Figure 33 : Localisation des éboulis depuis 2009 - Section 1 (source : BRGM)

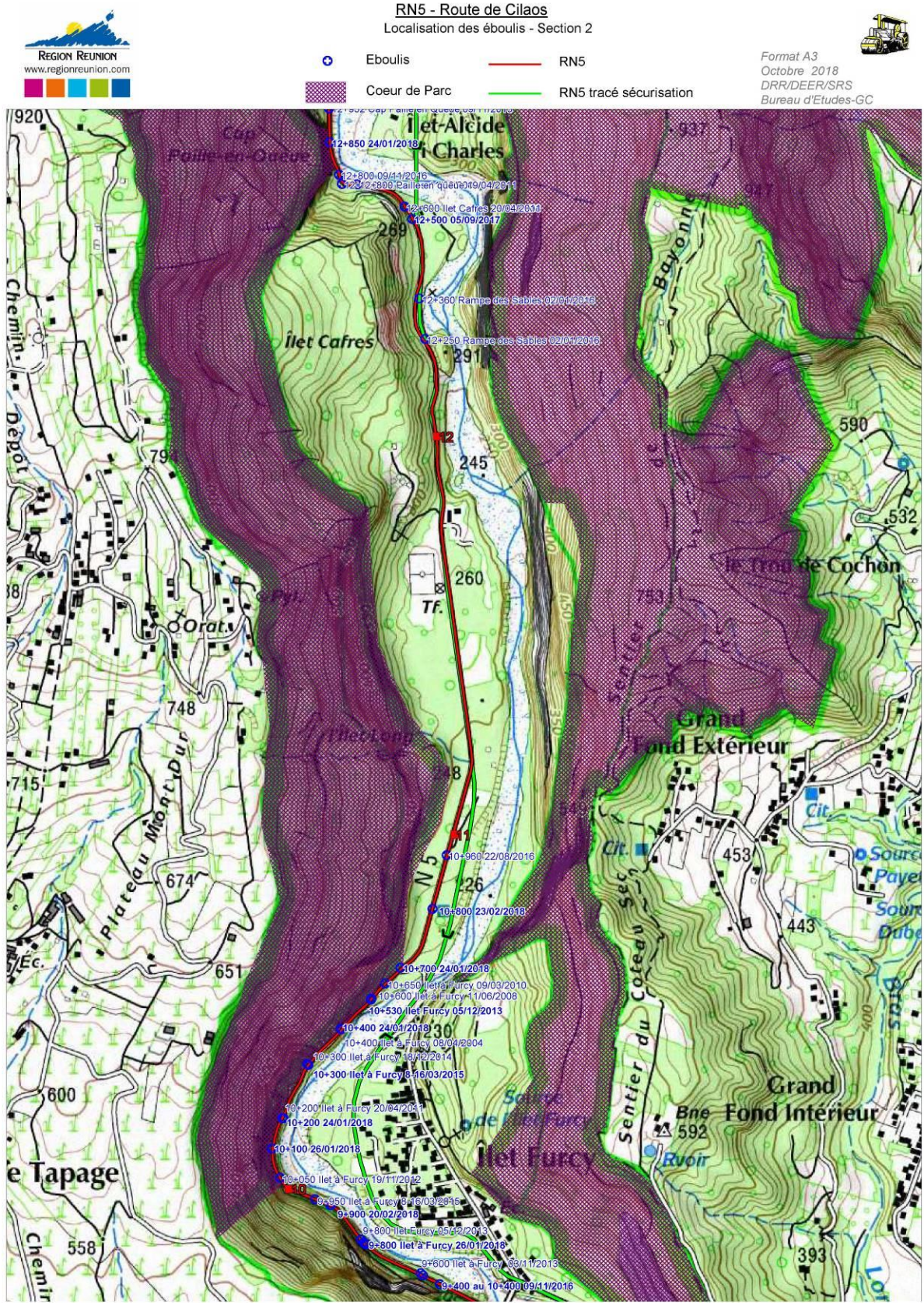


Figure 34 : Localisation des éboulis depuis 2009 - Section 2 (source : BRGM)

7.2 Caractérisation des extractions

Au début des années 1960, les extractions dans le lit mineur de la Rivière Saint-Etienne et du Bras de Cilaos ont commencé de façon intermittente. Avec l'intensification de besoins en matériaux et des travaux dans la région Sud de la Réunion (début 1976), les extractions deviennent plus massives. Aucune réglementation concernant les extractions n'était en vigueur à cette époque.

Le 12 janvier 1993, l'arrêté préfectoral n°57 réglemente les extractions dans le lit de la Rivière Saint-Etienne et du Bras de Cilaos. Il fixe un cadre de délivrance concernant les autorisations individuelles à l'intérieur de zones délimitées. Un cahier des charges prescrit des fosses d'extraction.

Les entreprises suivantes ont bénéficié de ces autorisations :

- SCPR
- VASSOR Frères
- Sud Concassage
- SORECO
- EXFORMAN

En octobre 1998, la préfecture interdit les extractions dans le lit de la Rivière Saint-Etienne et du Bras de Cilaos. Cependant, les extractions continuent sans autorisation jusqu'en 2002.

En 2003, des autorisations sont accordées à Sud Concassage et VASSOR Frères pour l'exploitation de banquettes alluviales vers « les cocos » de 7 ha pour 3 ans.

Le 6 juillet 2006, SORECO a disposé d'une autorisation d'exploitation au droit du Cap Assiette pour une durée de 3 ans.

Le 17 juillet 2007, Sud Concassage a une prolongation de 5 ans de son autorisation de l'exploitation de banquettes alluviales vers « les cocos ».

Depuis 2007, les extractions en lit mineur sont purement interdites en lit mineur et le dragage d'entretien dépend de la Police de l'Eau. La DDE instruit les dossiers de demande d'autorisation au titre de la loi sur l'Eau.

Le 7 juillet 2008, une autorisation d'exploitation de 2 ha d'une banquette d'alluvions anciennes en rive gauche du Bras de Cilaos en amont du radier du Ouaki a été accordé à l'entreprise EXFORMAN avec des conditions d'extractions très strictes (cote d'extraction et mesures de protection de la berge). Ce site situe à 50 m par rapport au lit mineur.

Cependant, malgré cette interdiction, plusieurs exploitants effectuent des extractions non autorisées dans le lit mineur du bras de Cilaos. Ces extractions s'effectuent essentiellement en aval du cours d'eau (en amont du Ouaki).

7.3 Bilan volumétrique

Le bilan volumétrique concerne le lit mineur de la zone d'étude. Il est effectué sur la courte période 2016-2018 via une comparaison des deux modèles numériques de terrain (Litto3D et MNT SINTEGRA)

Un abaissement du lit moyen sur cette courte période a été remarqué ainsi d'une perte de l'ordre de 270 000 m^3 (cf. Paragraphe 6.4). Cette perte de volume provient de la quantité de volume transitant au cours de la période (cf Paragraphe 7.1).

Un déséquilibre sédimentaire est ainsi constaté sur cette zone d'étude. Le rééquilibrage de du lit peut nécessiter plusieurs crues voire plusieurs décennies.

7.4 Comportement du fond du lit en crue

L'écoulement du Bras de Cilaos tend vers un régime critique/torrentiel lors des périodes de crue. Lorsque l'écoulement présente un nombre de Froude entre 0.84 et 1.77 (régime critique/torrentiel), un phénomène nommé antidune se produit.

L'antidune crée une déformation du fond du lit en crue. En effet, le dépôt de matériaux est important sur le flanc amont qui est un obstacle pour l'écoulement. Au niveau du flanc aval, l'écoulement crée une véritable érosion du fond.

La hauteur des antidunes peut atteindre la moitié de la profondeur de l'écoulement et engendre de fortes perturbations.

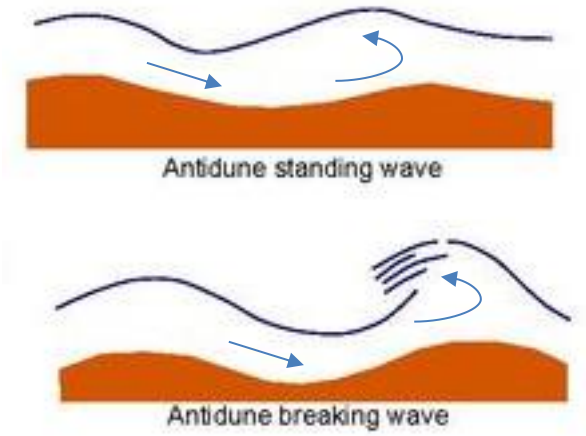


Figure 35 : Représentation schématique des antidunes

Le comportement du Bras de Cilaos lors des périodes de crue perturbe l'écoulement que ce soit au niveau des fonds ou au niveau de la ligne d'eau.

Pour intégrer cette contrainte, la ligne de charge sera prise en compte pour la définition des cotes de référence concernant le tracé routier. De la même manière le profil en long des fonds les plus bas recensés via la topographie ou via la modélisation sédimentaire sera pris en compte.

7.5 Sectorisation en tronçons homogènes

La zone d'étude a été découpé en 5 tronçons homogènes au regard des indicateurs hydromorphologiques suivants :

- Pente du lit ;
- Largeur et profondeur à plein bords ;
- Constitution des fonds.

Les 5 tronçons sont cartographiés sur la figure suivante.

Figure 36 : Sectorisation hydromorphologique du secteur d'étude

La dénomination qui leur a été attribué (ex : BC-T1 correspond au premier tronçon amont de la zone d'étude sur le Bras de Cilaos) est utilisé pour présenter les résultats des sections suivantes.

Dans le modèle à fond mobile, chacun de ces tronçons sera donc considéré comme homogène du point de vue des caractères suivants :

- Granulométrie des fonds ;
- Profondeur maximale d'érosion (érosion verticale des fonds) ;
- Section mobile (emprise latérale des processus d'érosion).

Tronçon	Pente (m/m)	Largeur à pleins bords (m)	Profondeur à pleins bords (m)	Diamètre médian d50 (mm)
BC-T1	0.016	60	7	83
BC-T2	0.017	80	5	32
BC-T3	0.015	75	4	28
BC-T4	0.018	140	9	39
BC-T5	0.017	150	10	78

Tableau 21 : Caractéristiques des tronçons homogènes

7.6 Granulométrie du lit

En fin d'année 2018 (novembre et décembre), une analyse granulométrique et une analyse blocométrique ont été effectuées par le bureau d'études GINGER sur la zone d'étude à des endroits stratégiques :

- Au niveau des futurs ouvrages de franchissement (OA3-P4, Passerelle Furcy et OA1-C0);
- En amont et en aval du modèle (0A4-P4 et Digue-P3).

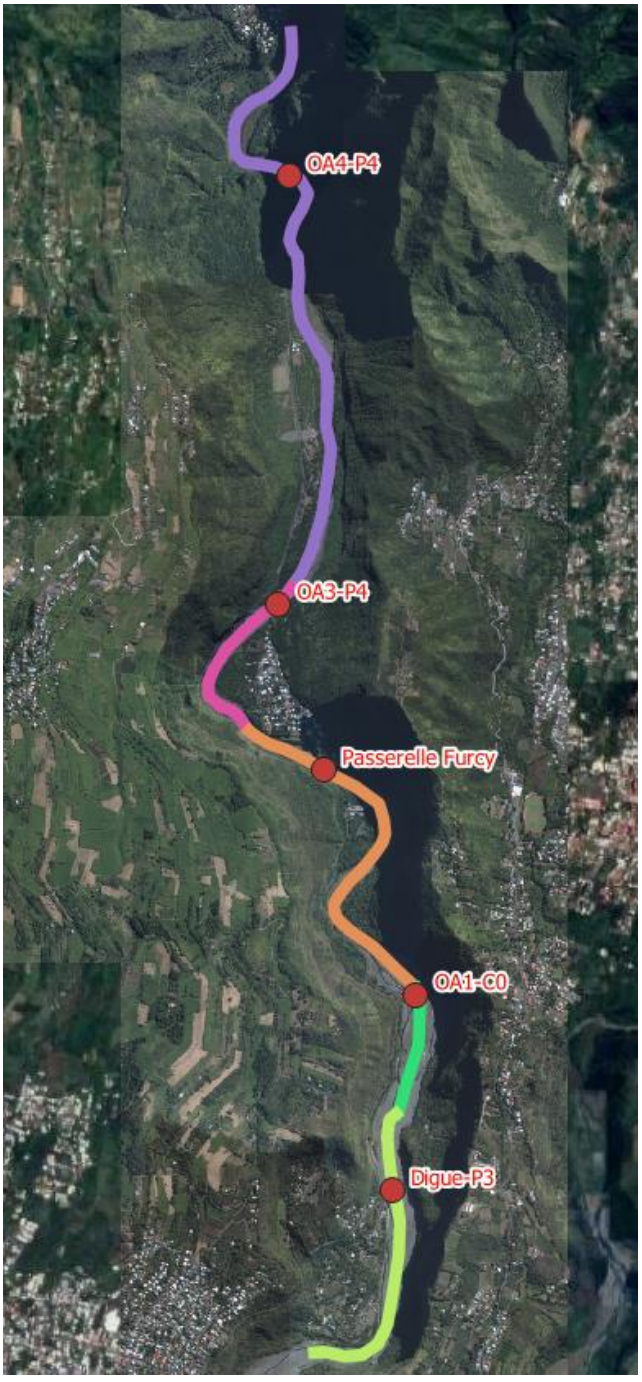


Figure 37 : Localisation des relevés granulométrique et blocométrique

L'analyse granulométrique a été réalisée par la méthode de tamisage à sec après lavage et l'analyse blocométrique a été réalisée via un relevé linaire de surface sur 10m de type Wolman.

Pour chaque localisation, une analyse granulométrique et une analyse blocométrique ont été réalisées.

Les résultats de ces levés terrain sont résumés dans les figures suivantes : distributions par fraction selon la classification de Wentworth, distributions par fréquence cumulées et distributions par taille des éléments selon le relevé linéaire de surface.

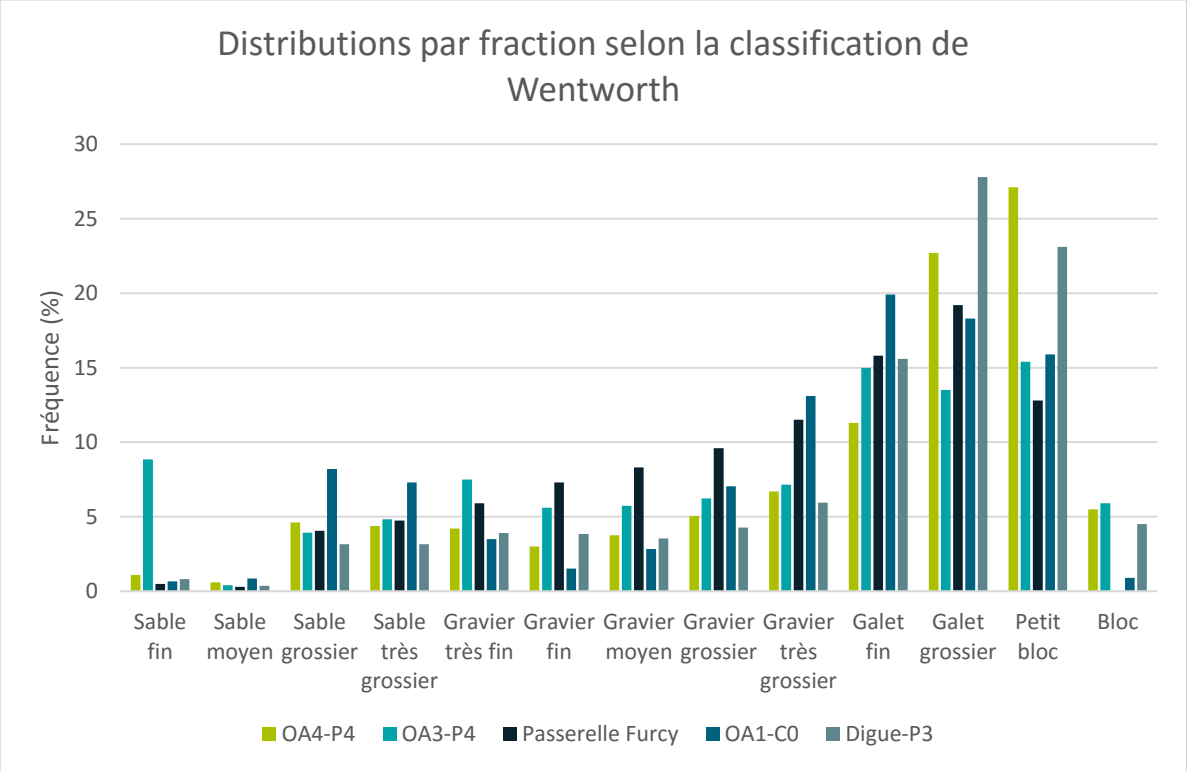


Figure 38 : Distributions par fraction selon la classification de Wentworth

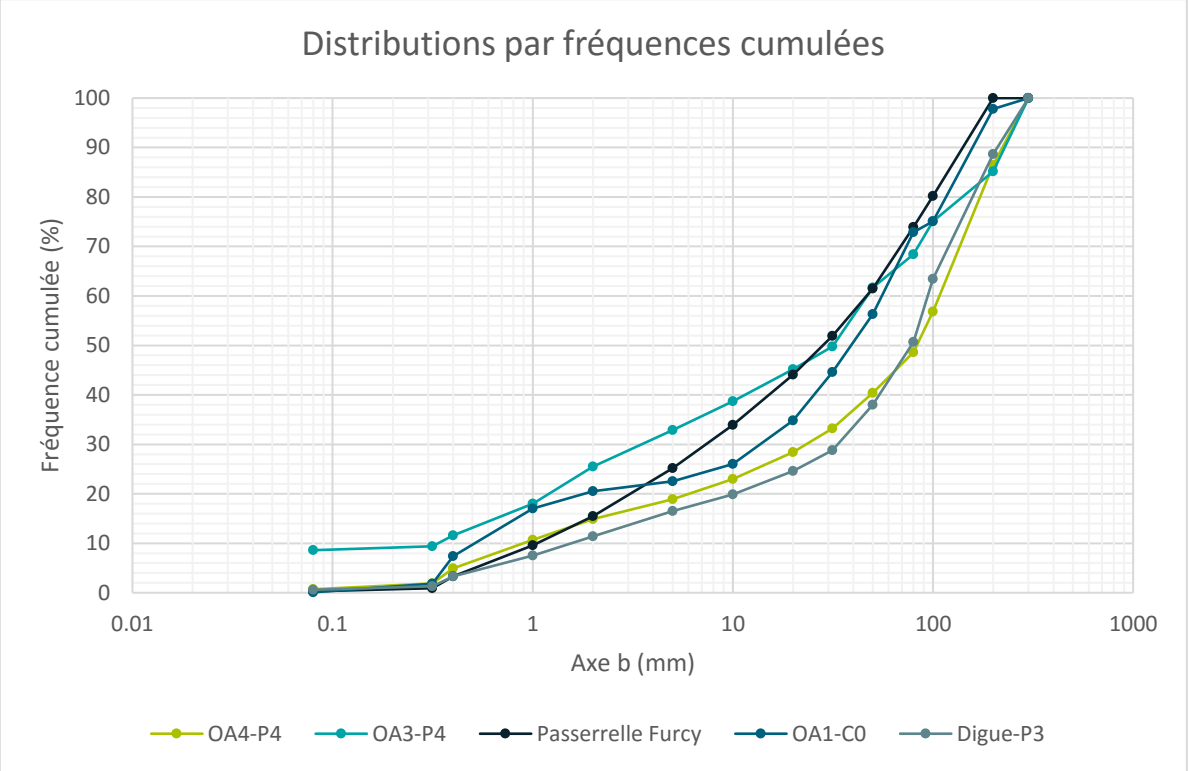


Figure 39 : Distributions par fréquences cumulées

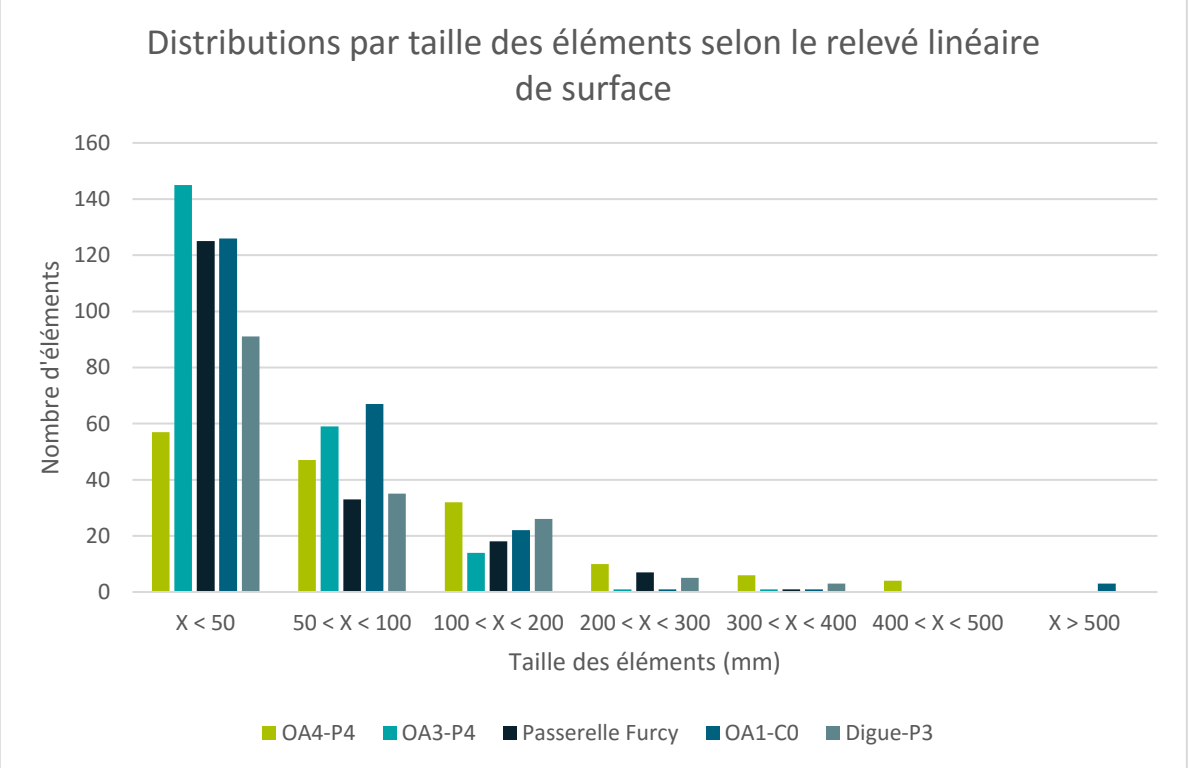


Figure 40 : Distributions par taille des éléments selon le relevé linéaire de surface

La taille des particules échantillonnées s'étend des blocs aux sables. De manière générale, les fonds présentent donc un faible tri granulométrique, c'est-à-dire une forte hétérogénéité, qui s'explique par la proximité des sources sédimentaires.

Entre les tronçons des différences sont constatées. Le secteur amont et aval du modèle présente des fonds plus grossiers avec une grande proportion de blocs et moins de particules fines que les tronçons intermédiaires.

Ces différences peuvent s'expliquer par:

- Pour le secteur amont BC-T1 affilié au relevé OA4-P4, un affinement granulométrique vers l'aval. Ce phénomène est généré par la diminution de la puissance des écoulements engendrant un tri sélectif des particules ;
- Pour le secteur aval BC-T5 affilié au relevé Digue-P3, une perte de vitesse des écoulements dans un élargissement de cours d'eau. L'étalement des écoulements provoque une incapacité du transport des matériaux les plus grossiers.

Le relevé OA3-P4 présente une distribution particulièrement fine s'expliquant par des accélérations localisées des écoulements sur ce tronçon.

7.7 Estimation du débit solide

Le débit solide correspond au volume de matériaux traversant une section donnée d'un cours d'eau par unité de temps.

Le cours d'eau véhicule différents types de matériaux : des matières en solution, des matières en suspension et des matériaux de fond. Sa capacité de transport sédimentaire varie en fonction de sa vitesse d'écoulement, de la pente du cours d'eau, de la granulométrie.

Le transport sédimentaire est continu sur un cours d'eau :

- Lorsque le débit solide diminue d'une section à une autre, une zone de dépôt est constatée ;
- Si le débit solide augmente sur un tronçon, une érosion des berges et/ou du fond est observée.

Dans le cadre du programme de recherche DYNTOR du BRGM, un travail sur la recherche de relation liant débit solide et débit liquide cohérente avec les relations de modèle physique et théoriques a été établie.

Les relations retenues sont :

- Les relations théoriques :
    - La formule de Meyer-Peter ;
    - La formule de Sogreah-Lefort.
- Les relations du modèle physique de 1969 (Qs et Ql en m^3/s):
    - Qs = 0.0097 x Ql -1.45 pour Ql inférieur à 3000 m^3/s ;
    - Qs = 0.0066 x Ql + 767 pour Ql supérieur à 3000 m^3/s.

Ces différentes lois ont été ajustées au cas de la Rivière Saint Etienne.

Une relation a été obtenue dans le cadre de l'étude hydraulique SOGREAH de 2009 :

$$Qs = 0.0081 \times Ql - 0.985 \text{ avec Qs et Ql en } m^3/s$$

Cette relation très similaire à la relation établie pour la rivière des Galets sera appliquée sur le Bras de Cilaos. Les caractéristiques de ces cours d'eau sont très proches.

7.8 Evaluation des volumes solides transportés

A partir de la relation entre le débit liquide et le débit solide et la modélisation du transport solide, une estimation des volumes solides charriés pour les crues recensées au cours des deux dernières décennies a été effectuée.

Les volumes solides associés aux crues récentes sont recensés dans le tableau ci-dessous.

Evènement	Volume de matériaux estimé (m^3)
Janvier 2000	28 000
Dina	280 000
Hary	20 000
Diwa	135 000
Gamède	450 000
Dumile	50 000
Feeleng	16 000
Bejisa	90 000
Haliba	18 000
Daya	2 000
Berguitta	30 000
Dumazile	80 000
Fakir	9 000
Total	**1 208 000**

Tableau 22 : Volumes solides associés aux crues récentes

Le volume total transporté sur les deux dernières décennies est de l'ordre de **1 200 000 m^3**.

Le volume solide transporté sur la dernière décennie (295 000 m^3) est moins important que sur la décennie antérieure (913 000 m^3). Cette constatation peut s'expliquer par la présence de crues supérieures à la crue décennale (Dina et Diwa) dans les années 2000.

7.9 Modélisation du transport solide

7.9.1 Type de modèle utilisé

La modélisation du transport solide est réalisée avec le logiciel HEC RAS permettant la représentation du transport sédimentaire en filaire (modélisation 1D).

L'intérêt de ce logiciel est d'utiliser le même outil pour la modélisation hydraulique (modélisation 2D) et sédimentaire (modélisation 1D à fond variable).

Il permet de représenter les écoulements via des profils en travers tout en modélisant le charriage et la suspension au cours d'une crue prédéfinie.

7.9.2 Emprise du modèle

Figure 41 : Emprise du modèle sédimentaire

Le modèle hydraulique couvre l'ensemble de la zone d'étude s'étendant du secteur ilet des Aloès à l'aval d'ilet Alcide.

Le modèle compte 730 profils en travers ayant une distance entre eux de 10 m.

Le nombre de profils en travers important s'explique par le linéaire conséquent étudié et la nécessité de stabilité du modèle hydraulique.

7.9.3 Données sédimentaires des profils

Les données du modèle sédimentologiques sont les caractéristiques des fonds (érodables ou non, profondeur maximale d'érosion), et des matériaux (granulométrie des matériaux, densité) pour chaque profil :

- La composition granulométrique des fonds a été établie à partir des levés terrain ;
- La section mobile de chaque profil en travers correspond au fond du lit entre les pieds de berges ;
- La profondeur maximale d'érosion varie selon les tronçons;
- La rugosité du lit est prédite par la formule de Limerinos, la plus adaptée aux cours d'eau à charge grossière.

7.9.4 Conditions aux limites

Les conditions aux limites amont du modèle sédimentaire correspondent aux apports solides, en volume et en composition granulométrique.

La granulométrie de la charge de fond a été établie à partir des levés terrain en excluant les blocs qualifiés de moyens selon la classification de Wentworth. La totalité des particules constituant les fonds des tronçons étudiés pourront être transportées dès une crue décennale. Le débit de début d'entrainement est égal à 200 m^3/s.

Un sédimentogramme (évolution du débit solide avec le temps durant la crue étudiée) spécifique à chacune de ces extrémités et à chaque crue de projet a été établi à partir de la formule de Meyer-Peter et Müller (1948) et des caractéristiques physiques des tronçons amont (pente, granulométrie, rugosité et largeur moyenne).

Fractions granulométriques		Composition de la charge de fond injectée en amont du modèle
Fraction	**Axe b min-max (mm)**	**Bras de Cilaos**
Sable fin	0.125-0.25	1.1%
Sable moyen	0.25-0.5	0.6%
Sable grossier	0.5-1	4.6%
Sable très grossier	1-2	4.4%
Gravier très fin	2-4	4.2%
Gravier fin	4-8	3%
Gravier moyen	8-16	3.75%
Gravier grossier	16-32	5.05%
Gravier très grossier	32-64	6.7%
Galet fin	64-128	11.3%
Galet grossier	128-256	22.7%
Petit bloc	256-512	27.1%
Bloc	512-1024	5.5%

Tableau 23 : Distributions granulométriques de la charge de fond injectée en condition limite amont

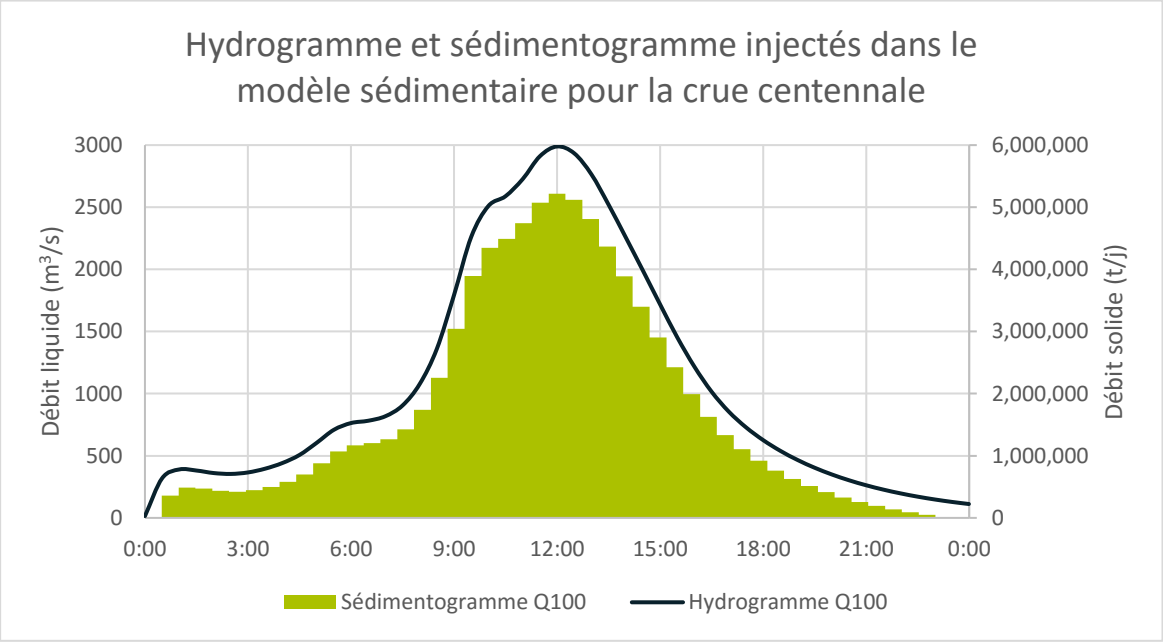


Figure 42 : Hydrogramme et sédimentogramme injectés dans le modèle sédimentaire pour la crue centennale

7.9.5 Paramètres de modélisation, tests de sensibilité

Le calage du modèle sédimentologique est délicat, car il nécessite un modèle hydraulique parfaitement stable et dépend de la précision des données d'entrée : structure des fonds (localisation des zones érodables, granulométrie des matériaux), quantification des apports solides, données de fonds initial avant la crue, et des données d'évolution de fonds permettant de comparer avec les résultats du modèle.

En l'absence de ces données disponibles pour le calage, les tests sur les formules empiriques de transport solide sont réalisés. De plus, un calage avec les fonds de 2016 du Lidar pour retrouver les fonds de 2018 du MNT de SINTEGRA en simulant les principaux évènements ayant eu lieu lors de cette période sera effectué.

Les différentes formules de transport disponibles dans le logiciel sont les suivantes :

- Ackers and White
- Engelund et Hansen
- Laursen-Copeland
- Meyer Peter Muller
- Toffaleti
- MPM - Toffaleti
- Yang
- Wilcock et Crowe

La plupart de ces formules visent à estimer le transport solide total (charge de fond et transport en suspension) sur de grands cours d'eau (fleuves ou grandes rivières) à faible pente dont la charge solide est dominée par les sables ou les graviers fins, Aucune d'entre elles n'est véritablement appropriée à la prédiction du charriage sur des cours d'eau à forte énergie et à granulométrie grossière comme le Bras de Cilaos.

Nous utiliserons la formule établie par Meyer-Peter et Müller (1948), la plus fréquemment utilisée pour estimer la capacité de transport par charriage des cours d'eau à graviers, dont le domaine d'application présente les limites suivantes :

- Pentes inférieures à 2,0 ou 2,5% (différentes appréciations selon les auteurs), ce qui est acceptable compte tenu des pentes des tronçons étudiés;
- Particules de diamètre inférieur à 29 mm, ce qui est très faible par rapport à la composition de la charge solide du Bras de Cilaos.

La formule complète empirique de Meyer-Peter et Müller est la suivante :

$$q_s = 8\sqrt{g}\sqrt{\gamma_s/\gamma_w - 1}\left(\beta.\tau^* - 0{,}047\right)^{3/2} d^{3/2} \text{ avec } \tau^* = \frac{R.i}{(\gamma_s/\gamma_w - 1).d}$$

Avec :

- qs : débit solide en m3/s par mètre de largeur de lit
- g : accélération de la pesanteur en m/s²
- τ^* : paramètre de Shields
- γs : poids volumique du matériau solide
- γw : poids volumique de l'eau
- B : paramètre adimensionnel compris entre 0.35 et 1

Les crues seront simulées avec l'hypothèse de fond initial du modèle numérique de terrain de 2018.

7.9.6 Calage du modèle

Le modèle sédimentaire a fait l'objet d'un calage sur l'évolution de la topographie de la Litto3D de 2016 à la topographie SINTEGRA de fin 2018.

Sur la base de la topographie de 2016, l'objectif du calage est d'atteindre la cote des fonds extrêmes de 2018 sur les tronçons non concernés par les travaux d'urgence.

Les données hydrologiques des différents évènements majeurs recensés sur la période 2016-2018 (Daya, Berguitta, Dumazile et Fakir) et la topographie de la Litto3D ont été intégrées dans la modélisation.

Un ajustement des différents paramètres de la modélisation a permis de représenter le plus fidèlement possible les évolutions constatées sur la période 2016-2018. Le graphique suivant présente le calage réalisé.

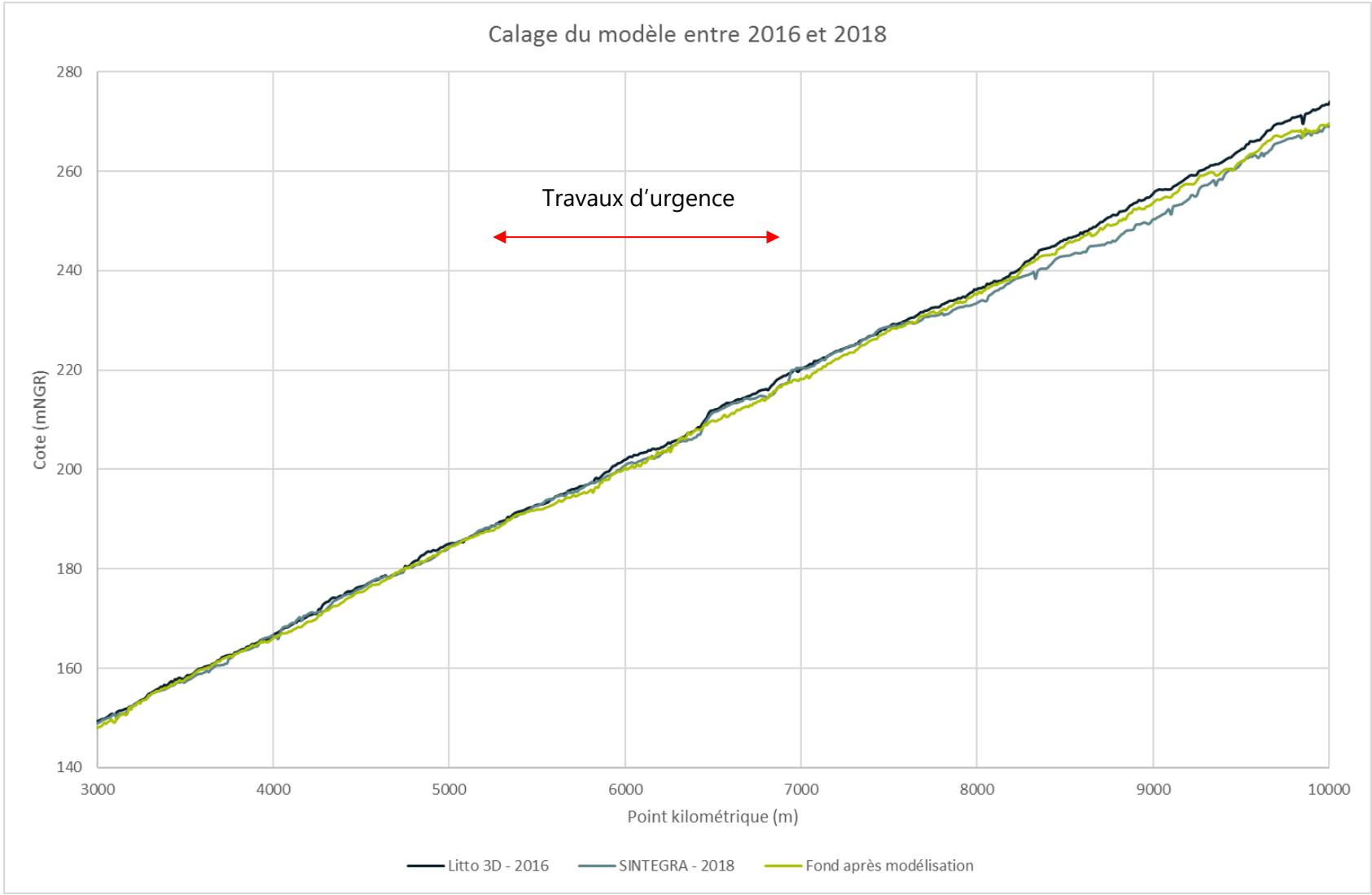


Figure 43 : Graphique représentant l'évolution du fond extrême selon le calage réalisé

Le calage permet de retrouver la cote de fond extrême de 2018 sur l'ensemble de la zone d'étude sauf sur les secteurs suivants :

- Au niveau des travaux d'urgence réalisés en 2018 ;
- Au niveau du secteur Rampe des Sables.

La première localisation est explicable par le remodelage du cours d'eau lié aux travaux d'urgence. Concernant le second point, au niveau de la Rampe des Sables, le fond s'est abaissé de près de 5 m en seulement 2 ans. Cette abaissement peut être lié à des extractions sauvages ou un recalibrage du cours d'eau non déclaré.

7.9.7 Résultats de la modélisation à fond mobile

Les résultats des modèles à fond mobile doivent être évalués selon 2 critères :

- La distribution spatiale des évolutions verticales du lit (incision ou exhaussement des fonds) ;
- L'intensité de ces évolutions verticales.

Pour évaluer l'efficacité du modèle, il convient dans un premier temps d'analyser la distribution spatiale des évolutions verticales de manière à vérifier que le modèle prédise des résultats cohérents avec la morphologie du lit : ruptures de pentes, élargissement et resserrement du lit. L'analyse de l'intensité des évolutions verticales n'intervient que dans un deuxième temps, car on peut l'ajuster en augmentant ou en diminuant la charge solide (volume et/ou composition granulométrique) définies comme conditions aux limites amont pour qu'elle corresponde davantage aux évolutions réellement constatées sur le terrain.

Plusieurs simulations ont été menées, avec pour état initial la topographie réalisée par SINTEGRA fin 2018, afin d'évaluer les tendances d'évolution probables du lit dans les décennies à venir.

L'évolution du niveau du lit n'étant plus impactée par les extractions, les hypothèses de simulation se basant sur des épisodes hydrologiques sont :

- Simulation avec 1 cycle de crue de la dernière décennie ;
- Simulation avec 1 cycle de crue de la décennie antérieure (2000 à 2009) ;
- Simulation avec 2 cycles de crue de la dernière décennie ;
- Simulation avec 2 cycles de la décennie antérieure ;
- Simulation avec une crue centennale.

La tendance d'évolution du profil en long du fond extrême sur la zone d'étude selon les différentes simulations est représentée sur le graphique suivant.

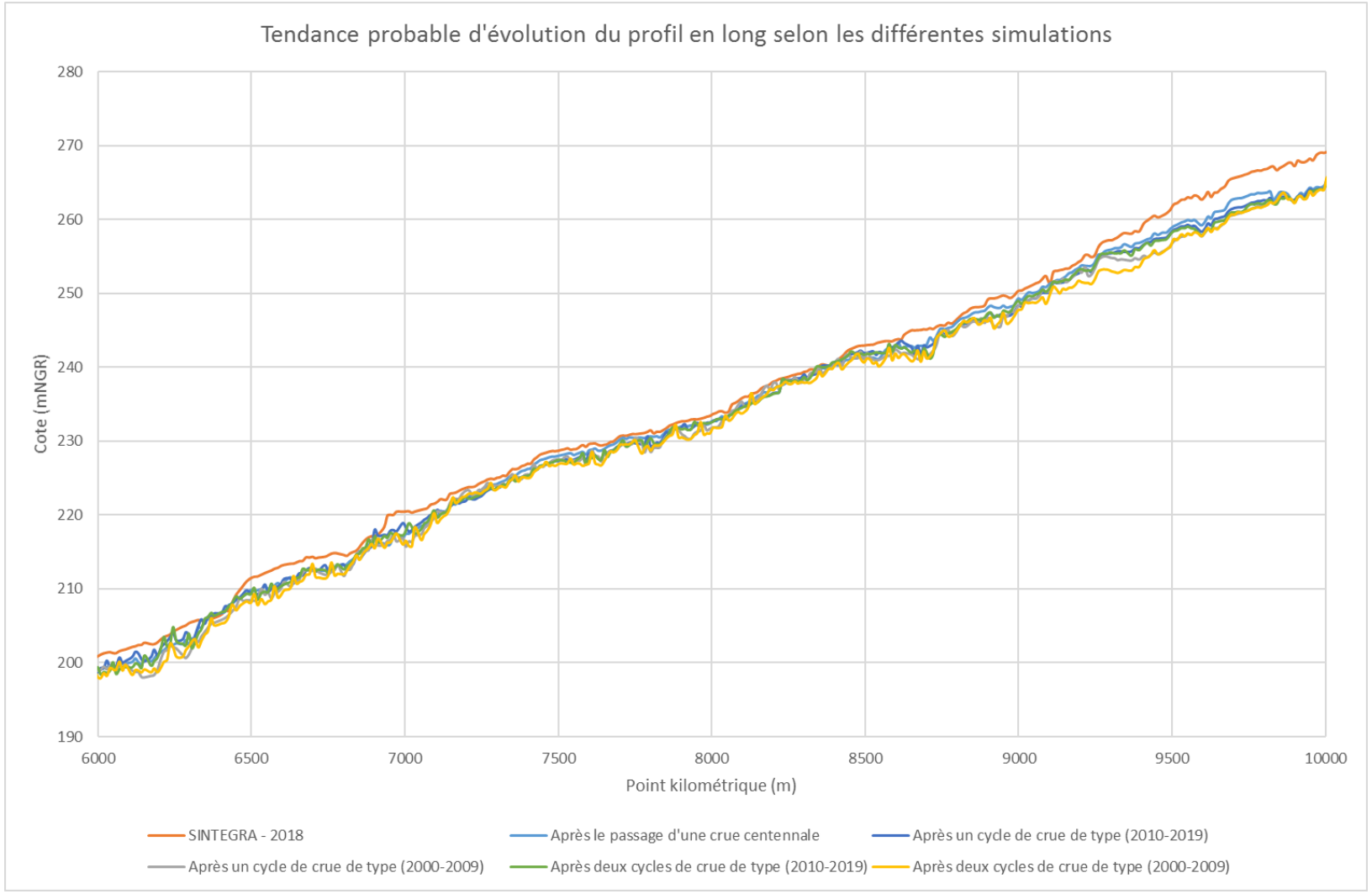


Figure 44 : Graphique représentant la tendance probable d'évolution du profil en long du fond extrême selon les différentes simulations (Partie amont)

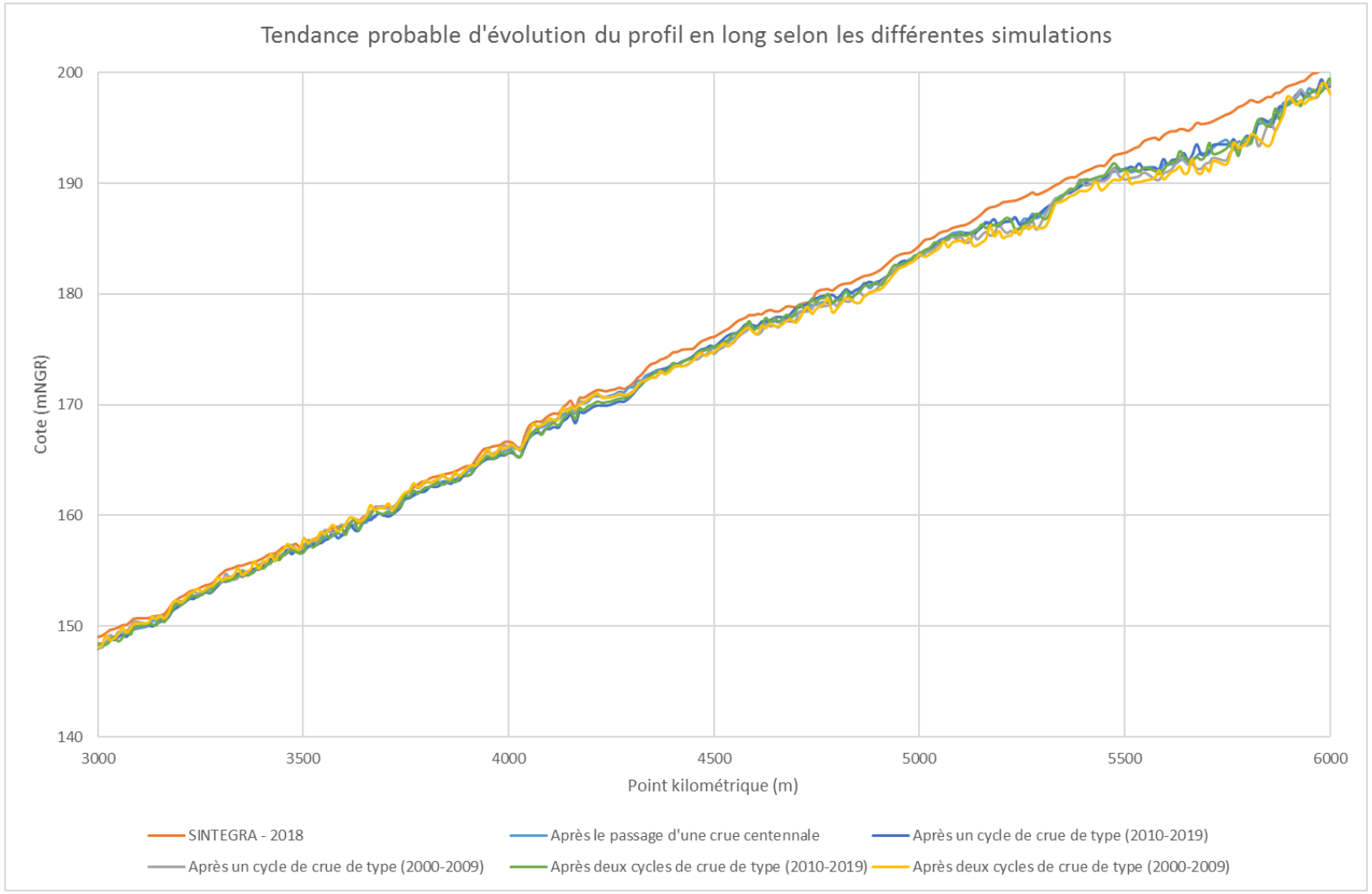


Figure 45 : Graphique représentant la tendance probable d'évolution du profil en long du fond extrême selon les différentes simulations (Partie aval)

7.9.8 Conclusions et hypothèses retenues

Les différentes simulations sur le logiciel HEC RAS montrent une tendance d'évolution du profil en long à l'abaissement du lit sur la zone d'étude.

Cet abaissement est plus ou moins important selon les secteurs. En effet, on recense un abaissement plus prononcé au niveau de Rampe des Sables (4 à 5 m) et de l'Ilet Furcy et l'Ilet Rond (3 à 5 m). Cet abaissement est favorisé par un écoulement en crue par laves torrentielles chenalisé avec la présence de vitesses importantes.

Les hypothèses d'évolution simulées impactent les niveaux d'eau atteints en crue (calage hors d'eau des infrastructures routières) et les cotes d'implantation des fondations des ouvrages pour s'assurer de leur durabilité à long terme en cas d'abaissement du lit.

L'évolution à long terme des profils en long du fond extrême du lit du Bras de Cilaos est difficile à prédire.

En ce qui concerne le calage des fondations des ouvrages de franchissement et des protections linéaires, le niveau minimal du lit est à retenir. Il correspond au minimum des fonds extrêmes historiques et simulés. Ce niveau minimal est défini sous l'hypothèse d'arrêt des extractions au droit ou à l'aval de la zone d'étude.

Afin de prendre en compte l'évolution probable du profil en long dans les décennies à venir, le profil de référence retenu concernant le calage altimétrique des ouvrages routiers est le profil en long correspondant au niveau maximal. Ce niveau maximal correspond au maximum des niveaux des fonds extrêmes historiques et simulés.

Au regard des phénomènes historiques observés, la problématique des laves torrentielles sera prise en compte dans le dimensionnement des ouvrages hydrauliques.

Les niveaux maximal et minimal du lit retenus sont représentés sur la figure suivante.

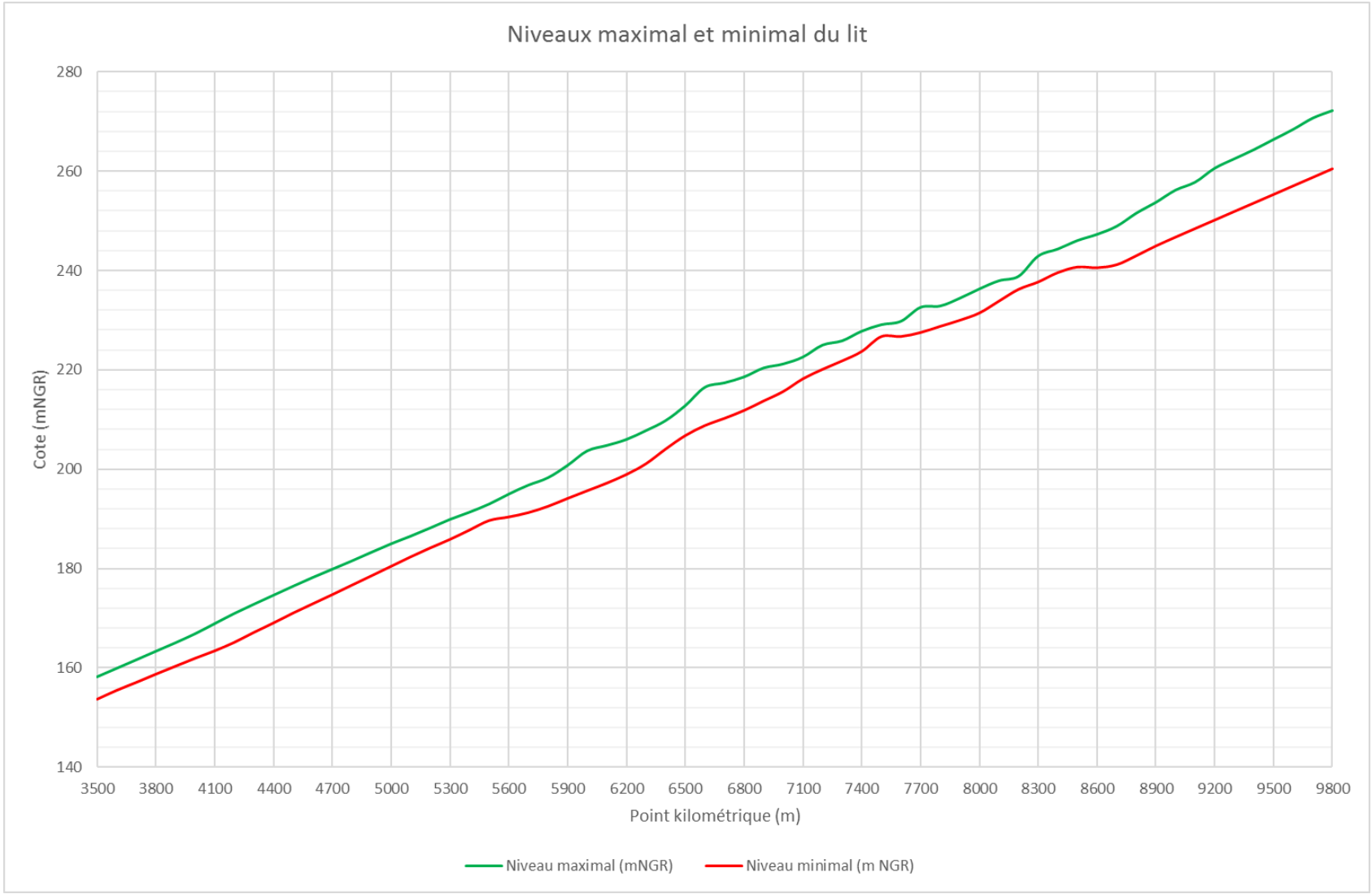


Figure 46 : Graphique représentant les niveaux maximal et minimal du lit

8. Analyse hydraulique de l'état actuel

8.1 Objectifs de l'analyse

L'objectif de l'analyse hydraulique est de définir les conditions d'écoulement hydrauliques pour les crues décennale, trentennale, centennale et millénale sur le linéaire de l'étude afin de préciser les contraintes à prendre en compte dans le dimensionnement des ouvrages (hauteurs, vitesses, forces tractrices…)

Les débits caractéristiques évalués lors de l'analyse hydrologique pour les différentes crues simulées sont les suivants :

		Période de retour			
		10 ans	**30 ans**	**100 ans**	**1000 ans**
Bras de Cilaos au Pavillon (85 km²)	**Débit de pointe (m³/s)**	**1100**	**2030**	**2650**	**4470**
	Débit spécifique (m³/s/km²)	12.9	23.9	31.2	52.6
Bras de Cilaos au Ouaki (100 km²)	**Débit de pointe (m³/s)**	**1240**	**2290**	**2990**	**5060**
	Débit spécifique (m³/s/km²)	12.4	22.9	29.9	50.6

Tableau 24 : Débits de pointe des différentes crues simulées

Les apports latéraux le long des gorges du Bras de Cilaos ont lieu entre le Pavillon et le Petit Serré. Afin de représenter la réalité avec une marge de sécurité, le débit de projet correspond au débit de pointe du Bras de Cilaos au Ouaki.

8.2 Analyse des bras vifs

La morphologie du Bras de Cilaos est très particulière avec la présence de chenaux dont la position varie au fil des crues.

Lors des faibles crues, la formation de bras vif associée à des vitesses importantes allant de 5 à 8 m/s est observée. Ce phénomène peut attaquer les berges et les piles d'ouvrages présents dans le lit mineur du Bras de Cilaos et engendrer des dégâts importants.

Par exemple, lors du cyclone Gamède (Février 2007), l'ouvrage d'art aval de la RN1 présent sur la Rivière Saint Etienne s'est effondré. Lors de la crue liée au cyclone, le lit s'est abaissé de 5 m et la pile numéro 7 de l'ouvrage a été attaqué par affouillement suite à l'attaque d'un bras vif ce qui a provoqué sa chute.

Figure 47 : Effondrement de l'ouvrage d'art aval sur la Rivière Saint Etienne suite à une attaque d'un bras vif

Le phénomène de bras vifs est souvent inobservable car en fin de crue, les sédiments se déposent et masquent la profondeur réelle des chenaux de crue.

8.3 Modélisation hydraulique

8.3.1 Type de modèle utilisé

La modélisation hydraulique du Bras de Cilaos sur la zone d'étude est réalisée à l'aide du logiciel HEC RAS 2D.

Il permet de simuler la circulation d'eau dans des réseaux simples ou maillés, à surface libre tels que les rivières et les canaux d'irrigation ou de drainage, en régime permanent ou transitoire.

HEC-RAS est plus particulièrement dédié à l'étude de la propagation des crues le long d'une rivière.

La schématisation du site d'étude est décrite dans une base de données au moyen d'une série de profils en travers et d'ouvrages …

Il permet notamment d'établir des cartes d'inondabilité, d'optimiser des aménagements ou protections et d'analyser le fonctionnement des systèmes hydrauliques complexes.

La diversité des fonctions de présentation des calculs offre toute une palette de moyens de valorisation des modélisations réalisées au cours d'études, facilitant par ce biais la compréhension des résultats.

Au regard des caractéristiques de la zone de projet, l'utilisation d'un modèle 2D répond à l'objectif de l'étude. En effet, les éléments suivants justifient cette utilisation :

- De nombreuses zones de débordement sur la zone d'étude,
- Présence d'écarts de la ligne d'eau entre intrados et extrados des courbes du cours d'eau,
- Présence d'un MNT précis

Le modèle hydraulique construit à partir de ce logiciel est un modèle 2D du lit mineur et du lit majeur.

8.3.2 Emprise du modèle

Le modèle hydraulique couvre l'ensemble de la zone d'étude s'étendant du secteur ilet des Aloès à l'aval d'ilet Alcide.

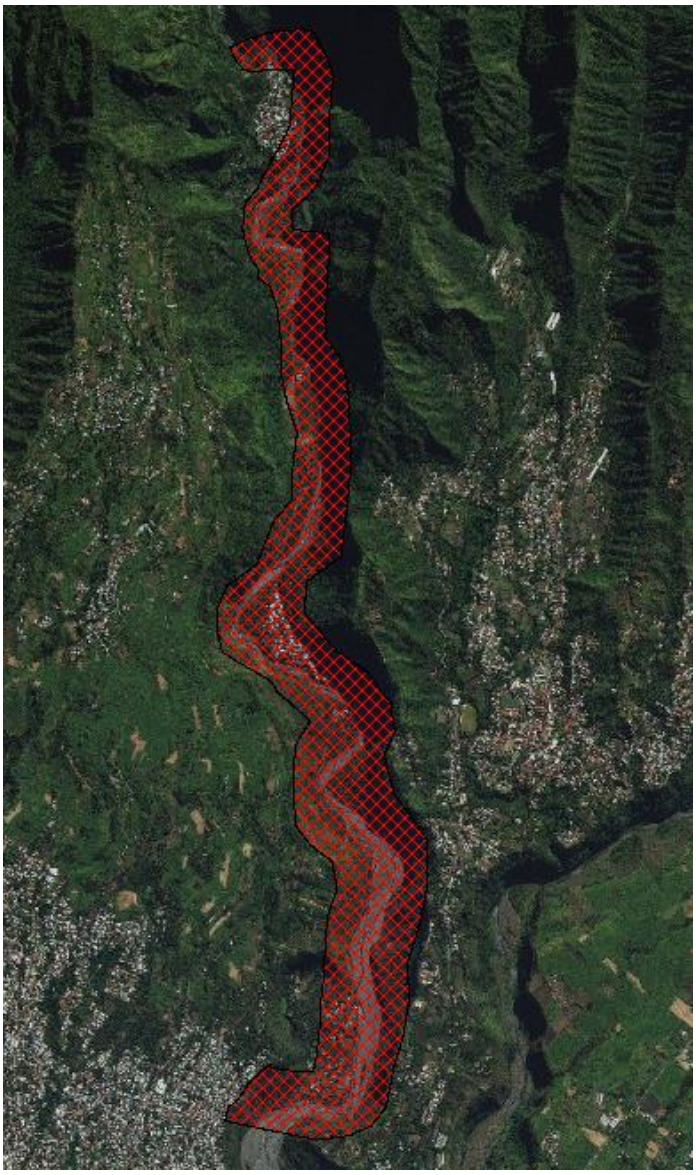


Figure 48 : Emprise du modèle hydraulique

La taille des mailles est de l'ordre de 16 m² (4 m x 4 m) sur la totalité de la zone d'étude. La modélisation compte ainsi un total de 210 000 mailles.

8.3.3 Hypothèses de modélisation

La modélisation n'intègre pas les ouvrages d'urgence réalisés courant 2018. Ces ouvrages ont été dimensionnés pour une crue quinquennale et seront emportés dès une crue importante (T>10 ans).

La modélisation hydraulique est donc réalisée sur le Bras de Cilaos sans ouvrages de franchissement sur le tronçon étudié.

Le modèle a été construit à partir du MNT Sintegra et du levé terrestre effectué dans le lit mineur du Bras de Cilaos réalisés en décembre 2018.

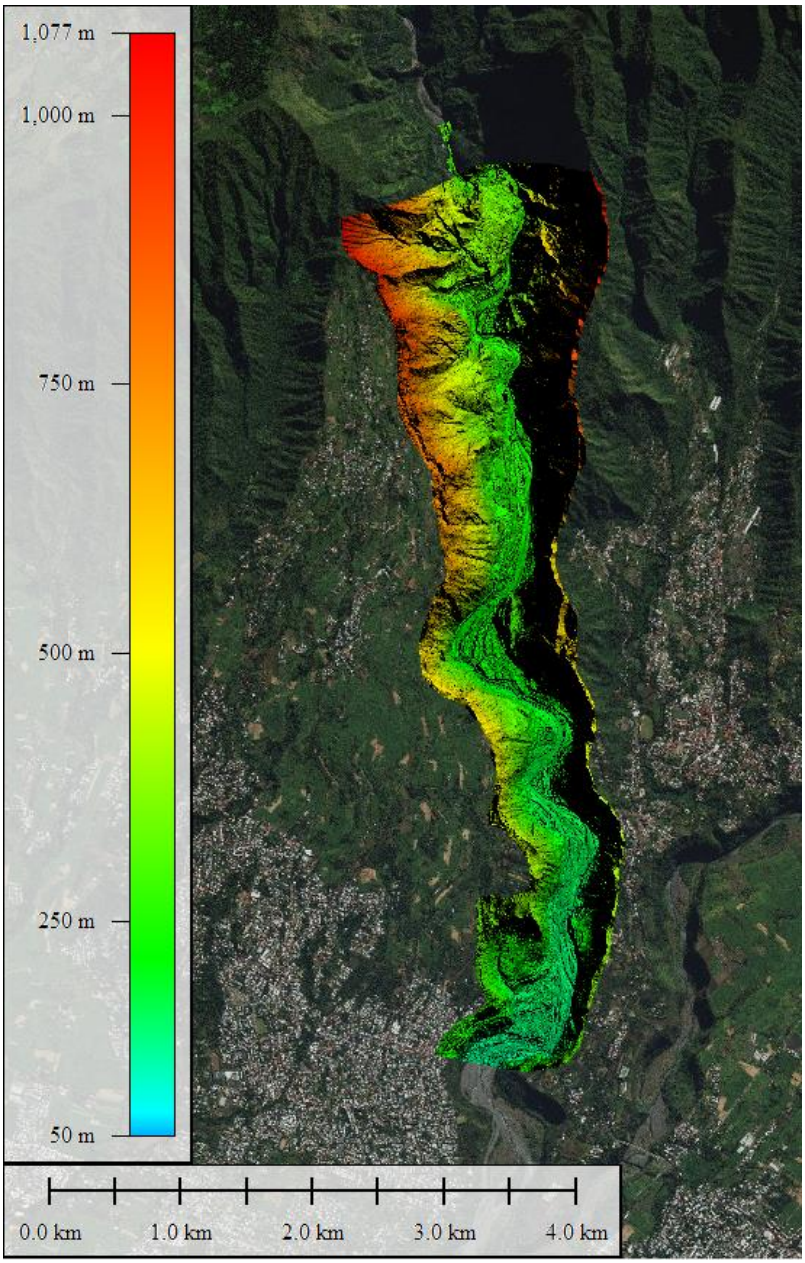


Figure 49 : Assemblage du modèle numérique terrestre de Sintegra avec les levés terrestres sur le lit mineur

Lors de cette modélisation, la topographie est considérée comme fixe. En réalité, la topographie varie en fonction du temps et de la crue.

Les débits de projet sont injectés en amont du modèle via un hydrogramme fictif produit par homothétie avec l'hydrogramme de la crue de Fakir.

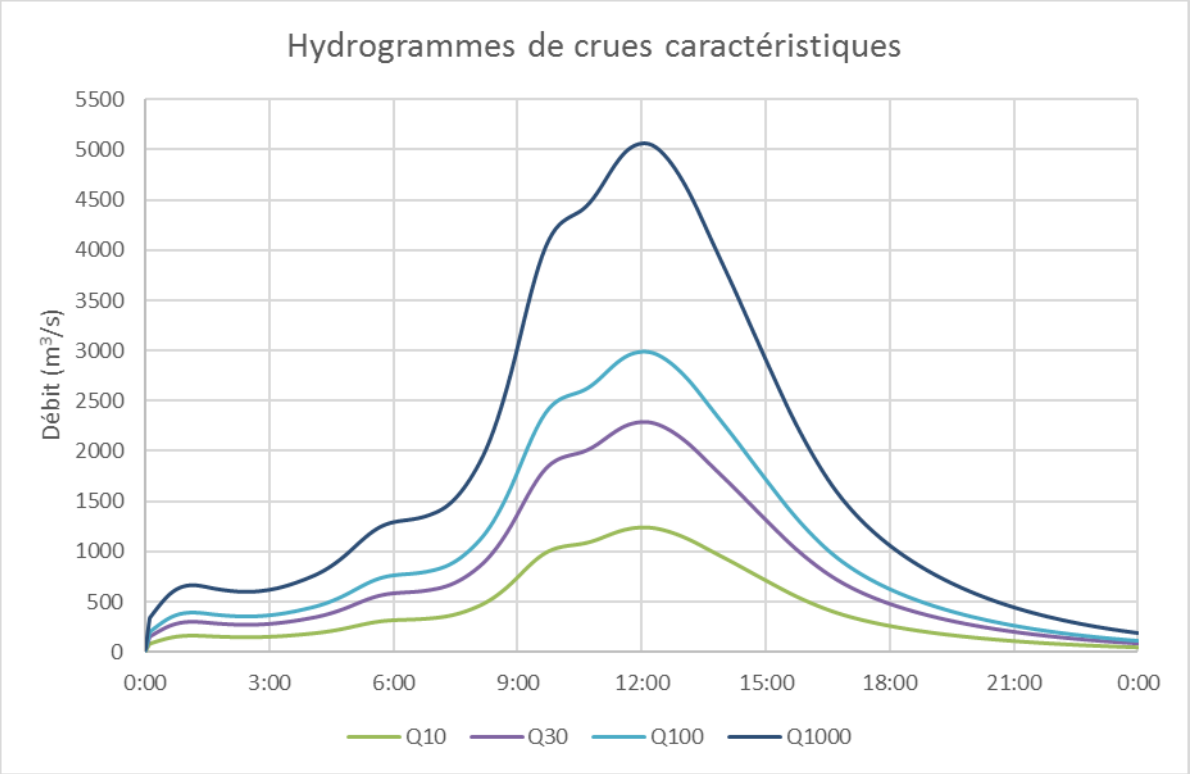


Figure 50 : Hydrogrammes de crues caractéristiques

8.3.4 Calage du modèle

Etant donné les particularités du site, il ne peut pas avoir de « calage » au sens strict qui correspond habituellement à la simulation d'un événement observé.

Les paramètres de rugosité retenus pour le modèle sont similaires aux paramètres du modèle de 2009 de SOGREAH :

- Coefficient de Strickler = 20 $m^{1/3}/s$ pour le lit mineur ;
- Coefficient de Strickler = 15 $m^{1/3}/s$ pour le lit majeur.

Un calage a néanmoins été effectué par comparaison avec les résultats de l'étude SOGREAH pour la crue centennale. Il a été vérifié que l'emprise calculée et les vitesses d'écoulement sont équivalentes.

8.4 Résultats de la modélisation hydraulique

Une description des différentes crues simulées est effectuée. Pour chaque crue, les maximums des hauteurs d'eau, des vitesses d'écoulement et des forces tractrices sont cartographiées.

Les cotes d'élévation de la surface d'eau, les vitesses d'écoulement maximales et les forces tractrices sont indiquées dans un tableau récapitulatif au droit de chacun des ouvrages de franchissement envisagés dans les variantes étudiées.

Figure 51 : Localisation des ouvrages de franchissement envisagés

8.4.1 Crue décennale

Les caractéristiques des écoulements au niveau des ouvrages de franchissement envisagés sont présentées dans le tableau suivant :

Lieu	Elévation de la surface d'eau (m NGR)	Vitesses d'écoulement maximales (m/s)	Forces tractrices au niveau de la rive gauche (N/m^2)	Forces tractrices au niveau du lit mineur (N/m^2)	Forces tractrices au niveau de la rive droite (N/m^2)
Passage OF1a	161.5	5.5	100	450	400
Passage OF1b	167	5.5	250	400	350
Passage OF1c	183.5	4.5	400	450	350
Passage OF2	193.5	8	350	650	500
Passage OF3	203	8.5	400	750	500
Passage OF4	227	9	250	700	450

Tableau 25 : Caractéristiques des conditions d'écoulement au niveau des ouvrages de franchissement envisagés pour la crue décennale

Le profil en long de la ligne d'eau et de la ligne de charge pour la crue décennale du Bras de Cilaos sur la zone d'étude en état actuel est disponible ci – dessous.

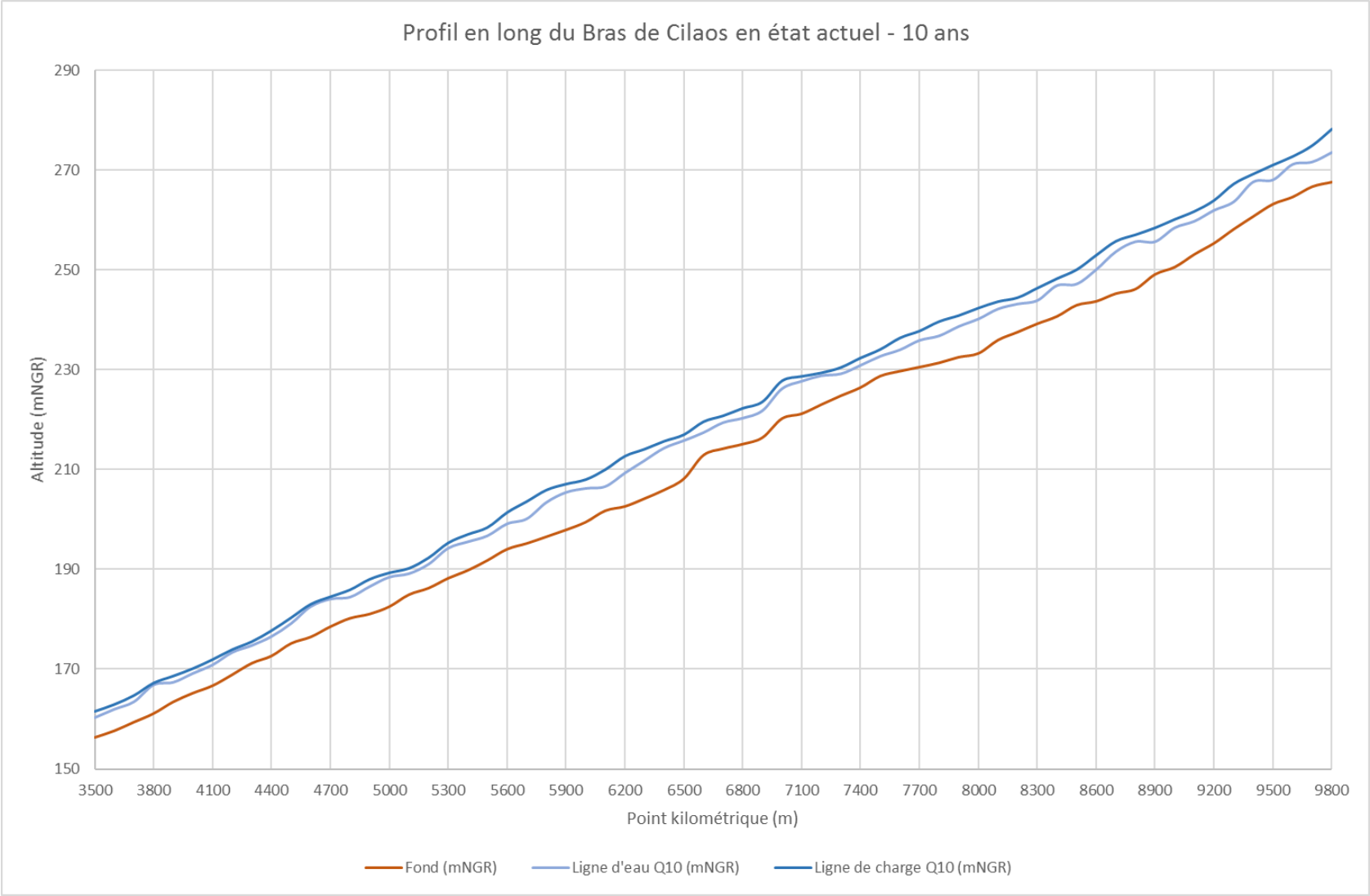


Figure 52 : Profil en long du Bras de Cilaos en état actuel - 10 ans

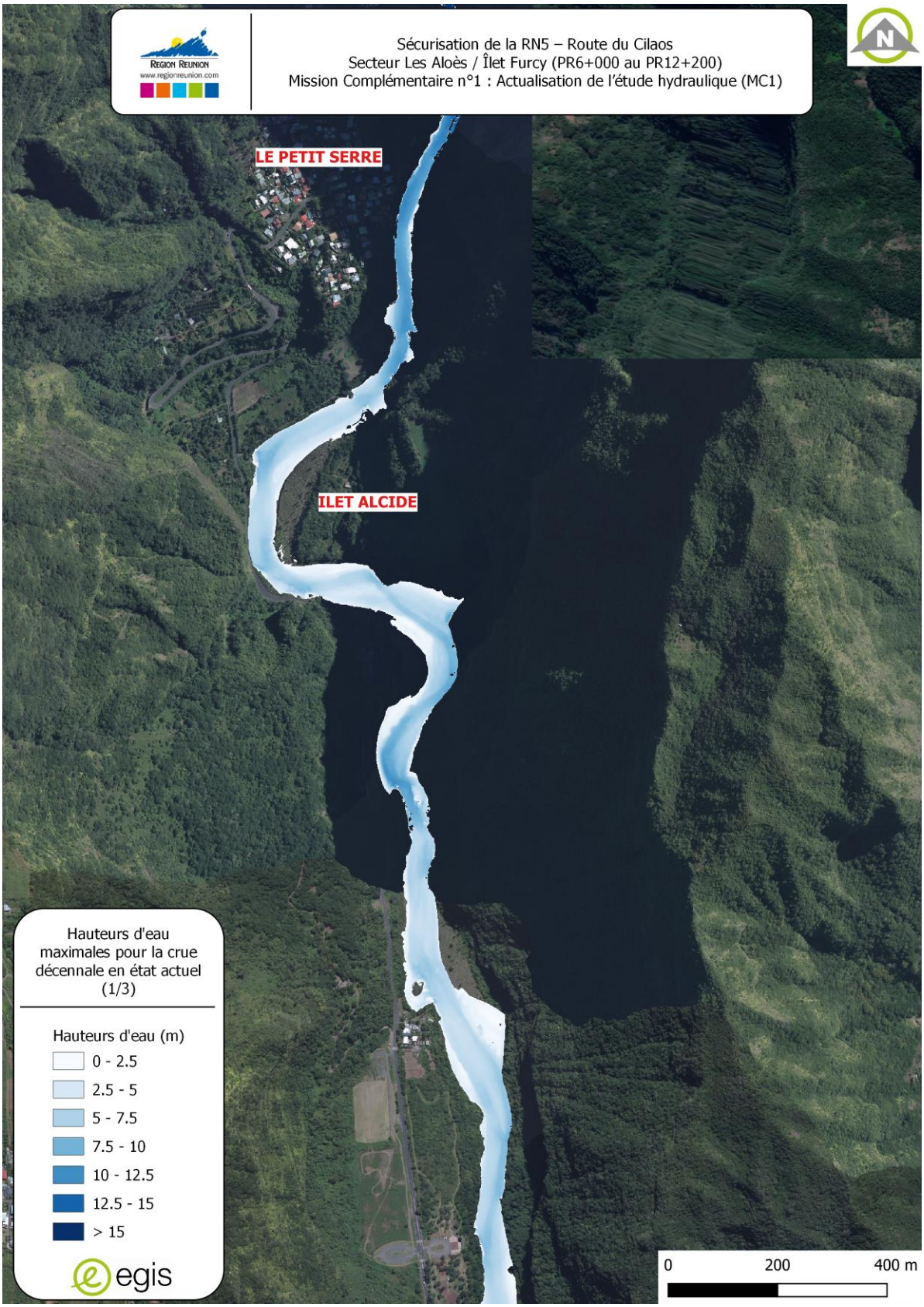


Figure 53 : Cartographie des hauteurs d'eau maximales pour la crue décennale en état actuel (1/3)

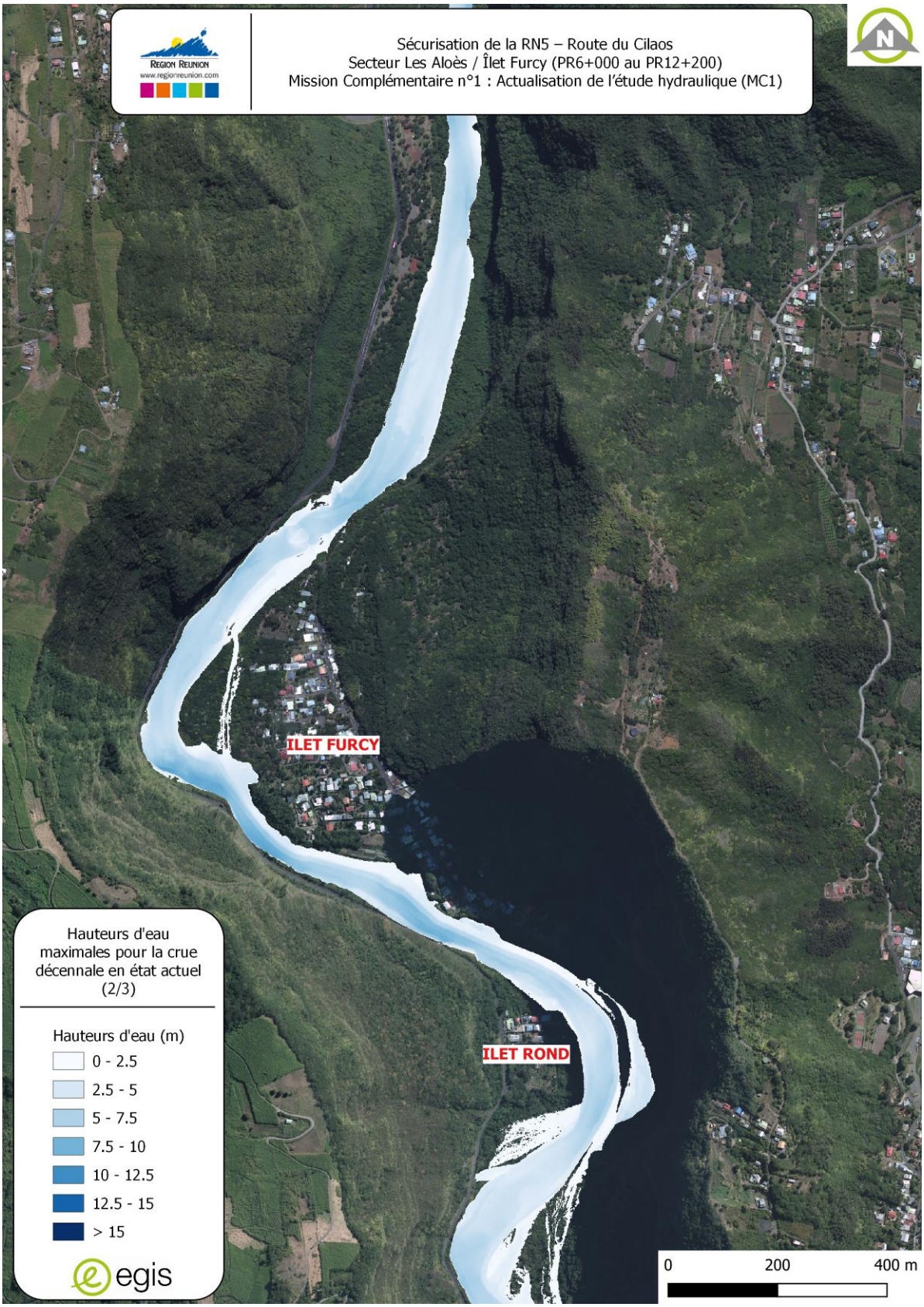


Figure 54 : Cartographie des hauteurs d'eau maximales pour la crue décennale en état actuel (2/3)

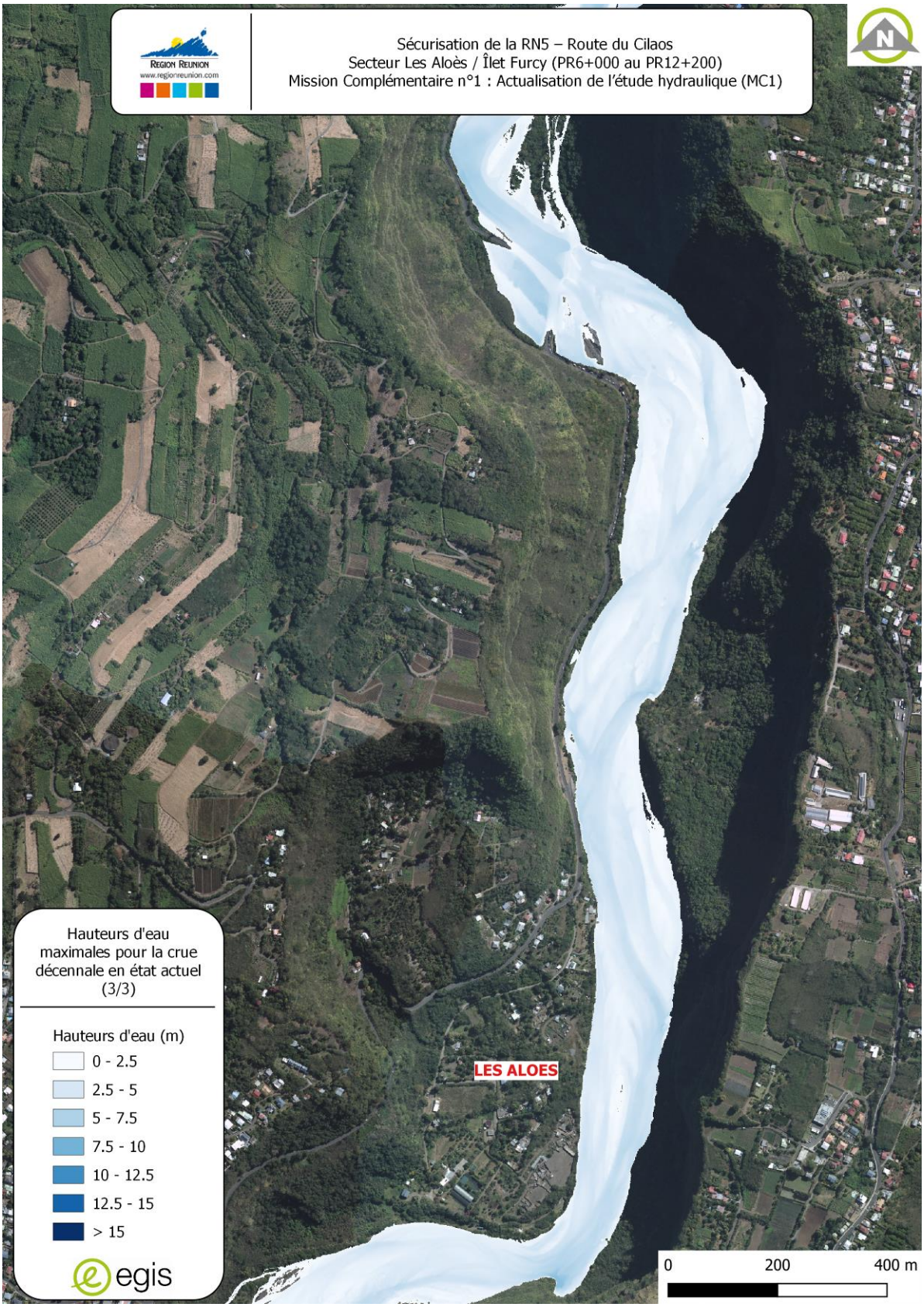


Figure 55 : Cartographie des hauteurs d'eau maximales pour la crue décennale en état actuel (3/3)

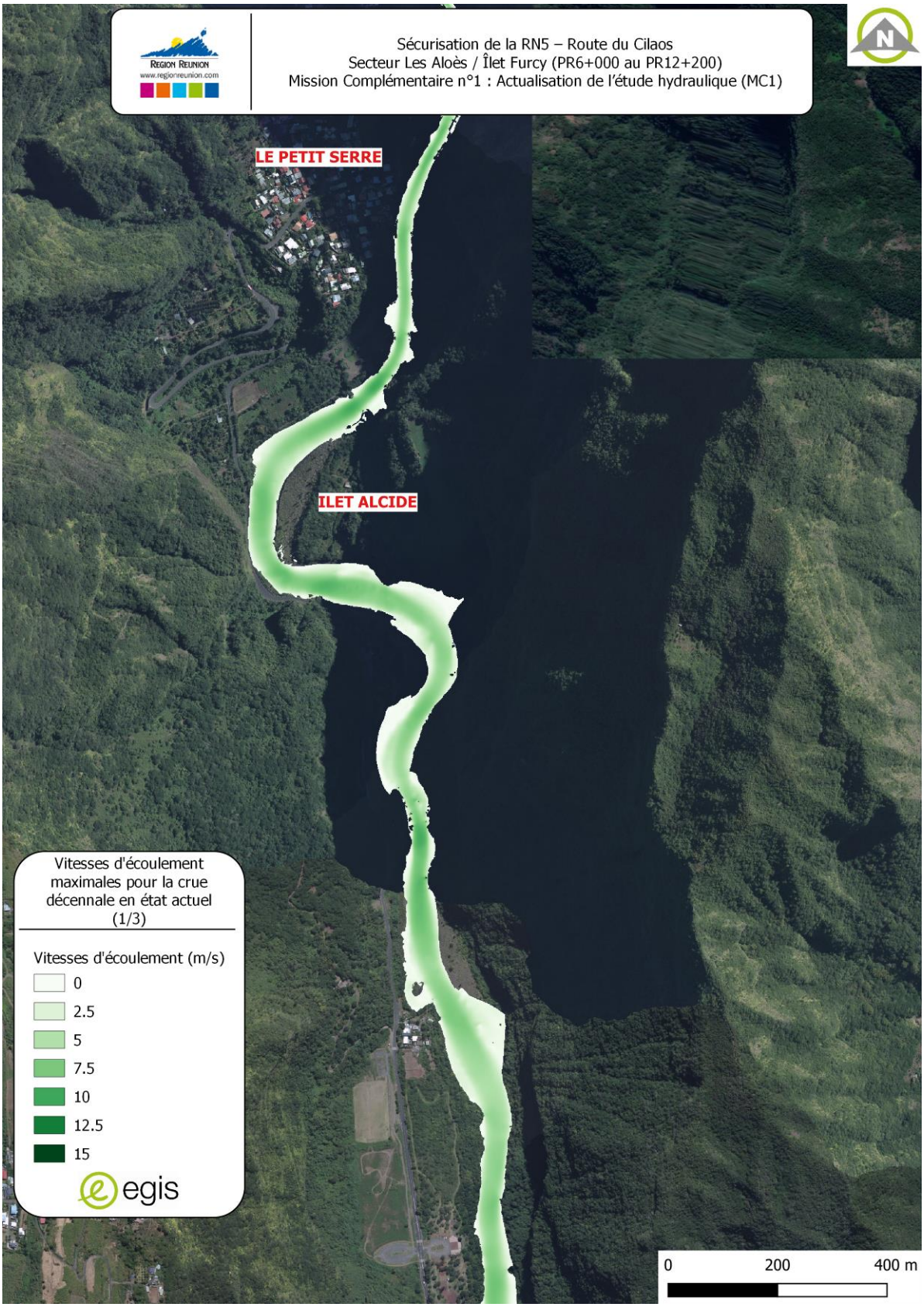


Figure 56 : Cartographie des vitesses d'écoulement maximales pour la crue décennale en état actuel (1/3)

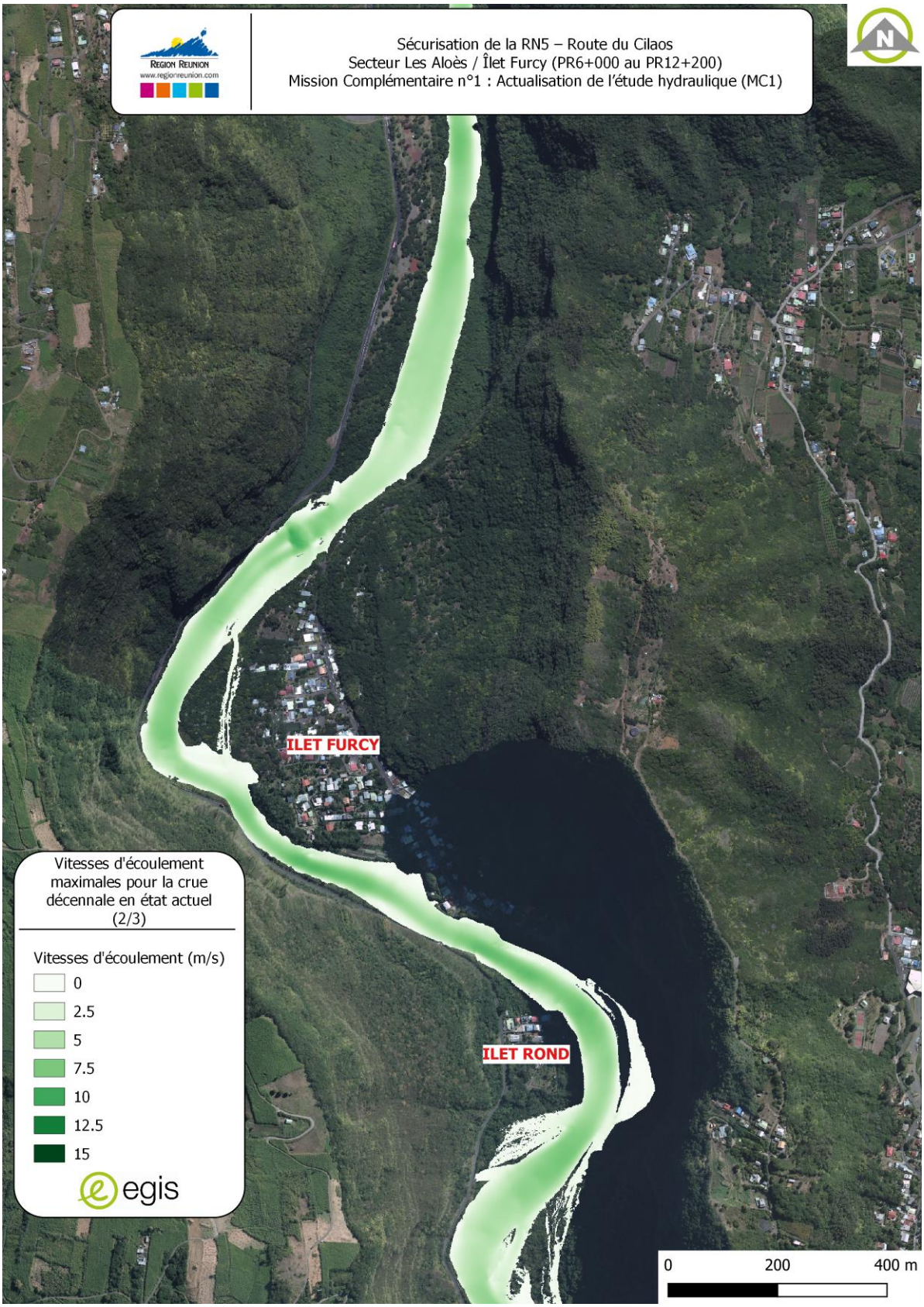


Figure 57 : Cartographie des vitesses d'écoulement maximales pour la crue décennale en état actuel (2/3)

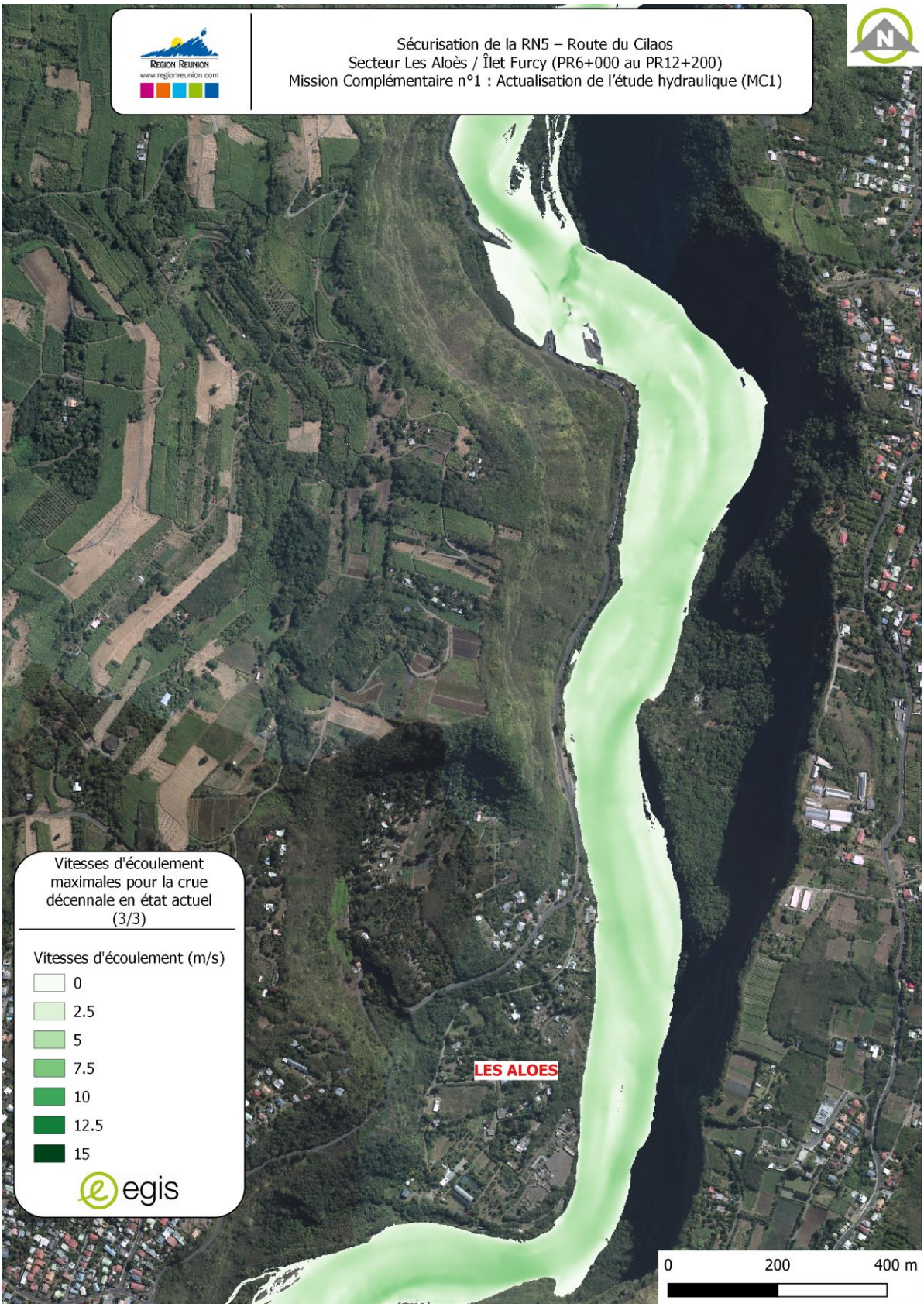


Figure 58 : Cartographie des vitesses d'écoulement maximales pour la crue décennale en état actuel (3/3)

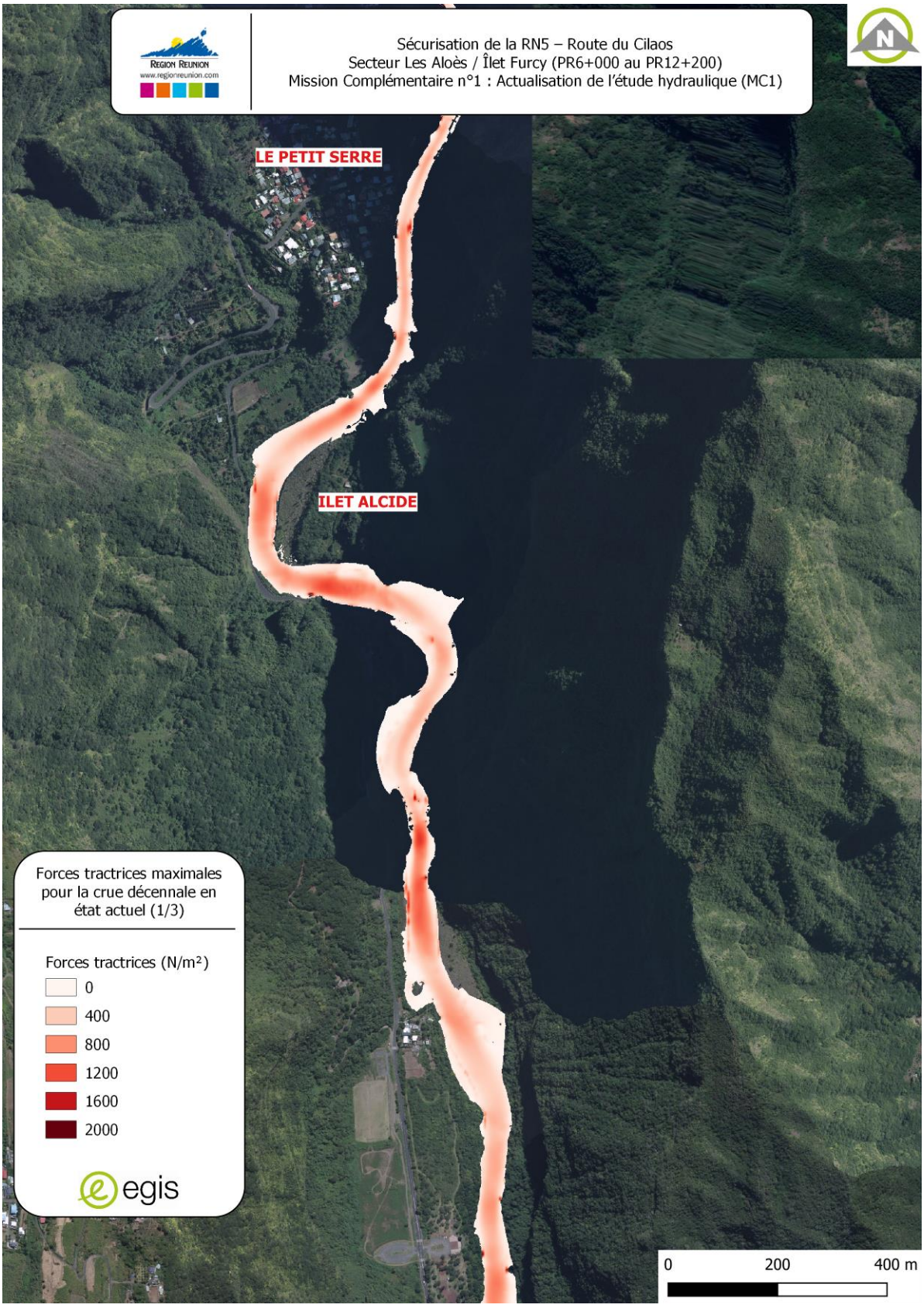


Figure 59 : Cartographie des forces tractrices maximales pour la crue décennale en état actuel (1/3)

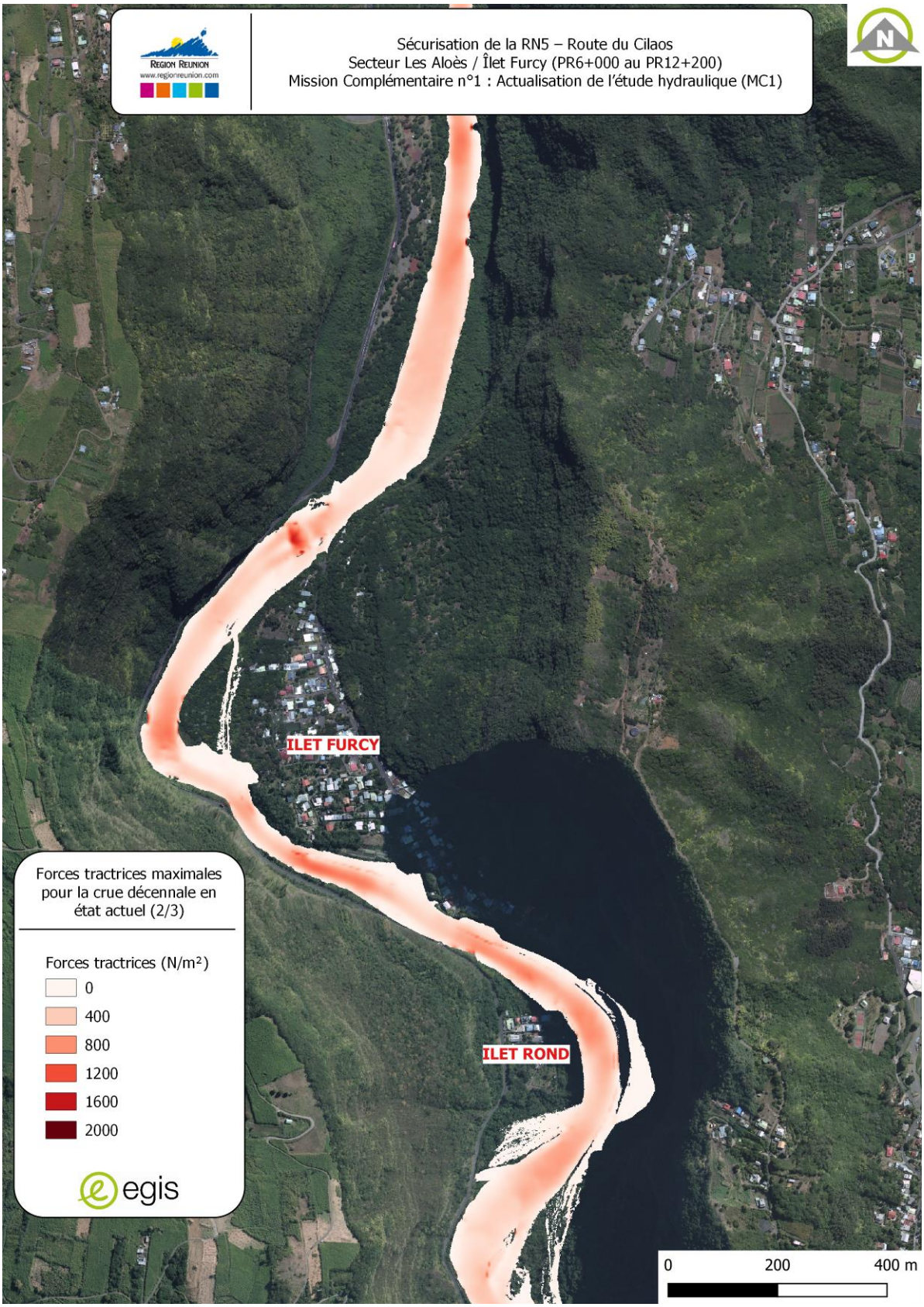


Figure 60 : Cartographie des forces tractrices maximales pour la crue décennale en état actuel (2/3)

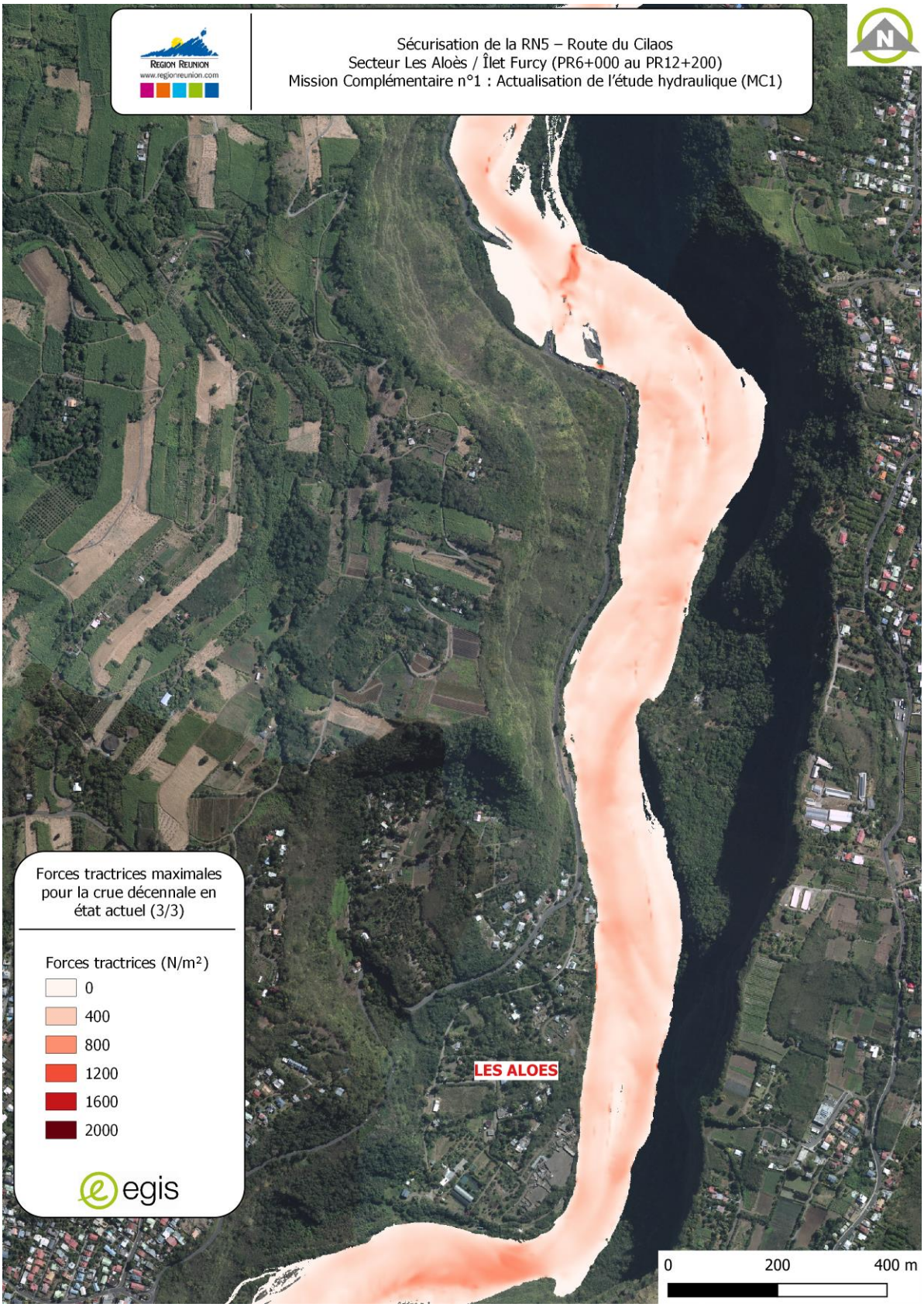


Figure 61 : Cartographie des forces tractrices maximales pour la crue décennale en état actuel (3/3)

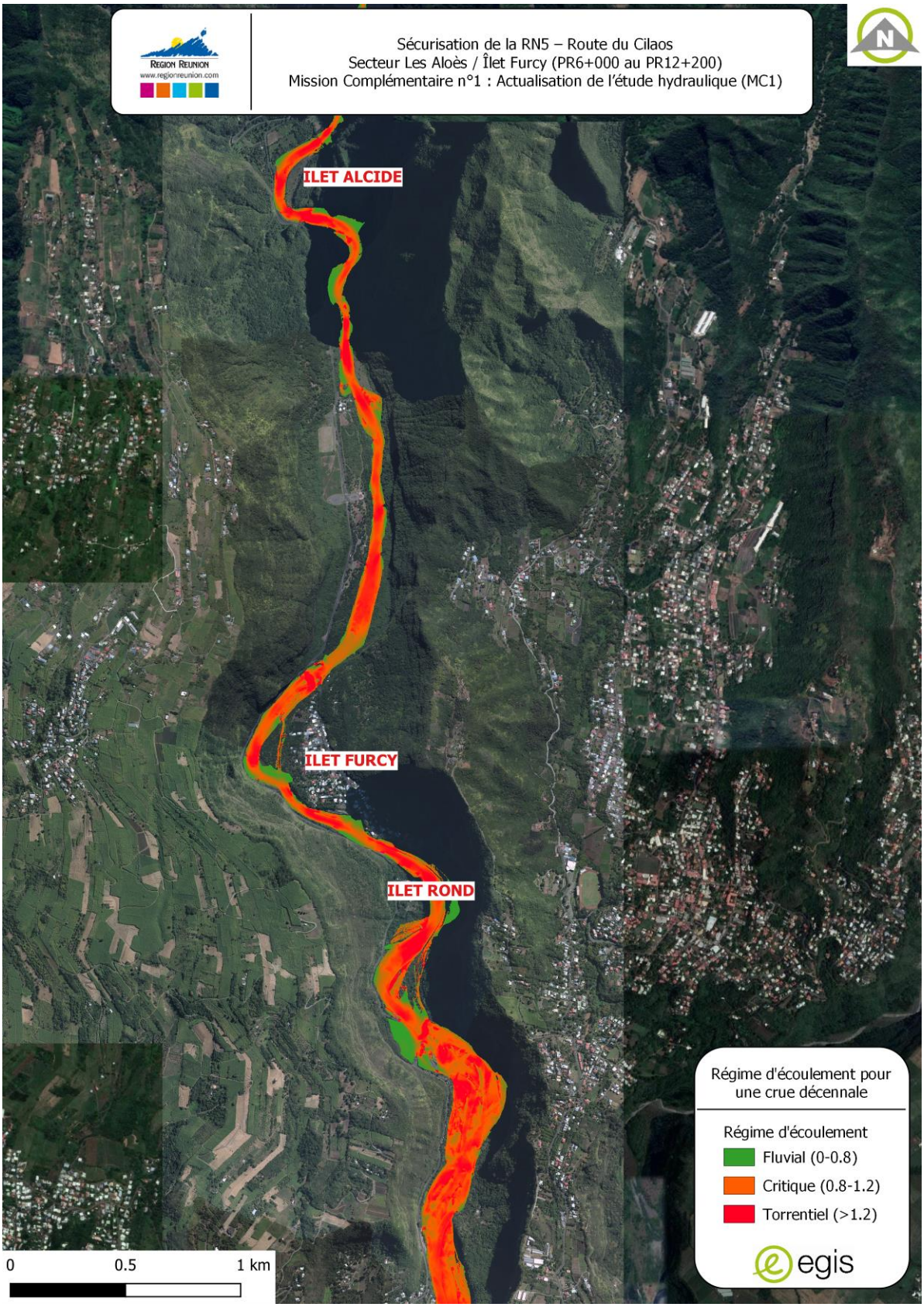


Figure 62 : Cartographie du régime d'écoulement pour la crue décennale en état actuel

8.4.2 Crue trentennale

Les caractéristiques des écoulements au niveau des ouvrages de franchissement envisagés sont présentées dans le tableau suivant :

Lieu	Elévation de la surface d'eau (m NGR)	Vitesses d'écoulement maximales (m/s)	Forces tractrices au niveau de la rive gauche (N/m^2)	Forces tractrices au niveau du lit mineur (N/m^2)	Forces tractrices au niveau de la rive droite (N/m^2)
Passage OF1a	162.5	6.5	200	600	400
Passage OF1b	168	6	350	550	400
Passage OF1c	184	7	500	850	550
Passage OF2	194.5	9.5	550	900	750
Passage OF3	204.5	10	750	1000	600
Passage OF4	228.5	10	550	1200	600

Tableau 26 : Caractéristiques des conditions d'écoulement au niveau des ouvrages de franchissement envisagés pour la crue trentennale

Le profil en long de la ligne d'eau et de la ligne de charge pour la crue trentennale du Bras de Cilaos sur la zone d'étude en état actuel est disponible ci – dessous.

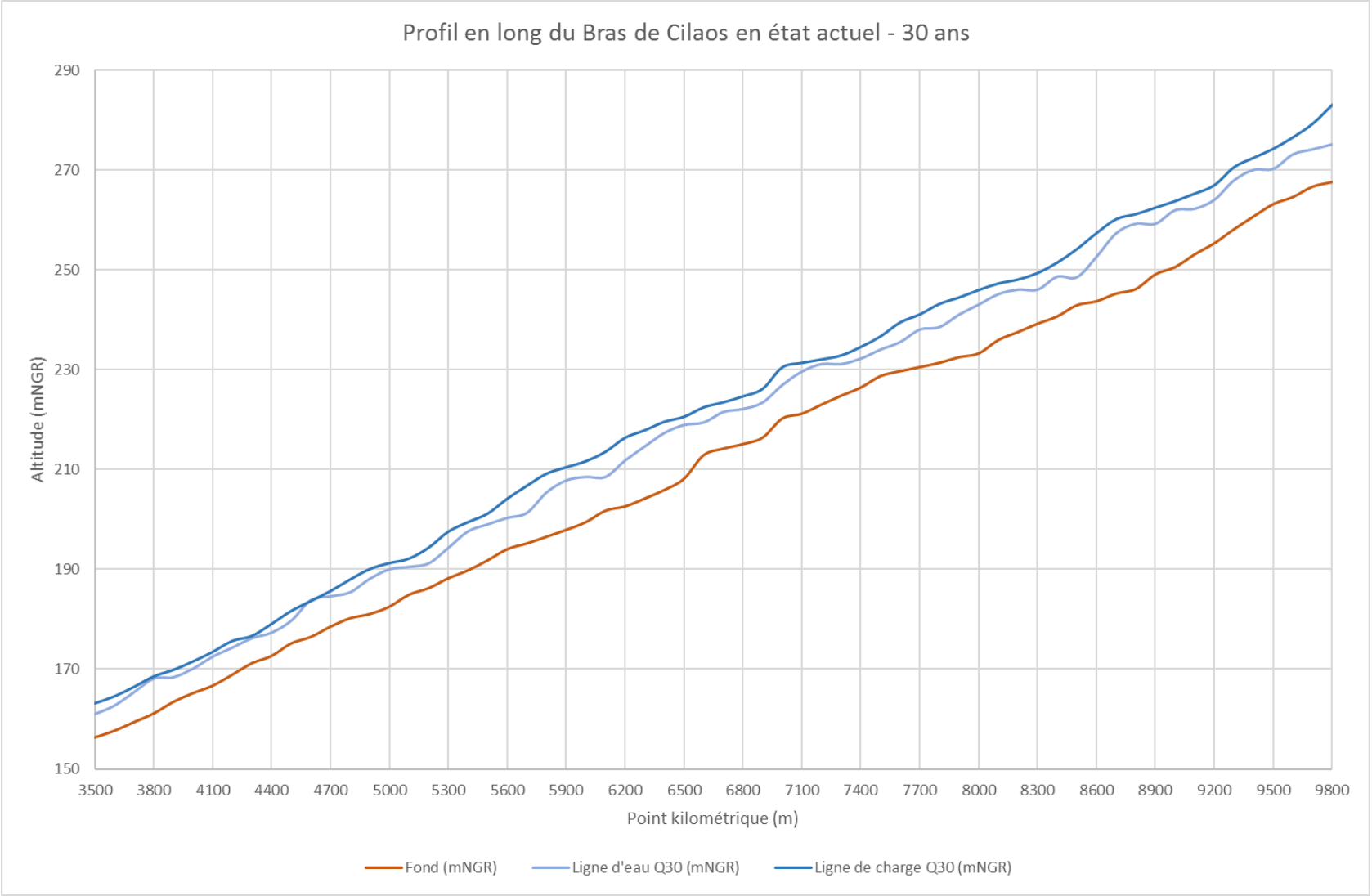


Figure 63 : Profil en long du Bras de Cilaos en état actuel - 30 ans

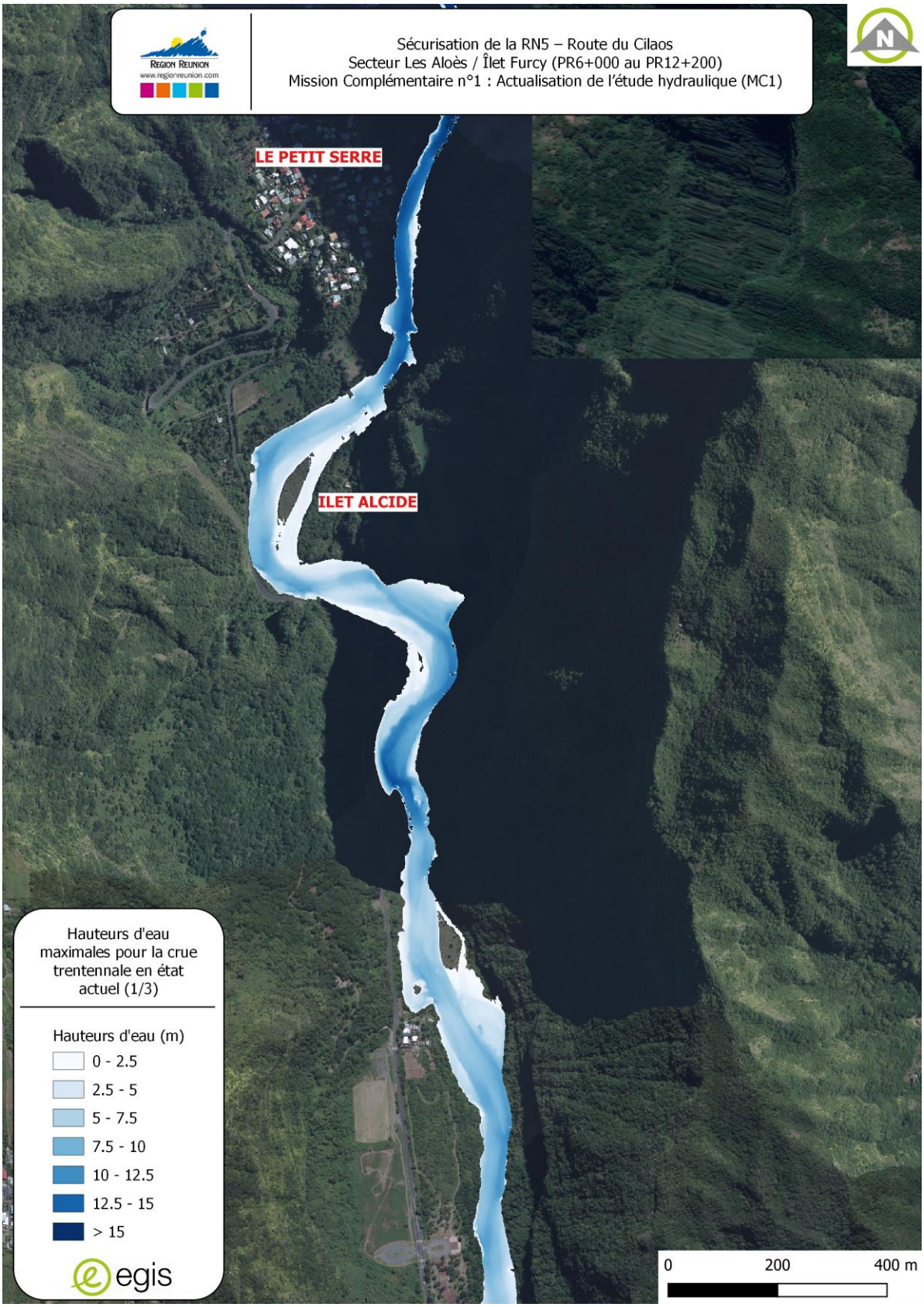


Figure 64 : Cartographie des hauteurs d'eau maximales pour la crue trentennale en état actuel (1/3)

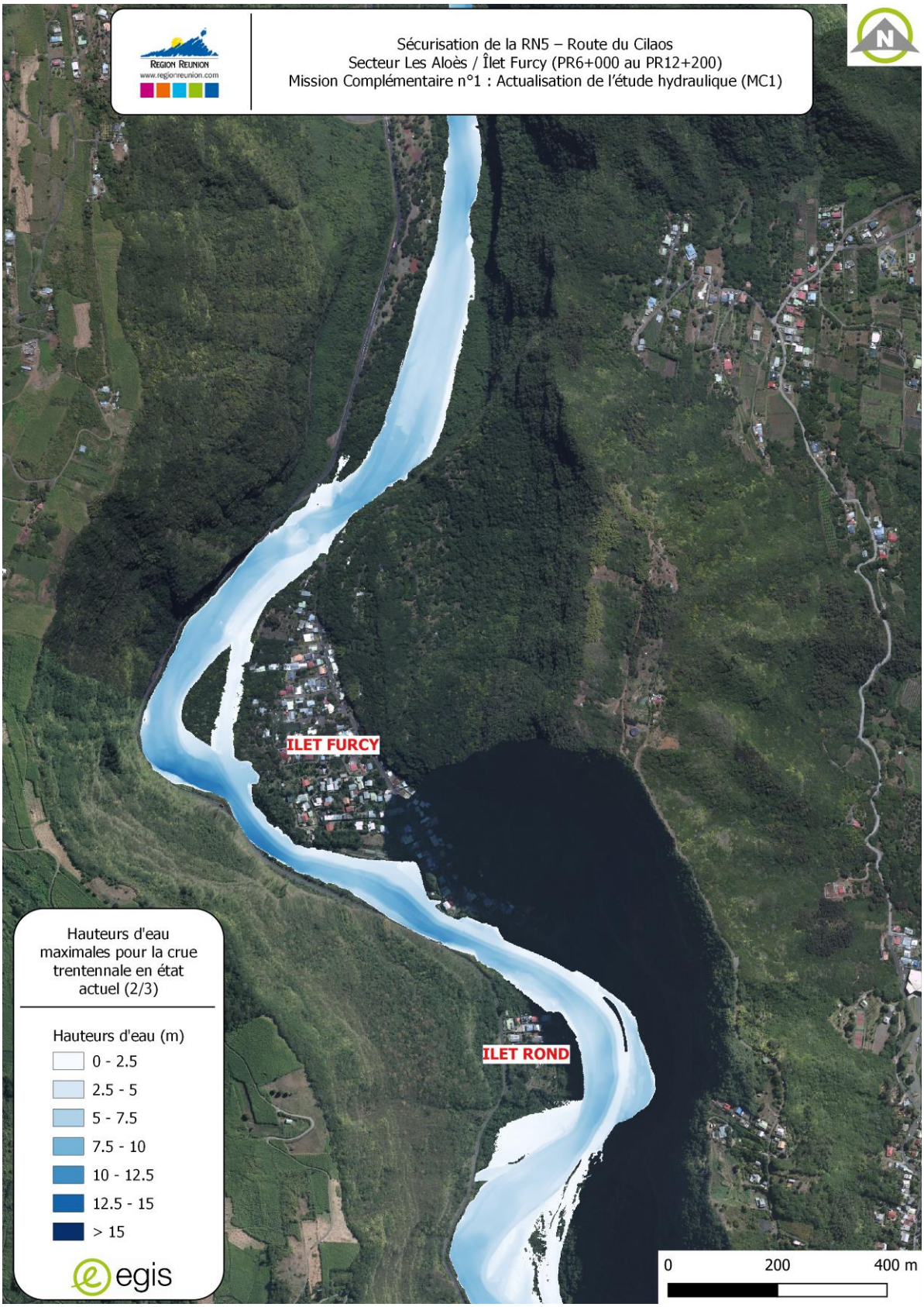


Figure 65 : Cartographie des hauteurs d'eau maximales pour la crue trentennale en état actuel (2/3)

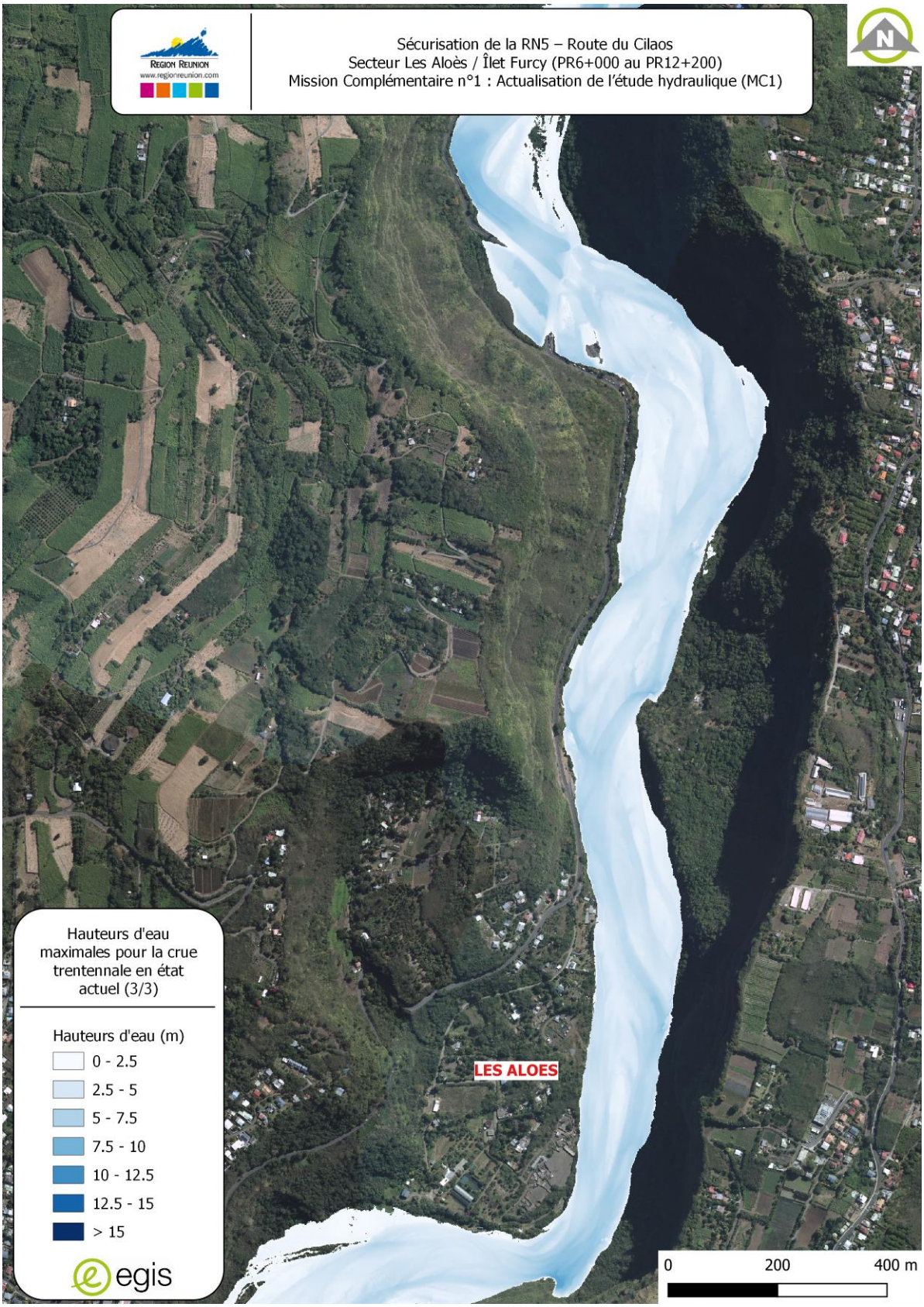


Figure 66 : Cartographie des hauteurs d'eau maximales pour la crue trentennale en état actuel (3/3)

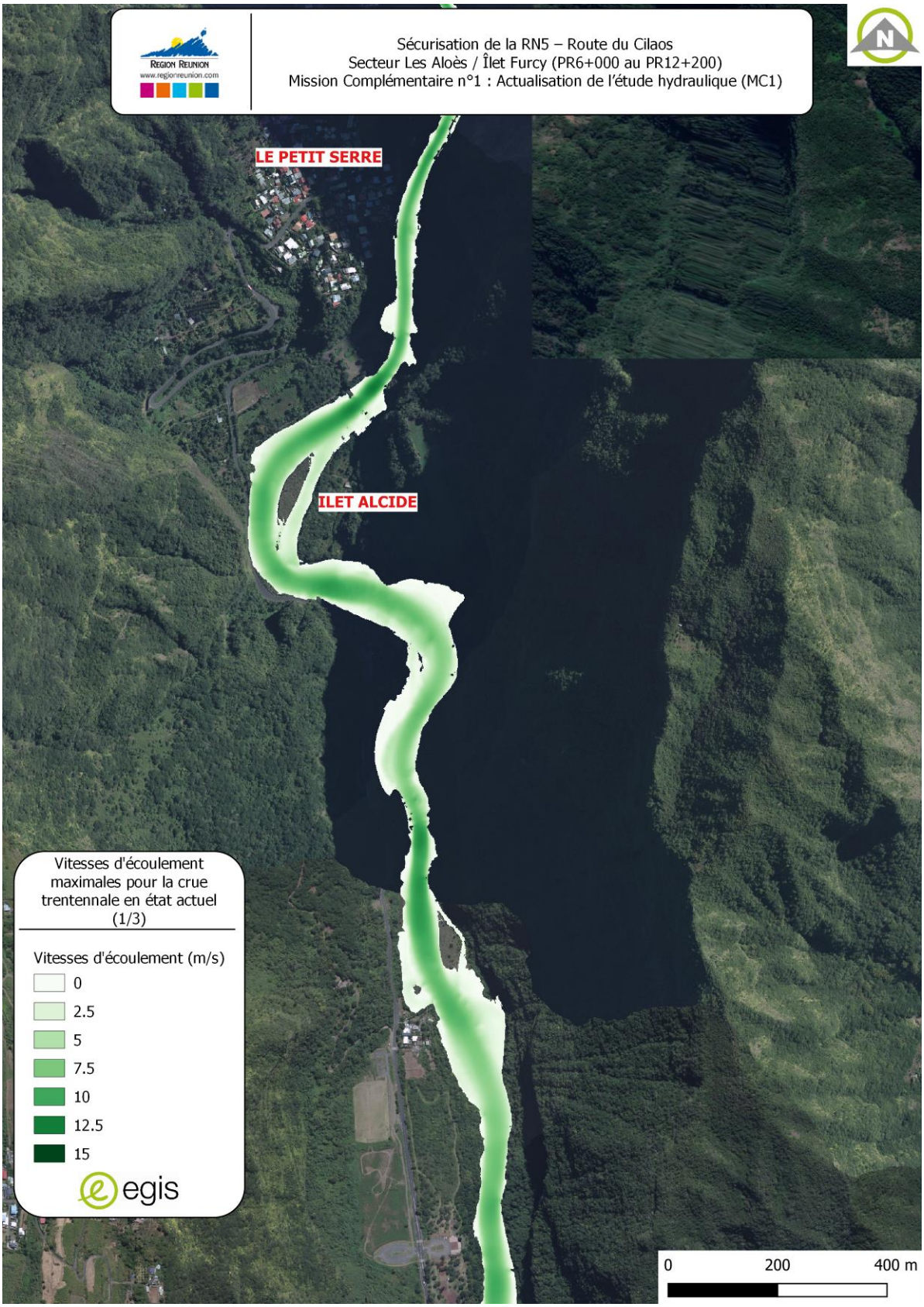


Figure 67 : Cartographie des vitesses d'écoulement maximales pour la crue trentennale en état actuel (1/3)

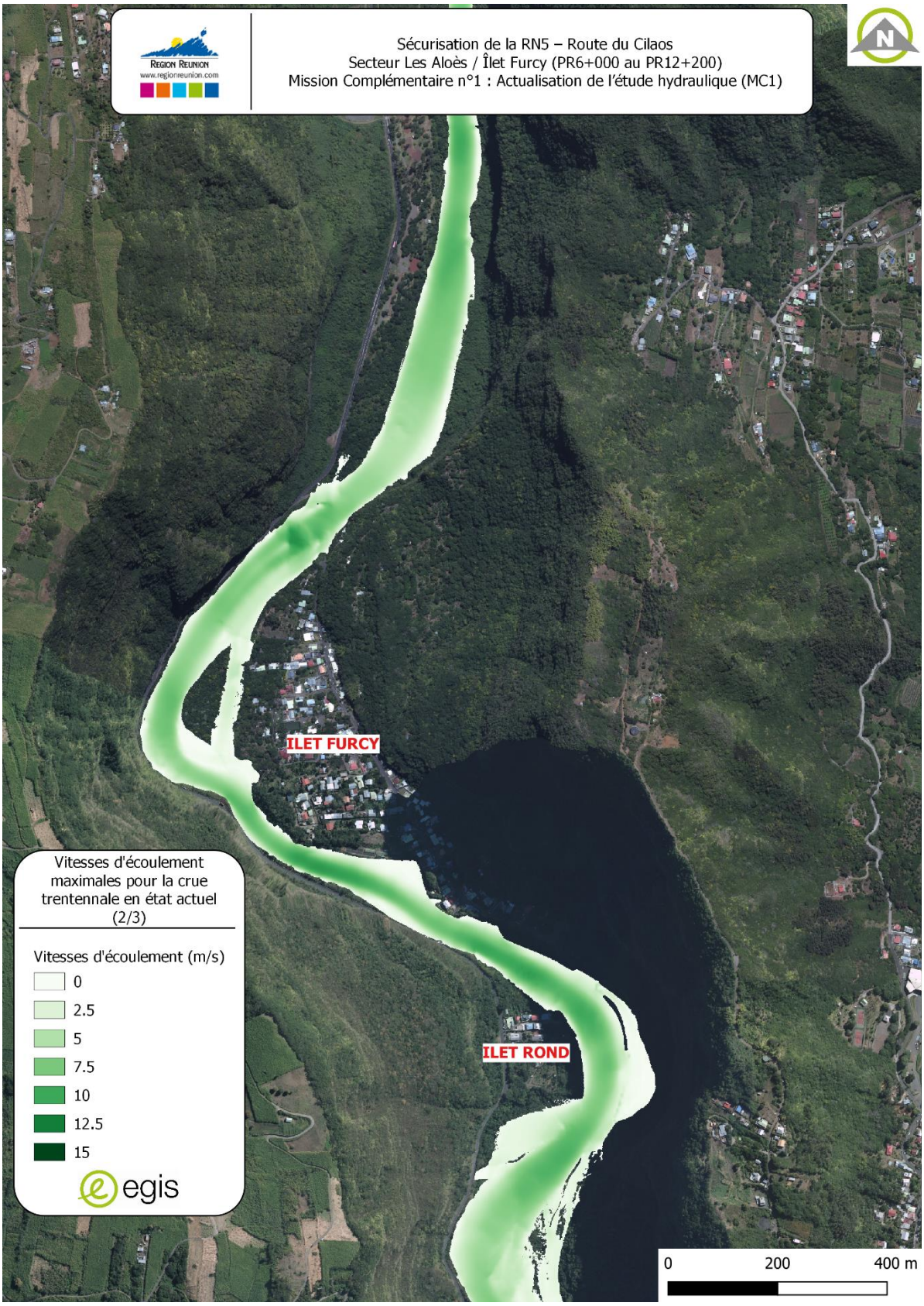


Figure 68 : Cartographie des vitesses d'écoulement maximales pour la crue trentennale en état actuel (2/3)

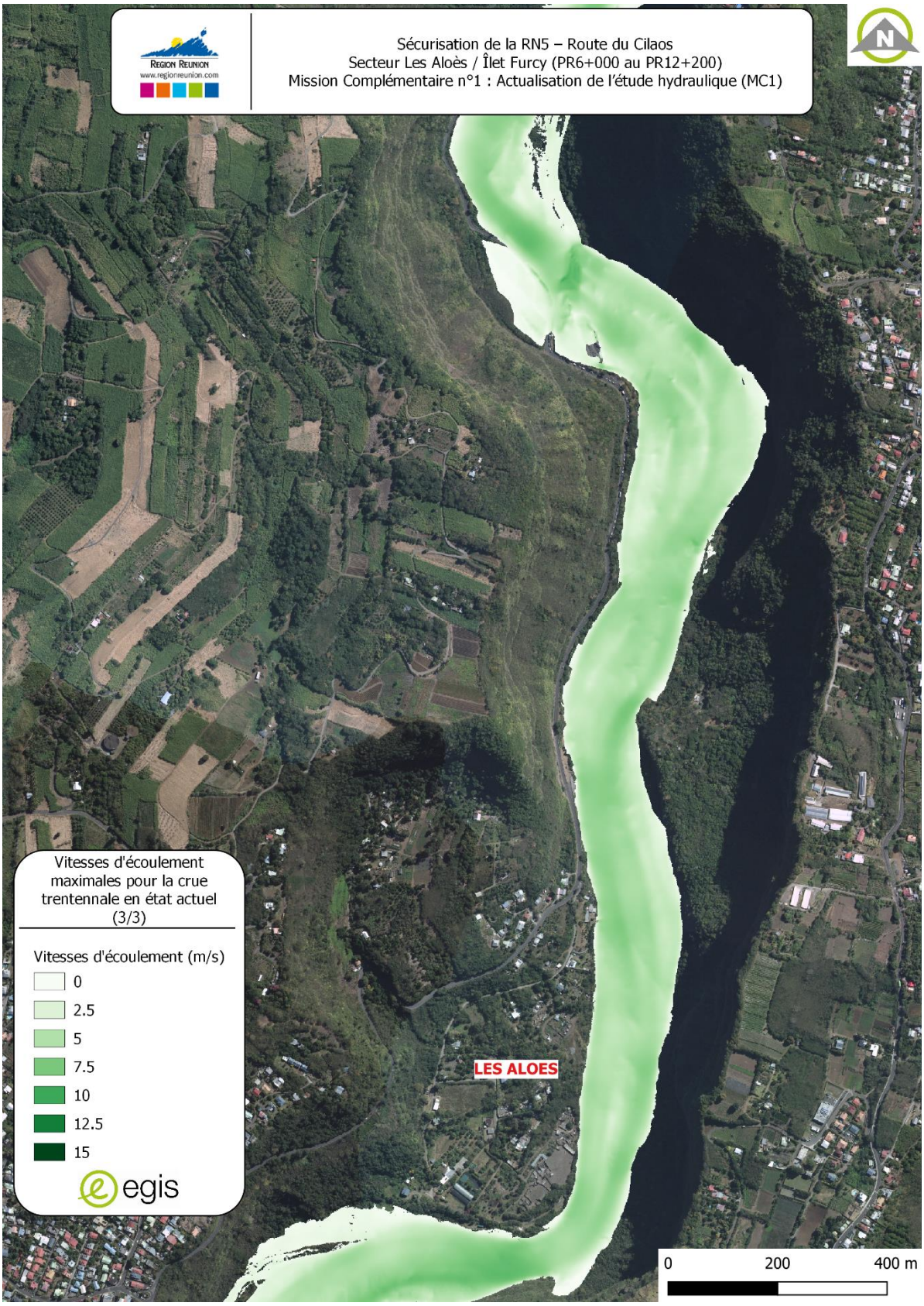


Figure 69 : Cartographie des vitesses d'écoulement maximales pour la crue trentennale en état actuel (3/3)

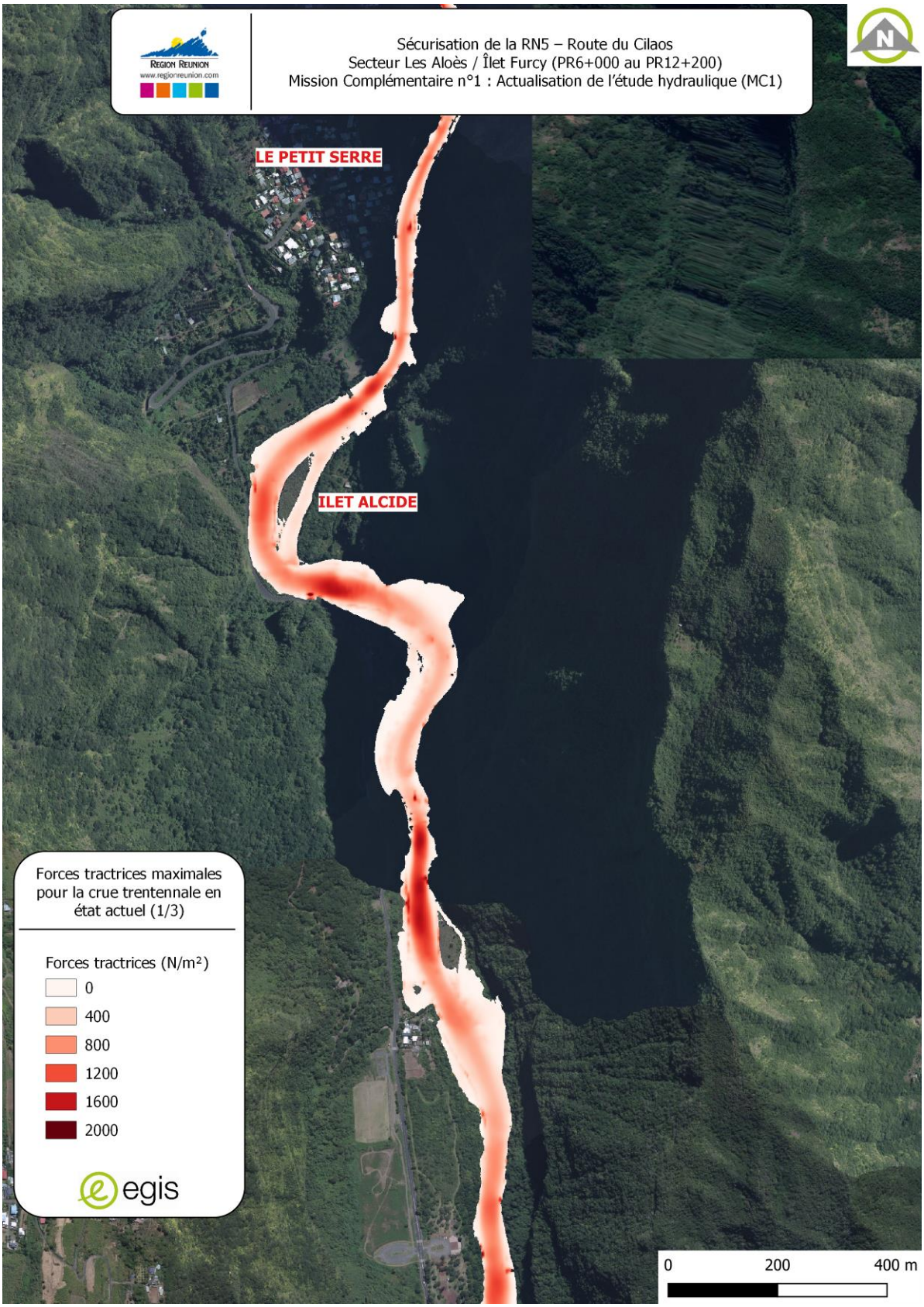


Figure 70 : Cartographie des forces tractrices maximales pour la crue trentennale en état actuel (1/3)

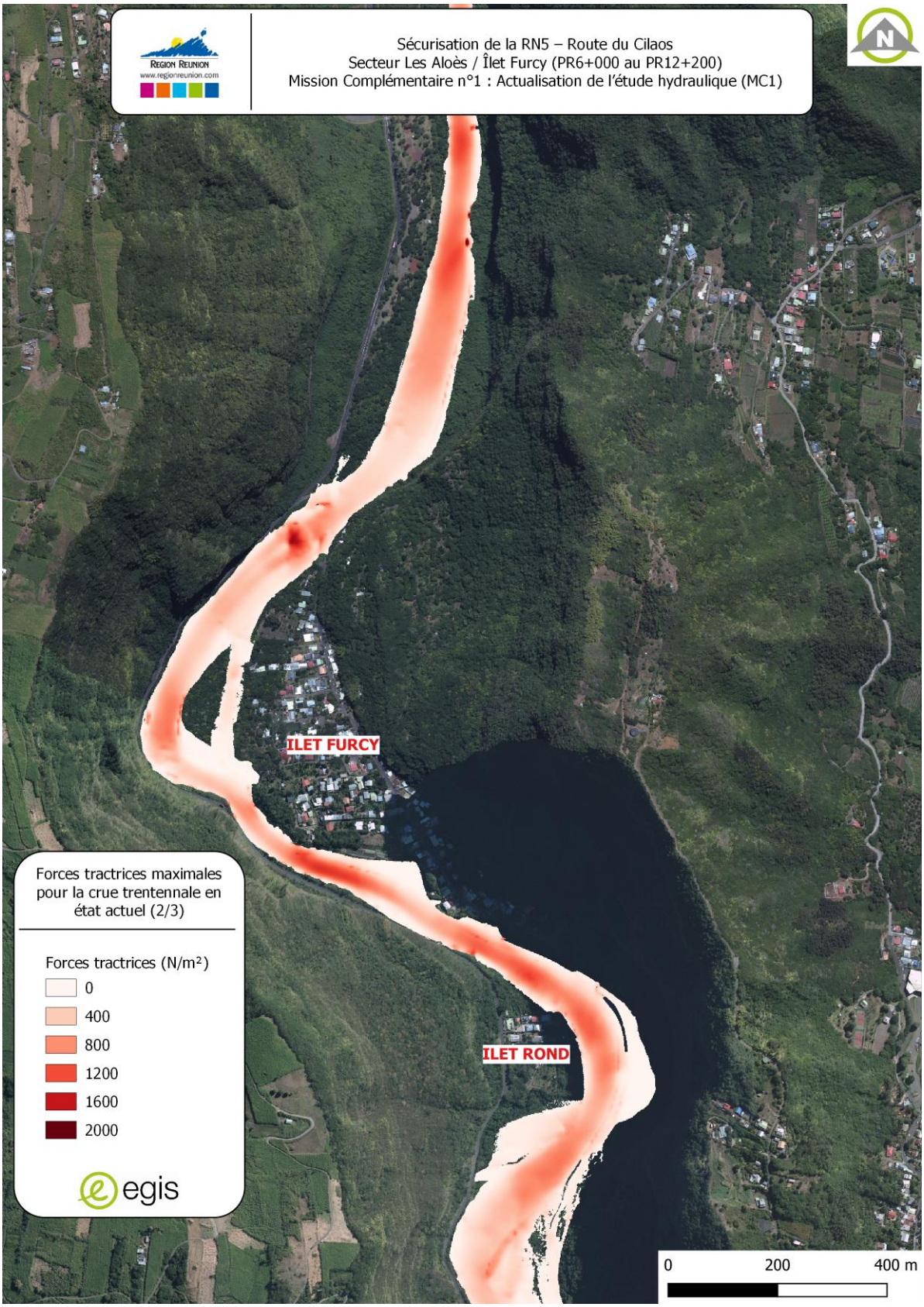


Figure 71 : Cartographie des forces tractrices maximales pour la crue trentennale en état actuel (2/3)

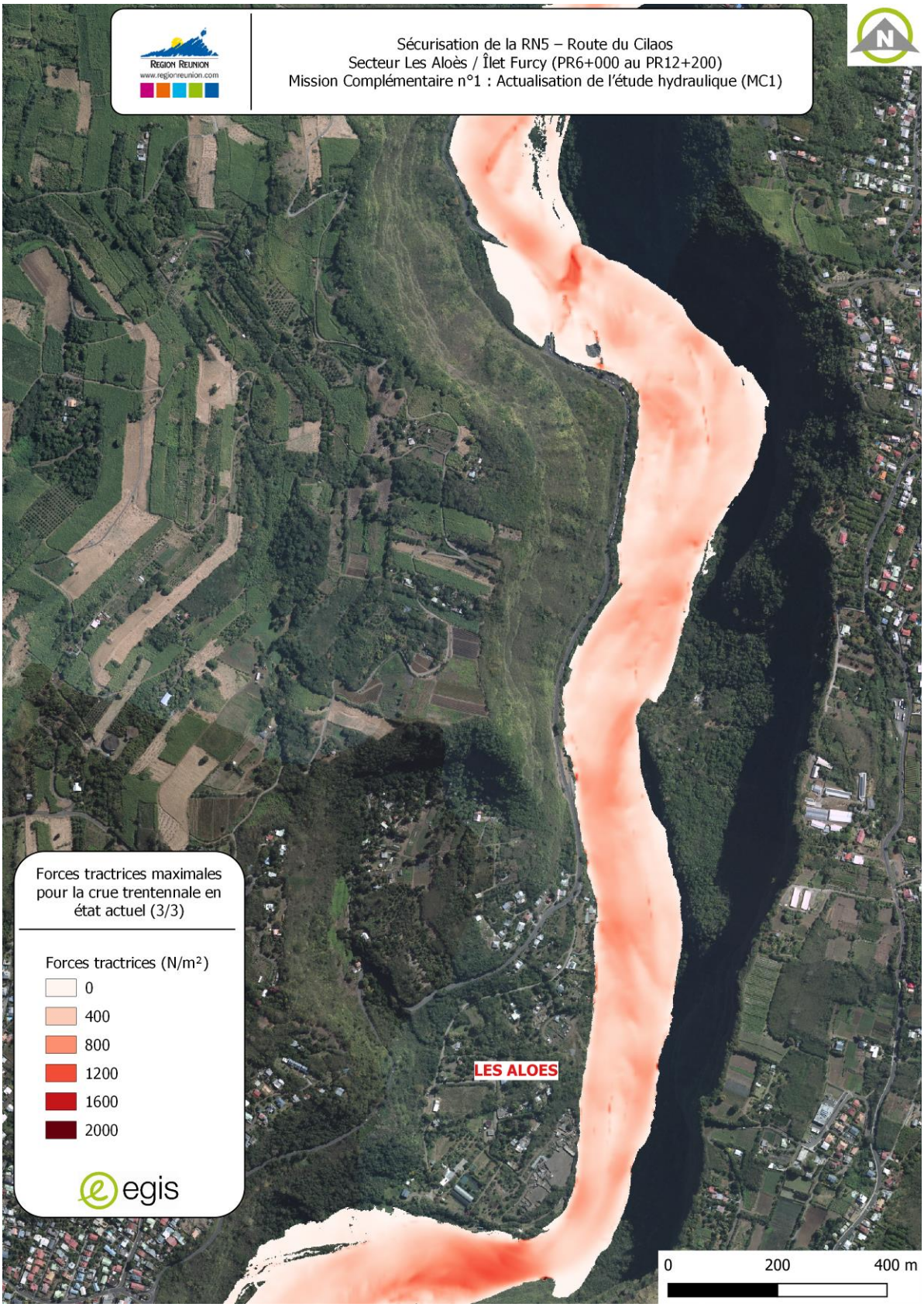


Figure 72 : Cartographie des forces tractrices maximales pour la crue trentennale en état actuel (3/3)

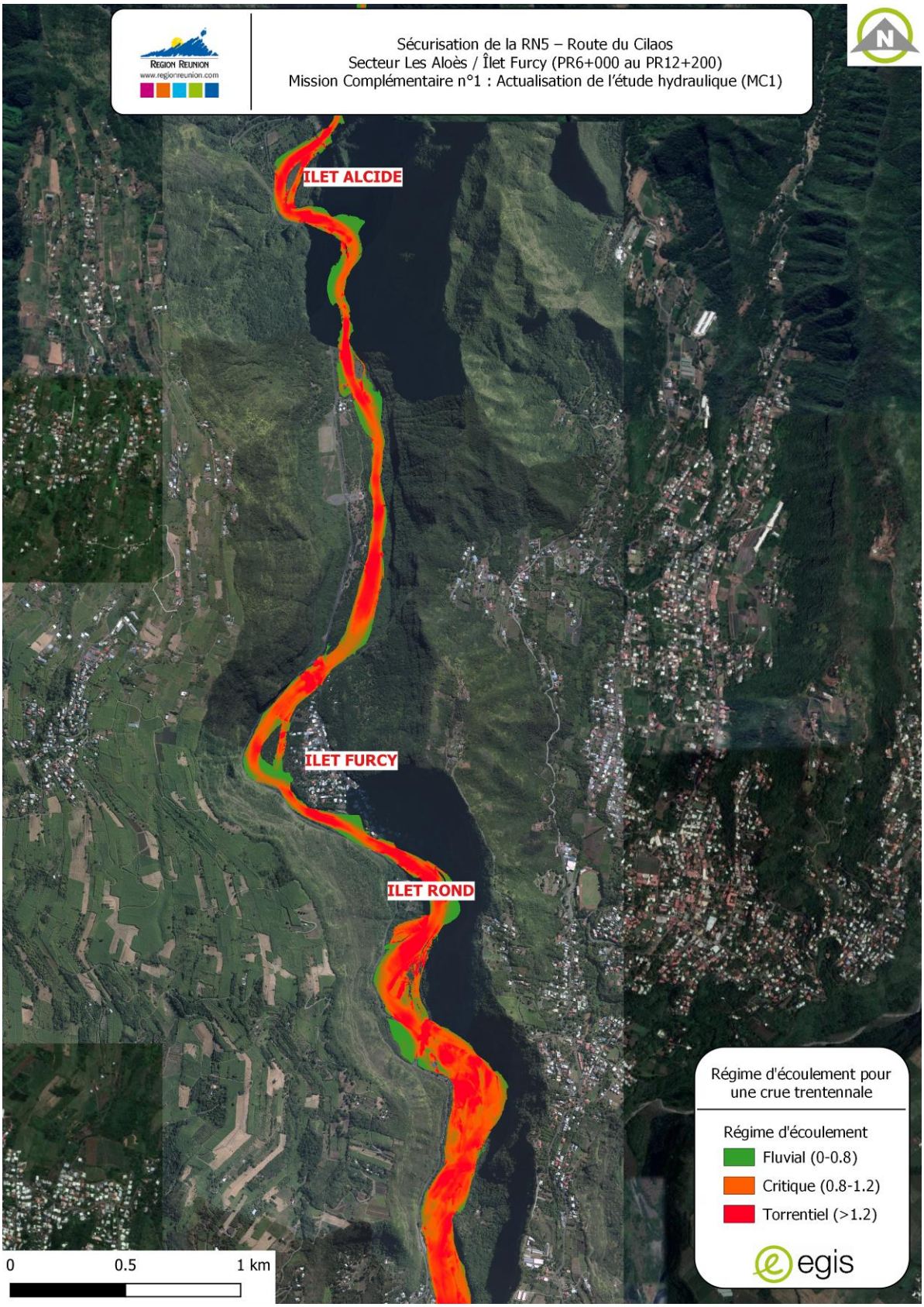


Figure 73 : Cartographie du régime d'écoulement pour la crue trentennale en état actuel

8.4.3 Crue centennale

Les caractéristiques des écoulements au niveau des ouvrages de franchissement envisagés sont présentées dans le tableau suivant :

Lieu	Elévation de la surface d'eau (m NGR)	Vitesses d'écoulement maximales (m/s)	Forces tractrices au niveau de la rive gauche (N/m^2)	Forces tractrices au niveau du lit mineur (N/m^2)	Forces tractrices au niveau de la rive droite (N/m^2)
Passage OF1a	163	7	250	750	450
Passage OF1b	169	6.5	350	650	400
Passage OF1c	185	9	700	1200	700
Passage OF2	195.5	10	700	1050	900
Passage OF3	206.5	11	1000	1200	800
Passage OF4	230	11.5	700	1600	700

Tableau 27 : Caractéristiques des conditions d'écoulement au niveau des ouvrages de franchissement envisagés pour la crue centennale

Le profil en long de la ligne d'eau et de la ligne de charge pour la crue centennale du Bras de Cilaos sur la zone d'étude en état actuel est disponible ci – dessous.

Les lignes d'eau et de charge pour la crue centennale de l'étude de 2009 établie par SOGREAH sont reportées sur ce profil en long.

Les lignes d'eau et de charge calculées dans la présente étude sont proches de l'étude de 2009. Les principales différences observées proviennent de la topographie des fonds utilisée entre les deux modélisations.

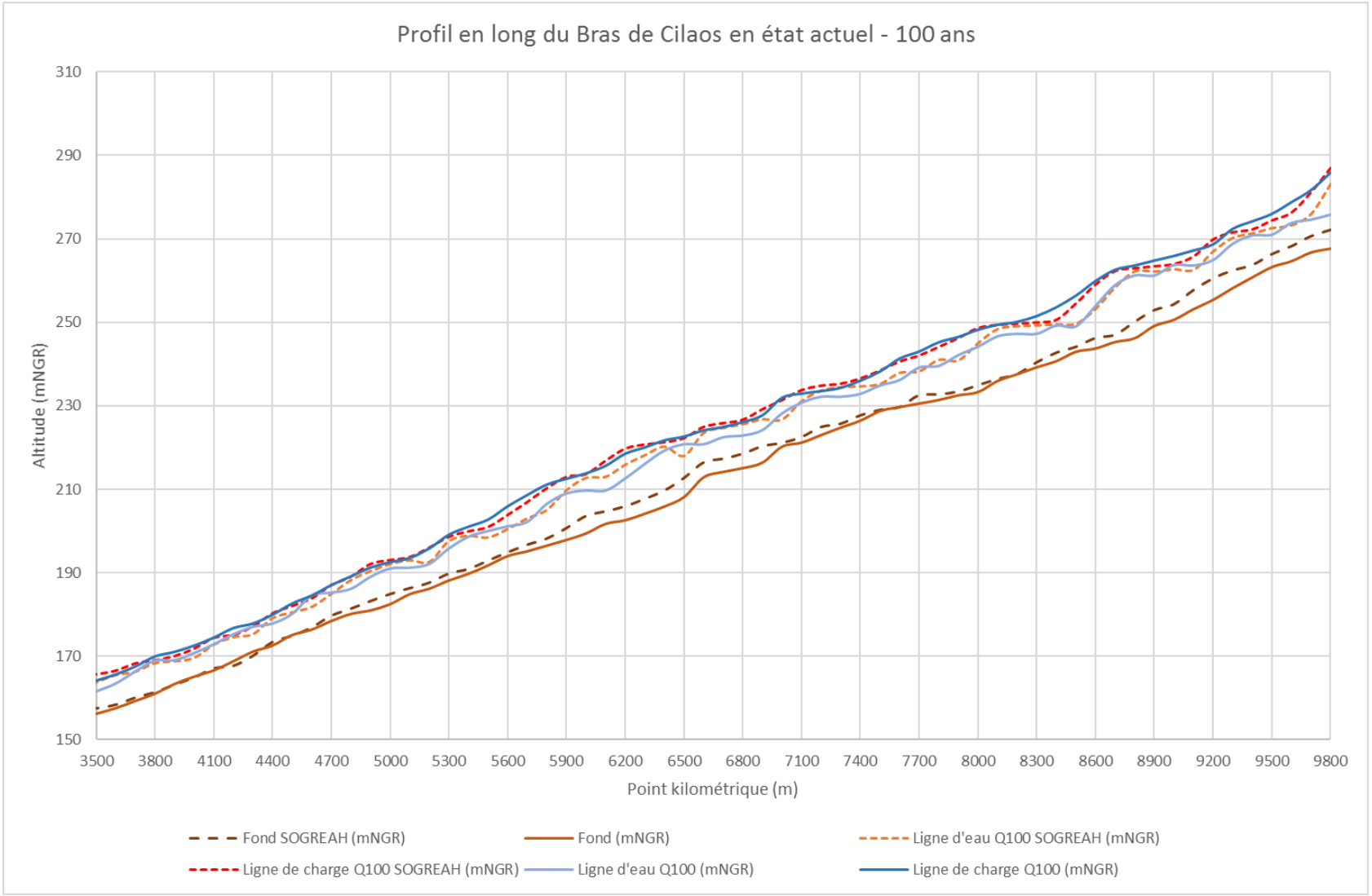


Figure 74 : Profil en long du Bras de Cilaos en état actuel - 100 ans

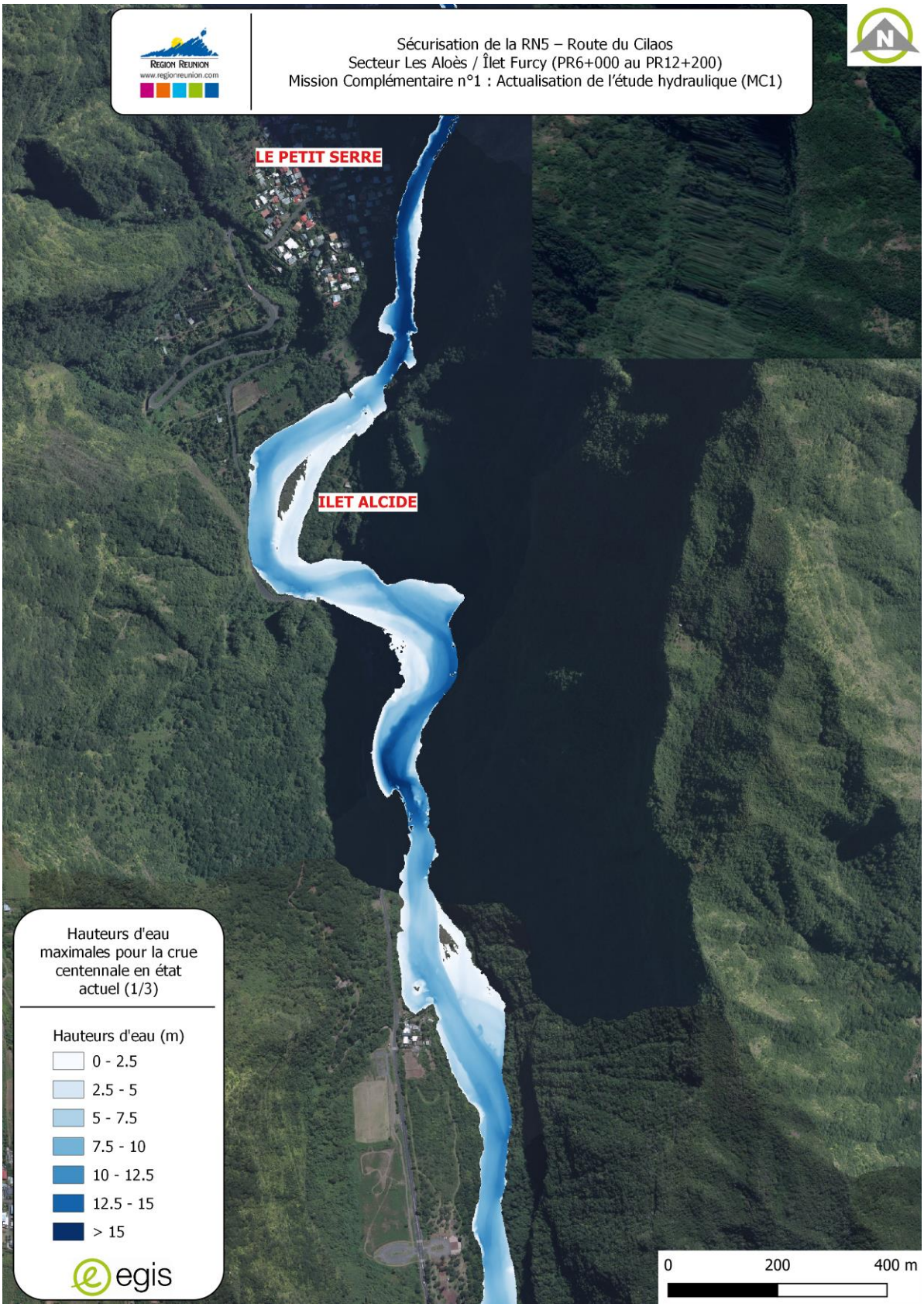


Figure 75 : Cartographie des hauteurs d'eau maximales pour la crue centennale en état actuel (1/3)

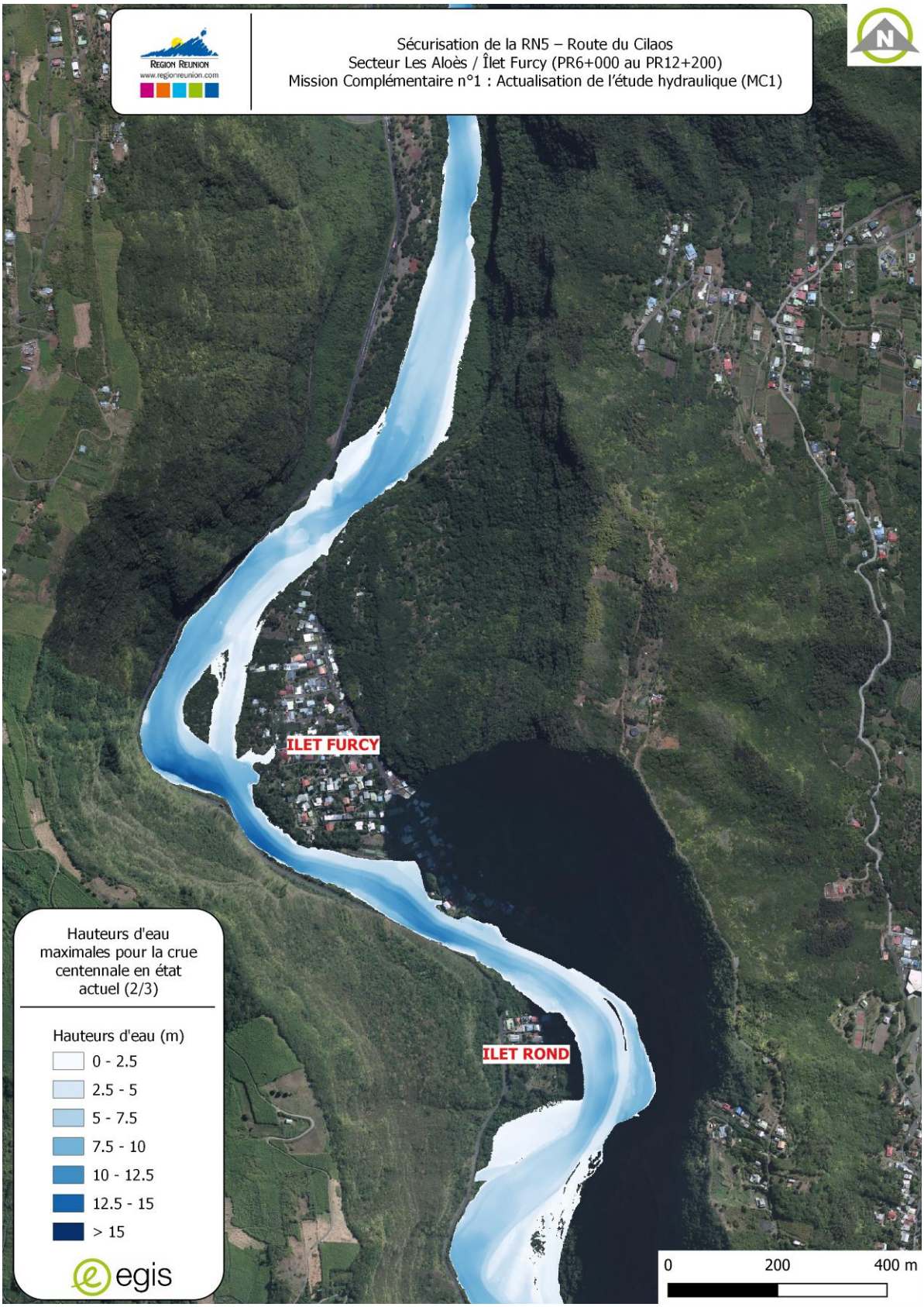


Figure 76 : Cartographie des hauteurs d'eau maximales pour la crue centennale en état actuel (2/3)

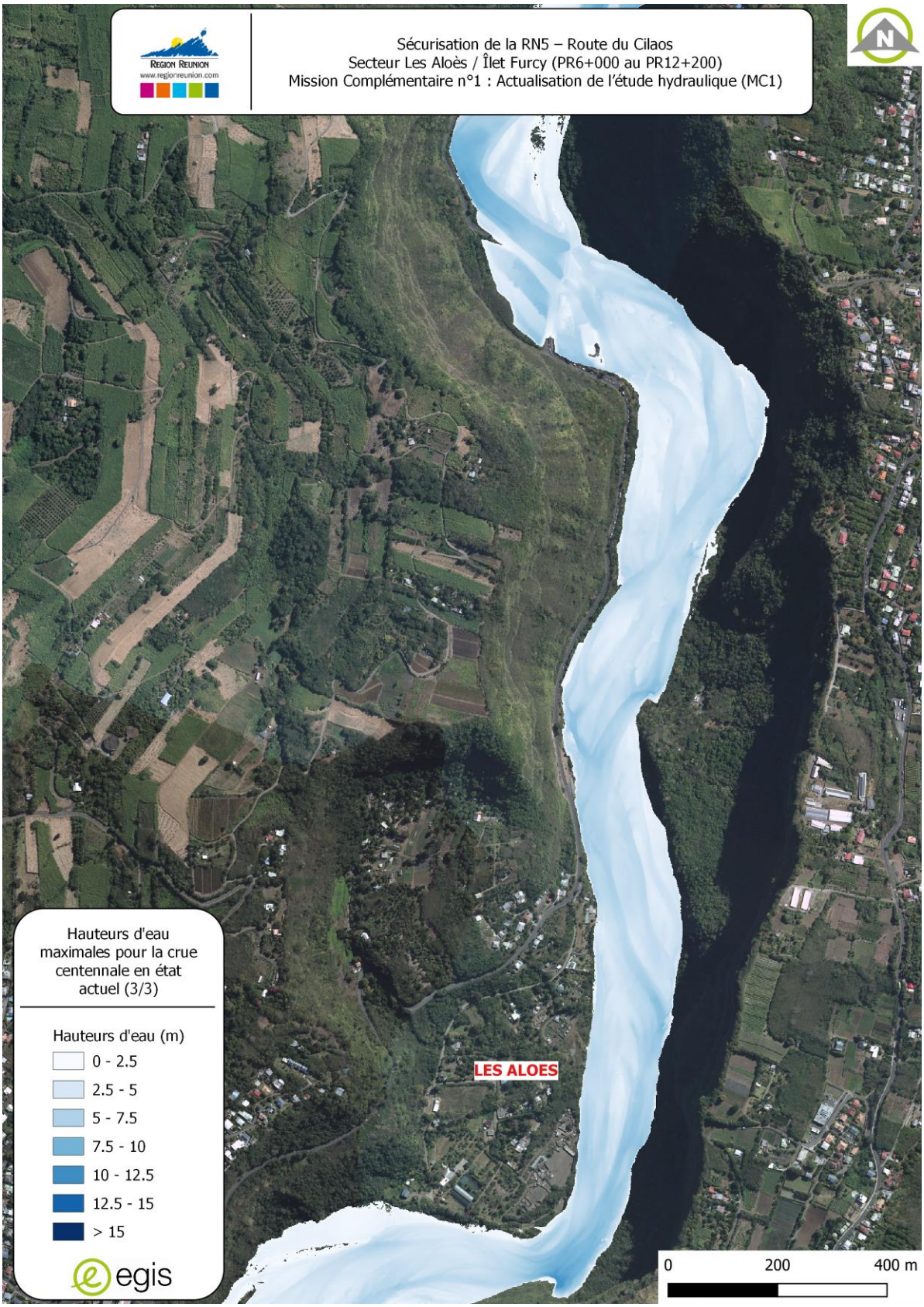


Figure 77 : Cartographie des hauteurs d'eau maximales pour la crue centennale en état actuel (3/3)

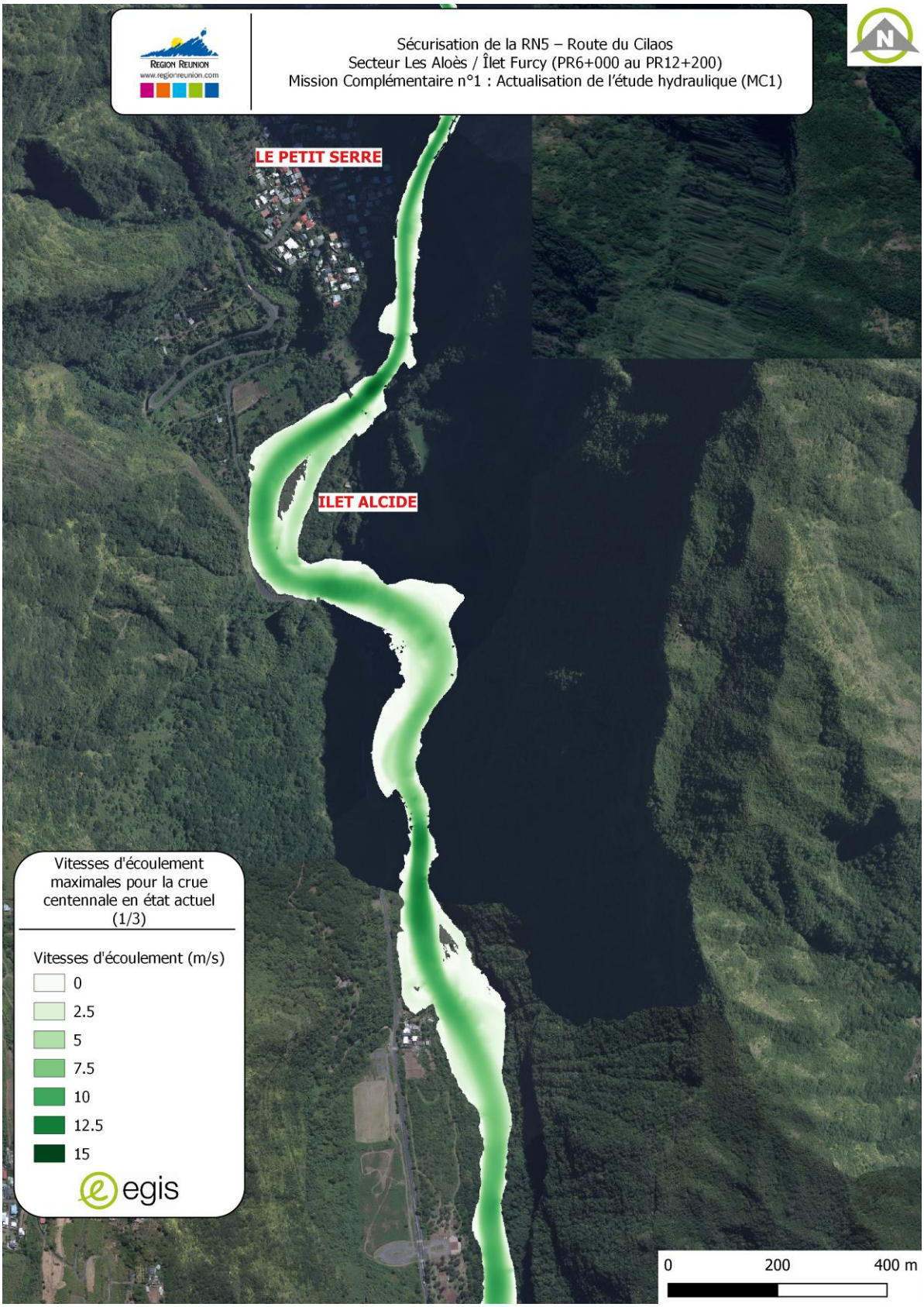


Figure 78 : Cartographie des vitesses d'écoulement maximales pour la crue centennale en état actuel (1/3)

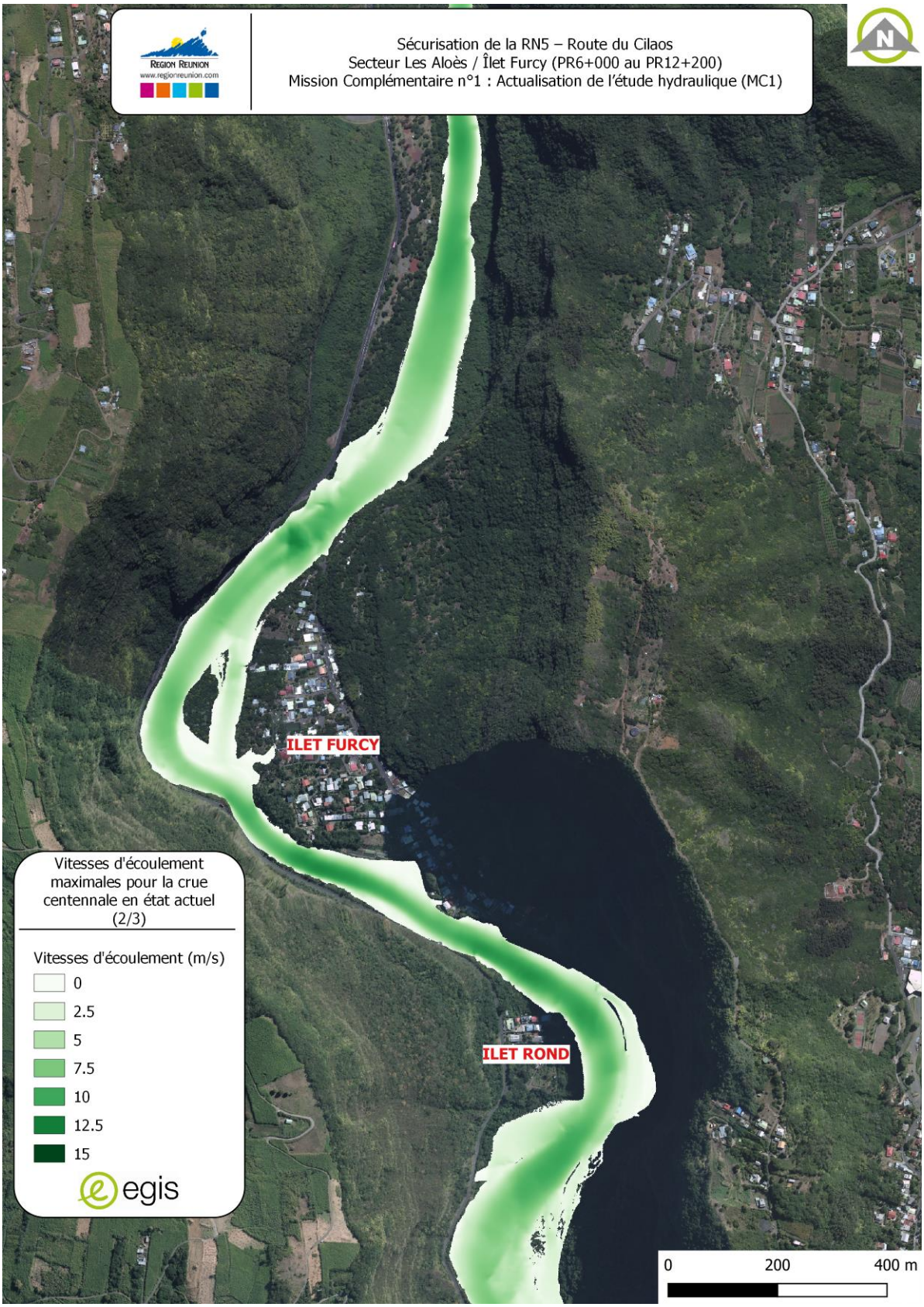


Figure 79 : Cartographie des vitesses d'écoulement maximales pour la crue centennale en état actuel (2/3)

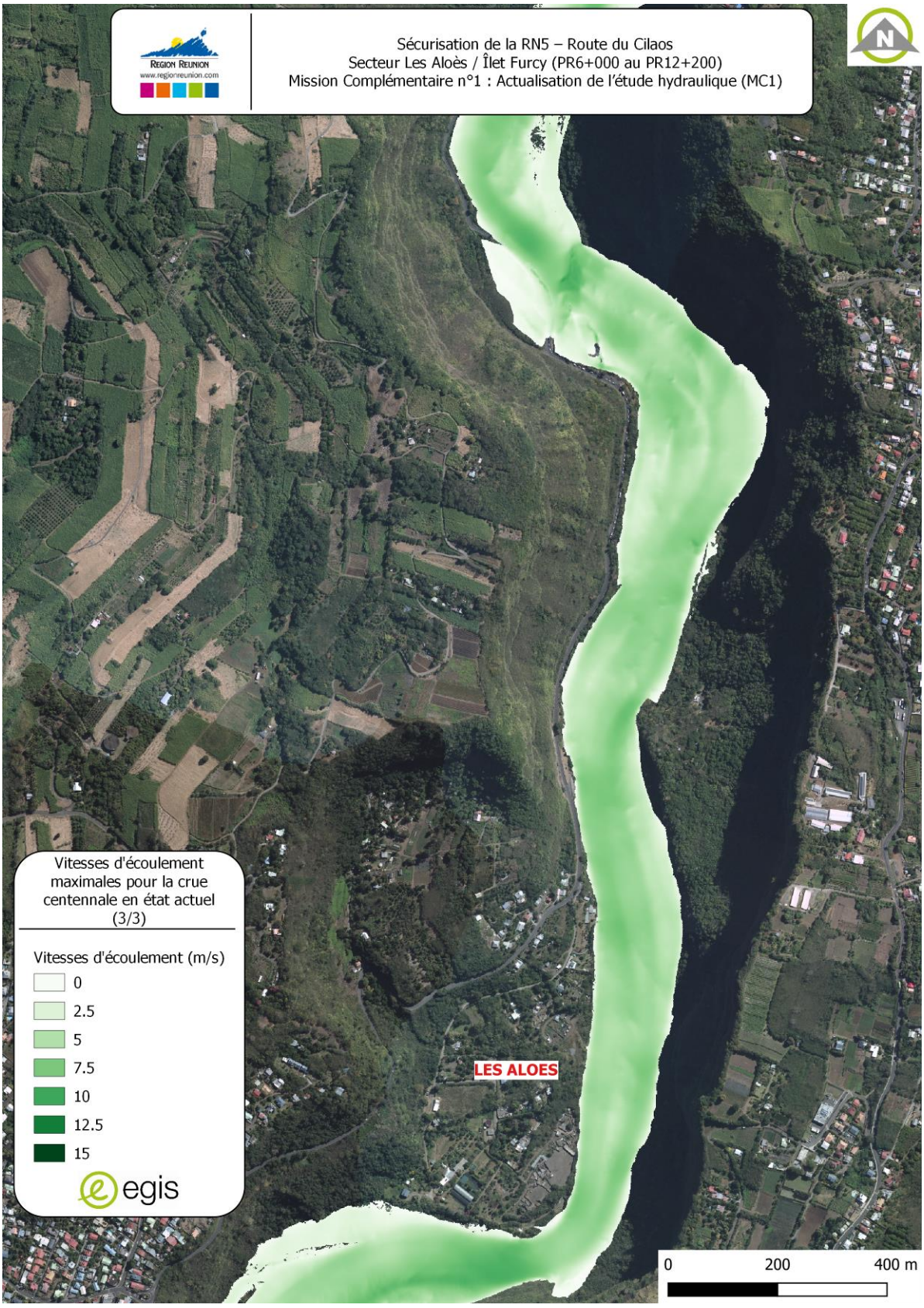


Figure 80 : Cartographie des vitesses d'écoulement maximales pour la crue centennale en état actuel (3/3)

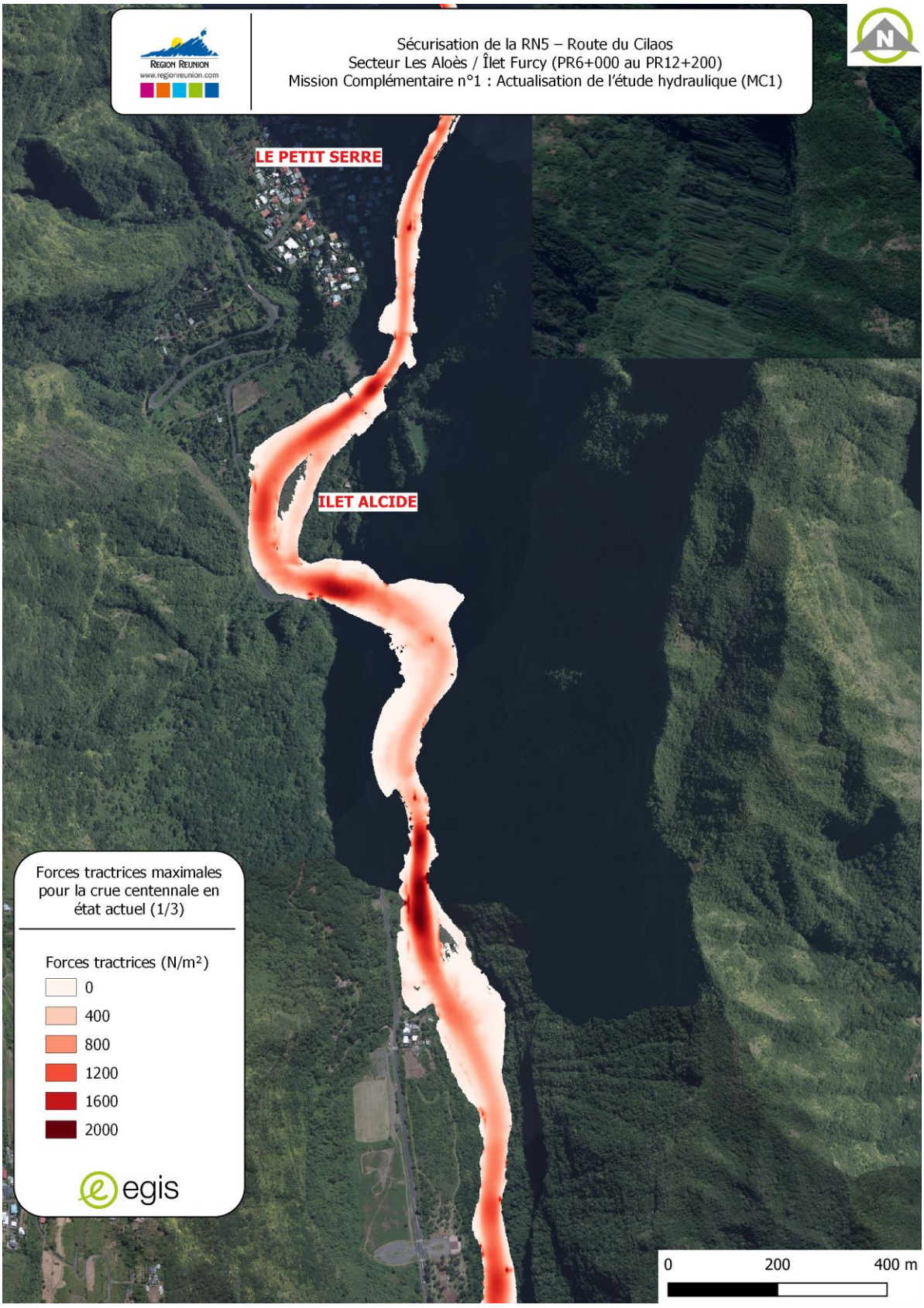


Figure 81 : Cartographie des forces tractrices maximales pour la crue centennale en état actuel (1/3)

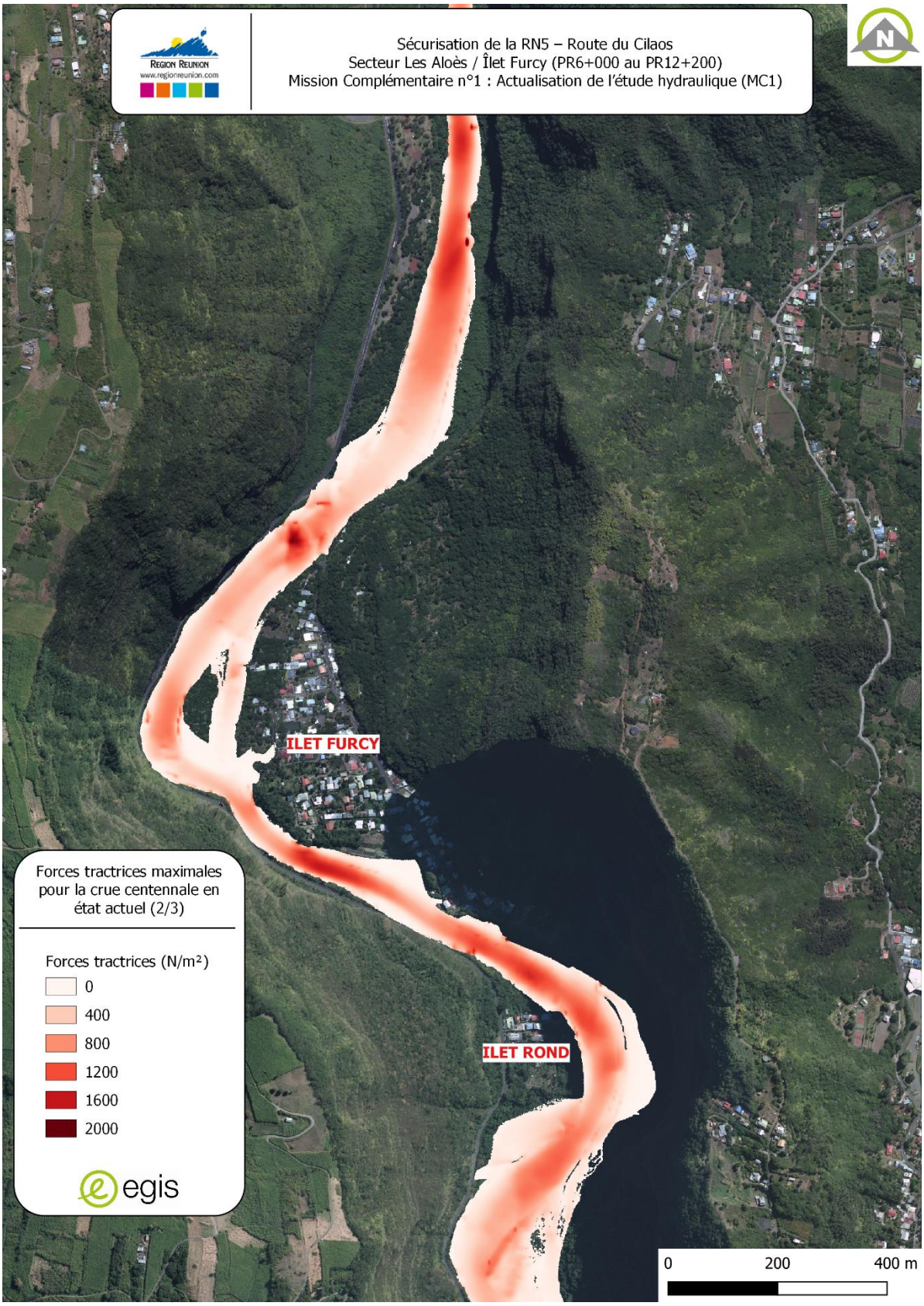


Figure 82 : Cartographie des forces tractrices maximales pour la crue centennale en état actuel (2/3)

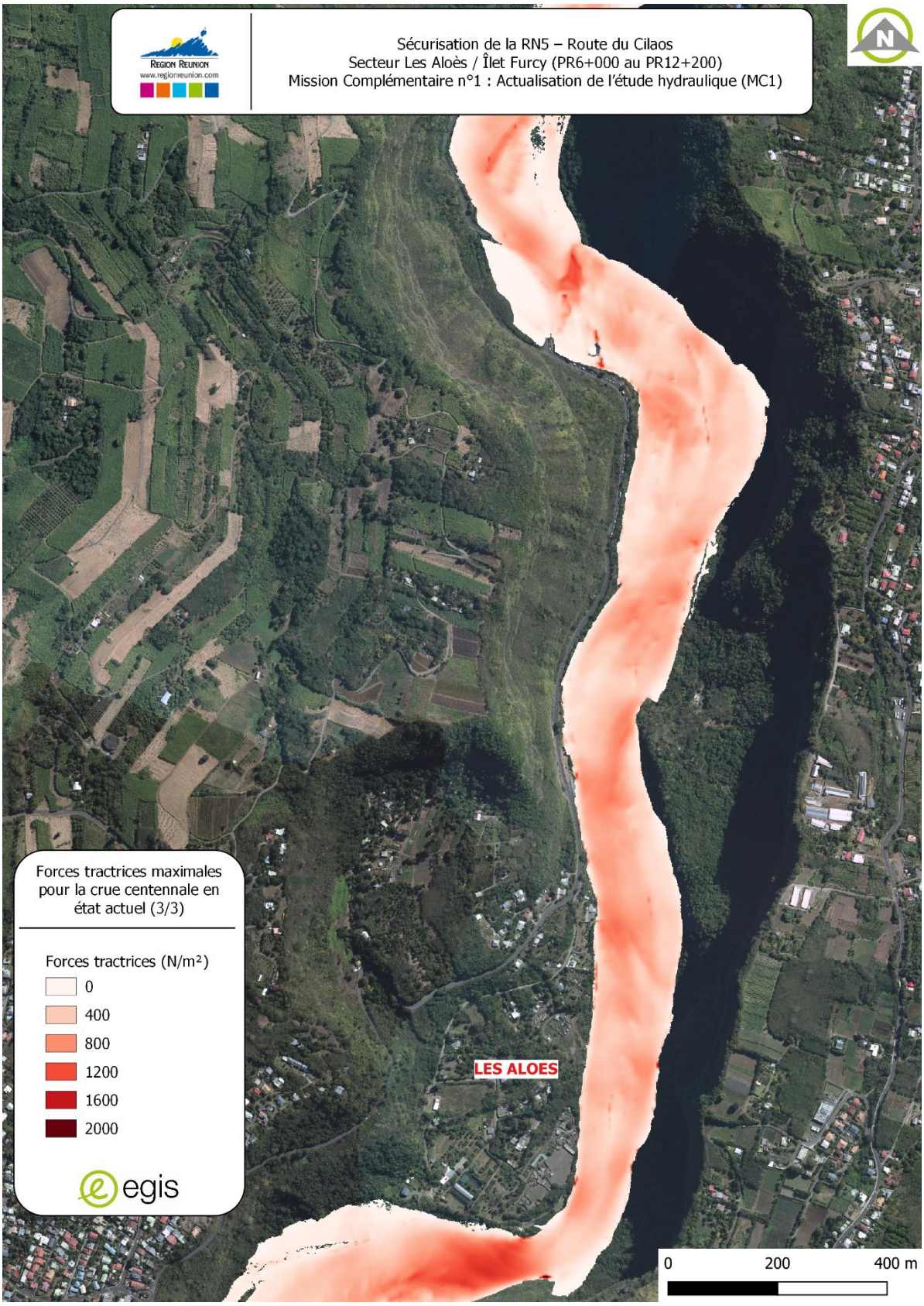


Figure 83 : Cartographie des forces tractrices maximales pour la crue centennale en état actuel (3/3)

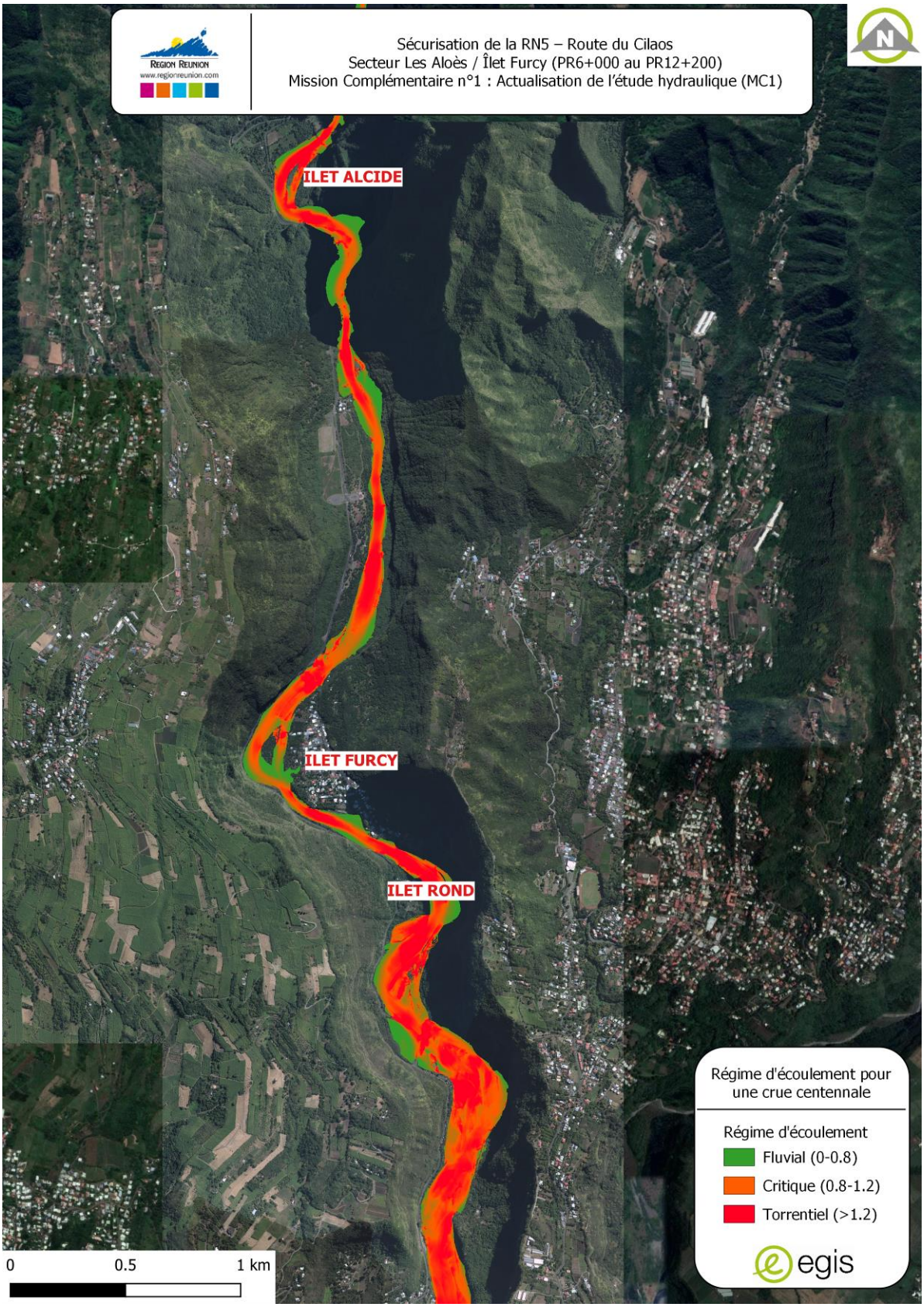


Figure 84 : Cartographie du régime d'écoulement pour la crue centennale en état actuel

8.4.4 Crue millénale

Les caractéristiques des écoulements au niveau des ouvrages de franchissement envisagés sont présentées dans le tableau suivant :

Lieu	Elévation de la surface d'eau (m NGR)	Vitesses d'écoulement maximales (m/s)	Forces tractrices au niveau de la rive gauche (N/m^2)	Forces tractrices au niveau du lit mineur (N/m^2)	Forces tractrices au niveau de la rive droite (N/m^2)
Passage OF1a	164.5	9	550	1100	850
Passage OF1b	171	8.5	450	800	500
Passage OF1c	186.5	11	850	1400	1100
Passage OF2	197.5	12	800	1350	1300
Passage OF3	209	13.5	1100	1650	1400
Passage OF4	233	13.5	900	2100	850

Tableau 28 : Caractéristiques des conditions d'écoulement au niveau des ouvrages de franchissement envisagés pour la crue millénale

Le profil en long de la ligne d'eau et de la ligne de charge pour la crue millénale du Bras de Cilaos sur la zone d'étude en état actuel est disponible ci – dessous.

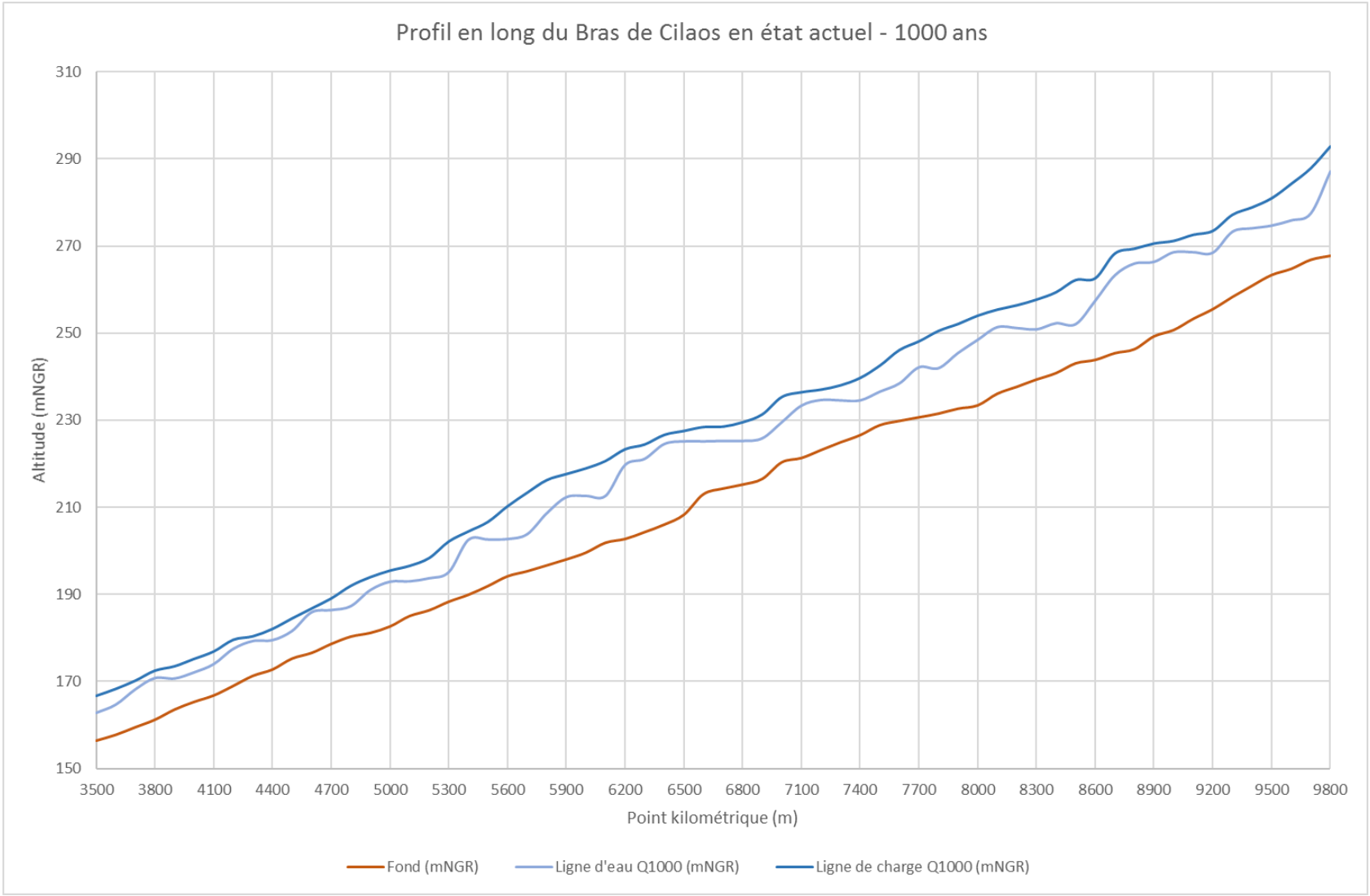


Figure 85 : Profil en long du Bras de Cilaos en état actuel - 1000 ans

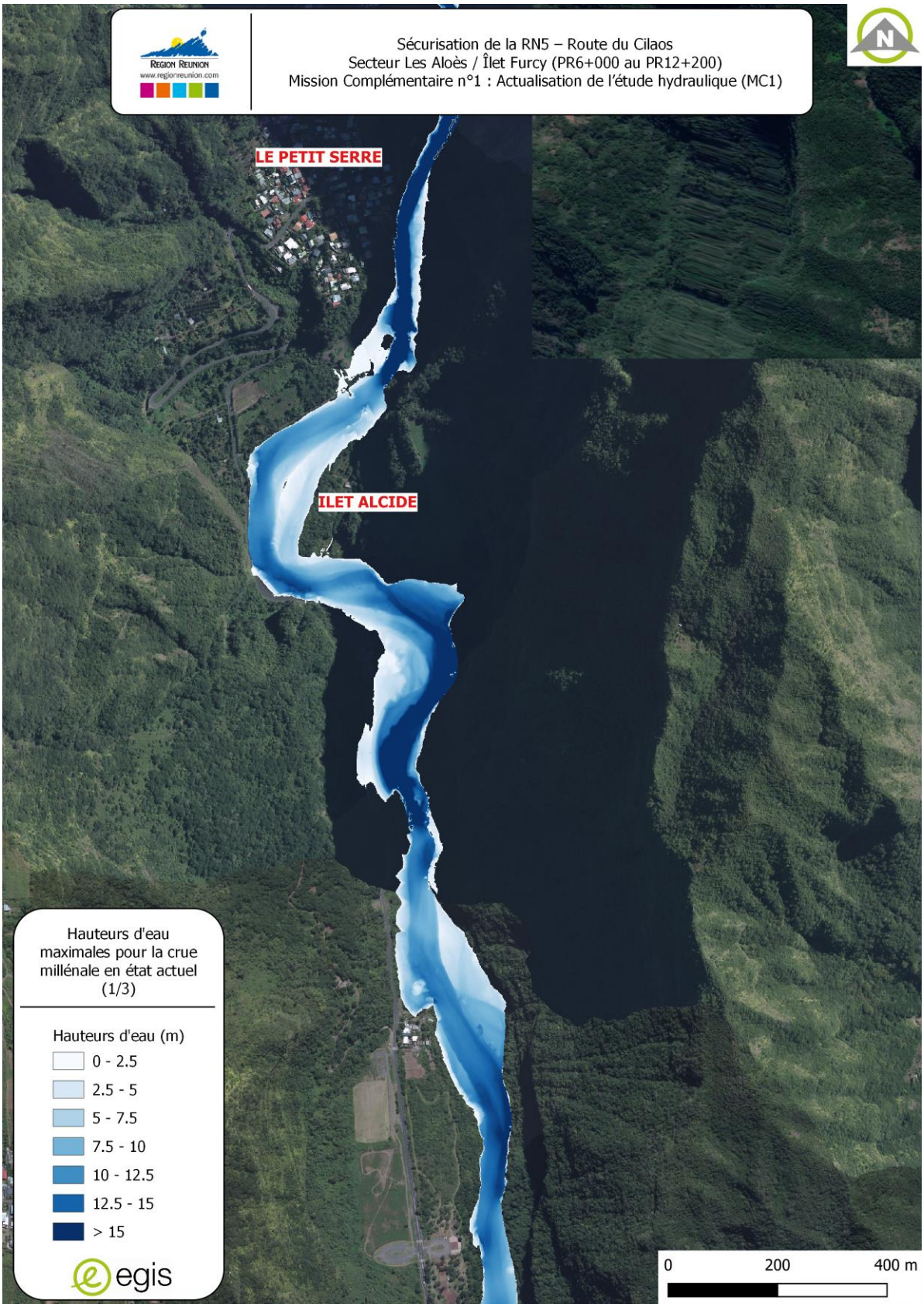


Figure 86 : Cartographie des hauteurs d'eau maximales pour la crue millénale en état actuel (1/3)

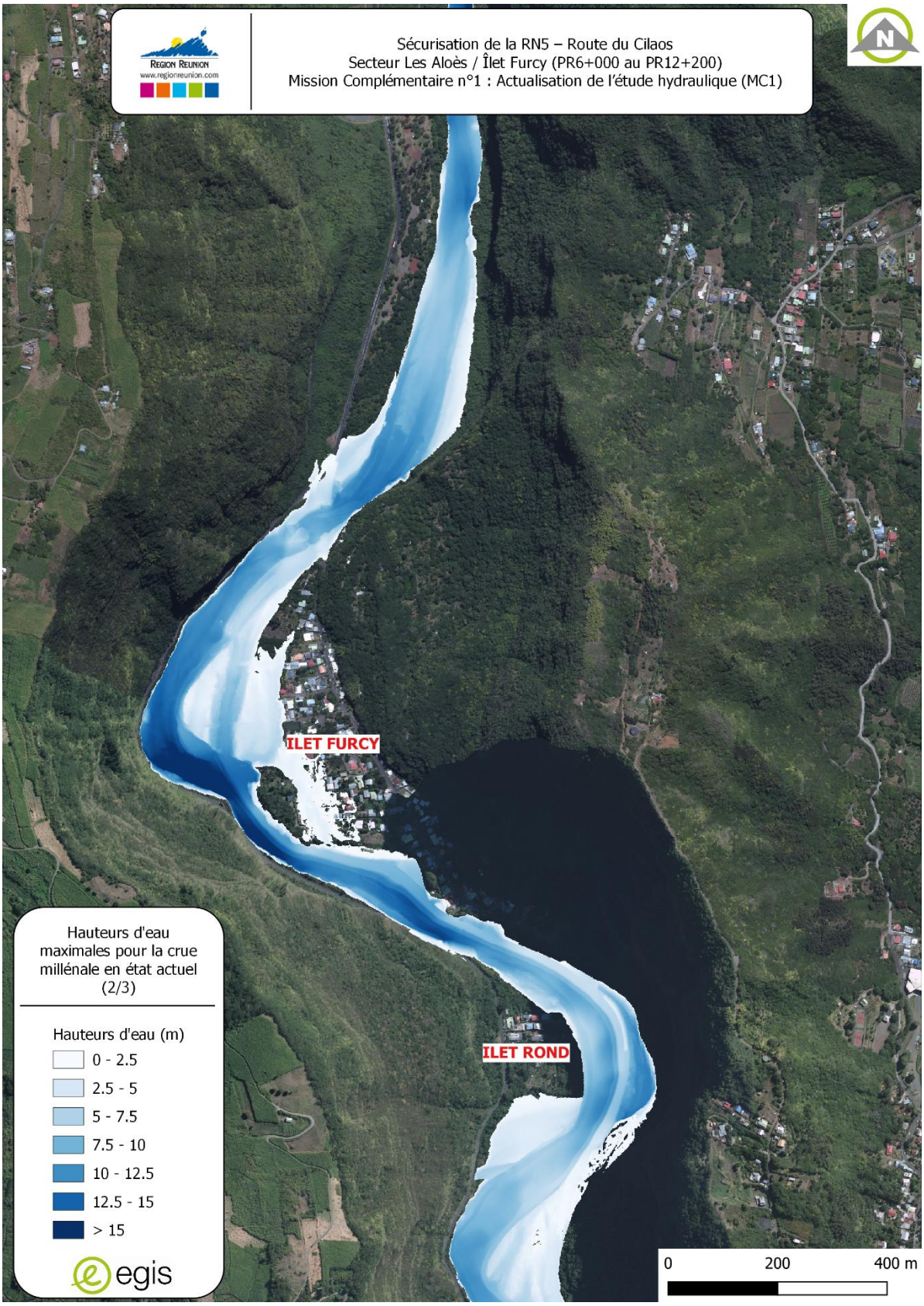


Figure 87 : Cartographie des hauteurs d'eau maximales pour la crue millénale en état actuel (2/3)

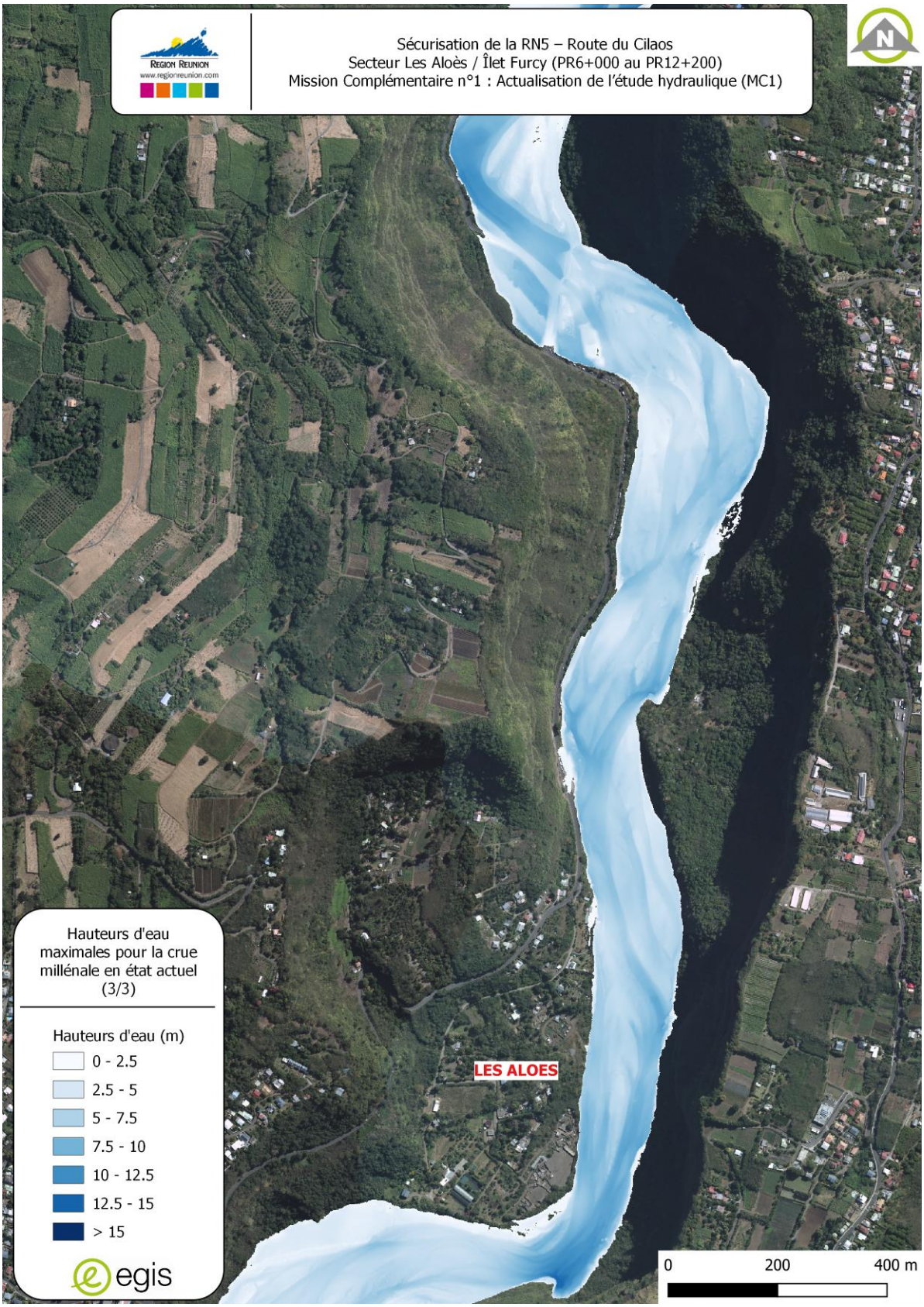


Figure 88 : Cartographie des hauteurs d'eau maximales pour la crue millénale en état actuel (3/3)

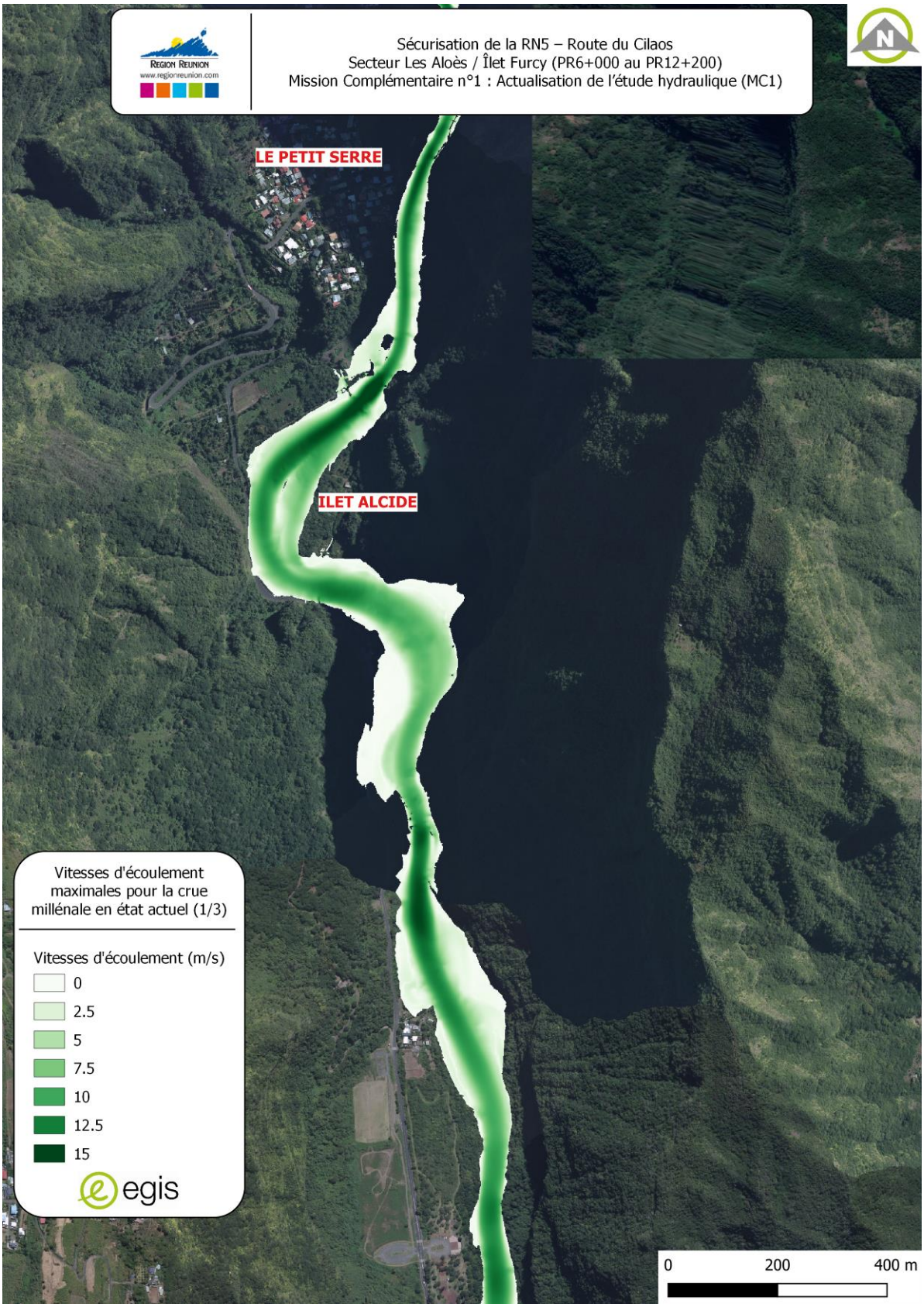


Figure 89 : Cartographie des vitesses d'écoulement maximales pour la crue millénale en état actuel (1/3)

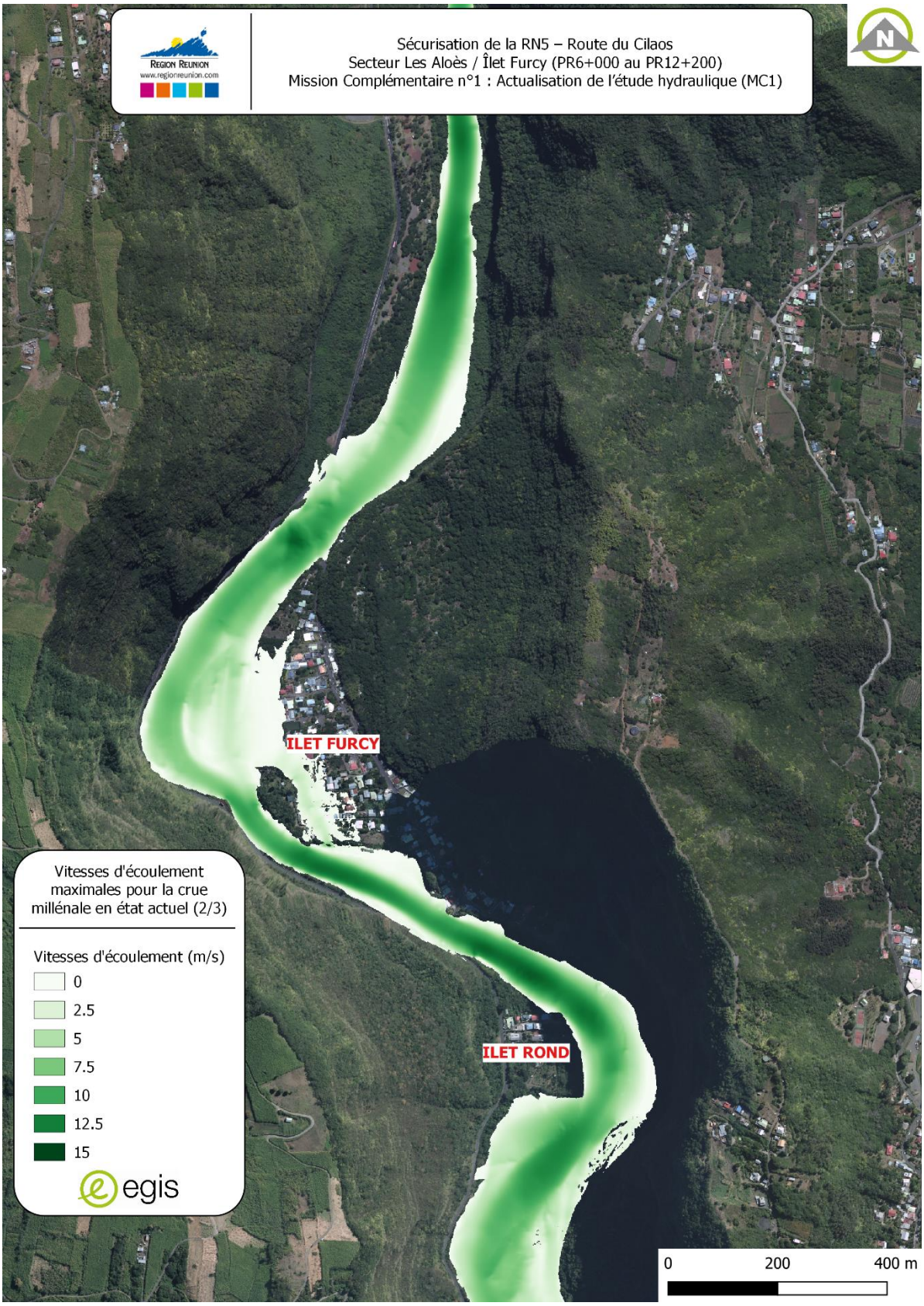


Figure 90 : Cartographie des vitesses d'écoulement maximales pour la crue millénale en état actuel (2/3)

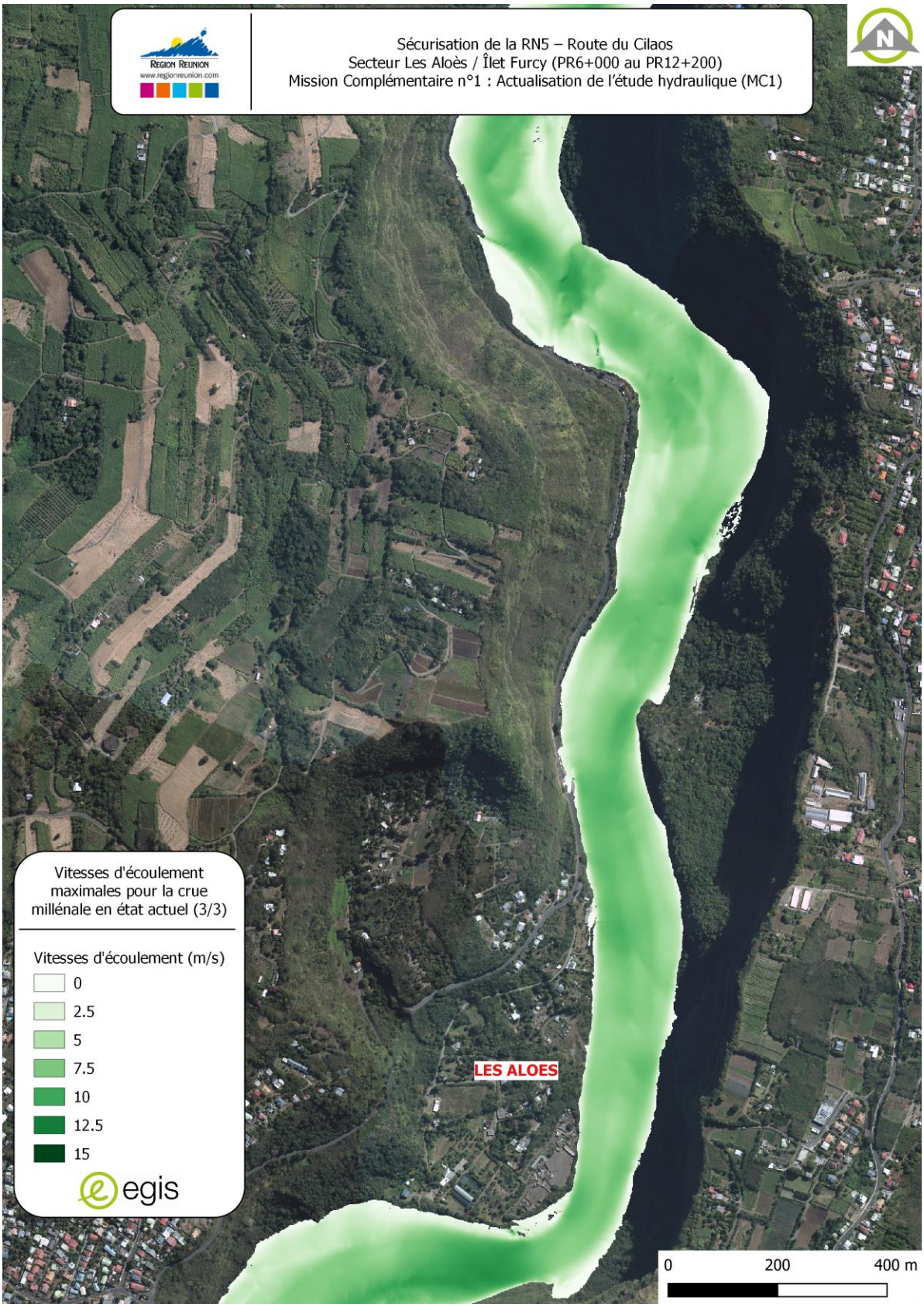


Figure 91 : Cartographie des vitesses d'écoulement maximales pour la crue millénale en état actuel (3/3)

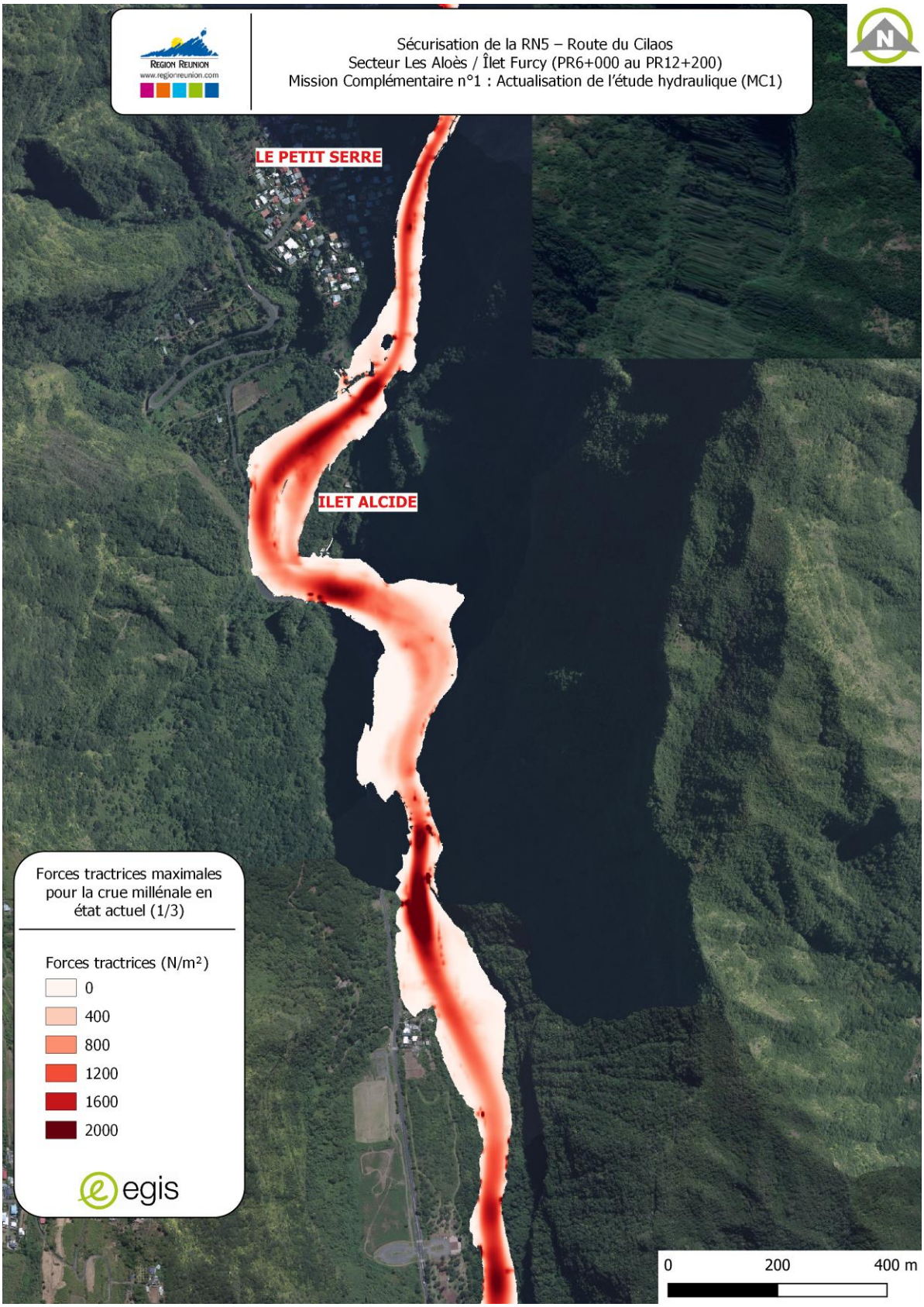


Figure 92 : Cartographie des forces tractrices maximales pour la crue millénale en état actuel (1/3)

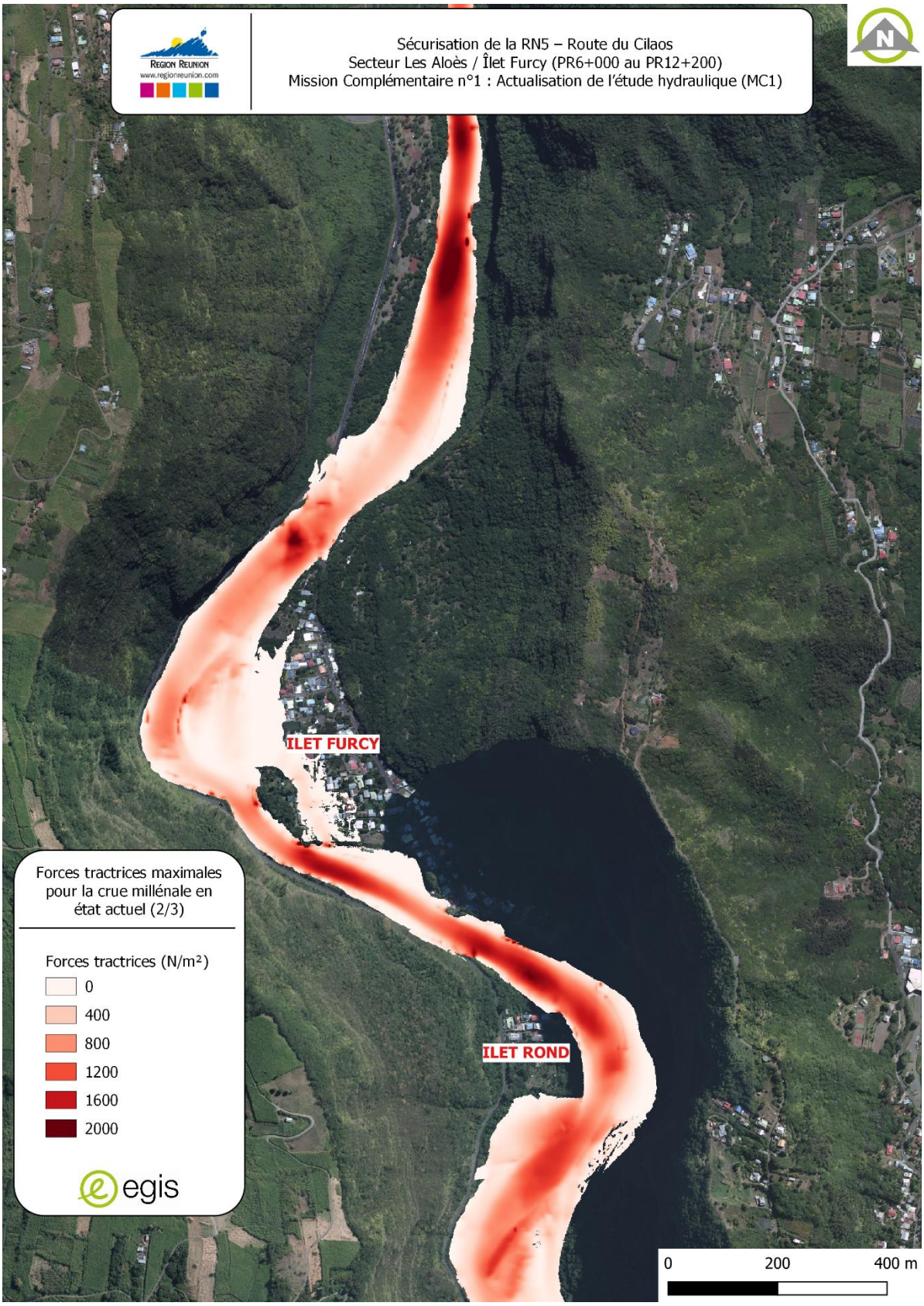


Figure 93 : Cartographie des forces tractrices maximales pour la crue millénale en état actuel (2/3)

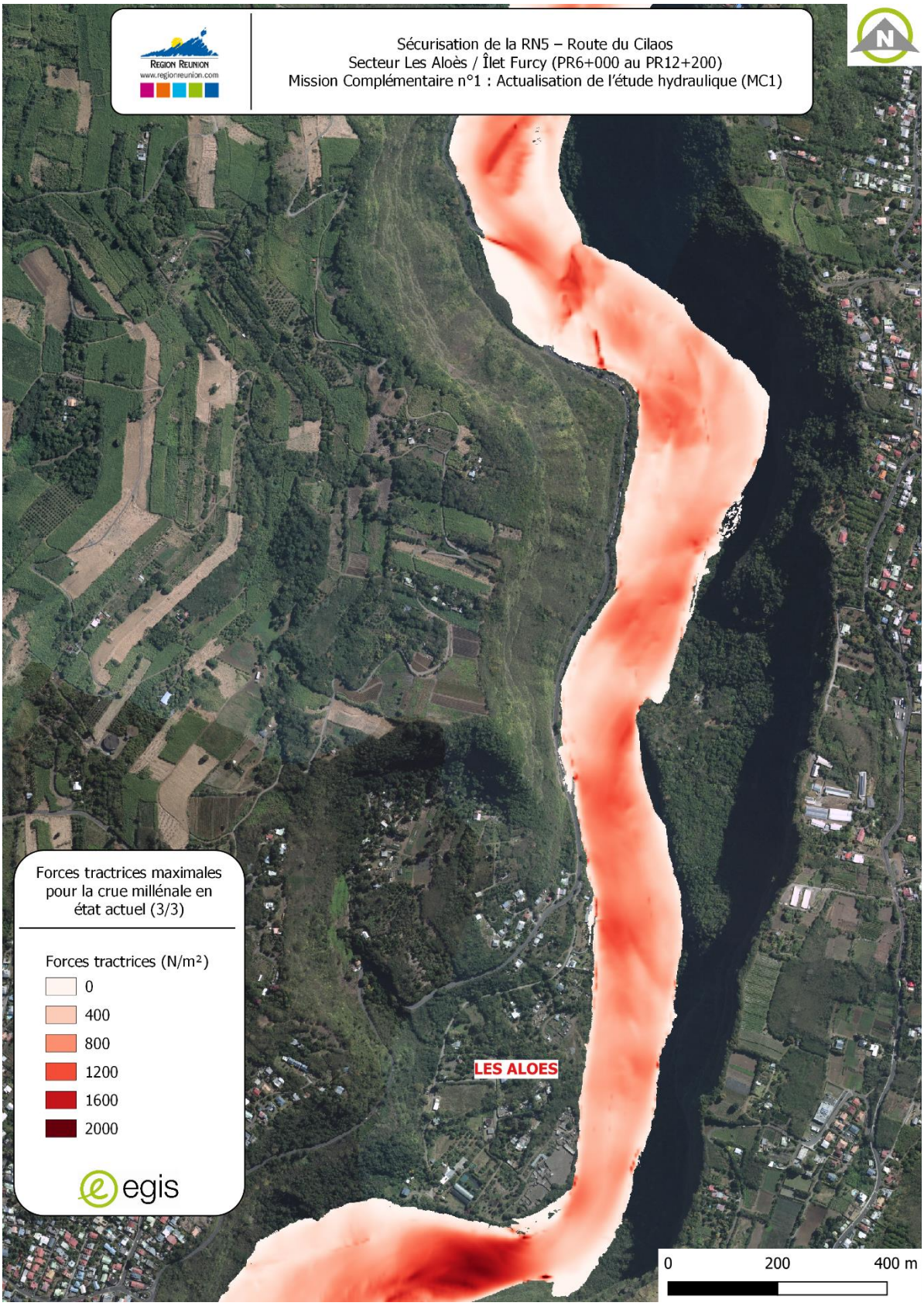


Figure 94 : Cartographie des forces tractrices maximales pour la crue millénale en état actuel (3/3)

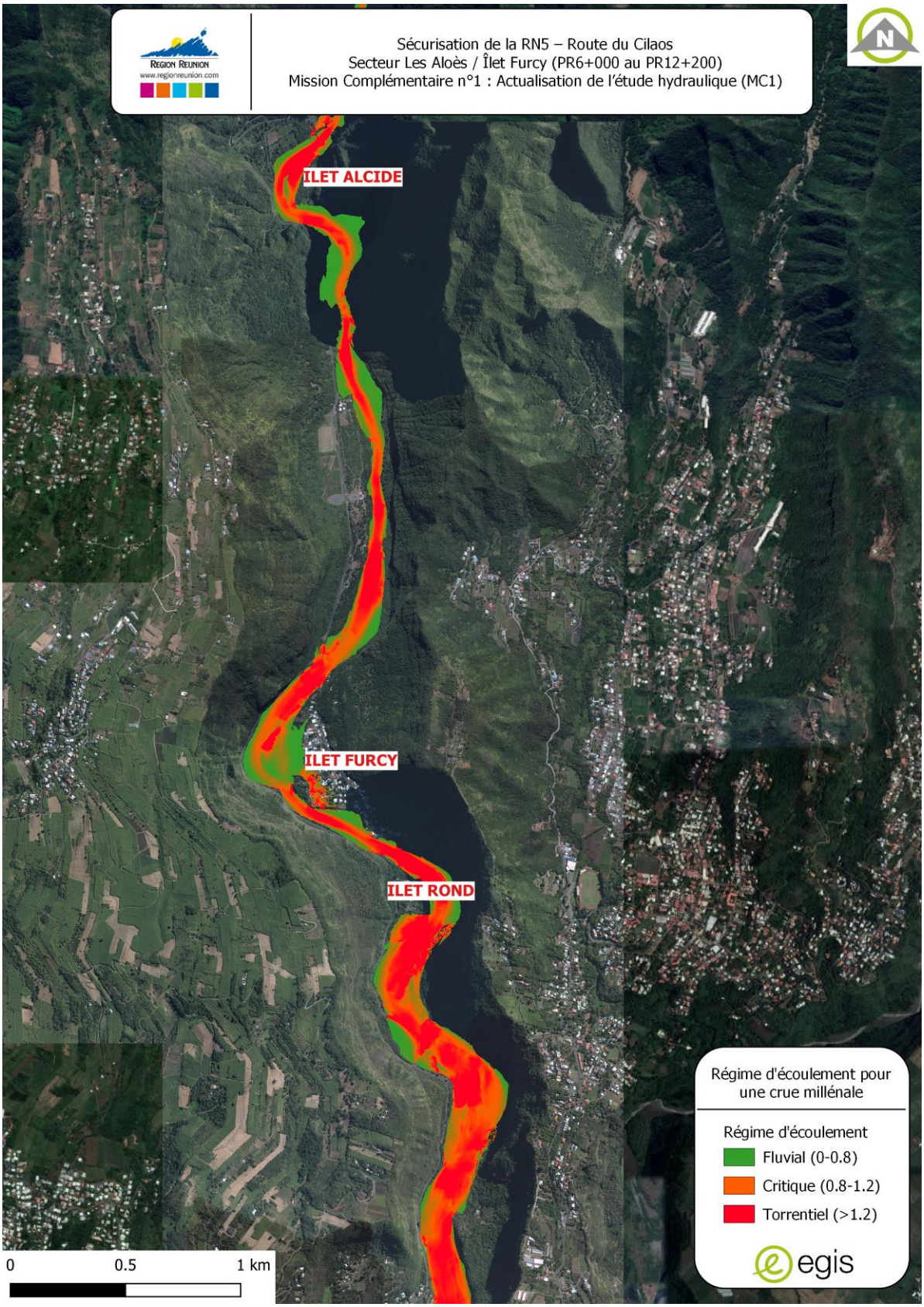


Figure 95 : Cartographie du régime d'écoulement pour la crue millénale en état actuel

8.5 Analyse et description des résultats

L'analyse des différentes crues réalisée par secteur est détaillée ci-dessous.

8.5.1 Secteur Ilet Alcide

Le secteur Ilet Alcide est décomposé en deux sous-secteurs : les gorges du Petit Serré et le contournement de l'Ilet Alcide. Les caractéristiques de l'écoulement en crue sont les suivantes :

- Crue décennale

	Gorges du Petit Serré	Contournement de l'Ilet Alcide
Hauteurs d'eau observées (m)	8 à 10	5 à 7
Vitesses d'écoulement observées (m/s)	7 à 10	6 à 8.5

Tableau 29 : Caractéristiques des conditions d'écoulement au niveau du secteur Ilet Alcide pour la crue décennale

- Crue trentennale

	Gorges du Petit Serré	Contournement de l'Ilet Alcide
Hauteurs d'eau observées (m)	8.5 à 12	6 à 9
Vitesses d'écoulement observées (m/s)	9 à 12	8 à 10

Tableau 30 : Caractéristiques des conditions d'écoulement au niveau du secteur Ilet Alcide pour la crue trentennale

- Crue centennale

	Gorges du Petit Serré	Contournement de l'Ilet Alcide
Hauteurs d'eau observées (m)	9 à 14	7 à 10
Vitesses d'écoulement observées (m/s)	9 à 14	9 à 12

Tableau 31 : Caractéristiques des conditions d'écoulement au niveau du secteur Ilet Alcide pour la crue centennale

- Crue millénale

	Gorges du Petit Serré	Contournement de l'Ilet Alcide
Hauteurs d'eau observées (m)	9.5 à 19.5	9.5 à 14
Vitesses d'écoulement observées (m/s)	11 à 17	10 à 14

Tableau 32 : Caractéristiques des conditions d'écoulement au niveau du secteur Ilet Alcide pour la crue millénale

- Description et analyse de l'écoulement

Le secteur Ilet Alcide est concerné par de fortes vitesses provenant des gorges du Petit Serré venant heurter la rive droite rocheuse. Une surélévation de la ligne d'eau est observée.

Dès l'occurrence 30 ans, la partie basse de la terrasse de l'ilet Alcide est submergée. Les hauteurs de submersion peuvent aller jusqu'à 6 m pour la crue millénale avec des vitesses pouvant être égales à 8 m/s.

8.5.2 Secteur Rampe des Sables

Le secteur Rampe des Sables est décomposé en deux sous-secteurs : le coude de la Rampe des Sables et le linéaire de la Rampe des Sables.

Les caractéristiques de l'écoulement en crue sont les suivantes :

- Crue décennale

	Coude de la Rampe des Sables	Linéaire de la Rampe des Sable
Hauteurs d'eau observées (m)	6 à 8.5	7 à 10
Vitesses d'écoulement observées (m/s)	6 à 7.5	6.5 à 9

Tableau 33 : Caractéristiques des conditions d'écoulement au niveau du secteur Rampe des Sables pour la crue décennale

- Crue trentennale

	Coude de la Rampe des Sables	Linéaire de la Rampe des Sable
Hauteurs d'eau observées (m)	7 à 11.5	9 à 13.5
Vitesses d'écoulement observées (m/s)	6.5 à 8.5	7 à 11

Tableau 34 : Caractéristiques des conditions d'écoulement au niveau du secteur Rampe des Sables pour la crue trentennale

- Crue centennale

	Coude de la Rampe des Sables	Linéaire de la Rampe des Sable
Hauteurs d'eau observées (m)	8.5 à 13	10 à 16
Vitesses d'écoulement observées (m/s)	7 à 11	7.5 à 11.5

Tableau 35 : Caractéristiques des conditions d'écoulement au niveau du secteur Rampe des Sables pour la crue centennale

- Crue millénale

	Coude de la Rampe des Sables	Linéaire de la Rampe des Sable
Hauteurs d'eau observées (m)	11 à 17	13 à 20
Vitesses d'écoulement observées (m/s)	8 à 12	9 à 14

Tableau 36 : Caractéristiques des conditions d'écoulement au niveau du secteur Rampe des Sables pour la crue millénale

- Description et analyse de l'écoulement

En amont de la Rampe des Sables, au niveau du coude, la terrasse basse en rive droite est inondée dès l'occurrence décennale. Les écoulements sur cette section sont orientés vers la berge gauche avec une mise en vitesse.

Au niveau de la Rampe des Sables, l'éperon rocheux situé en rive droite génère une surélévation de la ligne d'eau au niveau de la protection en enrochements liés existantes.

En aval de ce linéaire, le rétrécissement de section provoque une mise en vitesse de l'écoulement importante. Cette mise en vitesse attaque la berge en rive gauche.

Figure 96 : Observation du sous-cavement sur le secteur Rampe des Sables

8.5.3 Secteur Ilet Long

Le secteur Ilet Long est décomposé en deux sous-secteurs : l'éperon rocheux en rive droite et l'aval de l'Ilet Long.

Les caractéristiques de l'écoulement en crue sont les suivantes :

- Crue décennale

	Eperon rocheux en rive droite	Aval de l'Ilet Long
Hauteurs d'eau observées (m)	4 à 6.5	3 à 6.5
Vitesses d'écoulement observées (m/s)	6 à 9.5	5.5 à 8

Tableau 37 : Caractéristiques des conditions d'écoulement au niveau du secteur Ilet Long pour la crue décennale

- Crue trentennale

	Eperon rocheux en rive droite	Aval de l'Ilet Long
Hauteurs d'eau observées (m)	5 à 8.5	4 à 9
Vitesses d'écoulement observées (m/s)	8 à 11.5	6 à 9.5

Tableau 38 : Caractéristiques des conditions d'écoulement au niveau du secteur Ilet Long pour la crue trentennale

- Crue centennale

	Eperon rocheux en rive droite	Aval de l'Ilet Long
Hauteurs d'eau observées (m)	6 à 9	5 à 11
Vitesses d'écoulement observées (m/s)	9 à 13	7.5 à 10.5

Tableau 39 : Caractéristiques des conditions d'écoulement au niveau du secteur Ilet Long pour la crue centennale

- Crue millénale

	Eperon rocheux en rive droite	Aval de l'Ilet Long
Hauteurs d'eau observées (m)	8.5 à 12	7 à 15
Vitesses d'écoulement observées (m/s)	10 à 15	9 à 13

Tableau 40 : Caractéristiques des conditions d'écoulement au niveau du secteur Ilet Long pour la crue millénale

- Description et analyse de l'écoulement

Les vitesses venant du goulet du secteur Rampe des Sables sont importantes. Un éperon rocheux sur la rive droite provoque une élévation de la ligne d'eau. Cette surélévation alliée aux fortes vitesses venant de l'amont crée une forte sollicitation de la berge droite composée de matériaux meubles dès l'occurrence 10 ans.

La berge droite est ainsi concernée par un aléa érosion et devra être pris en considération dans les travaux de protection du nouvel itinéraire routier.

Figure 97 : Observations du matériau meuble de la berge en rive droite

En aval de l'Ilet Long, le cours d'eau s'élargit provoquant une baisse des vitesses et des hauteurs d'eau.

8.5.4 Secteur Ilet Furcy

Le secteur Ilet Furcy est décomposé en trois sous-secteurs : le secteur amont du coude d'Ilet Furcy, le coude d'Ilet Furcy et le secteur aval du coude d'Ilet Furcy.

Les caractéristiques de l'écoulement en crue sont les suivantes :

- Crue décennale

	Secteur amont du coude d'Ilet Furcy	Coude d'Ilet Furcy	Secteur aval du coude d'Ilet Furcy
Hauteurs d'eau observées (m)	4.5 à 6.5	3.5 à 8.5	5 à 8.5
Vitesses d'écoulement observées (m/s)	4.5 à 9	5 à 8.5	6 à 9

Tableau 41 : Caractéristiques des conditions d'écoulement au niveau du secteur Ilet Furcy pour la crue décennale

Un écoulement sur la déviation est observé présentant les caractéristiques suivantes :

- Hauteur d'eau : 10 à 15 cm
- Vitesse d'écoulement : 0.4 à 0.5 m/s

- Crue trentennale

	Secteur amont du coude d'Ilet Furcy	Coude d'Ilet Furcy	Secteur aval du coude d'Ilet Furcy
Hauteurs d'eau observées (m)	6 à 7.5	5.5 à 11.5	6.5 à 11.5
Vitesses d'écoulement observées (m/s)	5 à 11.5	6 à 9	7 à 11.5

Tableau 42 : Caractéristiques des conditions d'écoulement au niveau du secteur Ilet Furcy pour la crue trentennale

- Crue centennale

	Secteur amont du coude d'Ilet Furcy	Coude d'Ilet Furcy	Secteur aval du coude d'Ilet Furcy
Hauteurs d'eau observées (m)	7 à 9.5	7 à 13.5	8 à 12
Vitesses d'écoulement observées (m/s)	6 à 12	6.5 à 9.5	8.5 à 12

Tableau 43 : Caractéristiques des conditions d'écoulement au niveau du secteur Ilet Furcy pour la crue centennale

- Crue millénale

	Secteur amont du coude d'Ilet Furcy	Coude d'Ilet Furcy	Secteur aval du coude d'Ilet Furcy
Hauteurs d'eau observées (m)	8 à 12	9 à 18.5	10 à 16
Vitesses d'écoulement observées (m/s)	8.5 à 14	7 à 10	10 à 13.5

Tableau 44 : Caractéristiques des conditions d'écoulement au niveau du secteur Ilet Furcy pour la crue millénale

- Description et analyse de l'écoulement

En amont du coude d'Ilet Furcy, la section d'écoulement se rétrécit provoquant une mise en vitesse et une surélévation de la ligne d'eau. Cette surélévation cause un débordement en rive gauche au niveau de la déviation dès la crue décennale. Ce débordement devient conséquent dès la crue trentennale et scinde l'écoulement en deux.

Les deux écoulements confluent au niveau d'un éperon rocheux, situé en extrémité aval du coude, générant une surélévation de la ligne d'eau avec des vitesses importantes en rive droite.

L'ilet Furcy est concerné par une submersion du pied de l'ilet dès la crue centennale.

Le nouveau tracé sur ce tronçon devra être au plus près des habitations et former une digue entre le Bras de Cilaos et l'ilet Furcy afin de protéger ces enjeux.

En aval du coude, la déviation est submersible dès la crue décennale.

8.5.5 Secteur Ilet Rond

Le secteur Ilet Rond est décomposé en deux sous-secteurs : le contournement de l'Ilet Rond et le secteur aval d'Ilet Rond.

Les caractéristiques de l'écoulement en crue sont les suivantes :

- Crue décennale

	Contournement de l'Ilet Rond	Secteur aval d'Ilet Rond
Hauteurs d'eau observées (m)	3.5 à 6	3.5 à 6
Vitesses d'écoulement observées (m/s)	6 à 8.5	5 à 7

Tableau 45 : Caractéristiques des conditions d'écoulement au niveau du secteur Ilet Rond pour la crue décennale

- Crue trentennale

	Contournement de l'Ilet Rond	Secteur aval d'Ilet Rond
Hauteurs d'eau observées (m)	4.5 à 7	4.5 à 7
Vitesses d'écoulement observées (m/s)	7 à 10	6.5 à 9

Tableau 46 : Caractéristiques des conditions d'écoulement au niveau du secteur Ilet Rond pour la crue trentennale

- Crue centennale

	Contournement de l'Ilet Rond	Secteur aval d'Ilet Rond
Hauteurs d'eau observées (m)	6 à 8.5	5.5 à 8
Vitesses d'écoulement observées (m/s)	7.5 à 11.5	7 à 9.5

Tableau 47 : Caractéristiques des conditions d'écoulement au niveau du secteur Ilet Rond pour la crue centennale

- Crue millénale

	Contournement de l'Ilet Rond	Secteur aval d'Ilet Rond
Hauteurs d'eau observées (m)	7 à 10.5	7 à 10
Vitesses d'écoulement observées (m/s)	10 à 14	8 à 11

Tableau 48 : Caractéristiques des conditions d'écoulement au niveau du secteur Ilet Rond pour la crue millénale

- Description et analyse de l'écoulement

La partie amont de l'ilet Rond est inondée dès la crue décennale.

La berge meuble de l'ilet Rond est soumise à de fortes forces tractrices et donc à une érosion active.

Figure 98 : Berge alluviale de l'Ilet Rond

La protection de cette berge devra être réalisée.

Sur la partie aval du coude, la terrasse basse de l'ilet est submergée dès la crue décennale. Cette terrasse est soumise à de fortes vitesses. Elle est potentiellement érodable.

La déviation est partiellement submergée dès la crue décennale au niveau du coude de la rivière.

8.5.6 Secteur Bas du Ruisseau

- Crue décennale

L'écoulement sur ce secteur présente les caractéristiques suivantes :

  - Hauteur d'eau observée : 2.5 à 4.5 m
  - Vitesses d'écoulement observées : 4 à 6.5 m/s

- Crue trentennale

L'écoulement sur ce secteur présente les caractéristiques suivantes :

  - Hauteur d'eau observée : 3.5 à 6 m
  - Vitesses d'écoulement observées : 4.5 à 8 m/s

- Crue centennale

L'écoulement sur ce secteur présente les caractéristiques suivantes :

  - Hauteur d'eau observée : 4.5 à 6.5 m

- Vitesses d'écoulement observées : 6 à 9 m/s

- Crue millénale

L'écoulement sur ce secteur présente les caractéristiques suivantes :

- Hauteur d'eau observée : 6 à 7.5 m
- Vitesses d'écoulement observées : 7 à 10.5 m/s

- Description et analyse de l'écoulement

La terrasse située au niveau des ouvrages d'urgence est submergée dès la crue décennale.

Les écoulements sont orientés majoritairement vers la berge en rive gauche.

En aval de ce secteur, le lit s'élargit et les vitesses d'écoulement diminuent.

8.5.7 Secteur Aloès

Le secteur Aloès est décomposé en deux sous-secteurs : l'éperon rocheux en rive gauche et la Rampe des Aloès.

Les caractéristiques de l'écoulement en crue sont les suivantes :

- Crue décennale

	Eperon rocheux en rive gauche	**Rampe des Aloès**
Hauteurs d'eau observées (m)	3 à 6	3 à 4.5
Vitesses d'écoulement observées (m/s)	4.5 à 6	4.5 à 5.5

Tableau 49 : Caractéristiques des conditions d'écoulement au niveau du secteur Aloès pour la crue décennale

- Crue trentennale

	Eperon rocheux en rive gauche	**Rampe des Aloès**
Hauteurs d'eau observées (m)	4.5 à 7	4 à 6
Vitesses d'écoulement observées (m/s)	5.5 à 8	5.5 à 7

Tableau 50 : Caractéristiques des conditions d'écoulement au niveau du secteur Aloès pour la crue trentennale

- Crue centennale

	Eperon rocheux en rive gauche	**Rampe des Aloès**
Hauteurs d'eau observées (m)	5 à 7.5	5 à 6.5
Vitesses d'écoulement observées (m/s)	6 à 8.5	6 à 7.5

Tableau 51 : Caractéristiques des conditions d'écoulement au niveau du secteur Aloès pour la crue centennale

- Crue millénale

	Eperon rocheux en rive gauche	Rampe des Aloès
Hauteurs d'eau observées (m)	6 à 10	6.5 à 8
Vitesses d'écoulement observées (m/s)	8 à 9.5	8 à 9

Tableau 52 : Caractéristiques des conditions d'écoulement au niveau du secteur Aloès pour la crue millénale

- Description et analyse de l'écoulement

En amont de ce secteur, le lit du Bras de Cilaos est large et l'écoulement s'effectue préférentiellement en rive gauche.

La largeur du lit se réduit localement provoquant une mise en vitesse de l'écoulement. Une forte surélévation de ligne d'eau est observée au droit de l'éperon rocheux situé en rive gauche.

La berge droite est particulièrement soumise attaques de la rivière en crue.

9. Analyse hydraulique du projet APSIQ 2010

9.1 Description du projet

Le projet sur la zone d'étude, remis par le maitre d'ouvrage, est la proposition établie dans l'APSIQ finalisé en 2010 comportant :

- La création d'une route digue entre les Aloès et Bas du Ruisseau à l'intérieur du lit majeur du Bras de Cilaos ;
- Un ouvrage de franchissement de la route digue créée au Bas du Ruisseau avec 7 piles dans le lit majeur du cours d'eau ;
- Un ouvrage de franchissement avec 13 piles dont 8 dans le lit majeur du Bras de Cilaos au niveau de l'Ilet Rond ;
- Une route digue au niveau de l'Ilet Furcy avec des remblais pénétrant dans le lit majeur du Bras de Cilaos ;
- Un ouvrage de franchissement entre l'Ilet Furcy et l'Ilet Long présentant 6 piles dans le lit majeur du cours d'eau.

Les aménagements proposés dans l'APSIQ de 2010 sont présentés dans les figures suivantes.

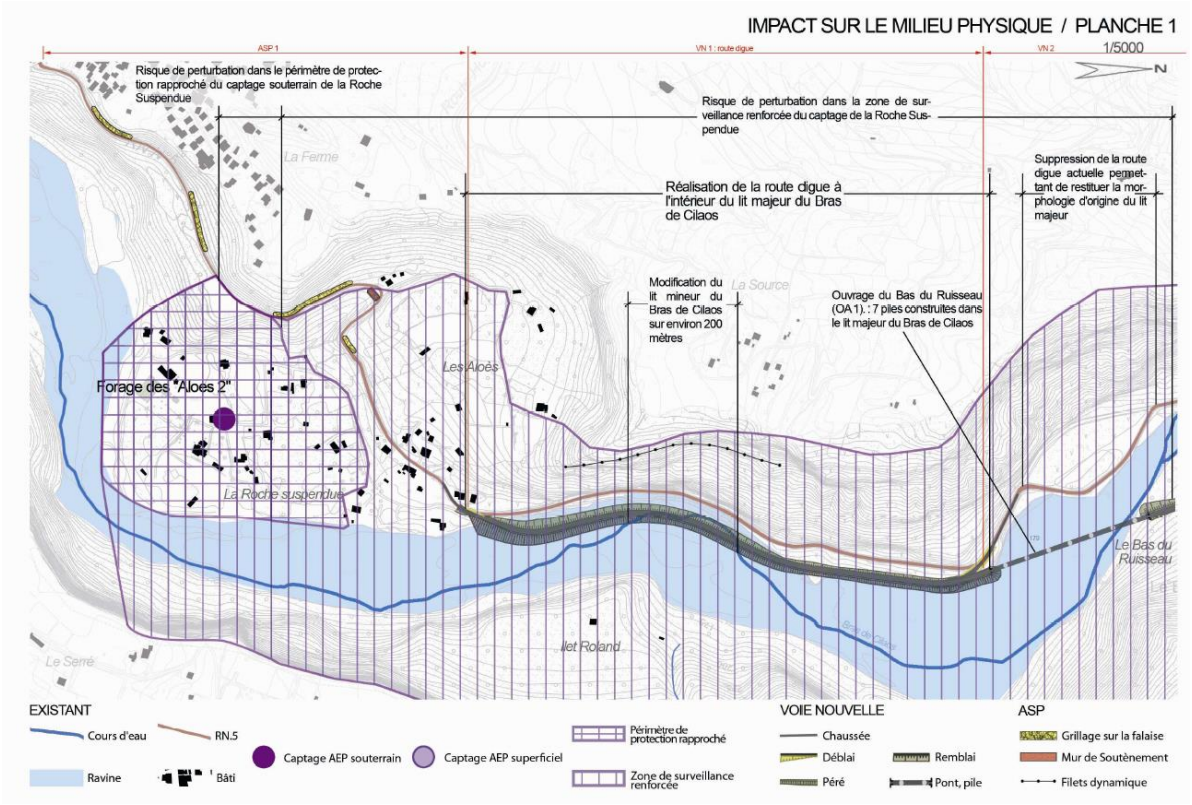


Figure 99 : Aménagements de la proposition figurant dans l'APSIQ de 2010 (Planche 1)

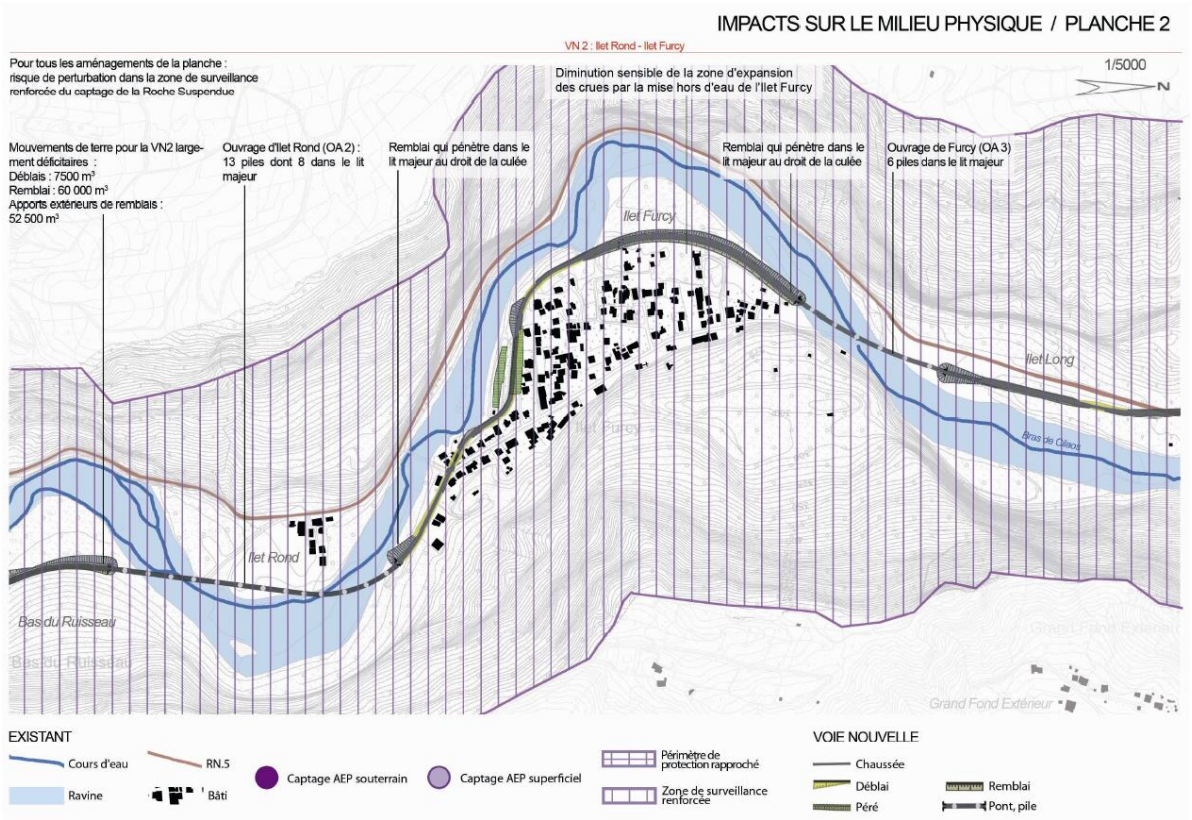


Figure 100 : Aménagements de la proposition figurant dans l'APSIQ de 2010 (Planche 2)

9.2 Analyse préliminaire des ouvrages à réaliser

9.2.1 Route digue entre les Aloès et Bas du Ruisseau

Une route digue entre les Aloès et Bas du Ruisseau est proposée dans l'APSIQ de 2010 afin d'éviter les chutes de blocs et de créer un piège à cailloux entre la falaise et la nouvelle voie.

L'implantation du tracé se situe dans le lit actif du Bras de Cilaos. Cette construction réduira une section déjà étroite pour un cours d'eau du type du bras de Cilaos et modifiera l'écoulement en lit mineur ainsi qu'en lit majeur. Du fait des vitesses d'écoulement constatées et des risques d'affouillement en base de la route digue, cet ouvrage sera extrêmement difficile à protéger.

9.2.2 Ouvrage de franchissement de la route digue créée au Bas du Ruisseau (OA1)

L'ouvrage de franchissement passant de la rive gauche à la rive droite du bras de Cilaos a pour objectif de positionner la route sur un versant moins raide et ne présentant pas d'instabilité de type écroulement/éboulement.

L'OA1 présente un tracé de biais par rapport à l'écoulement et à la vallée avec 8 travées dont 7 piles dans le lit majeur du cours d'eau.

La présence de piles va influer fortement l'écoulement en augmentant la ligne d'eau et le dépôt du transport solide en amont du franchissement.

Le nombre de piles augmente le risque d'attaque directe des appuis par des bras vifs tels que constatés sur la rivière des Saint Etienne, même pour des crues courantes.

De plus, le biais du franchissement par rapport à l'écoulement associé au nombre de piles dans le lit, risque avec une très forte probabilité de générer un phénomène d'embâcles au niveau des débris flottants mettant en péril l'ouvrage.

9.2.3 Ouvrage de franchissement au niveau de l'Ilet Rond (OA2)

L'ouvrage de franchissement au niveau de l'Ilet Rond présente une configuration particulière en assurant deux traversées successives du lit majeur du Bras de Cilaos.

L'OA2 présente un tracé biais par rapport à l'écoulement et à la vallée avec 14 travées dont 9 piles dans le lit majeur du cours d'eau. Ce tracé présente aussi une partie aérienne au-dessus de l'Ilet Rond.

La présence de piles va influer fortement l'écoulement en augmentant la ligne d'eau et le dépôt du transport solide en amont du franchissement.

Le nombre de piles augmente le risque d'attaque directe des appuis par des bras vifs tels que constatés sur la rivière Saint Etienne, même pour des crues courantes.

De plus, le biais du franchissement par rapport à l'écoulement associé au nombre de piles dans le lit, risque avec une très forte probabilité de générer un phénomène d'embâcles au niveau des débris flottants mettant en péril l'ouvrage.

9.2.4 Route digue au niveau de l'Ilet Furcy

La route digue au niveau de l'Ilet Furcy a pour but de mettre hors d'eau l'Ilet Furcy.

Cet ouvrage va perturber l'écoulement et augmenter la ligne d'eau au niveau de la courbure et en amont des extrémités de la route digue.

9.2.5 Ouvrage de franchissement entre l'Ilet Furcy et l'Ilet Long (OA3)

L'ouvrage de franchissement entre l'Ilet Furcy et l'Ilet Long présente un tracé biais très prononcé par rapport à l'écoulement et à la vallée avec 7 travées dont 6 piles dans le lit majeur du cours d'eau.
La présence de piles va influer fortement l'écoulement en augmentant la ligne d'eau et le dépôt du transport solide en amont du franchissement.

Le nombre de piles augmente le risque d'attaque directe des appuis par des bras vifs tels que constatés sur la rivière Saint Etienne, même pour des crues courantes.

De plus, le biais du franchissement par rapport à l'écoulement associé au nombre de piles dans le lit, risque avec une très forte probabilité de générer un phénomène d'embâcles au niveau des débris flottants mettant en péril l'ouvrage.

9.3 Impact des travaux

La proposition fournie par le maitre d'œuvre a été intégrée dans le modèle HEC RAS.

Afin de quantifier l'impact des travaux envisagés, les crues centennale et millénale sont simulées et analysées.

Pour chaque crue, les maximums des hauteurs d'eau, des vitesses d'écoulement et des forces tractrices sont cartographiées.

Les cotes d'élévation de la surface d'eau, les vitesses d'écoulement maximales et les forces tractrices sont indiquées dans un tableau récapitulatif au droit de chacun des ouvrages du projet.

De plus, une comparaison avec l'état actuel est réalisée au droit de chacun des ouvrages du projet.

9.3.1 Crue centennale

Les caractéristiques des conditions d'écoulement au niveau des ouvrages envisagés pour la crue centennale sont présentes dans le tableau suivant :

Lieu	Elévation de la surface d'eau (m NGR)		Vitesses d'écoulement maximales (m/s)		Forces tractrices au niveau de la rive gauche (N/m^2)		Forces tractrices au niveau du lit mineur (N/m^2)		Forces tractrices au niveau de la rive droite (N/m^2)	
	Etat projet	Différence avec l'état actuel	Etat projet	Différence avec l'état actuel	Etat projet	Différence avec l'état actuel	Etat projet	Différence avec l'état actuel	Etat projet	Différence avec l'état actuel
Route digue Aloès-Bas du Ruisseau (PK BC3700)	167	+1	7.5	-0.1	300	0	750	0	300	0
OA1	186	+0.1	9	0	500	0	600	0	500	0
OA2 aval	195.5	+0.2	10	0	700	0	1050	0	900	0
OA2 amont	202.5	+1	11	0	1000	0	1100	0	800	0
Route digue Ilet Furcy (PK BC6400)	219	-0.1	9.5	0	250	0	600	0	400	0
OA3	231.5	+0.5	11.5	0	700	0	1600	0	700	0

Tableau 53 : Caractéristiques des conditions d'écoulement au niveau des ouvrages envisagés pour la crue centennale

Le profil en long de la ligne d'eau et de la ligne de charge pour la crue centennale du Bras de Cilaos sur la zone d'étude en état projet APSIQ 2010 est disponible ci – dessous.

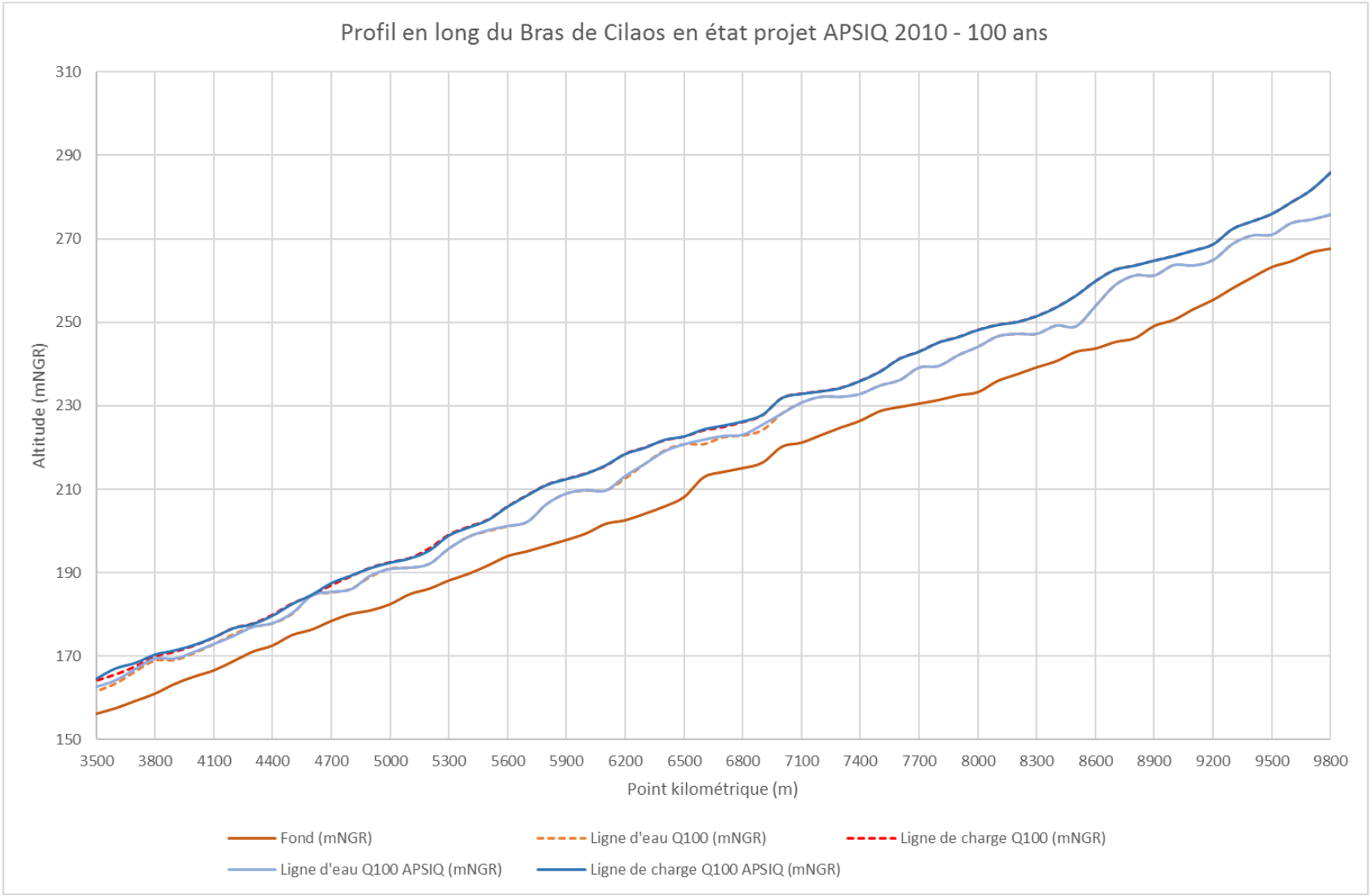


Figure 101 : Profil en long du Bras de Cilaos en état projet APSIQ 2010 - 100 ans

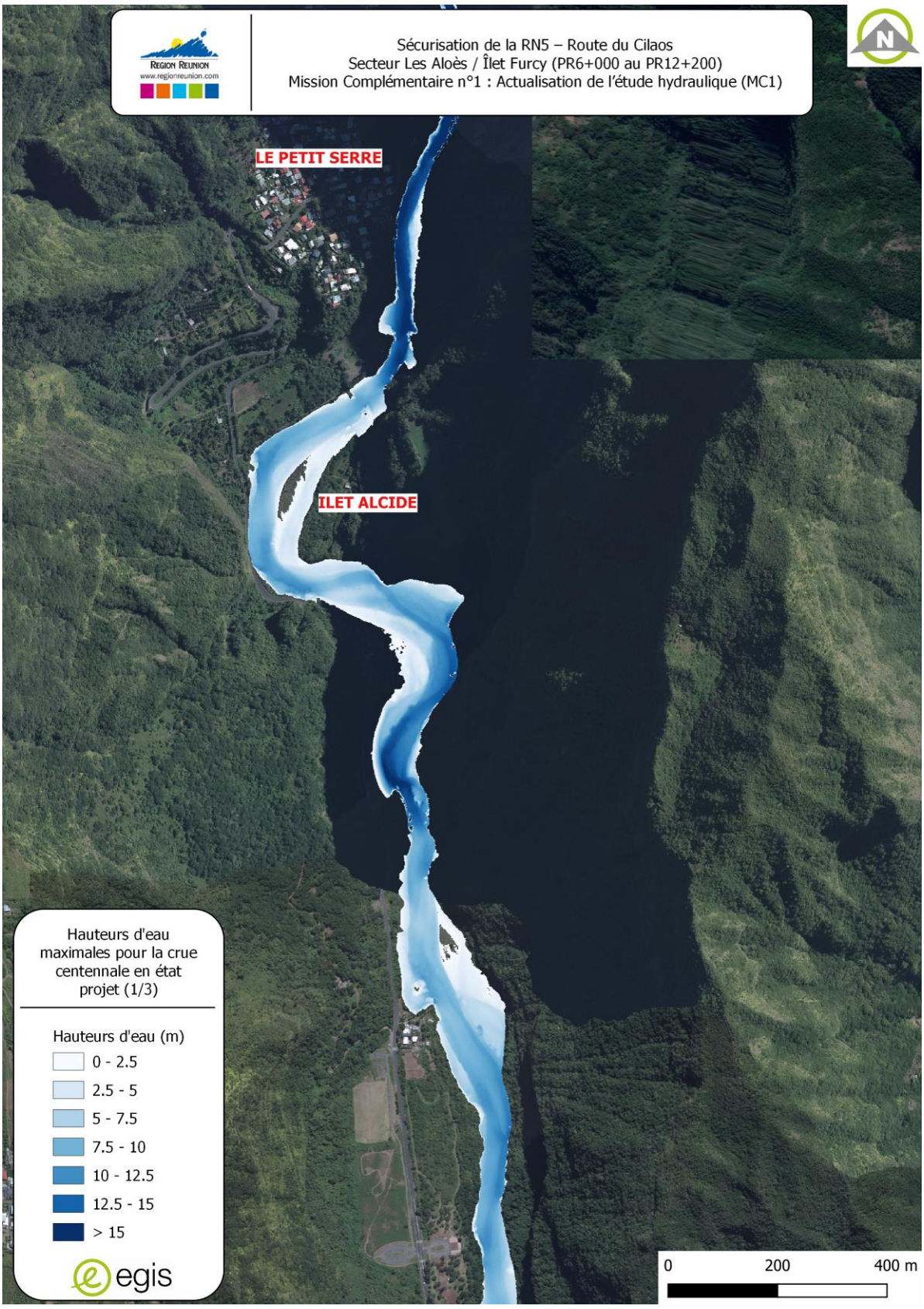


Figure 102 : Cartographie des hauteurs d'eau maximales pour la crue centennale en état projet (1/3)

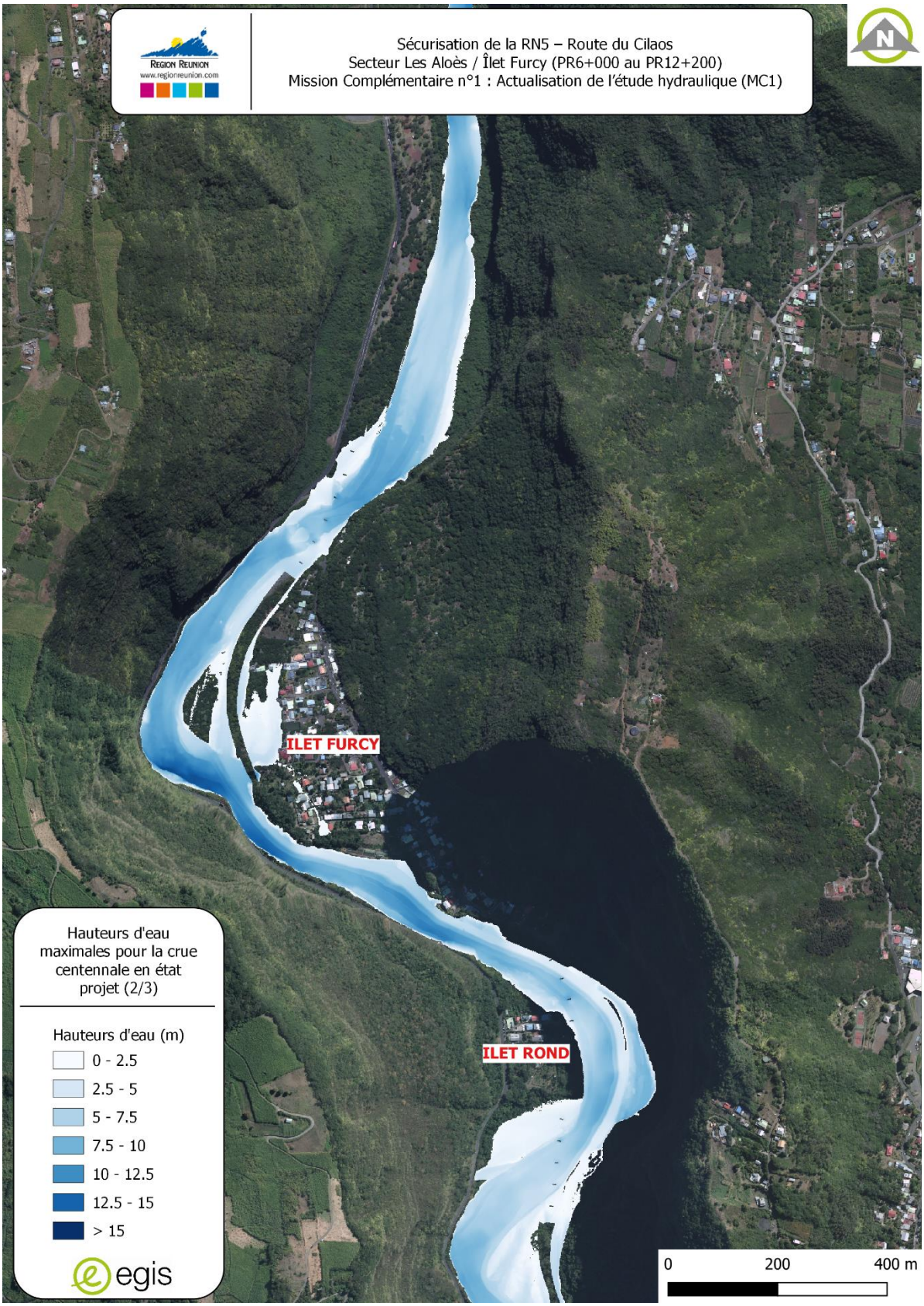


Figure 103 : Cartographie des hauteurs d'eau maximales pour la crue centennale en état projet (2/3)

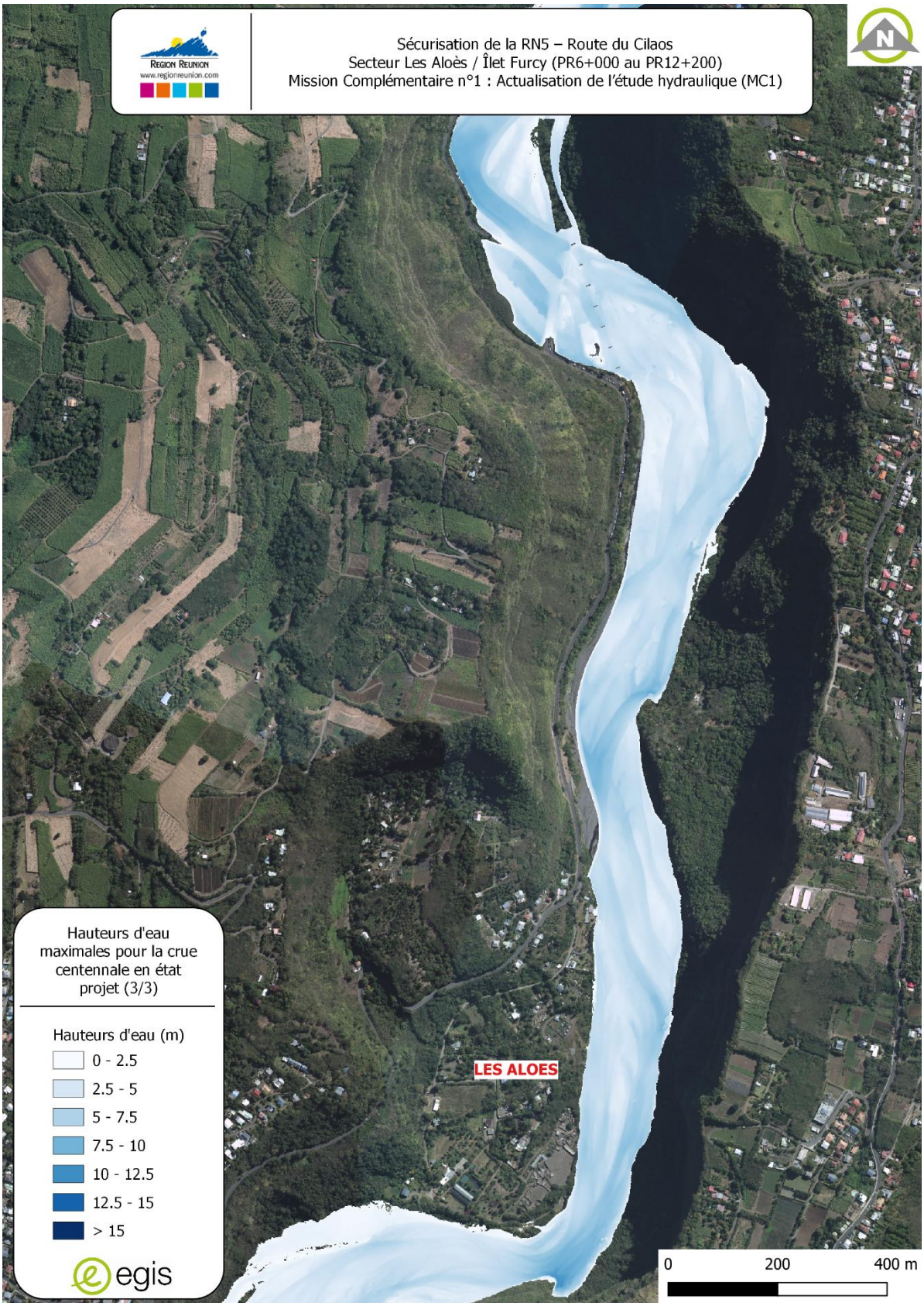


Figure 104 : Cartographie des hauteurs d'eau maximales pour la crue centennale en état projet (3/3)

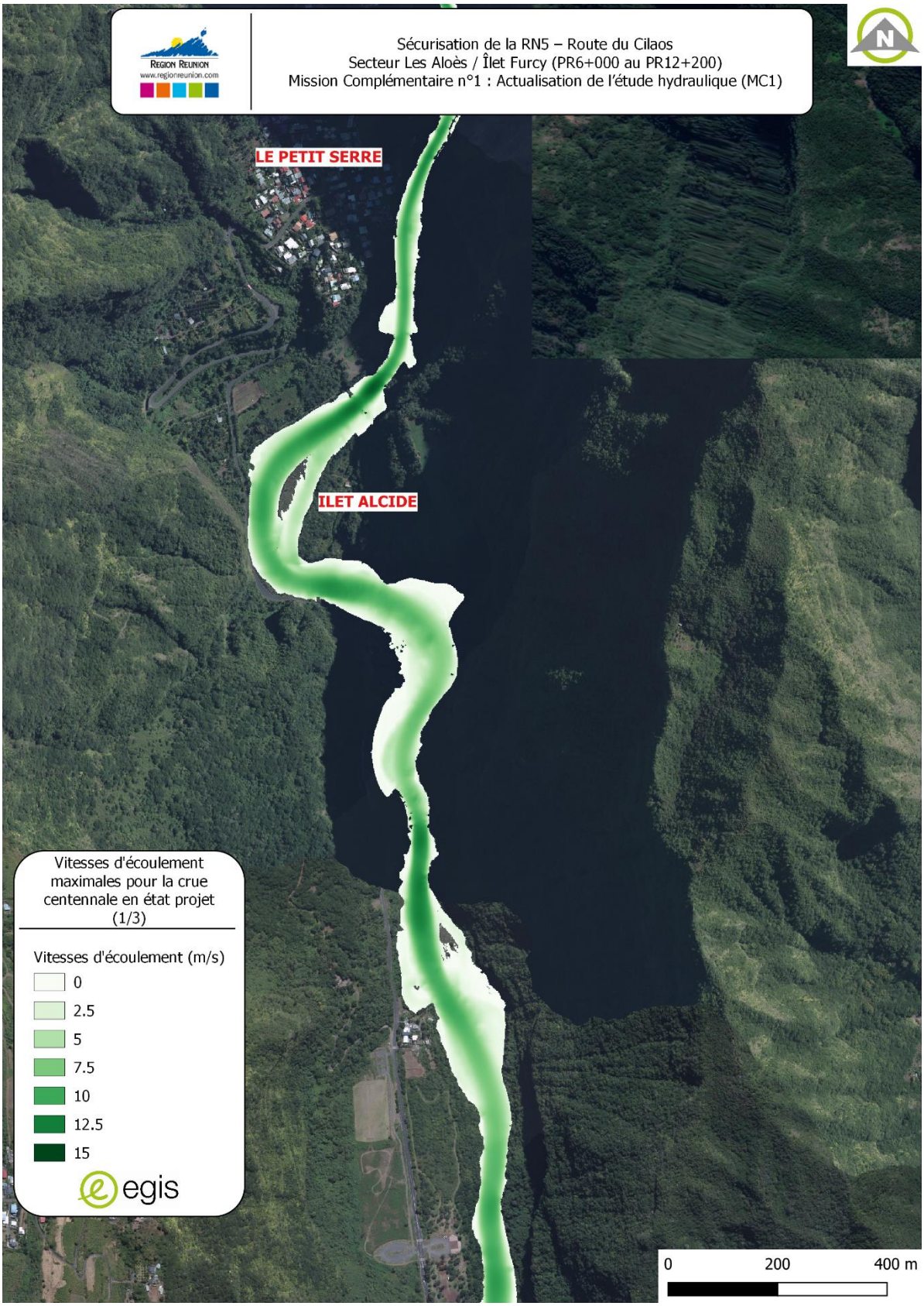


Figure 105 : Cartographie des vitesses d'écoulement maximales pour la crue centennale en état projet (1/3)

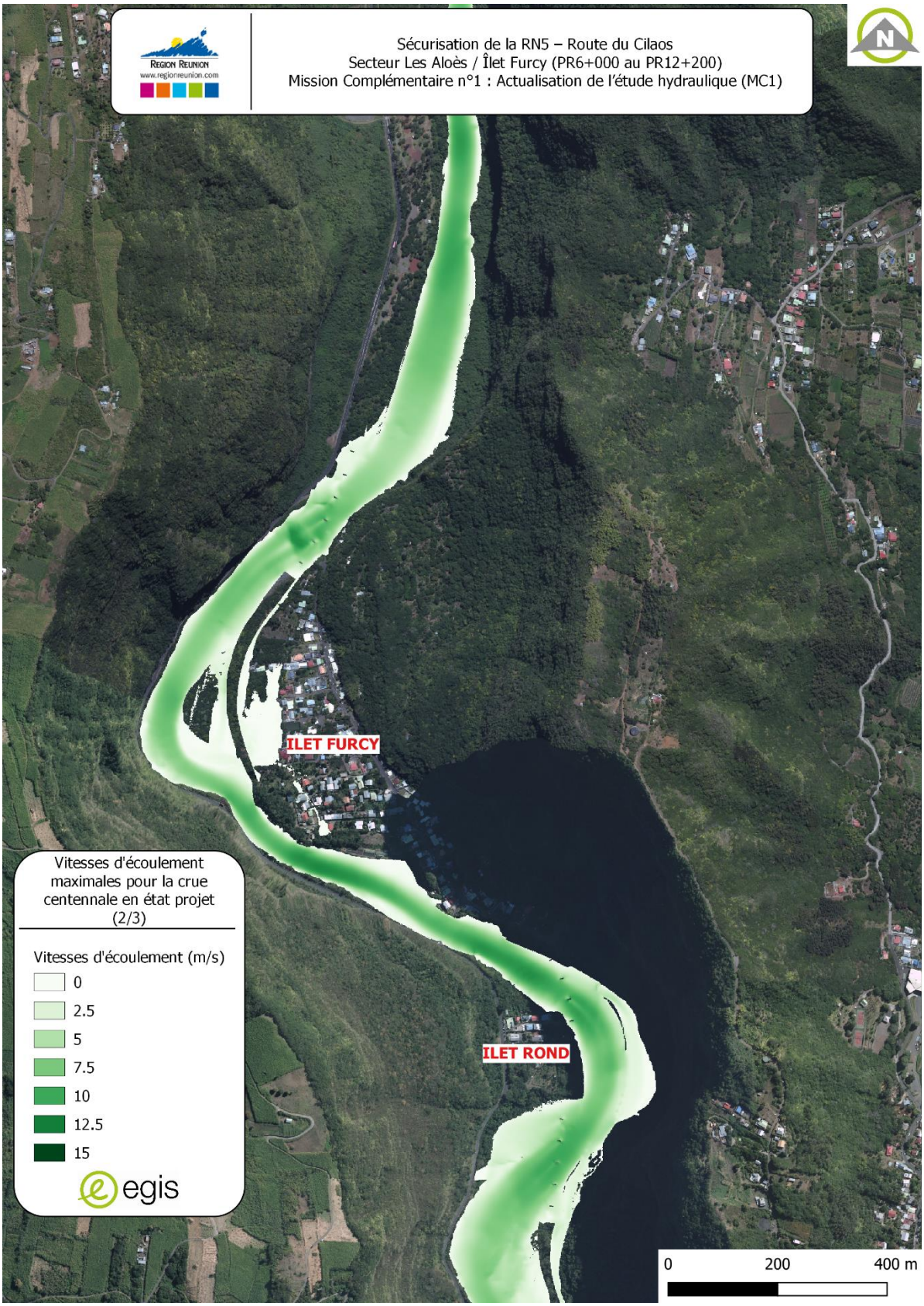


Figure 106 : Cartographie des vitesses d'écoulement maximales pour la crue centennale en état projet (2/3)

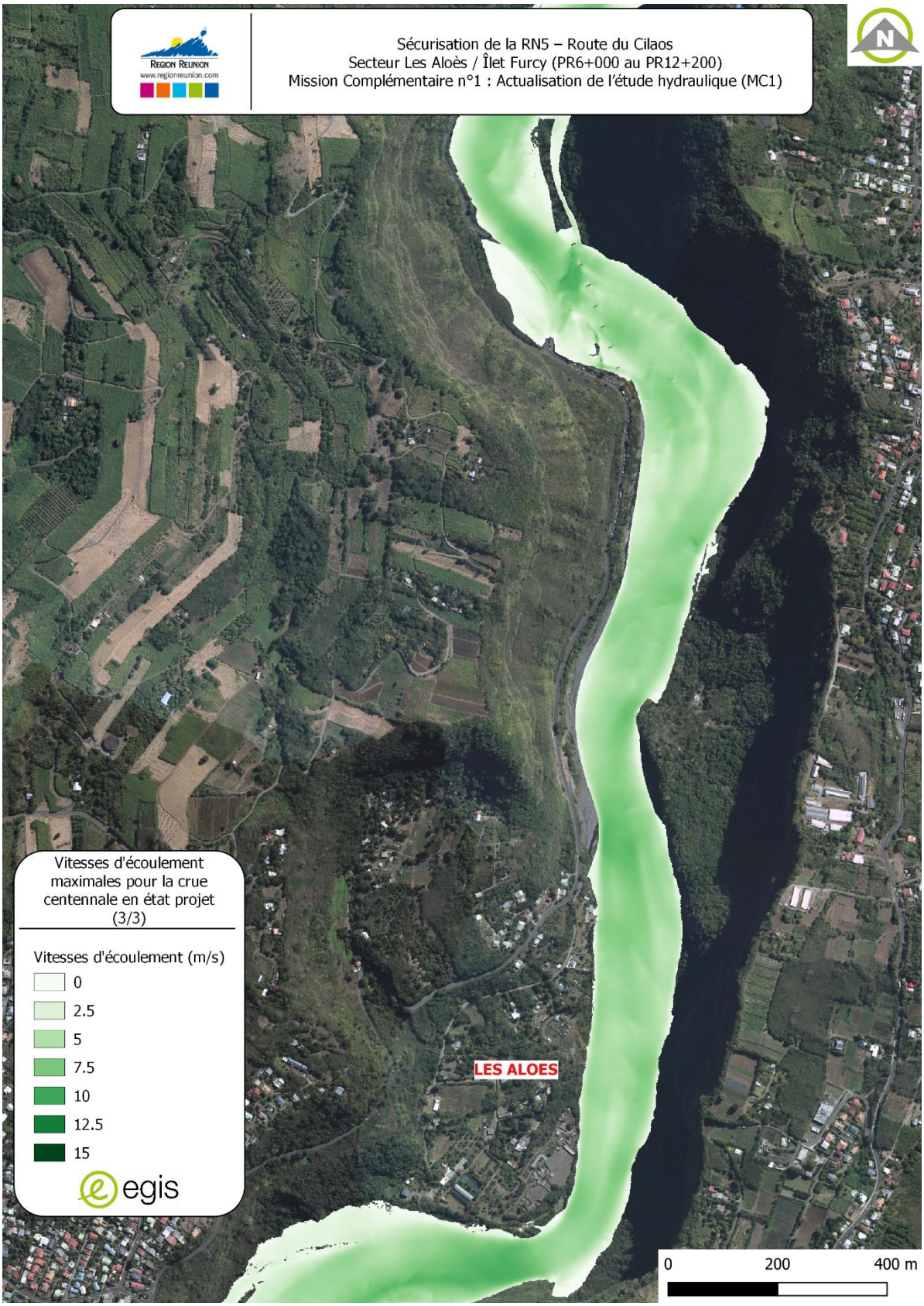


Figure 107 : Cartographie des vitesses d'écoulement maximales pour la crue centennale en état projet (3/3)

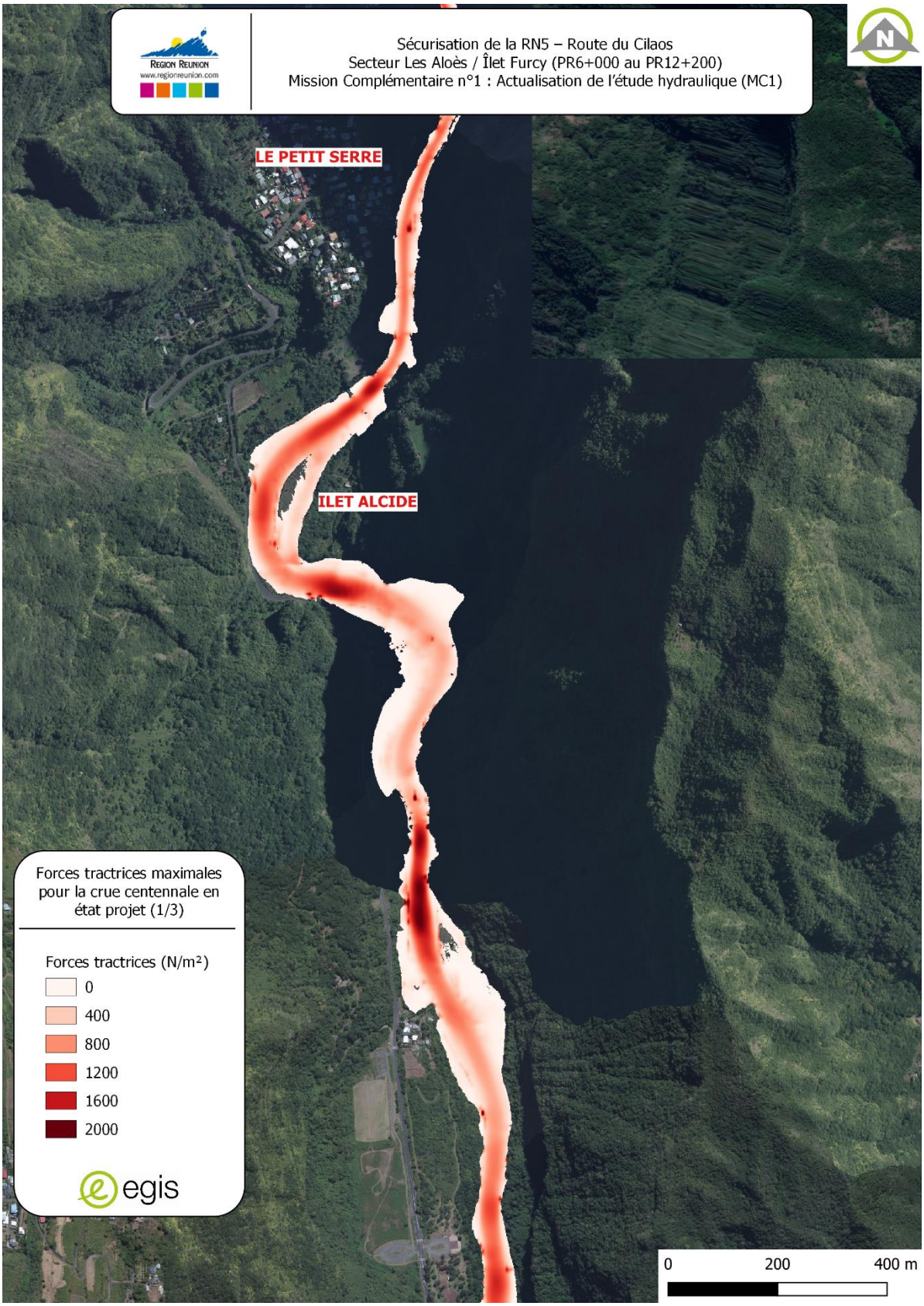


Figure 108 : Cartographie des forces tractrices maximales pour la crue centennale en état projet (1/3)

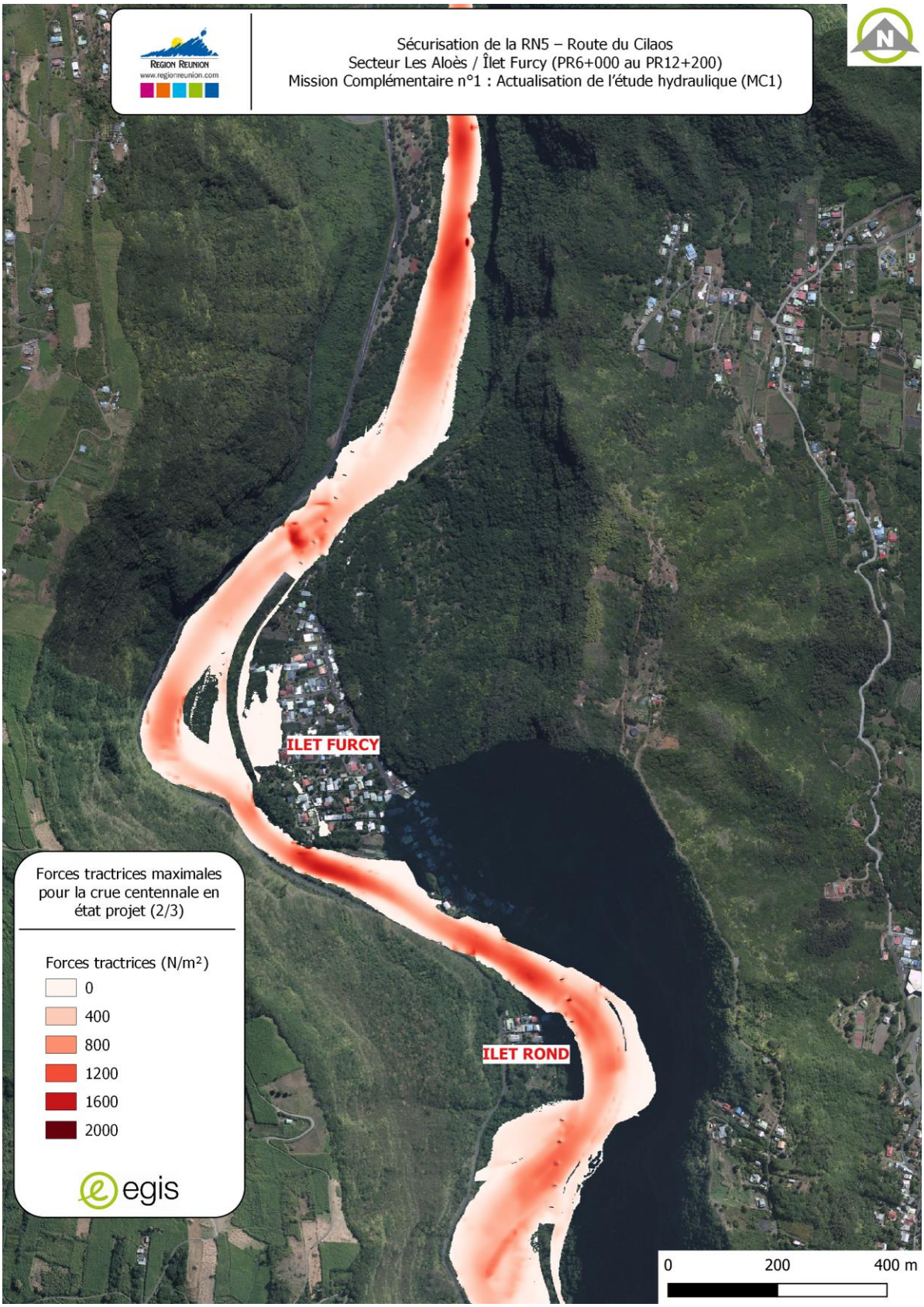


Figure 109 : Cartographie des forces tractrices maximales pour la crue centennale en état projet (2/3)

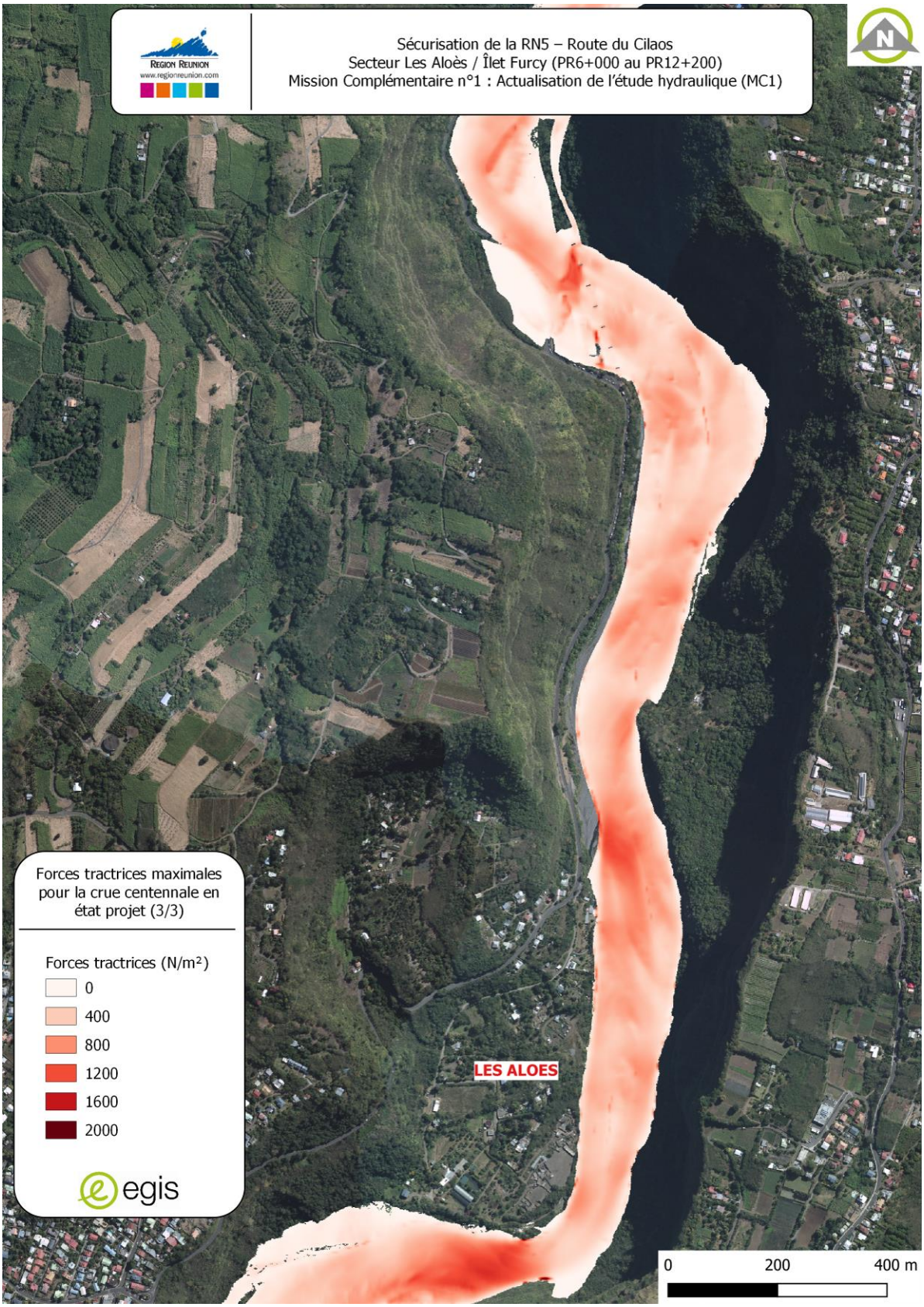


Figure 110 : Cartographie des forces tractrices maximales pour la crue centennale en état projet (3/3)

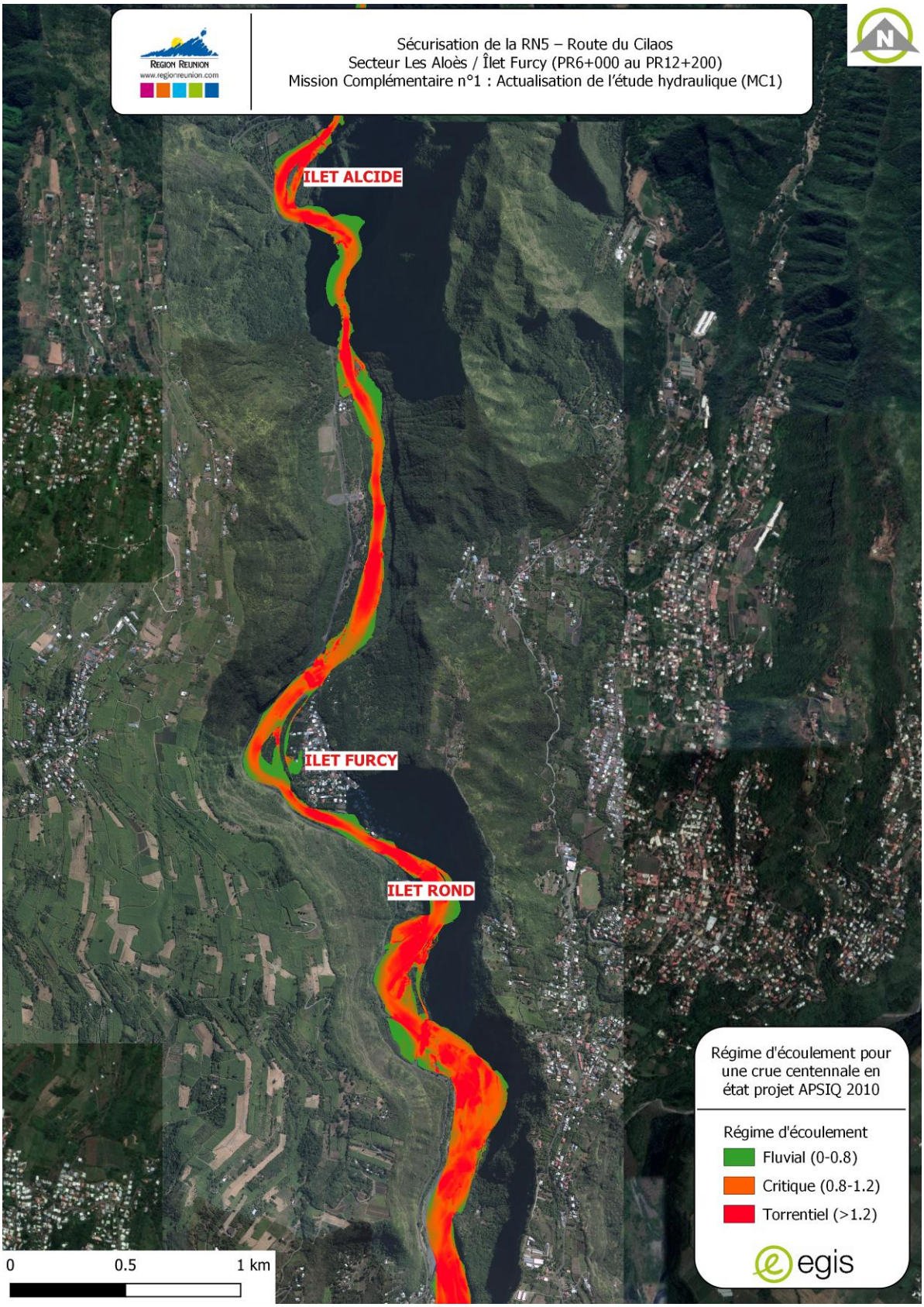


Figure 111 : Cartographie du régime d'écoulement pour la crue centennale en état projet

9.3.2 Crue millénale

Les caractéristiques des conditions d'écoulement au niveau des ouvrages envisagés pour la crue millénale sont présentes dans le tableau suivant :

Lieu	Elévation de la surface d'eau (m NGR)		Vitesses d'écoulement maximales (m/s)		Forces tractrices au niveau de la rive gauche (N/m^2)		Forces tractrices au niveau du lit mineur (N/m^2)		Forces tractrices au niveau de la rive droite (N/m^2)	
	Etat projet	Différence avec l'état actuel	Etat projet	Différence avec l'état actuel	Etat projet	Différence avec l'état actuel	Etat projet	Différence avec l'état actuel	Etat projet	Différence avec l'état actuel
Route digue Aloès-Bas du Ruisseau (PK BC3700)	169.5	+1.5	9	-0.3	350	0	1200	0	350	0
OA1	186.5	+0.1	11	0	750	0	1450	0	750	0
OA2 aval	196	+0.1	12	0	1000	0	1250	0	1000	0
OA2 amont	203.5	+0.1	14	0	1200	0	2000	0	1100	0
Route digue Ilet Furcy (PK BC6400)	223.5	-0.3	10.5	0	550	0	900	0	700	0
OA3	233.5	+0.3	13.5	0	900	0	2100	0	850	0

Tableau 54 : Caractéristiques des conditions d'écoulement au niveau des ouvrages envisagés pour la crue millénale

Le profil en long de la ligne d'eau et de la ligne de charge pour la crue millénale du Bras de Cilaos sur la zone d'étude en état projet APSIQ 2010 est disponible ci – dessous.

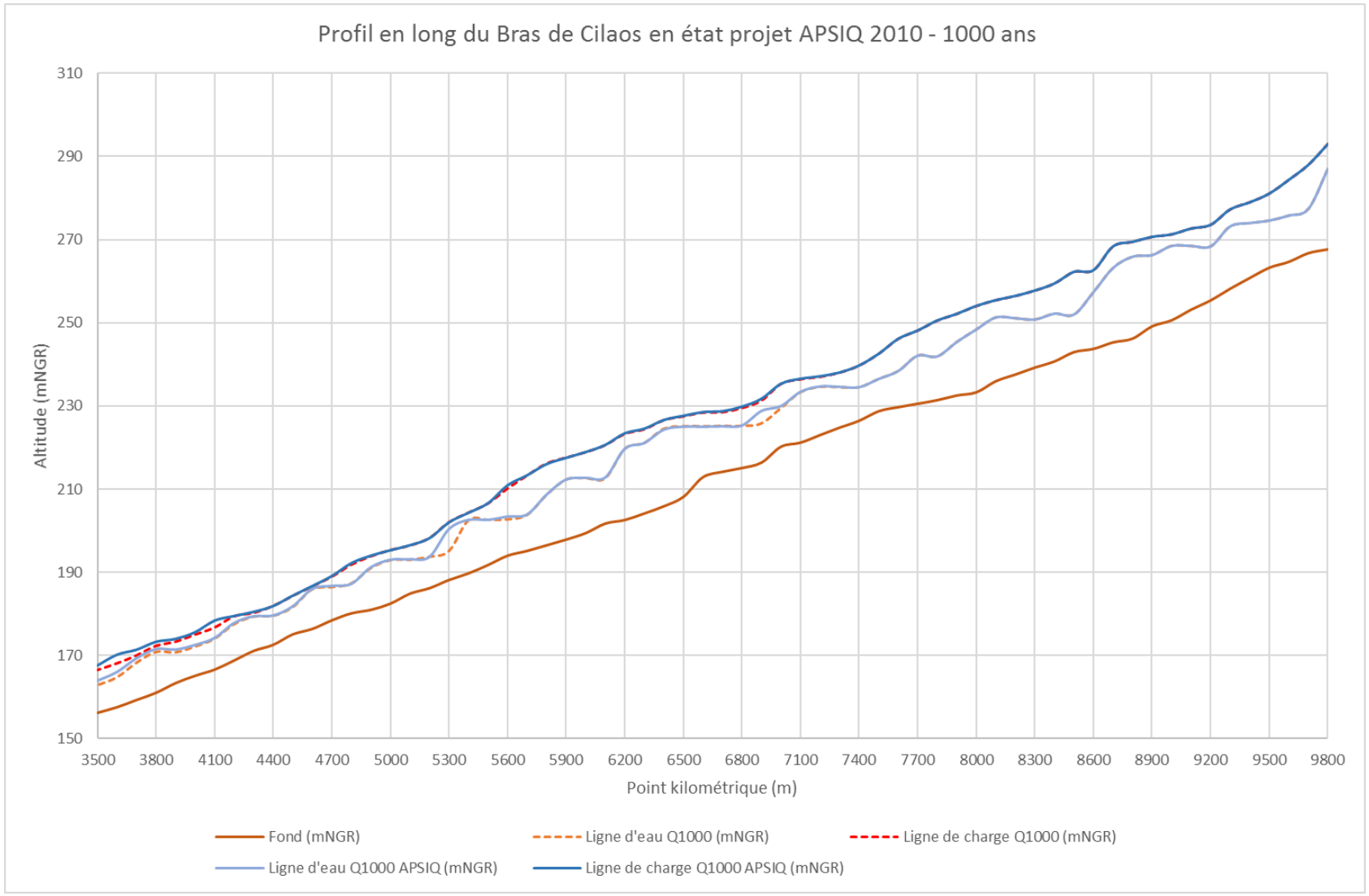


Figure 112 : Profil en long du Bras de Cilaos en état projet APSIQ 2010 - 1000 ans

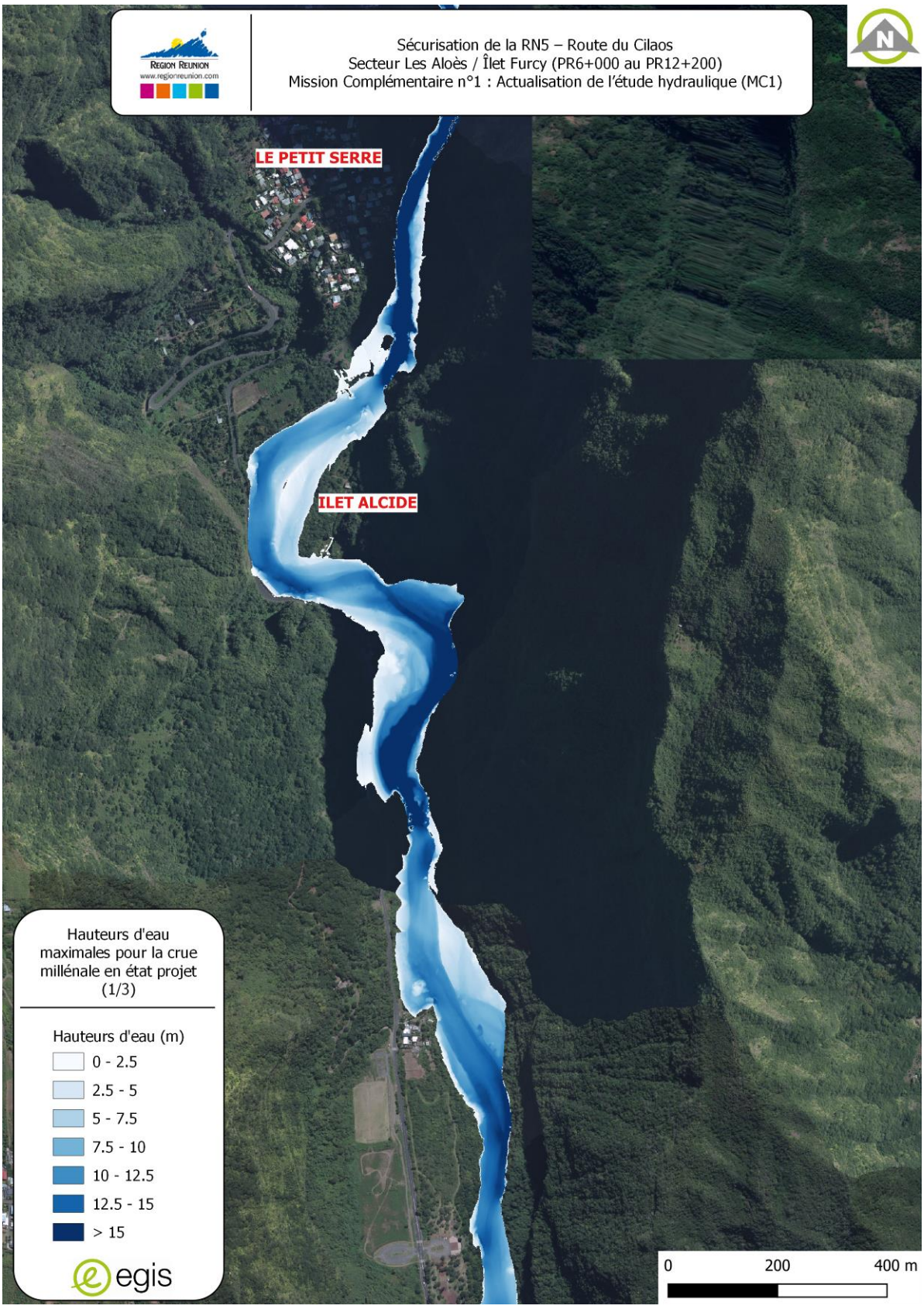


Figure 113 : Cartographie des hauteurs d'eau maximales pour la crue millénale en état projet (1/3)

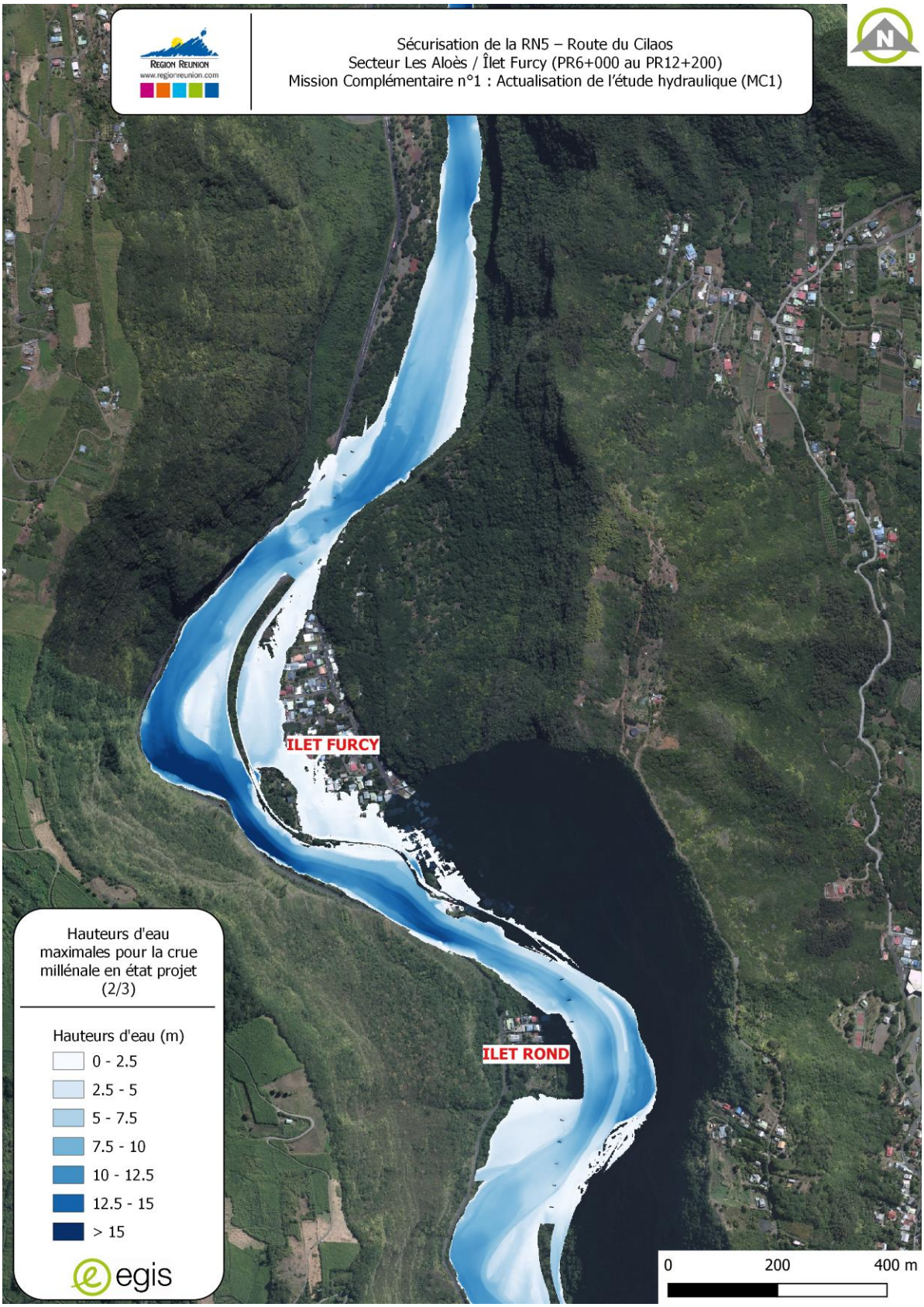


Figure 114 : Cartographie des hauteurs d'eau maximales pour la crue millénale en état projet (2/3)

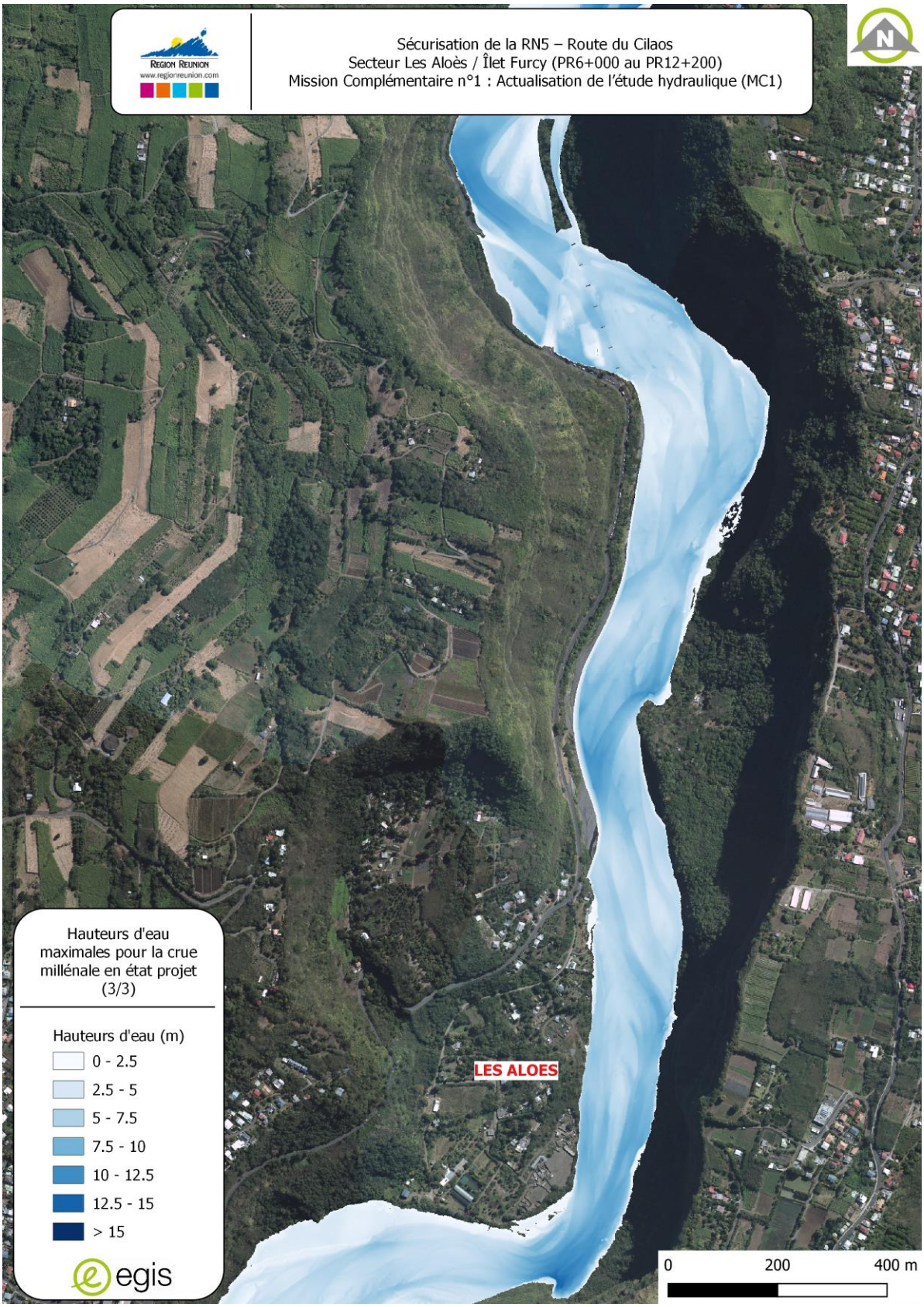


Figure 115 : Cartographie des hauteurs d'eau maximales pour la crue millénale en état projet (3/3)

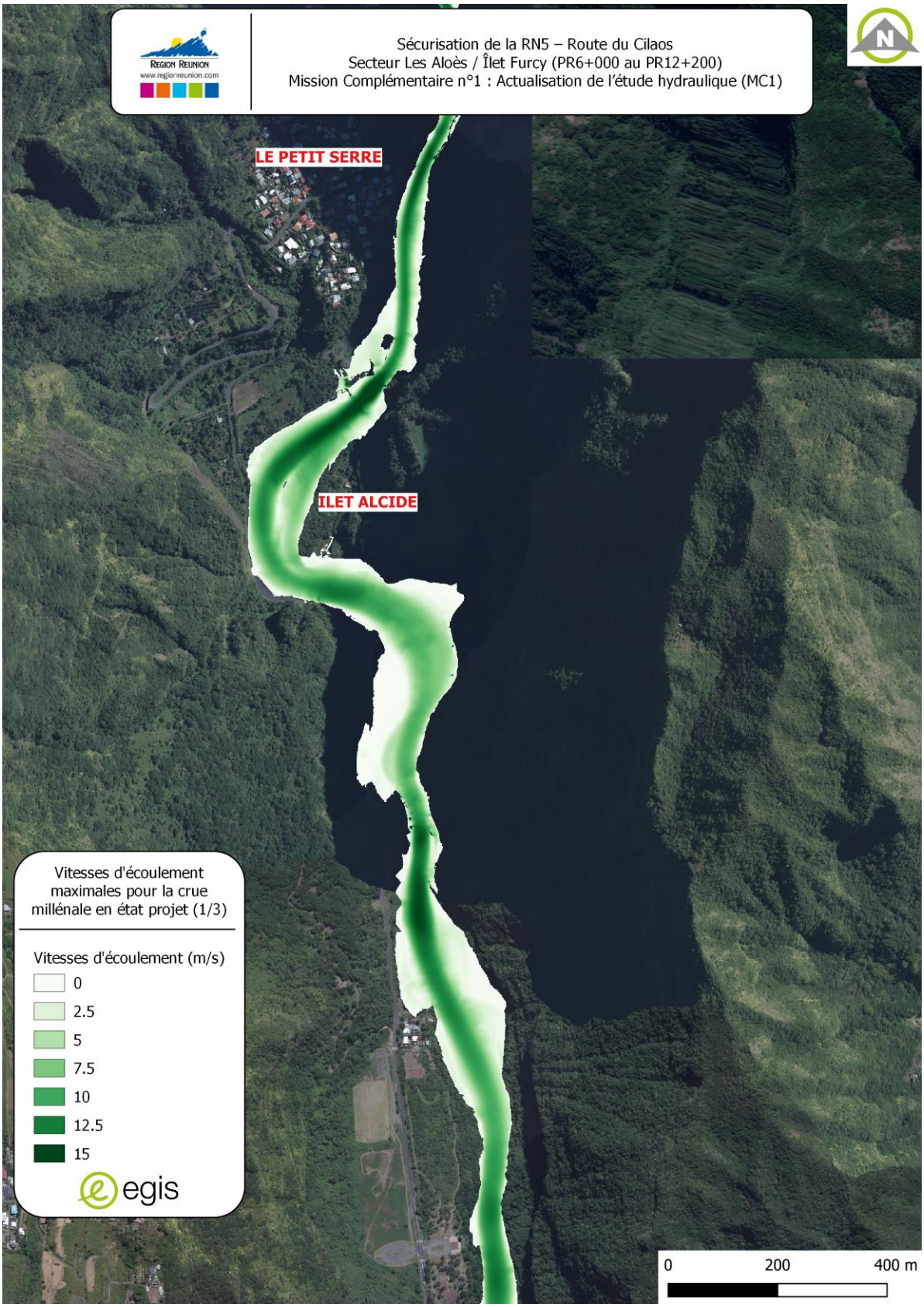


Figure 116 : Cartographie des vitesses d'écoulement maximales pour la crue millénale en état projet (1/3)

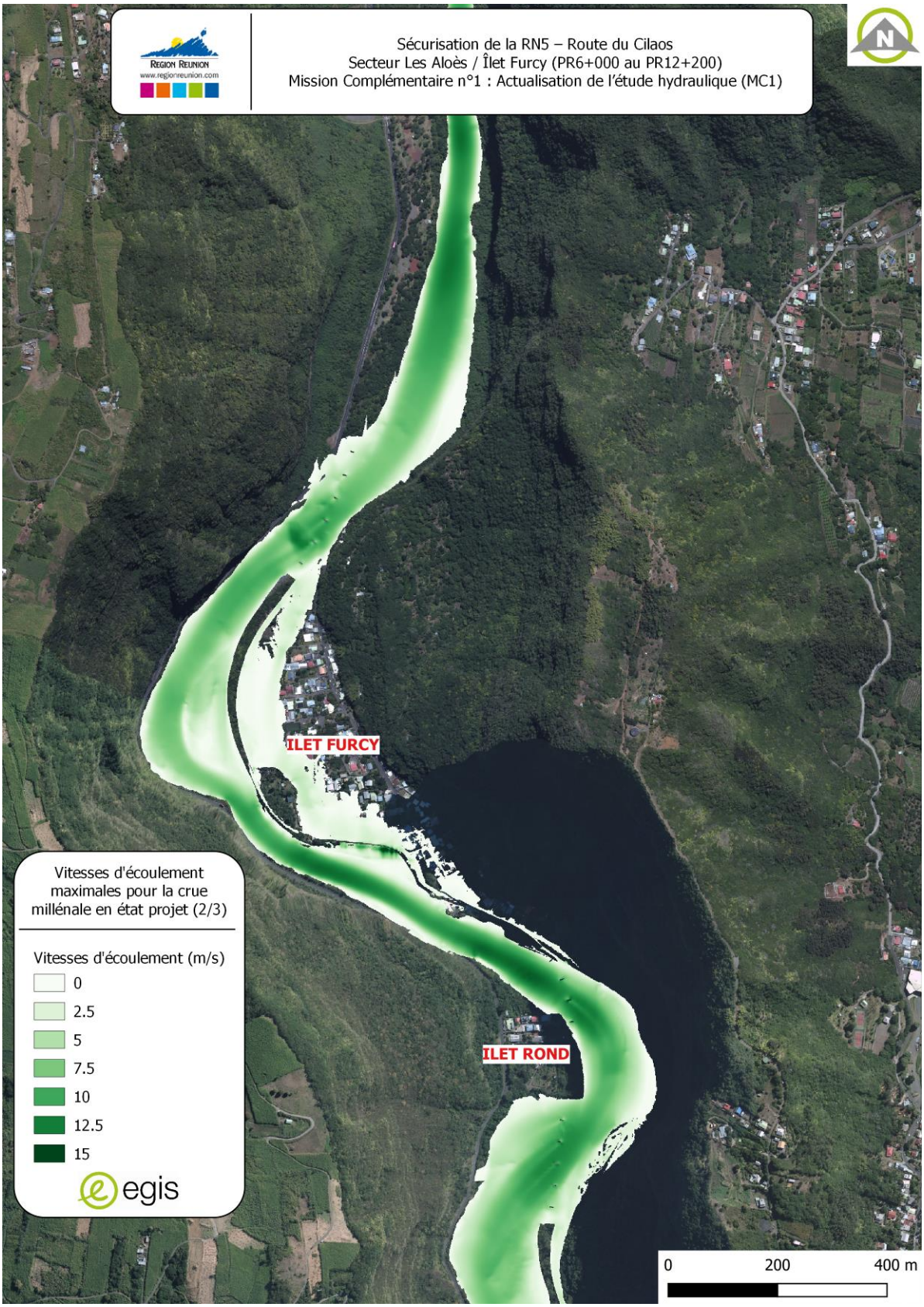


Figure 117 : Cartographie des vitesses d'écoulement maximales pour la crue millénale en état projet (2/3)

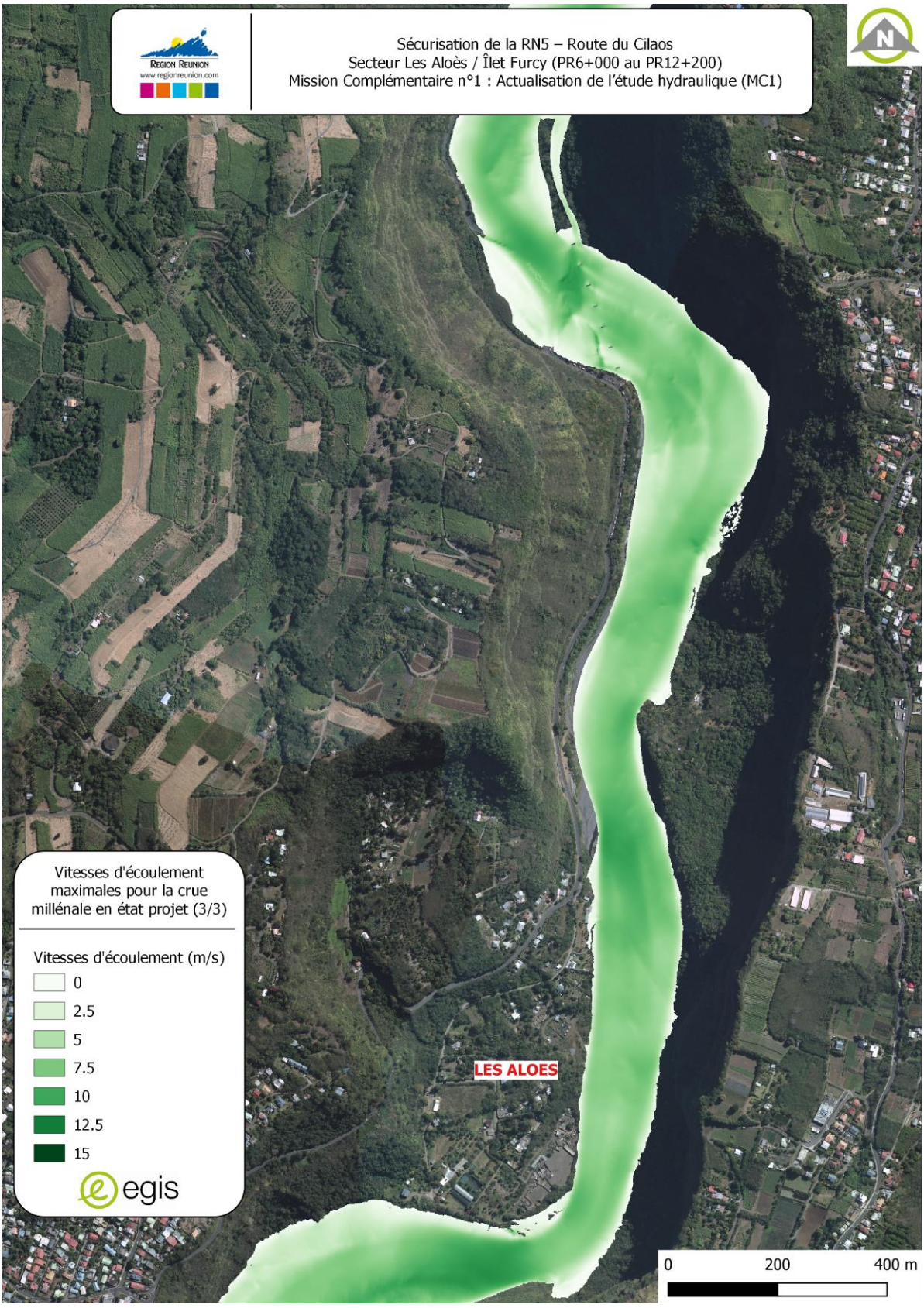


Figure 118 : Cartographie des vitesses d'écoulement maximales pour la crue millénale en état projet (3/3)

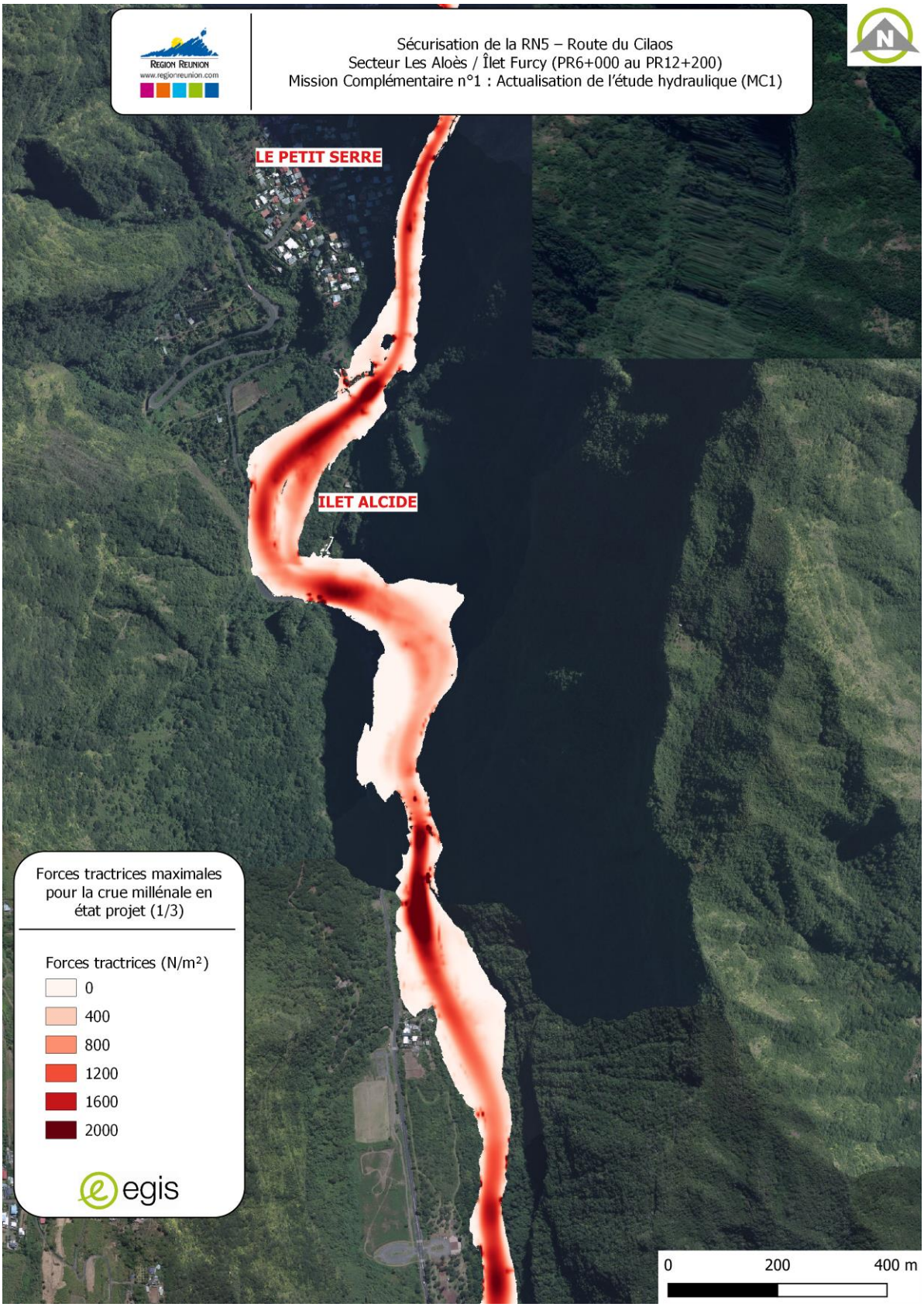


Figure 119 : Cartographie des forces tractrices maximales pour la crue millénale en état projet (1/3)

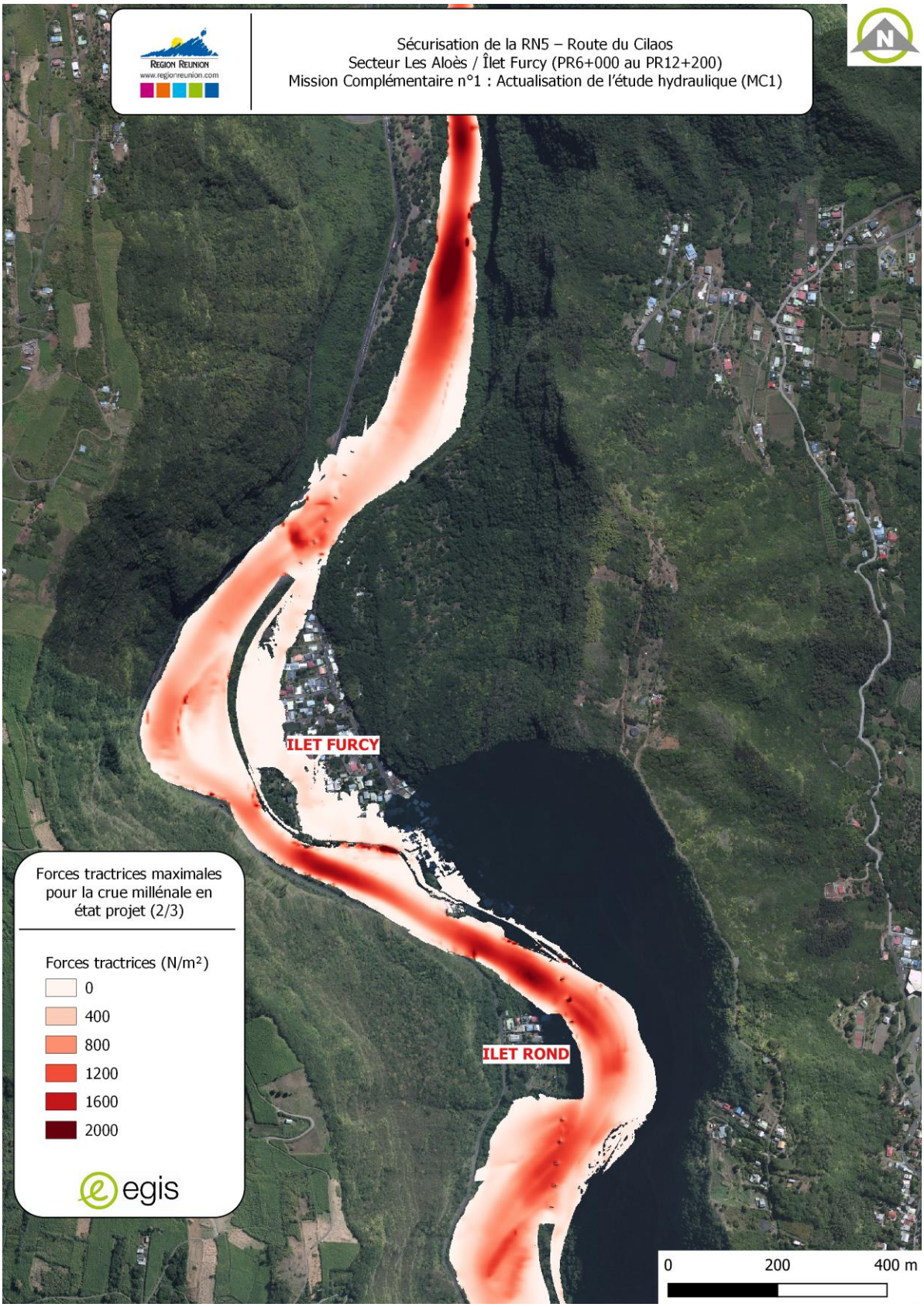


Figure 120 : Cartographie des forces tractrices maximales pour la crue millénale en état projet (2/3)

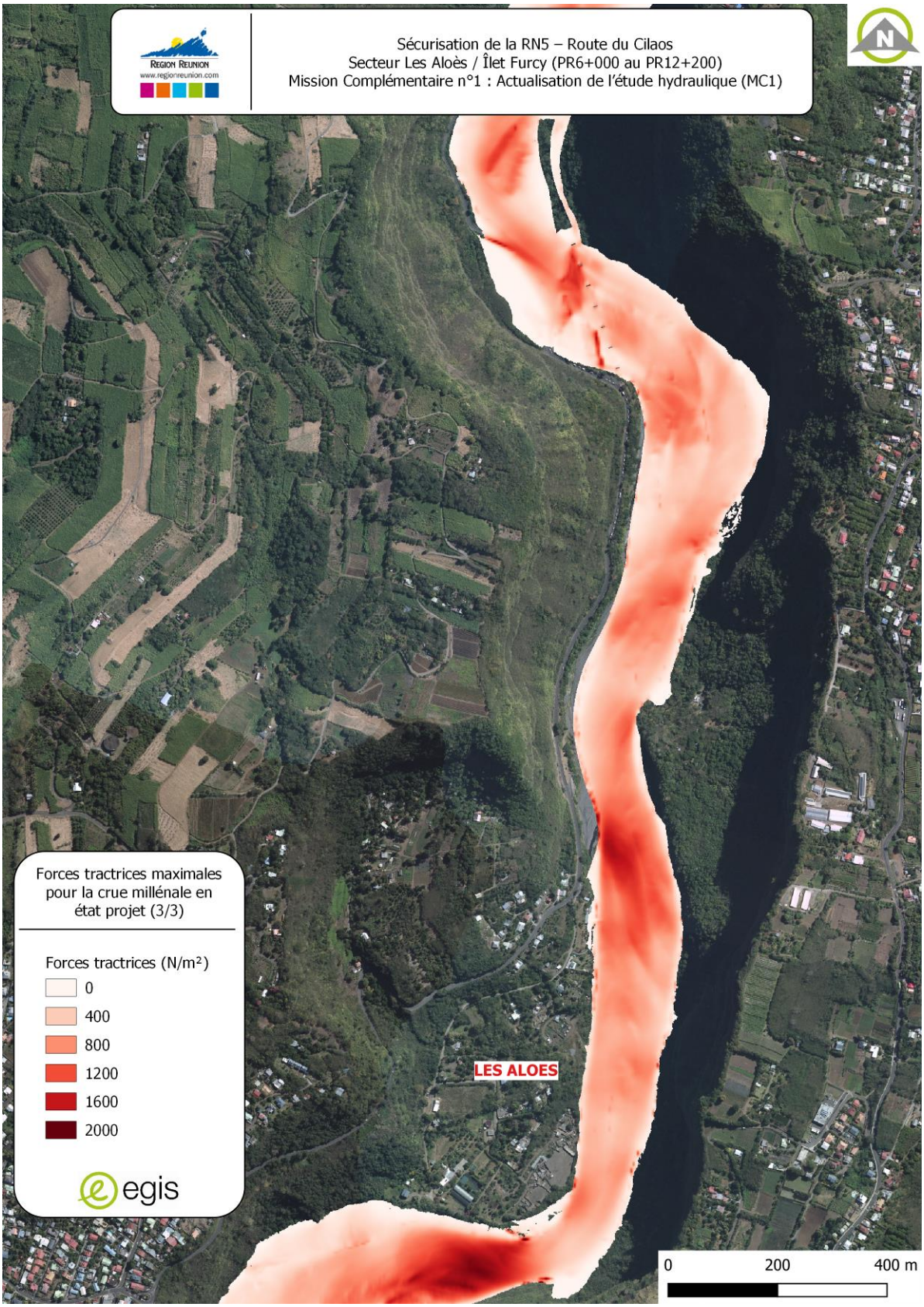


Figure 121 : Cartographie des forces tractrices maximales pour la crue millénale en état projet (3/3)

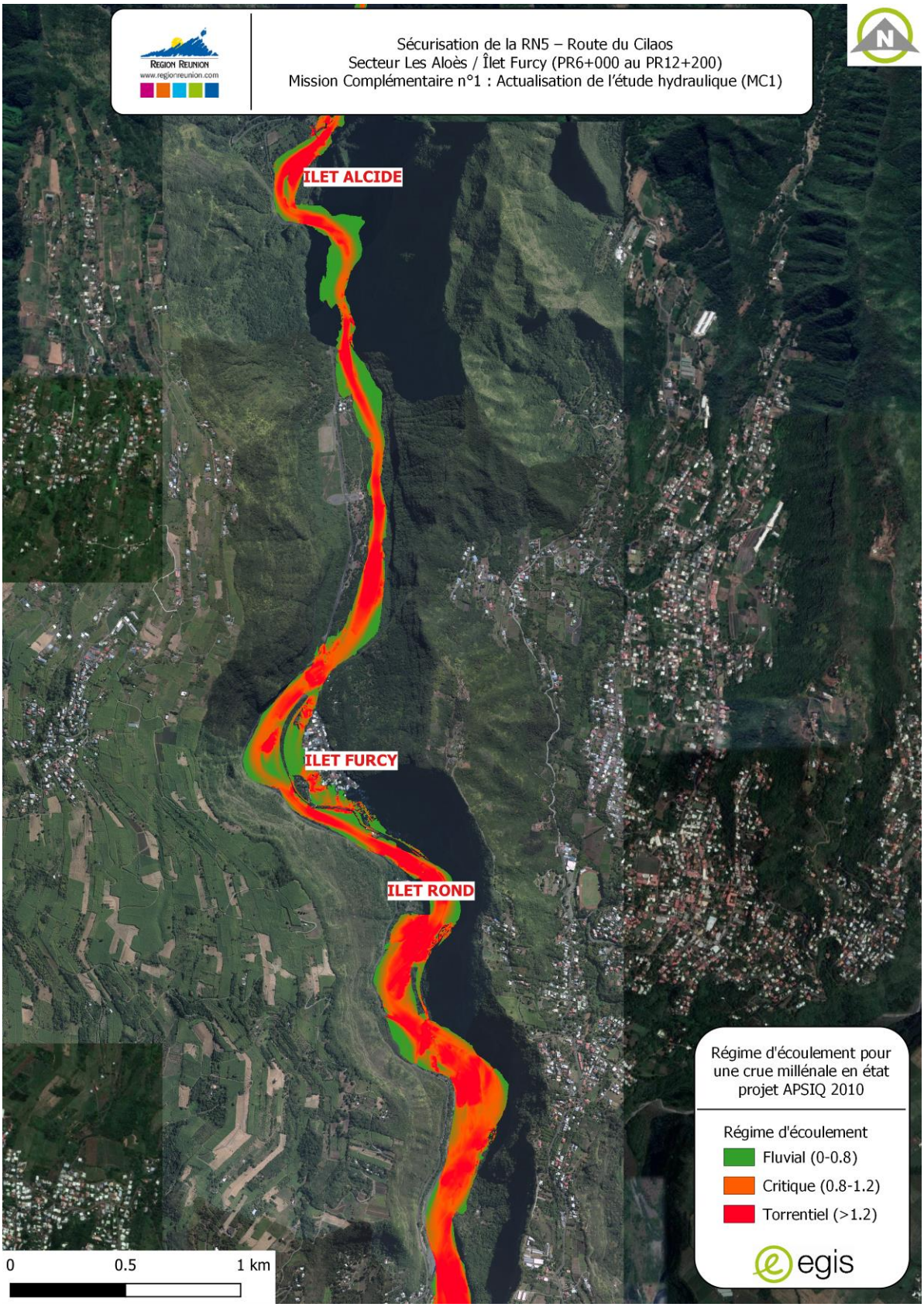


Figure 122 : Cartographie du régime d'écoulement pour la crue millénale en état projet

9.3.3 Analyse et description des résultats

Les secteurs Ilet Alcide, Rampe des Sables et Ilet Long ne présentent pas de modifications par rapport à l'état actuel. Aucun impact concernant l'écoulement n'est donc recensé par rapport à l'état actuel.

Secteur Ilet Furcy

Le secteur d'Ilet Furcy est concerné par le tracé proposé dans l'APSIQ 2010 via l'ouvrage de franchissement OA3 et la route digue longeant l'Ilet. Ces structures perturbent fortement l'écoulement :

- Les piles de l'OA3 dans le lit mineur du Bras de Cilaos augmentent la ligne d'eau et diminuent les vitesses d'écoulement localement (au droit des piles) ;
- La localisation de l'extrémité de la route digue au niveau du lit majeur du cours d'eau scinde l'écoulement en deux et provoque une inondation de l'Ilet Furcy. Le débordement en rive gauche du Bras de Cilaos est réduit par le remblais.

Le projet **provoque une augmentation de l'aléa débordement sur la zone habitée de l'ilet Furcy**.

Secteur Ilet Rond

Le secteur d'Ilet Rond comporte deux traversées du cours d'eau (OA2).

Le franchissement présentant au total 8 piles perturbe l'écoulement localement avec une rehausse de la ligne d'eau et une baisse de la vitesse d'écoulement.

Secteur Bas du Ruisseau

Le tronçon en route digue réduit l'emprise de débordement sur la rive gauche. Les écoulements en crue sont concentrés avec des hauteurs d'eau et des vitesses d'écoulement importantes.

Les piles de l'OA1 augmentent la ligne d'eau, diminuent les vitesses d'écoulement localement et augmentent le risque d'embâcle.

Secteur Aloès

La route digue se situant dans le lit actif du Bras de Cilaos réduit la section d'écoulement. Cette réduction d'écoulement provoque une montée des eaux sur tout le linéaire de l'ouvrage.

Une augmentation des vitesses en aval du linéaire est constatée.

9.4 Conclusion

L'analyse de l'APSIQ de 2010 met en évidence un certain nombre de contraintes fortes du point de vue hydraulique.

En premier lieu, **la route digue entre les Aloès et Bas du Ruisseau** se situe dans le lit actif du Bras de Cilaos et réduit la section d'écoulement existante. Les modélisations hydrauliques mettent en évidence une augmentation des niveaux de crue centennale de 1 m sur tout le linéaire de l'ouvrage, ainsi qu'une augmentation des vitesses d'écoulement a l'aval de la zone de travaux.

Du fait des vitesses d'écoulement constatées (7 à 8 m/s) et des risques d'affouillement afférents, cet ouvrage sera extrêmement difficile à protéger.

De manière générale **les ouvrages de franchissement** présentent un fort biais par rapport à l'axe d'écoulement du Bras de Cilaos, ce qui augmente le nombre de travées et le nombre d'appui en lit mineur du cours d'eau :

- Les axes de franchissement sont à redresser de manière à diminuer la longueur des ouvrages de franchissement et le nombre d'appuis.
- **Le nombre de piles est à diminuer drastiquement** : ces appuis constituent le principal risque de ruine des ouvrages de franchissement.

De manière générale :

- La présence de piles va influer fortement l'écoulement en augmentant la ligne d'eau et le dépôt de sédiments en amont du franchissement.
- Le nombre de piles augmente le risque d'attaque directe des appuis par **des bras vifs** tels que constatés sur la rivière Saint Etienne, même pour des crues courantes.
- Le biais du franchissement par rapport à l'écoulement associé au nombre de piles dans le lit, risque avec une très forte probabilité de générer un phénomène d'embâcles mettant en péril l'ouvrage.

La modélisation hydraulique a mis en évidence que la localisation de l'extrémité de la route digue au niveau du lit majeur du cours d'eau scinde l'écoulement en deux et provoque **une inondation de l'Ilet Furcy**. Cette problématique sera à corriger par une prolongation de la route digue en amont de l'accès à l'ilet.

Afin d'améliorer hydrauliquement la proposition établie dans l'APSIQ de 2010, plusieurs variantes sont à l'étude au stade de la concertation. Elles sont analysées dans le chapitre suivant.

10. Analyse des variantes

Les variantes proposées au stade de la concertation sont présentées sur la figure suivante :

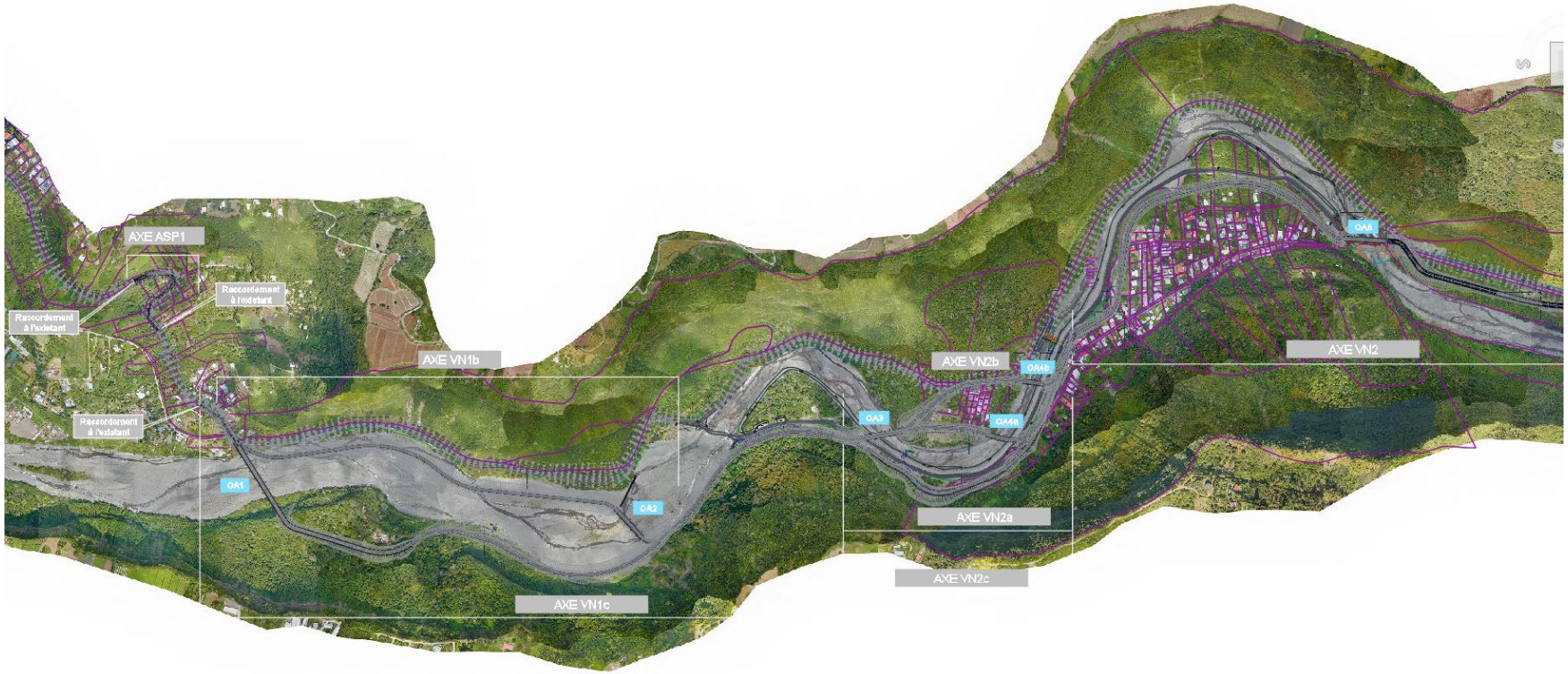


Figure 123 : Variantes à l'étude au stade de la concertation

10.1 Variantes VN1

Trois tracés sont à l'étude sur la VN1 :

- **VN1 A** : Tunnel
- **VN1 B** : Route digue sur la rive droite
- **VN1 C** : Passage sur la rive gauche

La variante VN1A n'est pas concernée par cette analyse car son tracé ne longe pas les berges du bras de Cilaos.

Les variantes VN1 B et VN1 C sont comparées selon les critères suivants :

- Caractéristiques de l'écoulement pour une crue centennale : hauteurs d'eau et vitesses d'écoulement,
- Impact sur les ouvrages de franchissement (portée, localisation…)
- Nécessité de protection en fonction de la nature des berges
- Impact sur les modifications de la section d'écoulement

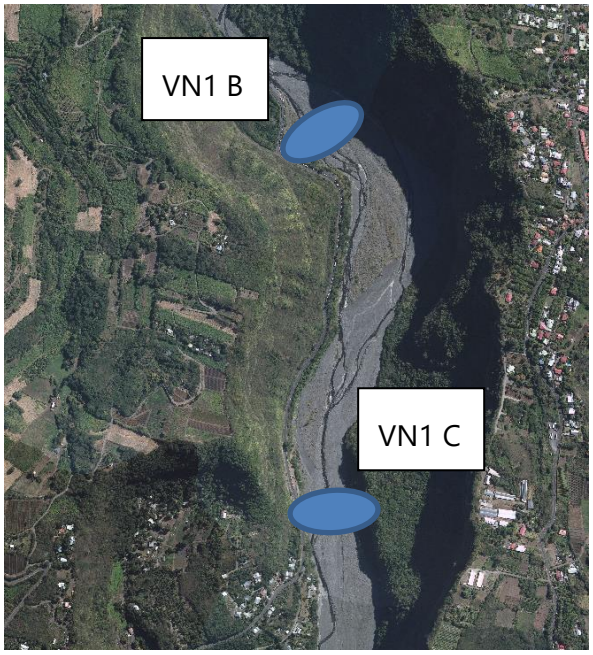
- **Caractéristiques de l'écoulement pour une crue centennale : hauteurs d'eau et vitesses d'écoulement**

Figure 124 : Représentation des hauteurs d'eau et des vitesses d'écoulement sur le linéaire du tracé VN1 (crue centennale)

Sur ce secteur, les vitesses d'écoulement varient entre 3 m/s et 9 m/s et les hauteurs d'eau peuvent atteindre 7 m de hauteur.

- Au sortir de la Rampe des Aloès et sur un linéaire de 200m : la rive droite est plus exposée que la rive gauche : il est observé des vitesses de l'ordre de 7 m/s en rive droite, de 4 à 5 m/s en rive gauche du fait de la protection opérée par l'éperon rocheux situé en amont. L'effet de l'éperon se traduit également par des cotes de crue supérieures en rive droite de 1.20 m par rapport de la rive gauche.
- Au droit de l'éperon rocheux situé en rive gauche, il est observé une surcote évaluée à près de 3 m. Ce point devra faire l'objet d'une analyse particulière pour le tracé retenu.
- En amont de l'éperon, la situation s'inverse et c'est la rive gauche qui est le plus exposée aux courants (avec des vitesses de l'ordre de 6-7 m/s) sur 380m.
- Dans le coude, en rive droite, les vitesses sont fortes, comprises entre 5 à 8 m/s.

- **Impact sur les ouvrages de franchissement**



La longueur des différents ouvrages de franchissement pour les deux variantes étudiées est relativement importante (de l'ordre de 150 à 200 m). Ils présenteront ainsi au minimum une pile dans le lit mineur avec des vitesses relativement conséquentes (7 à 8 m/s).

Concernant l'ouvrage de la variante VN1 C, les culées se situeront sur du rocher massif. Pour l'ouvrage de la variante VN1 B, la culée de la rive droite est localisée sur un encaissant meuble. Cette configuration sera donc plus complexe à traiter pour la protection contre les affouillements.

Figure 125 : Localisation des ouvrages de franchissement

- **Nécessité de protection en fonction de la nature des berges**

La variante VN1 B intègre la construction d'une route digue sur la rive droite dans le lit actif du cours d'eau. Cette solution nécessite de protéger les talus de l'infrastructure routière sur un linéaire de 1 km contre le risque d'affouillement.

La variante VN1 C intègre un tracé sur la rive gauche passant par deux secteurs présentant des terrains meubles, facilement affouillables. Ces tronçons sont évalués à un linéaire de 700 à 800 m.

Variante VN1 B

Variante VN1 C

Figure 126 : Localisation des protections contre le risque de l'affouillement

A noter que positionner la route sur la terrasse située en surplomb du bras de Cilaos en rive gauche permet de se prémunir contre les risques hydrauliques et constitue donc une solution intéressante.

- **Impact sur les modifications de la section d'écoulement**

La variante VN1 B intègre une solution de route digue construite dans le lit mineur sur un linéaire de 1 km. Cette construction réduirait une section déjà étroite pour un cours d'eau du type du bras de Cilaos et modifierait l'écoulement en lit mineur ainsi qu'en lit majeur.

La variante VN1 C dispose d'un tracé permettant de limiter les réductions de sections d'écoulement et les modifications morphologiques en découlant.

- **Résumé de l'analyse des variantes VN1**

Solution		Variante 1a : tunnel + ouvrage	Variante 1b : route digue + ouvrage	Variante 1c : voie nouvelle + ouvrage
Impact hydraulique	Hauteurs d'eau / Vitesses d'écoulement	- Section en tunnel permettant de s'éloigner du Bras de Cilaos	- Rive droite soumise à de forte vitesse sur un linéaire de 200 m	- Rive gauche soumise à de forte vitesse sur un linéaire de 700 m - Eperon rocheux créant une surcote de 3 m
	Ouvrages de franchissement	- Ouvrage nécessitant une pile dans le lit mineur ou mise en place d'un ouvrage exceptionnel sans appui dans le cours d'eau	- Ouvrage nécessitant une pile dans le lit mineur ou mise en place d'un ouvrage exceptionnel sans appui dans le cours d'eau - Configuration complexe pour la protection contre l'affouillement	- Ouvrage nécessitant une pile dans le lit mineur mineur ou mise en place d'un ouvrage exceptionnel sans appui dans le cours d'eau
	Risque d'affouillement	- Eloignement des berges du cours d'eau	- Protection du risque d'affouillement sur un linéaire de 1 km	- Protection du risque d'affouillement sur un linéaire de 800 m
	Modifications de la section d'écoulement	- Aucune modification de la section d'écoulement	- Modification du lit mineur sur la section route digue	- Plus faible empiètement des ouvrages dans le lit mineur du cours d'eau.

Tableau 55 : Analyse des variantes VN1

10.2 Variantes VN2

Deux tracés sont à l'étude sur le secteur de l'ilet rond :

- **VN2 A** : Création d'une route digue en bordure des zones habitées coté rivière en rive droite
- **VN2 B** : Les ouvrages de franchissement se raccordent sur l'ancienne route de Cilaos en évitant la construction d'une route digue dans le lit du bras de Cilaos
- **VN2 C** : Passage de la route au niveau de la rive gauche en évitant la construction des deux ouvrages de franchissement

Les variantes VN2 A, VN2 B et VN2 C sont comparées selon les mêmes critères que la variante VN1 :

- Caractéristiques de l'écoulement pour une crue centennale : hauteurs d'eau et vitesses d'écoulement,
- Impact sur les ouvrages de franchissement (portée, localisation…)
- Nécessité de protection en fonction de la nature des berges
- Impact sur les modifications de la section d'écoulement

- **Caractéristiques de l'écoulement pour une crue centennale : hauteurs d'eau et vitesses d'écoulement**

Figure 127 : Représentation des hauteurs d'eau et des vitesses d'écoulement sur le linéaire du tracé VN2 (crue centennale)

Sur ce secteur, les vitesses d'écoulement sont extrêmement fortes et les hauteurs d'eau peuvent atteindre 13.5 m de hauteur.

- En aval de l'ilet Rond et sur un linéaire de 300 m, les deux rives sont très sollicitées par des vitesses d'écoulement allant jusqu'à 9 m/s. Les hauteurs d'eau varient entre 4.5 m et 7 m. Des débordements sont constatés sur la rive gauche.
- Dans le coude longeant l'ilet Rond, les vitesses d'écoulement sont très élevées : 10 à 11.5 m/s dans le lit mineur. Des débordements sont observés au niveau de l'extrados du coude sur la rive gauche et au niveau de l'intrados sur l'ilet Rond. Les hauteurs d'eau atteignent 7.5 m de hauteur.
- Sur la partie relativement droite du Bras de Cilaos entre ilet Furcy et ilet Rond, les hauteurs d'eau et les vitesses d'écoulement sont très élevées, elles peuvent atteindre 10 m de hauteur et 11.5 m/s en vitesse d'écoulement sur cette section.
- Dans le coude longeant l'ilet Furcy, la route actuelle est inondée. Ce débordement scinde ainsi l'écoulement en deux. A sa confluence, l'écoulement provenant de la route crée de fortes perturbations et provoque la montée des eaux à un niveau pouvant aller à 13.5 m de haut.

- **Impact sur les ouvrages de franchissement**

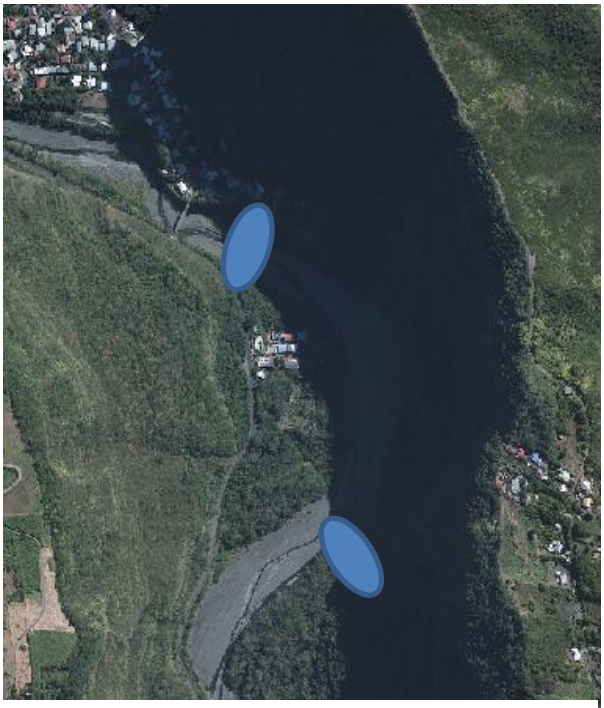


Figure 128 : Localisation des ouvrages de franchissement

Les deux variantes de tracé VN2 A et VN2 B présentent les mêmes ouvrages de franchissement. L'impact sera donc similaire.

La longueur des différents ouvrages de franchissement pour les deux variantes étudiées est de l'ordre de 80 à 100 m. La conception de ces ouvrages doit être envisagée sans pile dans le lit du Bras de Cilaos et en cherchant à positionner les culées sur un substratum rocheux.

La variante VN2 C ne présente pas d'ouvrages de franchissement sur son tracé.

- **Nécessité de protection en fonction de la nature des berges**

La variante VN2 A intègre la construction d'une route digue sur la rive droite du cours d'eau. Cette solution nécessite de protéger les talus de l'infrastructure routière sur un linéaire de 400 m contre le risque d'affouillement.

La variante VN2 B rejoint le tracé de l'ancienne route de l'ilet Rond et s'éloigne du cours d'eau permettant de se prémunir des risques hydrauliques.

La variante VN2 C est située sur le tracé actuel de la route construite en urgence en 2018. Ce tracé s'éloigne du cours d'eau et permet de diminuer les risques hydrauliques. Le tronçon situé en aval de l'Ilet Furcy devra être protégé sur un linéaire de 300 m contre le risque d'affouillement.

Figure 129 : Localisation des protections contre le risque de l'affouillement pour la variante 2A

- **Impact sur les modifications de la section d'écoulement**

Les variantes VN2 A, VN2 B et VN2 C disposent d'un tracé permettant de limiter les réductions de sections d'écoulement et les modifications morphologiques en découlant.

- **Résumé de l'analyse des variantes VN2**

Solution		Variante 2a : création d'une route sur l'ilet Rond	Variante 2b : reprise de l'ancienne route sur l'ilet Rond	Variante 2b : reprise du tracé de la route actuelle
Impact hydraulique	Hauteurs d'eau / Vitesses d'écoulement	- Rives du cours d'eau soumises à de forte vitesse	- Rives du cours d'eau soumises à de forte vitesse	- Rives du cours d'eau soumises à de forte vitesse
	Ouvrages de franchissement	- Ouvrage ne nécessitant pas de pile dans le lit mineur	- Ouvrage ne nécessitant pas de pile dans le lit mineur	- Pas d'ouvrages de franchissement
	Risque d'affouillement	- Protection du risque d'affouillement sur un linéaire de 400 m	- Eloignement des berges du cours d'eau	- Eloignement des berges du cours d'eau - Protection du risque d'affouillement sur un linéaire de 300 m
	Modifications de la section d'écoulement	- Faible empiètement des ouvrages dans le lit mineur du cours d'eau.	- Faible empiètement des ouvrages dans le lit mineur du cours d'eau.	- Faible empiètement des ouvrages dans le lit mineur du cours d'eau.

Tableau 56 : Analyse des variantes VN2

10.3 En amont des variantes VN2

Au niveau de l'ilet Furcy, le tracé routier devra conserver l'emprise du chenal de crue mis en évidence lors des modélisations, et donc se rapprocher des habitations existantes par rapport au tracé VN2.1 proposé.

L'ouvrage de franchissement OA5 devra être positionné de manière à minimiser sa portée et d'éviter des appuis intermédiaires dans le lit du cours d'eau.

En amont de l'ouvrage OA5, le tronçon VN2.2 rejoignant le tracé actuel devra être éloigné de la berge droite du Bras de Cilaos constituée de matériaux meubles et très érodables. Il devra être positionné sur la route existante.

10.4 Conclusions

Quelque soient les variantes étudiées la mise en place d'une nouvelle route sur la zone d'étude se heurte à des conditions hydrauliques particulièrement défavorables qui devront se traduire par des travaux considérables, tant sur les dispositifs anti affouillement des ouvrages de protection linéaires, que sur les protections des appuis des futurs ouvrages de franchissement.

L'historique des évènements passés montre que la zone d'étude est sujette à des risques de laves torrentielles. Ces laves ont été observées au moins deux fois (en 1849 et en 1948) sur une période de 170 ans. Etant donné le caractère destructif de ces phénomènes, **il est très probable que la durée de vie maximale de tout ouvrage situé dans le lit du Bras de Cilaos soit de l'ordre de 50 à 100 ans.**

Ceci doit être intégré dans le choix des variantes d'aménagement en évitant la mise en place d'appuis d'ouvrages dans le lit de la rivière et limitant au maximum les tronçons de route digue.

10.4.1 Analyse des variantes VN1B et VN1C

D'un point de vue strictement hydraulique la variante VN1C est préférable à la variante VN1B. Cette variante permet de minimiser les linéaires de route digue à mettre en œuvre. Nous préconisons de plus les éléments suivants :

- Positionner l'ouvrage de franchissement à l'aval de l'éperon rocheux situé face à l'ilet Rolland, de manière à éviter les surcotes et les accélérations de vitesses d'écoulement observées dans le modèle hydraulique. Etant donnés les risques existants il est préconisé de ne pas mettre de piles dans le lit du cours d'eau. Dans le cas où la construction d'une pile serait inévitable, la pile de l'ouvrage de franchissement devra être situé le plus possible vers la rive gauche de manière à limiter son exposition aux bras actifs concentrant les écoulements formés en période de crue.
- Le tracé devra éviter au maximum une implantation dans le lit de la rivière en s'inscrivant sur la terrasse de l'ilet Rolland, puis les terrasses existantes jusqu'à la jonction avec la route actuelle. Ceci dans l'objectif de profiter le plus possible des berges rocheuses existantes sur ce parcours.
- Le tracé VN1C devra donc être repoussé coté rempart sur un linéaire de 500m de 20 mètres en moyenne par rapport à l'implantation proposée.

10.4.2 Analyse des variantes VN2A, VN2B et VN2C

La variante VN2B est préférable à la variante VN2A. Cette variante évite la construction d'une route digue sur un linéaire de 400m en bordure des habitations de l'ilet Rond sur un secteur particulièrement exposé aux fortes vitesses d'écoulement. A noter que cette variante peut, en prolongeant le tracé sur la route actuelle, permettre un nouvel ouvrage de franchissement

en amont du pont existant de l'Ilet Furcy en remplacement de l'ouvrage OA4B et ainsi éviter la destruction de maisons d'habitations de l'Ilet.

Les deux ouvrages de franchissement devront être réalisés sans appui intermédiaire, soit d'une seule portée d'un linéaire d'environ 90m en cherchant à appuyer les culées sur les affleurements rocheux présents sur l'Ilet. Ceci ne pourra pas être possible pour la culée droite de l'OA3.

D'un point de vue strictement hydraulique, la variante VN2 C est préférable aux variantes VN2 A et VN2 B. Cette variante permet d'éviter la construction de deux ouvrages de franchissement du bras de Cilaos.

- Le tracé devra éviter une implantation dans le lit de la rivière en s'inscrivant sur la terrasse face à l'ilet Rond. Ceci dans l'objectif de profiter le plus possible des berges rocheuses existantes sur ce parcours.
- Le tracé VN2C devra donc être repoussé coté rempart sur un linéaire de 220 m de 20 mètres en moyenne par rapport à l'implantation proposée.
- De la même manière le tracé VN2 C devra être écarté de la berge sur 200 m à l'aval de la passerelle de l'Ilet Furcy. Sur ce secteur les berges sont meubles et érodables ce qui évitera de mettre en place des protections sur un secteur particulièrement difficile à traiter du point de vue hydraulique.

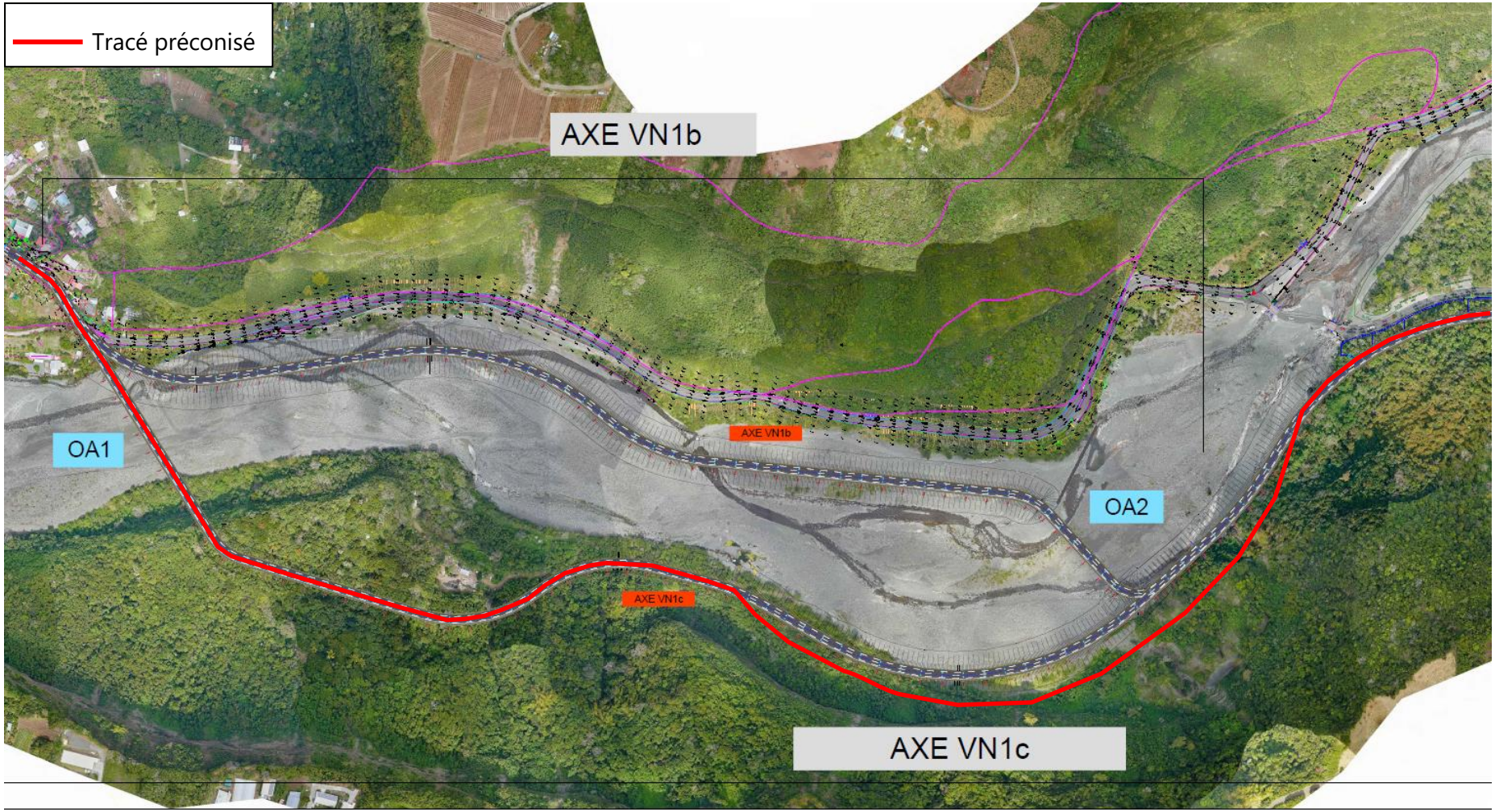
10.4.3 Axes VN2.1 (Ilet Furcy) et VN2.2

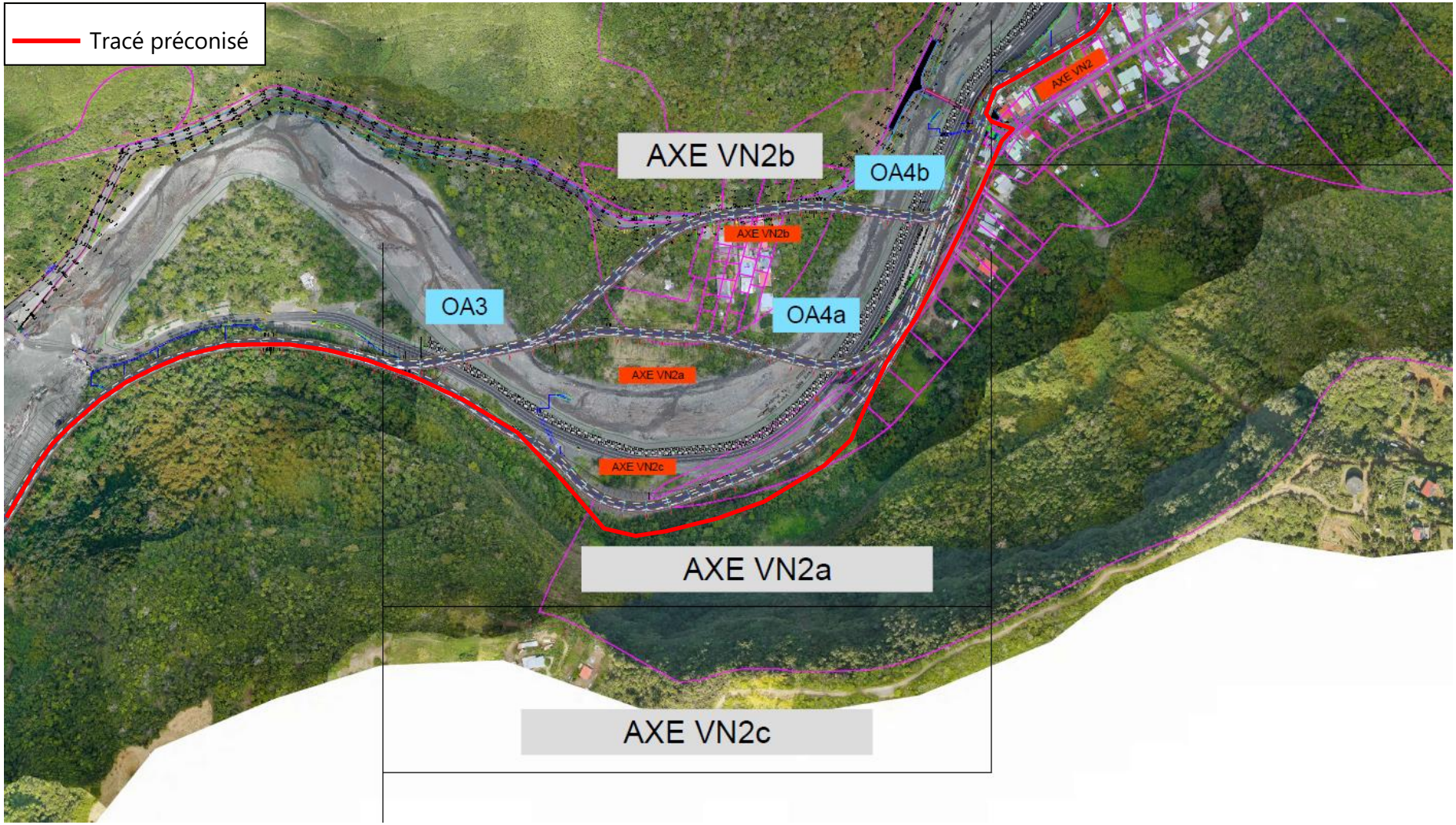
Au niveau de l'Ilet Furcy, l'axe VN2.1 devra préserver l'emprise du chenal de crue mis en évidence lors des modélisations, et donc se rapprocher au plus près des habitations existantes.

L'ouvrage de franchissement OA5 devra être positionné de manière à minimiser sa portée et d'éviter des appuis intermédiaires dans le lit du cours d'eau. Il est de plus nécessaire de supprimer toute possibilité de débordement au niveau de l'extrémité amont de l'Ilet, car les eaux débordées seraient alors confinées entre le rempart en rive gauche et la route digue, soit à travers la zone habitée.

En amont de l'ouvrage OA5, le tronçon VN2.2 rejoignant le tracé actuel devra être éloigné de la berge droite du Bras de Cilaos constituée de matériaux meubles et très érodables. Il devra être positionné sur la route existante.

Les figures suivantes synthétisent les modifications de tracé proposées.


Tracé préconisé
AXE VN1b
OA1
AXE VN1b
OA2
AXE VN1c
AXE VN1c


Tracé préconisé
AXE VN2b
OA4b
AXE VN2b
OA3
OA4a
AXE VN2a
AXE VN2c
AXE VN2a
AXE VN2c
AXE VN2

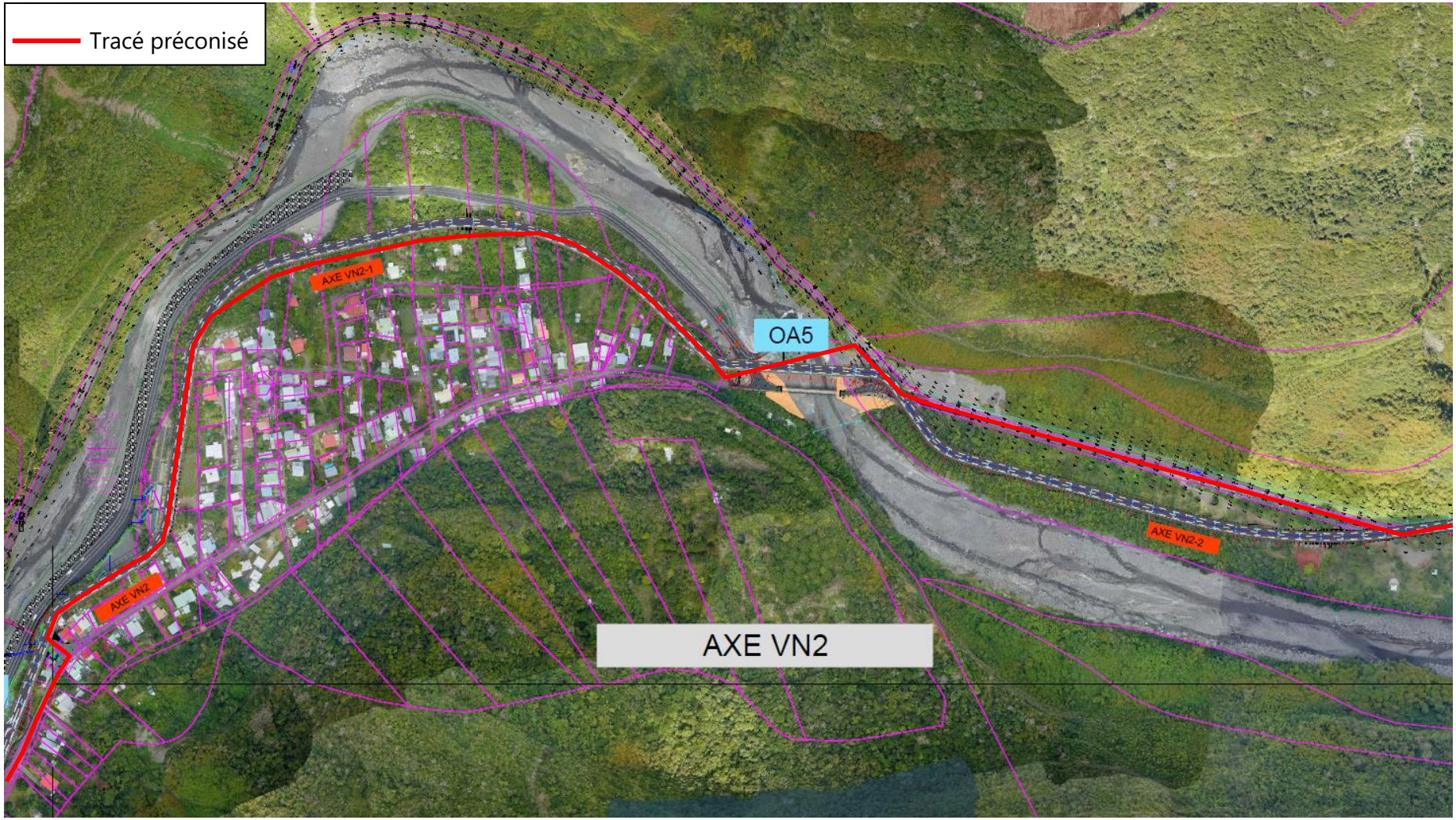


Figure 130 : Synthèse des modifications proposées

11. Principes de dimensionnement retenus

11.1 Principes retenus pour le calage altimétrique du tracé routier et des ouvrages

Le calage altimétrique des ouvrages sera basé sur la crue centennale. Ce dimensionnement sera vérifié pour une crue millénale. En fonction des impacts observés pour une crue millénale, le calage centennal sera adapté.

Le calage du projet sera réalisé en prenant une revanche de :

- **1.5 m au-dessus de la ligne de charge centennale** (cote de la ligne d'eau + $v^2/2g$) **appliqué au fond le plus haut** pour le tracé routier (route digue),
- **2.5 m au-dessus de la ligne de charge centennale** (cote de la ligne d'eau + $v^2/2g$) **appliqué au fond le plus haut** pour le calage du bas du tablier des ouvrages de franchissement de manière à permettre le passage des flottants.

Profil en long pris en compte

Afin de prendre en compte l'évolution probable du profil en long dans les décennies à venir, le profil de référence retenu concernant le calage altimétrique des ouvrages routiers est le profil en long correspondant au niveau maximal :

- Soit observé lors des levés topographiques existants
- Soit calculé via la modélisation sédimentaire.

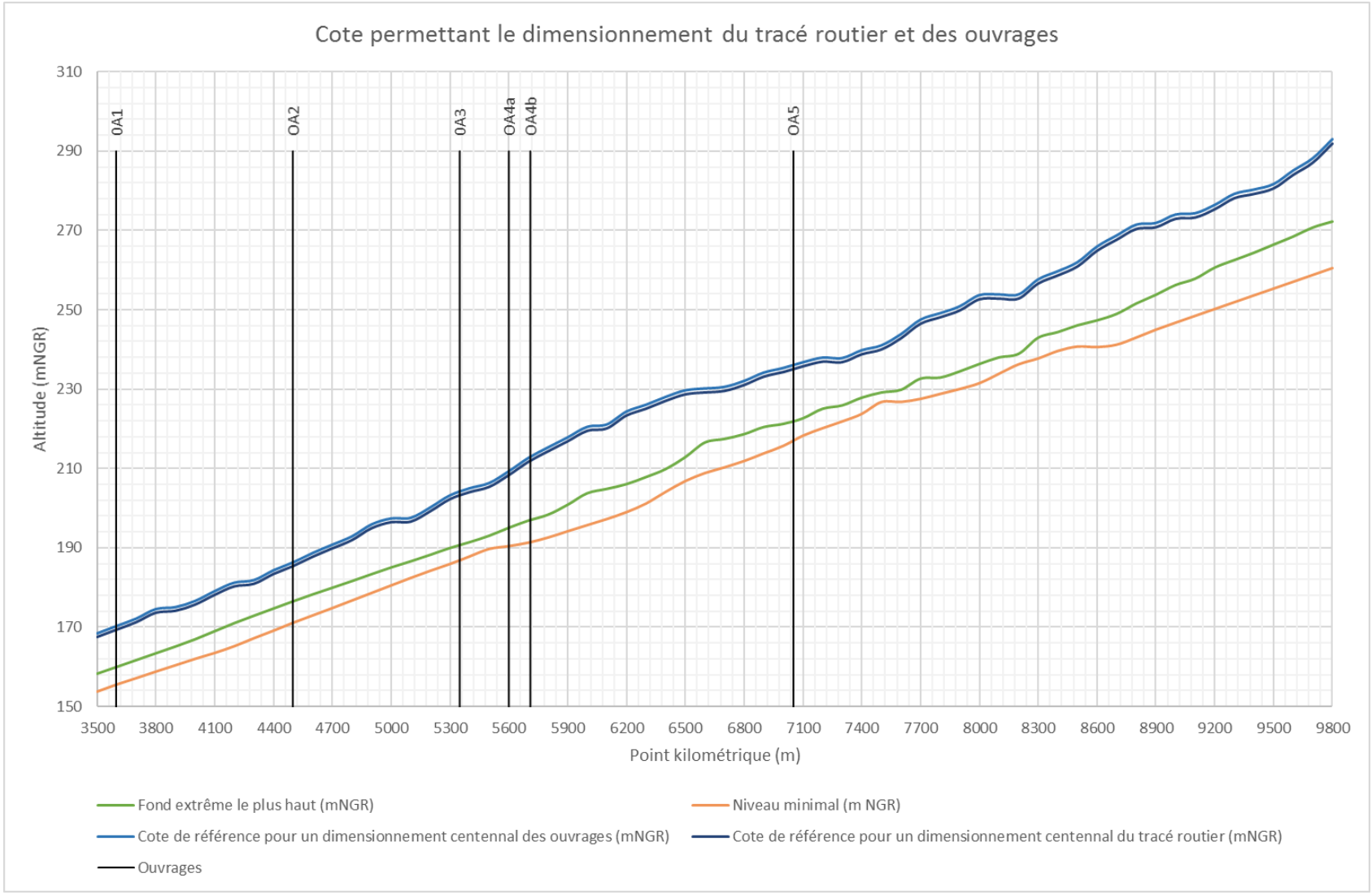


Figure 131 : Profil en long permettant le dimensionnement du tracé routier et des ouvrages

11.2 Principes de calcul des cotes de fondation des appuis

11.2.1 Profil en long pris en compte

Afin de prendre en compte l'évolution probable du profil en long dans les décennies à venir, le profil de référence retenu concernant le calage des cotes de fondation des appuis est **le profil en long correspondant au niveau minimal défini (voir Paragraphe 7.9.8).** Il correspond au minimum des fonds extrêmes historiques et simulés.

11.2.2 Méthodologie du calcul des affouillements

Les affouillements au droit des ouvrages correspondent à la somme des paramètres suivants :

- Affouillement généralisé
- Affouillement causé par un rétrécissement de section
- Affouillement localisé au niveau des piles et des culées

Plusieurs méthodes de calcul de profondeurs d'affouillement sont présentées dans les paragraphes ci-dessous. Etant données les incertitudes liées à ces évaluations, la **profondeur maximale d'affouillement** sera retenue pour définir le calage de la cote de fondation.

Affouillement généralisé

- Formule de Ramette

La formule empirique de Ramette permet de définir la profondeur maximale des fonds susceptibles d'être affouillés en section rectiligne sans causes de perturbations supplémentaires.

La formule a pour équation :

$$fp = \frac{0.73 * q^{\frac{2}{3}}}{dm^{\frac{1}{6}}}$$

Avec :

- fp (m) : Profondeur des fonds perturbés par rapport à la ligne d'eau correspondant au débit de la crue dimensionnante
- q (m^2/s) : débit liquide par unité de largeur L du lit mineur du cours d'eau
- dm (m) : diamètre moyen des sédiments

Affouillement causé par un rétrécissement de section

- Formule de Laursen

L'effet de contraction du lit au droit de l'ouvrage est pris en compte par la formule de Laursen :

$$\frac{y2}{y1} = \frac{Q2^{\frac{6}{7}}}{Q1} * \frac{W1^{k1}}{W2} \text{ et } P = y2 - y0$$

Avec :

- P (m) : Profondeur d'affouillement liée à l'effet de rétrécissement du lit
- y2 (m) : Profondeur moyenne de l'écoulement après l'affouillement dans la section contractée
- y1 (m) : Profondeur moyenne de l'écoulement dans le chenal en amont du pont au début de la contraction
- y0 (m) : Profondeur existante dans la section contractée au droit du pont avant l'affouillement
- Q1 (m^3/s) : Débit dans chenal à la section en amont
- Q2 (m^3/s) : Débit dans chenal à la section contractée
- W1 (m) : Largeur du fond du lit en amont du pont
- W2 (m) : Largeur du fond du lit dans la section contractée moins les largeurs des piles
- k1 : coefficient compris entre 0.59 et 0.69 dépendant du mode de transport du matériau dans le lit

En considérant par hypothèse que le débit et la profondeur d'écoulement sont constants sur la zone impactée, les équations ci-dessus se simplifient de la manière suivante :

$$P = y0 * (\frac{W1^{k1}}{W2} - 1)$$

Affouillement localisé au niveau des piles

- Ordre de grandeur

L'ordre grandeur suivant est souvent admis:

$$Pmax = 2 * D$$

Avec :

- Pmax (m) : Profondeur maximale d'affouillement sous le fond du lit
- D (m) : Diamètre de la pile

- Formule de l'université du Colorado

Pour le calcul de l'affouillement local au droit des piles, la formule 1 de l'université du Colorado peut être employée :

$$P = 2 * K1 * K2 * K3 * K4 * a^{0.65} * y^{0.35} * Fr^{0.43}$$

Avec :

- P (m) : Profondeur d'affouillement sous le fond du lit
- K1 : Facteur de correction de la forme de l'appui
- K2 : Facteur de correction pour l'angle d'attaque de l'écoulement
- K3 : Facteur de correction de la forme du lit
- K4 : Facteur de correction de pavage du lit en fonction de la taille des grains
- a (m) : Epaisseur du fût de pile ou largeur de semelle si apparente
- y (m) : Hauteur d'eau en amont de l'appui
- Fr : Nombre de Froude en amont de l'appui ($Fr = v/(g*y)^{1/2}$)

Le facteur de correction K1 dépend de la forme de l'appui, il est pris égal à :

- 0.9 pour des appuis munis d'un avant-bec « aiguisé »
- 1 pour des appuis de forme cylindrique ou munis d'un avant-bec circulaire
- 1.1 pour des appuis de forme rectangulaire

Le facteur de correction K2 est calculé à partir de l'équation suivante :

$$K2 = (\cos\theta + \frac{L}{a} * \sin\theta)^{0.65}$$

Avec :

- θ : Angle d'attaque de l'écoulement
- L (m) : Largeur du fût de pile ou de l'appui

Le facteur de correction K3 sera égal à 1.3 et le facteur de correction K4 sera égal à 0.4 dans notre cas.

Affouillement localisé au niveau des culées

- Formule de l'université du Colorado

Pour le calcul de l'affouillement local au droit des culées, la formule 2 de l'université du Colorado peut être employée :

$$P = Ya * (2.27 * K1 * K2 * (\frac{L}{Ya})^{0.43} * Fr^{0.61} + 1)$$

Avec :

- Ya (m) : Hauteur d'eau moyenne de la plaine d'inondation
- K1 : Coefficient de forme de la culée
- K2 : Coefficient d'angle du remblai par rapport à l'écoulement
- L (m) : Largeur de l'écoulement actif influencé par la présence du remblai
- Fr : Nombre de Froude en amont de l'appui ($Fr = v/(g*y)^{1/2}$)

Le facteur de correction K1 dépend de la forme de la culée, il est pris égal à :

- 1 pour une culée à mur de front avec des murs en retour perpendiculaires
- 0.82 pour une culée à mur de front avec murs en aile
- 0.55 pour une culée remblayée

Le coefficient K2 est fonction de l'angle du remblai par rapport à l'écoulement :

$$K2 = (\frac{\theta}{90})^{0.13}$$

Avec :

- θ < 90° si le remblai pointe vers l'aval
- θ > 90° si le remblai pointe vers l'amont

11.2.3 Quantification du niveau d'aléa

A partir de la profondeur d'affouillement totale, il est proposé de suivre les cinq niveaux d'aléa exposée dans le guide du CEREMA « Analyse de risque des ponts en site affouillable », publié en Février 2019 :

Niveau d'aléa - étape 2	
Très Faible	P < 1 m
Faible	1 ≤ P < 3 m
Moyen	3 ≤ P < 6 m
Elevé	6 ≤ P < 12 m
Très élevé	P ≥ 12 m

Figure 132 : Quantification du niveau d'aléa, CEREMA, 2019

Les profondeurs totales d'affouillement de l'ordre de 20 m ou plus seront considérées comme des cas extrêmes. Ils seront à éviter dans la conception.

11.3 Recommandations générales

11.3.1 Protection des piles et des culées

D'une manière générale le nombre de piles est à minimiser en augmentant la longueur des travées (>= 80m) et en réduisant au maximum le biais des franchissements.

Dans le cas où la mise en place de piles est absolument nécessaire, les piles devront être situées sur les secteurs les plus abrités de la formation des bras vifs pouvant à l'instar de la rivière Saint Etienne conduire à leur ruine.

Les piles devront être circulaires, de faible section, pour tenir compte d'angles d'attaques variables en fonction des crues.

Les piles devront s'appuyer sur des barrettes fondées sur pieux en intégrant pour le dimensionnement des pieux des coefficients de sécurité prenant en compte les incertitudes sur l'évolution du profil en long du Bras de Cilaos.

Une protection contre l'abrasion et l'usure des fûts devra être établie via une couche de béton d'usure.

Il sera recherché préférentiellement la construction des culées sur un substratum rocheux non affouillable.

11.3.2 Origine des matériaux

Les matériaux concernant le projet routier ne devront pas être extraits du Bras de Cilaos.

11.3.3 Pérennité des ouvrages

Afin de pérenniser au maximum les travaux qui vont être entrepris, les actions à entreprendre sont :

- Un **suivi régulier du niveau du lit** sur la zone d'étude
- Une **inspection régulière des ouvrages** permettant d'anticiper les réparations avant ruine complète.

ANNEXES

Annexe 1 : Fiches descriptives des différents postes pluviométriques

- Bras Long (974 03 440)

Fermer — *La fiche de poste est indisponible !*

INSEE: 97403440
Nom: ENTRE-DEUX (BRAS-LONG - 1)
Lieu-dit: Bras-Long
Ouverture: 01/11/1966
Fermeture:
Code bassin: NR

Info:
(*) La position de la station est fournie à 6" près soit environ 200 mètres.
(**) Lambert II étendu

EMPLACEMENT :	Début	Fin	Altitude	Latitude (*)	Longitude (*)	E (**)	N (**)
(1)	01/11/1966		430 m	21°14'12"S	55°28'12"E	x	x

TYPE DE STATION :	Début	Fin	Type de station
(1)	01/11/1966		4: Station climatologique (bénévole), expertise temps différé

PRODUCTEUR :	Début	Fin	Producteur
(1)	01/11/1966		METEO-FRANCE

PARAMETRES DISPONIBLES :

Filtrer les paramètres: Pas de filtre
Seulement les paramètres mesurés actuellement:

Affiche 10 lignes par tableau — Filtrer

Nom du paramètre (station numéro 97403440)	Début	Fin
CUMUL DES HAUTEURS DE PRECIPITATIONS	01/11/1966	01/05/1974
CUMUL DES HAUTEURS DE PRECIPITATIONS	01/11/1974	01/04/1984
CUMUL DES HAUTEURS DE PRECIPITATIONS	01/07/1984	01/06/1989
CUMUL DES HAUTEURS DE PRECIPITATIONS	01/09/1989	01/07/1993
CUMUL DES HAUTEURS DE PRECIPITATIONS	01/10/1993	
HAUTEUR DE PRECIPITATIONS HORAIRE	23/12/2008	29/12/2008
HAUTEUR DE PRECIPITATIONS QUOTIDIENNE	01/11/1966	31/05/1974
HAUTEUR DE PRECIPITATIONS QUOTIDIENNE	01/11/1974	
HAUTEUR ESTIMEE DES PRECIPS MENSUELLES	01/10/1970	01/12/1970
HAUTEUR ESTIMEE DES PRECIPS MENSUELLES	01/07/1971	01/07/1971
Nom du paramètre (station numéro 97403440)	Début	Fin

- Cilaos (974 24 410)

Fermer — *La fiche de poste est indisponible !*

INSEE: 97424410
Nom: CILAOS
Lieu-dit: Centre-Ville
Ouverture: 01/01/1952
Fermeture:
Code bassin: NR

Info:
(*) La position de la station est fournie à 6" près soit environ 200 mètres.
(**) Lambert II étendu

EMPLACEMENT :	Début	Fin	Altitude	Latitude (*)	Longitude (*)	E (**)	N (**)
(1)	01/01/1952		1197 m	21°8'0"S	55°28'18"E	x	x

TYPES DE STATION :	Début	Fin	Type de station
(1)	01/01/1952	09/06/1989	4: Station climatologique (bénévole), expertise temps différé
(2)	10/06/1989		1: Station synoptique avec personnel non Météo-France, temps réel en diffusion et expertise

PRODUCTEUR :	Début	Fin	Producteur
(1)	01/01/1952		METEO-FRANCE

PARAMETRES DISPONIBLES :

Filtrer les paramètres: Pas de filtre
Seulement les paramètres mesurés actuellement:

Affiche 10 lignes par tableau — Filtrer

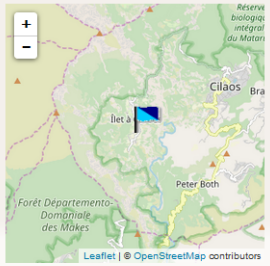
Nom du paramètre (station numéro 97424410)	Début	Fin
AMPLITUDE ENTRE TN ET TX QUOTIDIEN	01/01/1969	31/08/1971
AMPLITUDE ENTRE TN ET TX QUOTIDIEN	01/01/1972	28/02/1975
AMPLITUDE ENTRE TN ET TX QUOTIDIEN	01/07/1975	
CODE TEMPS PASSE W1 HORAIRE	12/06/1989	30/08/1991
CODE TEMPS PRESENT HORAIRE	12/06/1989	30/08/1991
CUMUL DE PRECIPITATIONS EN 6 MN	30/01/2006	
CUMUL DE RAYONNEMENT GLOBAL DECADAIRE	11/06/1989	
CUMUL DES DUREES D'INSOLATION	01/01/1986	01/12/2007
CUMUL DES DUREES D'INSOLATION	01/06/2016	
CUMUL DES HAUTEURS DE PRECIPITATIONS	01/01/1952	

- Ilet A Cordes (974 24 450)

Fermer — *La fiche de poste est indisponible !*

INSEE: 97424450
Nom: CILAOS (ILET A CORDES_SAPC)
Lieu-dit: Fond de la Cour
Ouverture: 08/08/1977
Fermeture:
Code bassin: NR

Info:
(*) La position de la station est fournie à 6" près soit environ 200 mètres.
(**) Lambert II étendu



EMPLACEMENT :	Début	Fin	Altitude	Latitude (*)	Longitude (*)	E (**)	N (**)
(1)	08/08/1977		1067 m	21°9'12"S	55°26'12"E	x	x

TYPES DE STATION :	Début	Fin	Type de station
(1)	08/08/1977	04/04/2013	4: Station climatologique (bénévole), expertise temps différé
(2)	05/04/2013		2: Station automatique, temps réel en diffusion et expertise

PRODUCTEURS :	Début	Fin	Producteur
(1)	08/08/1977	05/04/2013	METEO-FRANCE
(2)	06/04/2013		METEO-FRANCE
(3)	06/04/2013		DIRECTION GENERALE DE LA PREVENTION DES RISQUES

PARAMETRES DISPONIBLES :

Filtrer les paramètres: Pas de filtre
Seulement les paramètres mesurés actuellement:

Affiche 10 lignes par tableau — Filtrer

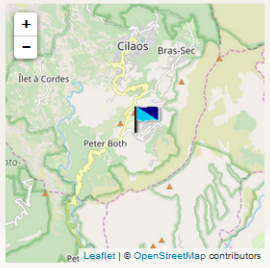
Nom du paramètre (station numéro 97424450)	Début	Fin
CUMUL DE PRECIPITATIONS EN 6 MN	04/04/2013	
CUMUL DES HAUTEURS DE PRECIPITATIONS	01/08/1977	01/04/1982
CUMUL DES HAUTEURS DE PRECIPITATIONS	01/08/1982	
DUREE DES PRECIPITATIONS QUOTIDIENNES	27/09/2004	30/09/2004
HAUTEUR DE PRECIPITATIONS HORAIRE	02/02/2009	09/02/2009
HAUTEUR DE PRECIPITATIONS HORAIRE	04/04/2013	
HAUTEUR DE PRECIPITATIONS QUOTIDIENNE	08/08/1977	30/04/1982
HAUTEUR DE PRECIPITATIONS QUOTIDIENNE	27/08/1982	
HAUTEUR ESTIMEE DES PRECIPS MENSUELLES	01/08/1977	01/08/1977
HAUTEUR ESTIMEE DES PRECIPS MENSUELLES	01/02/1978	01/02/1978
Nom du paramètre (station numéro 97424450)	Début	Fin

- Palmiste Rouge (974 24 460)

Fermer — *La fiche de poste est indisponible !*

INSEE: 97424460
Nom: CILAOS (PALMISTE-ROUGE)
Lieu-dit: Le Palmiste Rouge
Ouverture: 01/01/1962
Fermeture:
Code bassin: NR

Info:
(*) La position de la station est fournie à 6" près soit environ 200 mètres.
(**) Lambert II étendu



EMPLACEMENT :	Début	Fin	Altitude	Latitude (*)	Longitude (*)	E (**)	N (**)
(1)	01/01/1962		830 m	21°10'6"S	55°28'24"E	x	x

TYPE DE STATION :	Début	Fin	Type de station
(1)	01/01/1962		4: Station climatologique (bénévole), expertise temps différé

PRODUCTEUR :	Début	Fin	Producteur
(1)	01/01/1962		METEO-FRANCE

PARAMETRES DISPONIBLES :

Filtrer les paramètres: Pas de filtre
Seulement les paramètres mesurés actuellement:

Affiche 10 lignes par tableau — Filtrer

Nom du paramètre (station numéro 97424460)	Début	Fin
CUMUL DE PRECIPITATIONS EN 6 MN	02/11/2017	03/11/2017
CUMUL DES HAUTEURS DE PRECIPITATIONS	01/02/1962	01/10/1965
CUMUL DES HAUTEURS DE PRECIPITATIONS	01/02/1966	
DUREE DES PRECIPITATIONS QUOTIDIENNES	01/09/2004	30/09/2004
HAUTEUR DE PRECIPITATIONS HORAIRE	02/11/2017	03/11/2017
HAUTEUR DE PRECIPITATIONS QUOTIDIENNE	20/02/1962	31/10/1965
HAUTEUR DE PRECIPITATIONS QUOTIDIENNE	01/02/1966	
HAUTEUR ESTIMEE DES PRECIPS MENSUELLES	01/02/1962	01/02/1962
HAUTEUR ESTIMEE DES PRECIPS MENSUELLES	01/11/1965	01/01/1966
HAUTEUR ESTIMEE DES PRECIPS MENSUELLES	01/10/1967	01/10/1967

- Plaine des Cafres (974 22 440)

Fermer

La fiche de poste est indisponible !

INSEE: 97422440
Nom: LE TAMPON (PLAINE DES CAFRES)
Lieu-dit: Bourg-Murat - Observatoire volcanologique
Ouverture: 01/01/1948
Fermeture:
Code bassin: NR

Info:
(*) La position de la station est fournie à 6" près soit environ 200 mètres.
(**) Lambert II étendu

EMPLACEMENT :	Début	Fin	Altitude	Latitude (*)	Longitude (*)	E (**)	N (**)
(1)	01/01/1948		1560 m	21°12'30"S	55°34'18"E	x	x

TYPES DE STATION :	Début	Fin	Type de station
(1)	01/01/1948	31/12/1964	4: Station climatologique (bénévole), expertise temps différé
(2)	01/01/1965	31/08/1991	0: Station synoptique, automatique ou avec personnel Météo-France, temps réel en diffusion et expertise
(3)	01/09/1991		1: Station synoptique avec personnel non Météo-France, temps réel en diffusion et expertise

PRODUCTEUR :	Début	Fin	Producteur
(1)	01/01/1948		METEO-FRANCE

PARAMETRES DISPONIBLES :

Filtrer les paramètres: Pas de filtre
Seulement les paramètres mesurés actuellement:

Affiche 10 lignes par tableau

Filtrer

Nom du paramètre (station numéro 97422440)	Début	Fin
AMPLITUDE ENTRE TN ET TX QUOTIDIEN	01/01/1965	
CODE SYNOP NUAGES BAS HORAIRE	01/01/1965	31/10/1967
CODE SYNOP NUAGES BAS HORAIRE	20/03/1968	24/12/1968
CODE SYNOP NUAGES BAS HORAIRE	08/05/1969	31/12/1969
CODE SYNOP NUAGES ELEVE HORAIRE	01/01/1965	31/10/1967
CODE SYNOP NUAGES ELEVE HORAIRE	20/03/1968	24/12/1968
CODE SYNOP NUAGES ELEVE HORAIRE	08/05/1969	31/12/1969
CODE SYNOP NUAGES MOYEN HORAIRE	01/01/1965	31/10/1967
CODE SYNOP NUAGES MOYEN HORAIRE	20/03/1968	24/12/1968
CODE SYNOP NUAGES MOYEN HORAIRE	08/05/1969	31/12/1969
Nom du paramètre (station numéro 97422440)	Début	Fin

Annexe 2 : Résultats de la modélisation Pluie-Débit

Les crues modélisées sont résumées dans le tableau suivant :

Date	Nom du Cyclone	Hyétogrammes utilisés
28 Février 1964 au 1er Mars 1964	Giselle	Plaine des Cafres
16 au 28 Janvier 1980	Hyacinthe	Cilaos
5 au 8 Février 1986	-	Ilet à Cordes
11 au 14 Février 1987	Clotilda	Plaine des Cafres
28 au 30 Janvier 1989	Firinga	Ilet à Cordes
19 au 20 Janvier 1993	Colina	Cilaos
28 au 30 Janvier 2000	-	Cilaos
21 au 24 Janvier 2002	Dina	Ilet à Cordes
10 au 12 Mars 2002	Hary	Cilaos
4 au 7 Mars 2006	Diwa	Cilaos
24 au 28 Février 2007	Gamède	Cilaos
1 au 3 Janvier 2013	Dumile	Cilaos
31 Janvier au 3 Février 2013	Feeleng	Cilaos
1 au 4 Janvier 2014	Bejisa	Cilaos
7 au 10 Mars 2015	Haliba	Cilaos, Ilet à Cordes
5 au 9 Février 2016	Daya	Cilaos
17 au 19 Janvier 2018	Berguitta	Cilaos
3 au 6 Mars 2018	Dumazile	Cilaos
21 au 25 Avril 2018	Fakir	Plaine des Cafres

Les résultats de la modélisation pluie-débit sont précisés dans les pages suivantes.

- ***Giselle (28/02/1964 - 01/03/1964)***
  - Paramètres du modèle

P5j à Cilaos = 37 mm, Ip = 253 mm, CN forts

Sous-bassin versant	Pluie considérée	Pertes initiales (mm)	Curve Number	Référence temporelle
BC_cirque_ilets	0.68 x Cilaos + 0.26 x Palmiste Rouge	63	40	Plaine des Cafres
BC_cirque_remparts	Cilaos	0	60	Plaine des Cafres
BC_gorges	0.385 x Cilaos + 52	0	60	Plaine des Cafres

Tableau 57 : Paramètres du modèle pluie-débit pour Giselle

  - Résultats

L'hydrogramme du Bras de Cilaos au Pavillon et le hyétogramme utilisé sont présents sur la figure suivante.

Le débit de pointe et le volume de crue sont synthétisés sur le tableau suivant.

Point de calcul	Débit de pointe (m^3/s)	Volume de la crue (Mm^3)
Pavillon	2 100	103

Tableau 58 : Débit de pointe et volume de la crue estimés pour Giselle

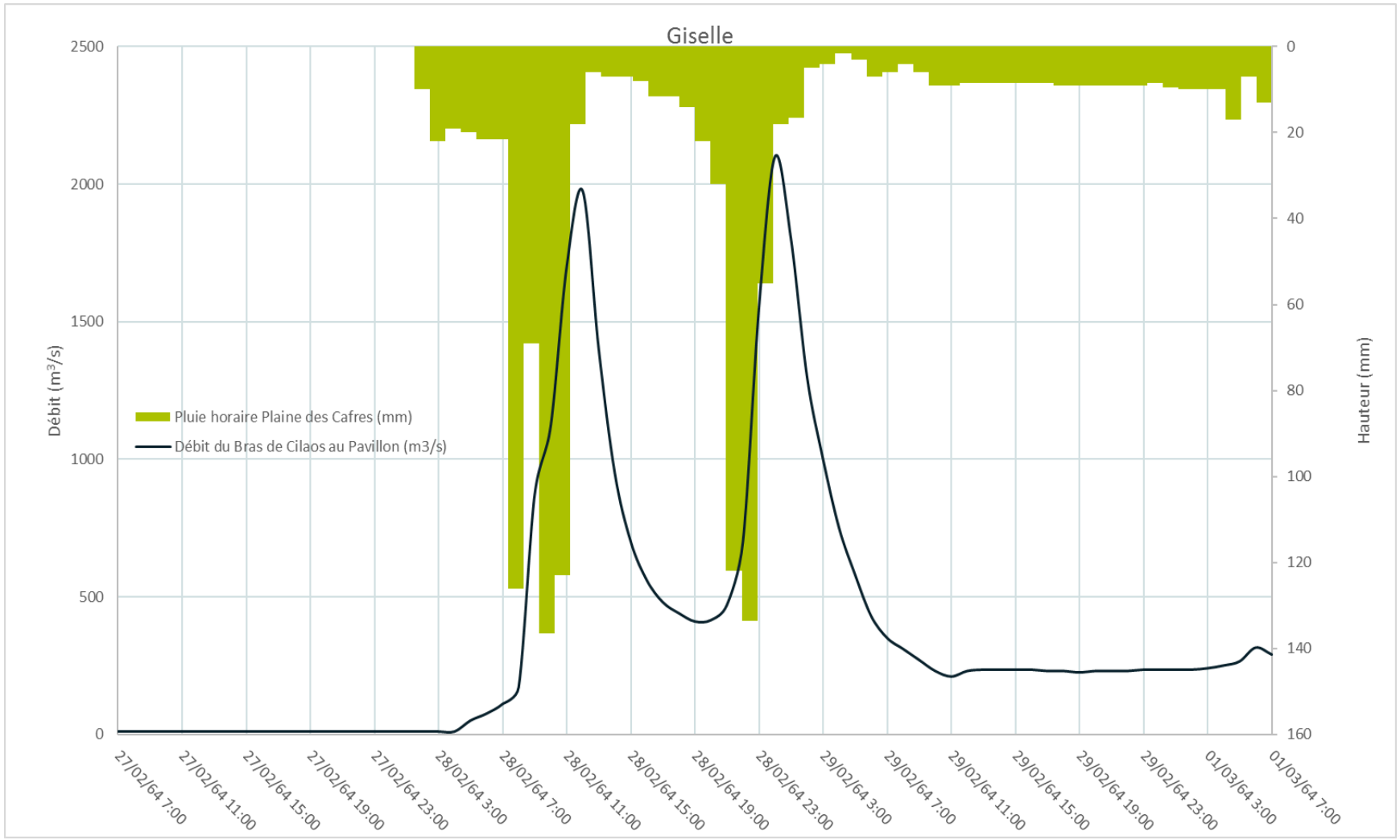


Figure 133 : Modélisation pluie-débit de l'évènement Giselle

- ***Hyacinthe (16/01/1980 - 28/01/1980)***
  - Paramètres du modèle

P5j à Cilaos = 15 mm, Ip = 78 mm, CN moyens

Sous-bassin versant	Pluie considérée	Pertes initiales (mm)	Curve Number	Référence temporelle
BC_cirque_ilets	0.31 x Ilet à Cordes + 0.26 x Palmiste Rouge + 0.43 x Cilaos	85	30	Cilaos
BC_cirque_remparts	Cilaos	15	45	Cilaos
BC_gorges	0.385 x Cilaos + 52	15	45	Cilaos

Tableau 59 : Paramètres du modèle pluie-débit pour Hyacinthe

  - Résultats

L'hydrogramme du Bras de Cilaos au Pavillon et le hyétogramme utilisé sont présents sur la figure suivante.

Le débit de pointe et le volume de crue sont synthétisés sur le tableau suivant.

Point de calcul	Débit de pointe (m^3/s)	Volume de la crue (Mm^3)
Pavillon	800	202

Tableau 60 : Débit de pointe et volume de la crue estimés pour Hyacinthe

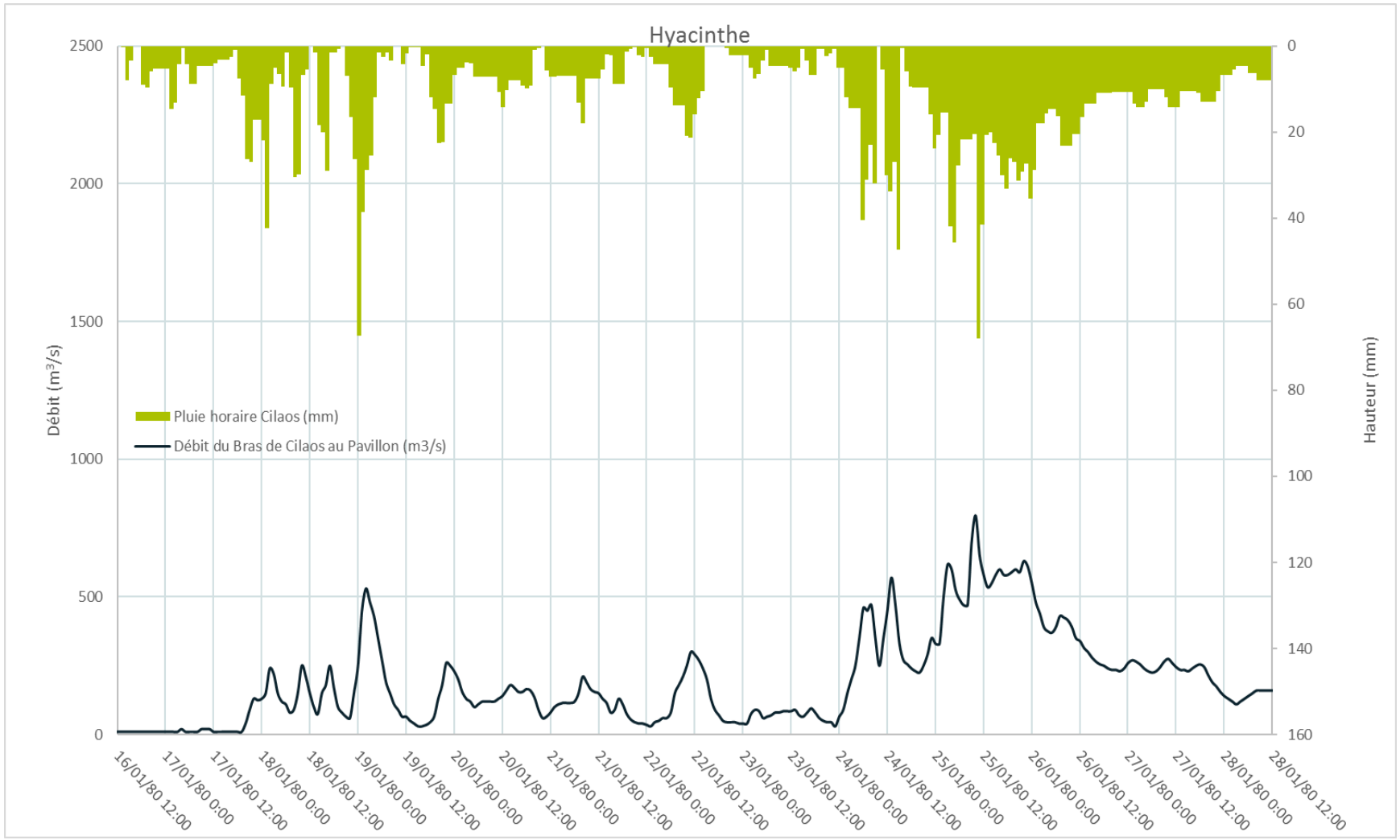


Figure 134 : Modélisation pluie-débit de l'évènement Hyacinthe

- **5 au 8 Février 1986**

  - Paramètres du modèle

P5j à Cilaos = 126 mm, Ip = 305 mm, CN forts

Sous-bassin versant	Pluie considérée	Pertes initiales (mm)	Curve Number	Référence temporelle
BC_cirque_ilets	0.31 x Ilet à Cordes + 0.26 x Palmiste Rouge + 0.43 x Cilaos	0	40	Ilet à Cordes
BC_cirque_remparts	Cilaos	0	60	Ilet à Cordes
BC_gorges	Bras Long	0	60	Ilet à Cordes

Tableau 61 : Paramètres du modèle pluie-débit pour l'évènement du 5 au 8 février 1986

  - Résultats

L'hydrogramme du Bras de Cilaos au Pavillon et le hyétogramme utilisé sont présents sur la figure suivante.

Le débit de pointe et le volume de crue sont synthétisés sur le tableau suivant.

Point de calcul	Débit de pointe (m^3/s)	Volume de la crue (Mm^3)
Pavillon	1 020	79

Tableau 62 : Débit de pointe et volume de la crue estimés pour l'évènement du 5 au 8 février 1986

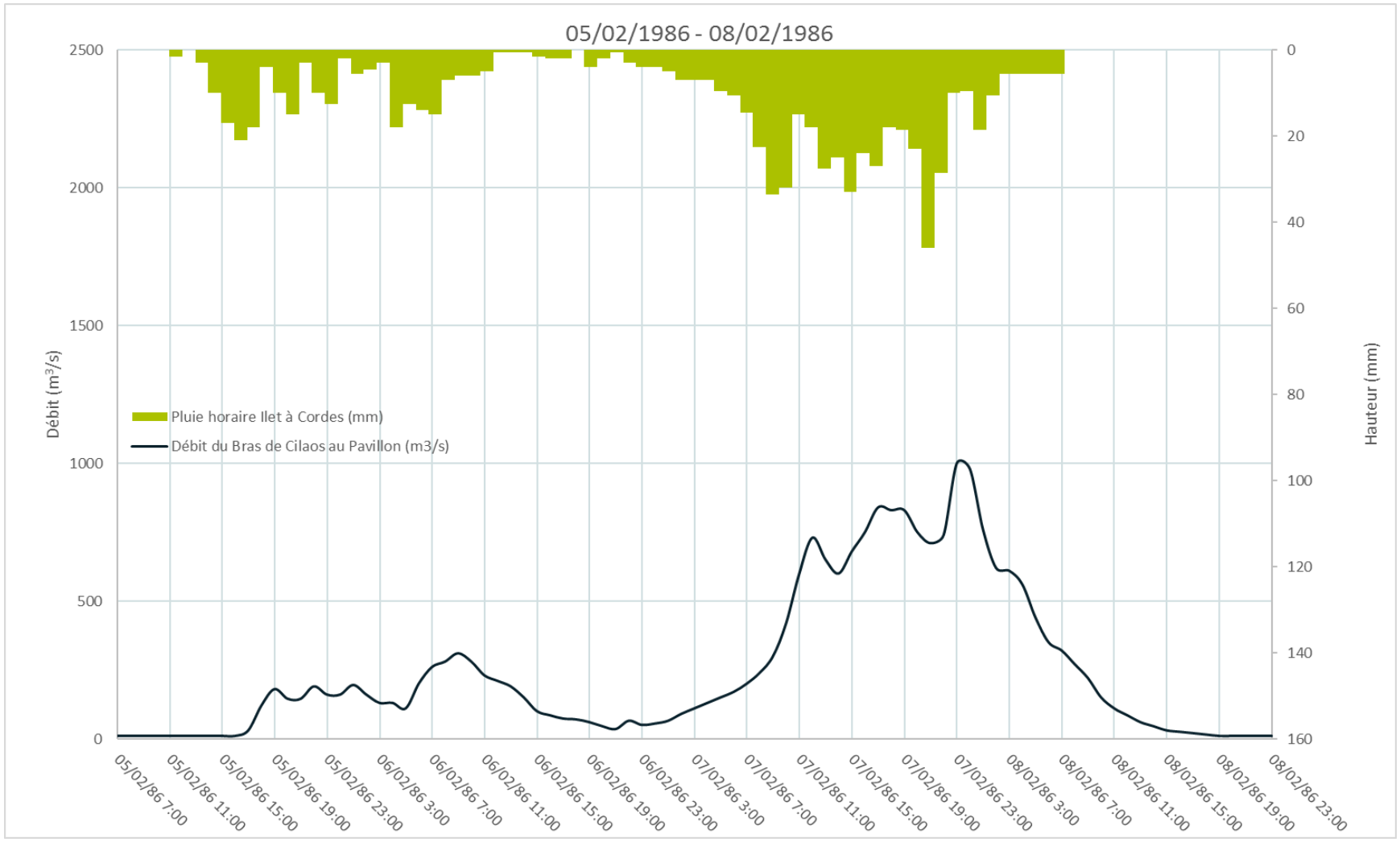


Figure 135 : Modélisation pluie-débit de l'évènement du 5 au 8 février 1986

- **Clotilda (11/02/1987 – 14/02/1987)**

  - Paramètres du modèle

P5j à Cilaos = 224 mm, Ip = 610 mm, CN forts

Sous-bassin versant	Pluie considérée	Pertes initiales (mm)	Curve Number	Référence temporelle
BC_cirque_ilets	0.66 x Cilaos + 0.26 x Palmiste Rouge	0	40	Plaine des Cafres
BC_cirque_remparts	Cilaos	0	60	Plaine des Cafres
BC_gorges	Bras Long	0	60	Plaine des Cafres

Tableau 63 : Paramètres du modèle pluie-débit pour Clotilda

  - Résultats

L'hydrogramme du Bras de Cilaos au Pavillon et le hyétogramme utilisé sont présents sur la figure suivante.

Le débit de pointe et le volume de crue sont synthétisés sur le tableau suivant.

Point de calcul	Débit de pointe (m^3/s)	Volume de la crue (Mm^3)
Pavillon	1 140	97

Tableau 64 : Débit de pointe et volume de la crue estimés pour Clotilda

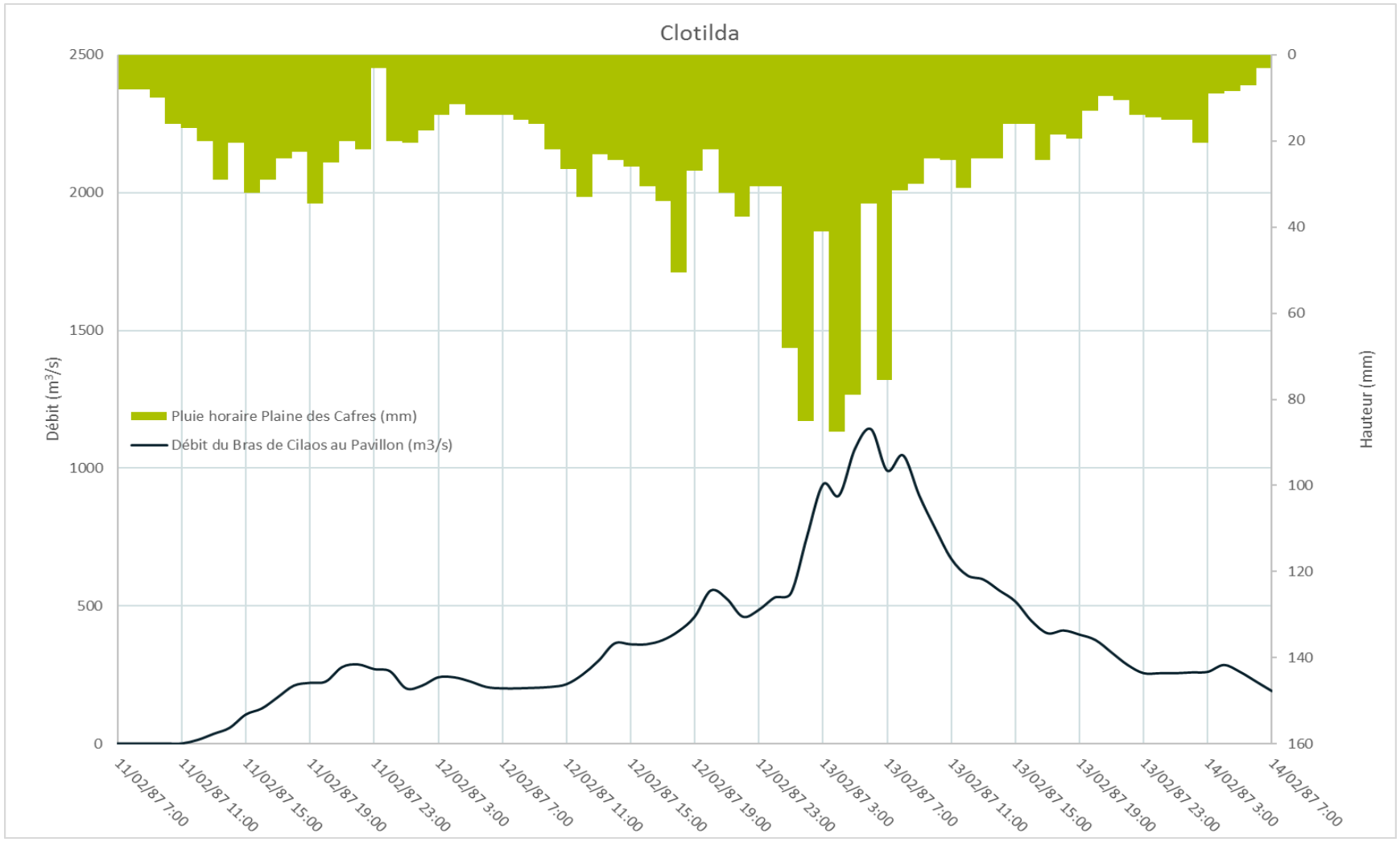


Figure 136 : Modélisation pluie-débit de l'évènement Clotilda

- **Firinga (28/01/1989 – 30/01/1989)**

  - Paramètres du modèle

P5j à Cilaos = 0 mm, Ip = 73 mm, CN moyens

Sous-bassin versant	Pluie considérée	Pertes initiales (mm)	Curve Number	Référence temporelle
BC_cirque_ilets	0.31 x Ilet à Cordes + 0.26 x Palmiste Rouge + 0.43 x Cilaos	100	30	Ilet à Cordes
BC_cirque_remparts	Cilaos	30	45	Ilet à Cordes
BC_gorges	Bras Long	30	45	Ilet à Cordes

Tableau 65 : Paramètres du modèle pluie-débit pour Firinga

  - Résultats

L'hydrogramme du Bras de Cilaos au Pavillon et le hyétogramme utilisé sont présents sur la figure suivante.

Le débit de pointe et le volume de crue sont synthétisés sur le tableau suivant.

Point de calcul	Débit de pointe (m^3/s)	Volume de la crue (Mm^3)
Pavillon	400	19

Tableau 66 : Débit de pointe et volume de la crue estimés pour Firinga

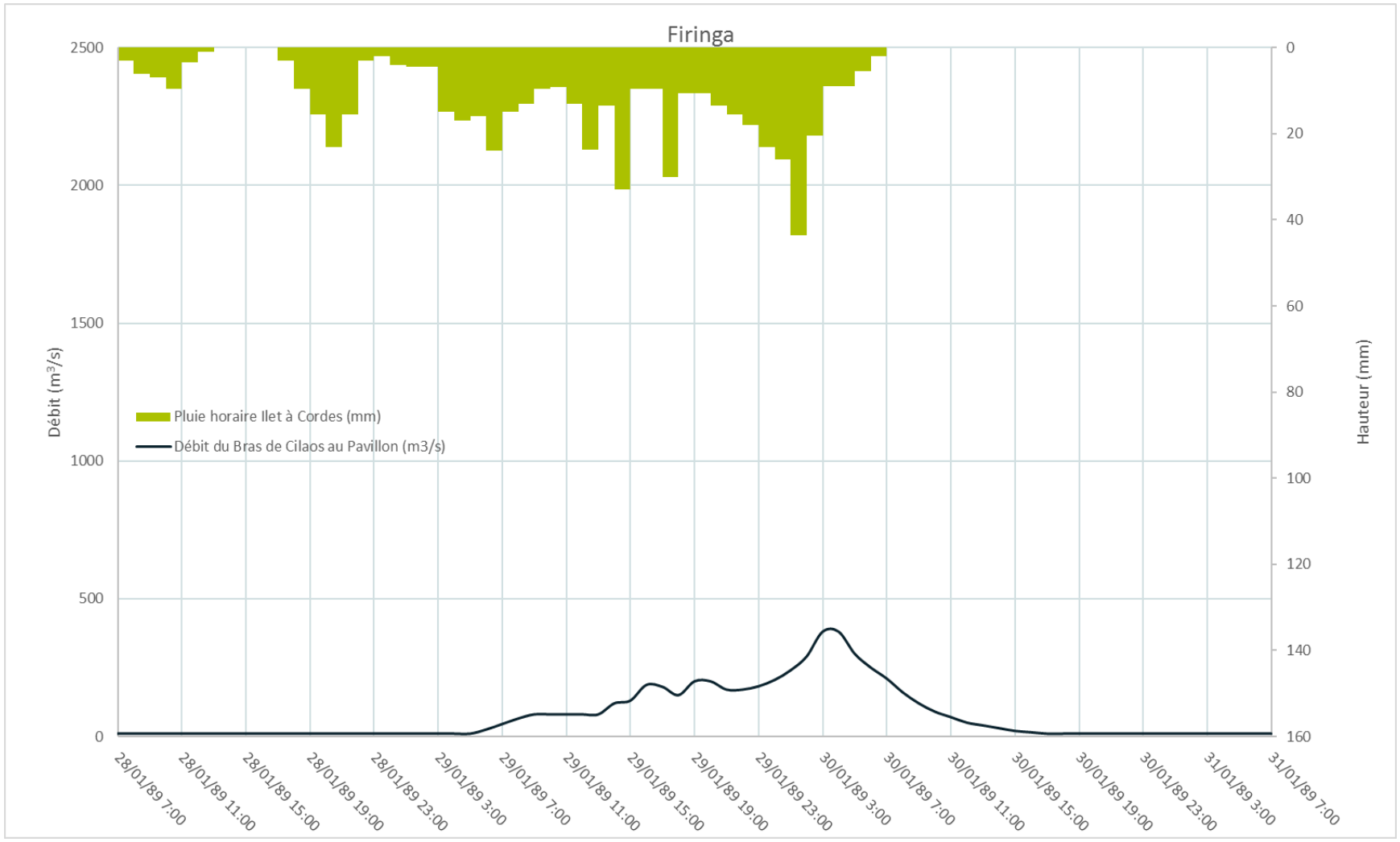


Figure 137 : Modélisation pluie-débit de l'évènement Firinga

- **Colina (19/01/1993 – 20/01/1993)**
  - Paramètres du modèle

P5j à Cilaos = 19 mm, Ip = 43 mm, CN faibles

Sous-bassin versant	Pluie considérée	Pertes initiales (mm)	Curve Number	Référence temporelle
BC_cirque_ilets	0.31 x Ilet à Cordes + 0.26 x Palmiste Rouge + 0.43 x Cilaos	81	25	Cilaos
BC_cirque_remparts	Cilaos	11	40	Cilaos
BC_gorges	Bras Long	11	40	Cilaos

Tableau 67 : Paramètres du modèle pluie-débit pour Colina

  - Résultats

L'hydrogramme du Bras de Cilaos au Pavillon et le hyétogramme utilisé sont présents sur la figure suivante.

Le débit de pointe et le volume de crue sont synthétisés sur le tableau suivant.

Point de calcul	Débit de pointe (m^3/s)	Volume de la crue (Mm^3)
Pavillon	590	30

Tableau 68 : Débit de pointe et volume de la crue estimés pour Colina

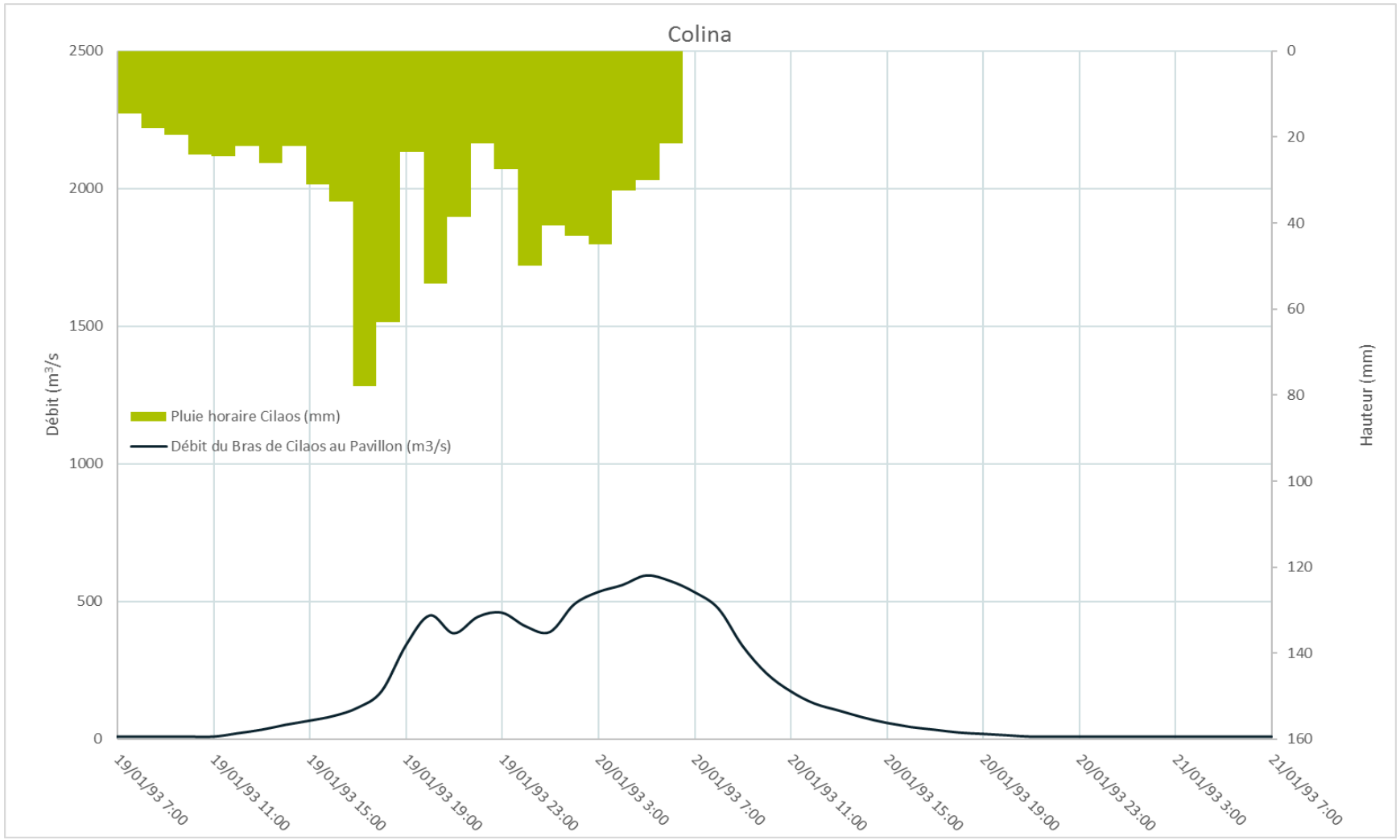


Figure 138 : Modélisation pluie-débit de l'évènement Colina

- **28 au 30 Janvier 2000**

  - Paramètres du modèle

P5j à Cilaos = 24 mm, Ip = 76 mm, CN moyens

Sous-bassin versant	Pluie considérée	Pertes initiales (mm)	Curve Number	Référence temporelle
BC_cirque_ilets	0.31 x Ilet à Cordes + 0.26 x Palmiste Rouge + 0.43 x Cilaos	76	30	Cilaos
BC_cirque_remparts	Cilaos	6	45	Cilaos
BC_gorges	Bras Long	6	45	Cilaos

Tableau 69 : Paramètres du modèle pluie-débit pour l'évènement du 28 au 30 janvier 2000

  - Résultats

L'hydrogramme du Bras de Cilaos au Pavillon et le hyétogramme utilisé sont présents sur la figure suivante.

Le débit de pointe et le volume de crue sont synthétisés sur le tableau suivant.

Point de calcul	Débit de pointe (m^3/s)	Volume de la crue (Mm^3)
Pavillon	420	23

Tableau 70 : Débit de pointe et volume de la crue estimés pour l'évènement du 28 au 30 janvier 2000

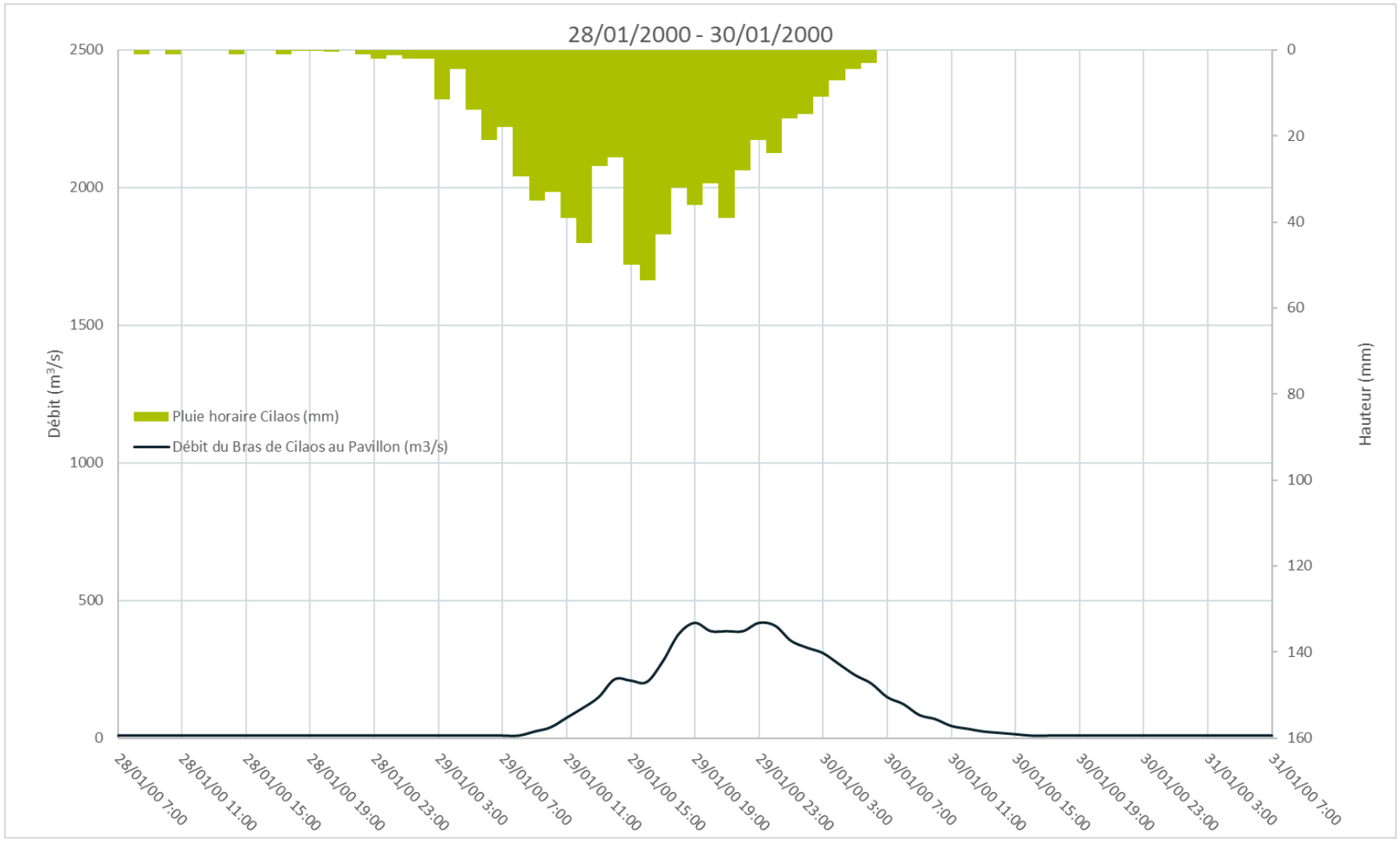


Figure 139 : Modélisation pluie-débit de l'évènement du 28 au 30 janvier 2000

- **Dina (21/01/2002 – 24/01/2002)**

  - Paramètres du modèle

P5j à Cilaos = 0 mm, Ip = 49 mm, CN faibles

Sous-bassin versant	Pluie considérée	Pertes initiales (mm)	Curve Number	Référence temporelle
BC_cirque_ilets	0.31 x Ilet à Cordes + 0.26 x Palmiste Rouge + 0.43 x Cilaos	100	25	Ilet à Cordes
BC_cirque_remparts	Cilaos	30	40	Ilet à Cordes
BC_gorges	Bras Long	30	40	Ilet à Cordes

Tableau 71 : Paramètres du modèle pluie-débit pour Dina

  - Résultats

L'hydrogramme du Bras de Cilaos au Pavillon et le hyétogramme utilisé sont présents sur la figure suivante.

Le débit de pointe et le volume de crue sont synthétisés sur le tableau suivant.

Point de calcul	Débit de pointe (m^3/s)	Volume de la crue (Mm^3)
Pavillon	1 370	102

Tableau 72 : Débit de pointe et volume de la crue estimés pour Dina

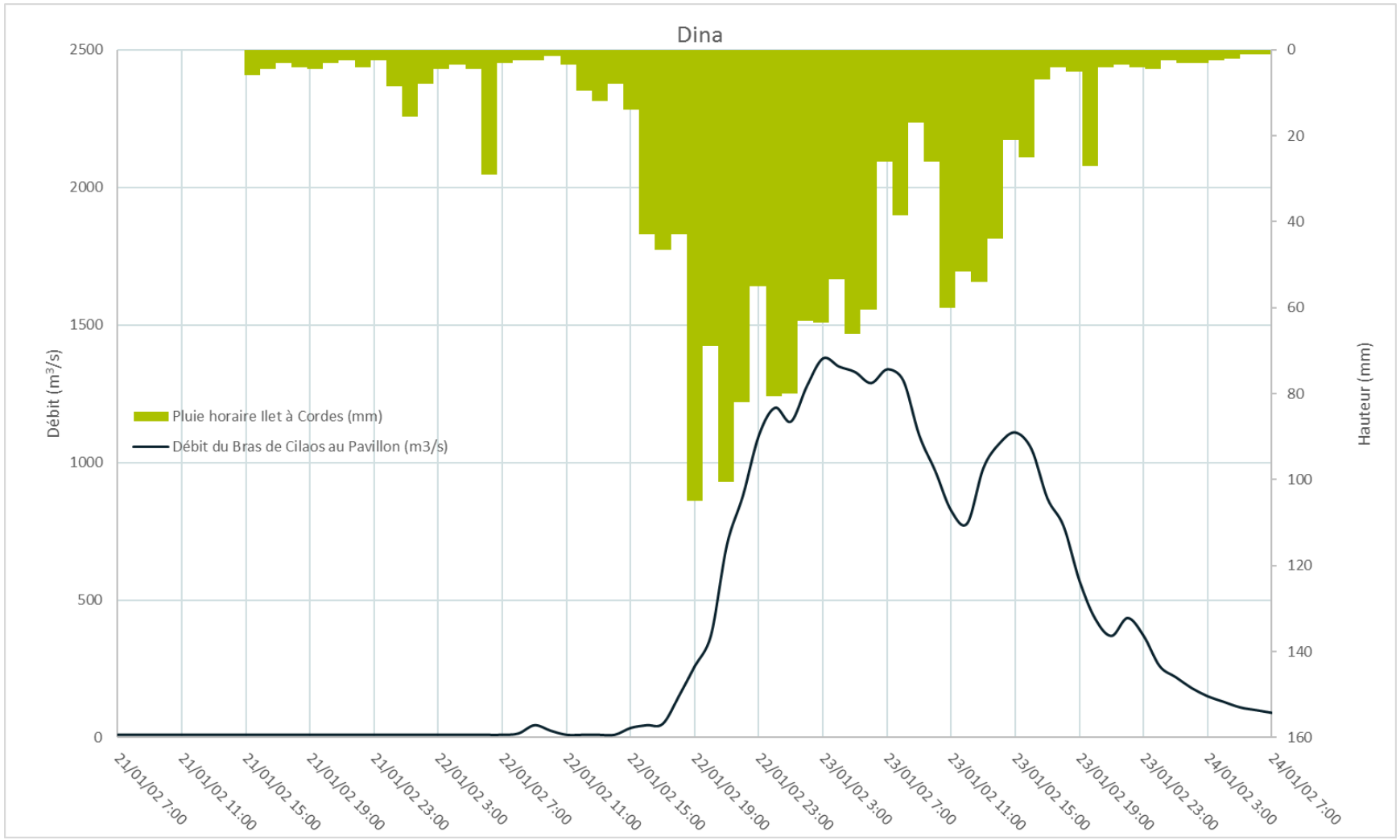


Figure 140 : Modélisation pluie-débit de l'évènement Dina

- **Hary (10/03/2002 – 12/03/2002)**
  - Paramètres du modèle

P5j à Cilaos = 24 mm, Ip = 399 mm, CN forts

Sous-bassin versant	Pluie considérée	Pertes initiales (mm)	Curve Number	Référence temporelle
BC_cirque_ilets	0.31 x Ilet à Cordes + 0.26 x Palmiste Rouge + 0.43 x Cilaos	76	40	Cilaos
BC_cirque_remparts	Cilaos	6	60	Cilaos
BC_gorges	Bras Long	6	60	Cilaos

Tableau 73 : Paramètres du modèle pluie-débit pour Hary

  - Résultats

L'hydrogramme du Bras de Cilaos au Pavillon et le hyétogramme utilisé sont présents sur la figure suivante.

Le débit de pointe et le volume de crue sont synthétisés sur le tableau suivant.

Point de calcul	Débit de pointe (m^3/s)	Volume de la crue (Mm^3)
Pavillon	410	26

Tableau 74 : Débit de pointe et volume de la crue estimés pour Hary

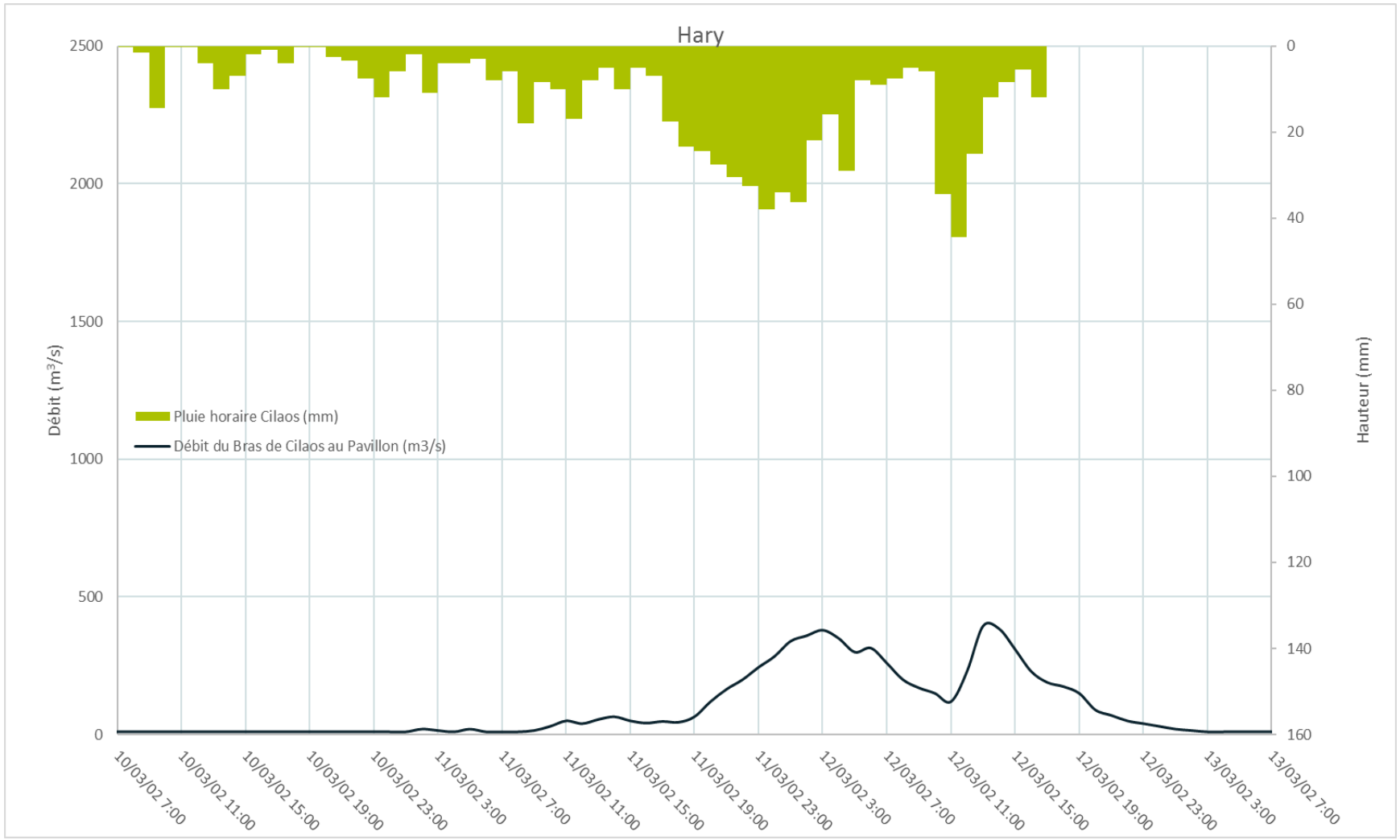


Figure 141 : Modélisation pluie-débit de l'évènement Hary

- **Diwa (04/03/2006 – 07/03/2006)**

  - Paramètres du modèle

P5j à Cilaos = 54 mm, Ip = 196 mm, CN forts

Sous-bassin versant	Pluie considérée	Pertes initiales (mm)	Curve Number	Référence temporelle
BC_cirque_ilets	0.31 x Ilet à Cordes + 0.26 x Palmiste Rouge + 0.43 x Cilaos	46	40	Cilaos
BC_cirque_remparts	Cilaos	0	60	Cilaos
BC_gorges	Bras Long	0	60	Cilaos

Tableau 75 : Paramètres du modèle pluie-débit pour Diwa

  - Résultats

L'hydrogramme du Bras de Cilaos au Pavillon et le hyétogramme utilisé sont présents sur la figure suivante.

Le débit de pointe et le volume de crue sont synthétisés sur le tableau suivant.

Point de calcul	Débit de pointe (m^3/s)	Volume de la crue (Mm^3)
Pavillon	790	84

Tableau 76 : Débit de pointe et volume de la crue estimés pour Diwa

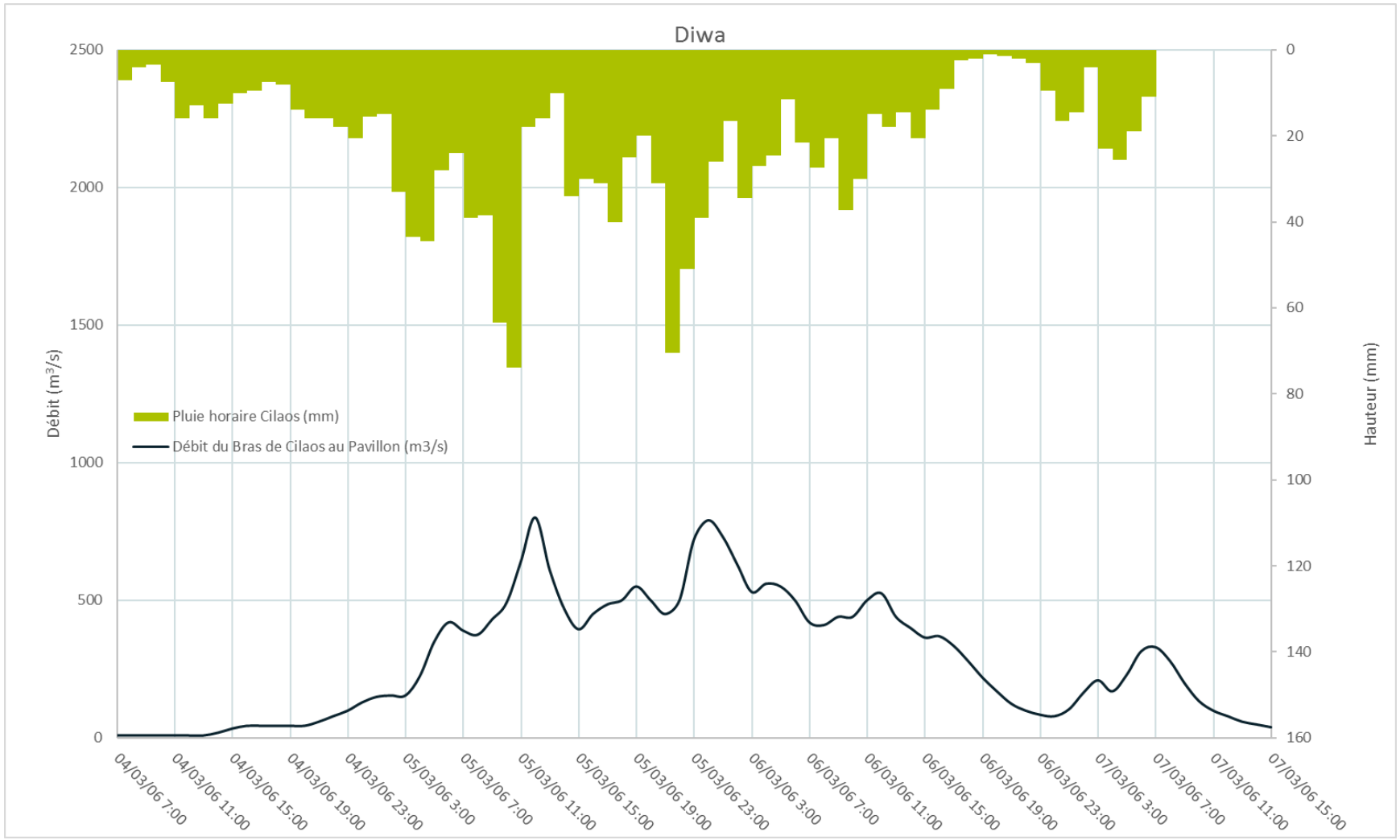


Figure 142 : Modélisation pluie-débit de l'évènement Diwa

- **Gamède (24/02/2007 – 28/02/2007)**

  - Paramètres du modèle

P5j à Cilaos = 220 mm, Ip = 438 mm, CN forts

Sous-bassin versant	Pluie considérée	Pertes initiales (mm)	Curve Number	Référence temporelle
BC_cirque_ilets	Cilaos	0	40	Cilaos
BC_cirque_remparts	Cilaos	0	60	Cilaos
BC_gorges	Bras Long	0	60	Cilaos

Tableau 77 : Paramètres du modèle pluie-débit pour Gamède

  - Résultats

L'hydrogramme du Bras de Cilaos au Pavillon et le hyétogramme utilisé sont présents sur la figure suivante.

Le débit de pointe et le volume de crue sont synthétisés sur le tableau suivant.

Point de calcul	Débit de pointe (m^3/s)	Volume de la crue (Mm^3)
Pavillon	1 220	196

Tableau 78 : Débit de pointe et volume de la crue estimés pour Gamède

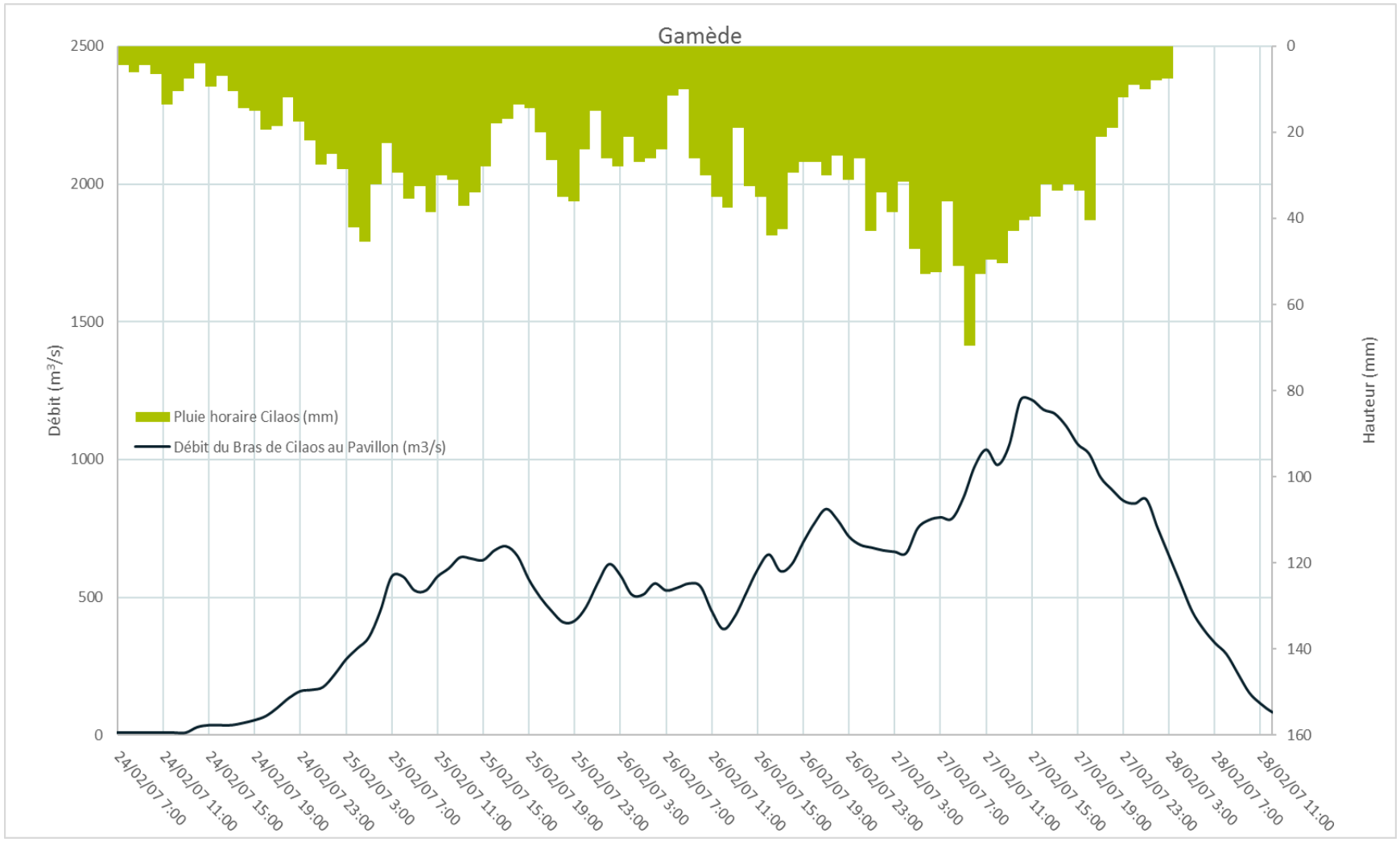


Figure 143 : Modélisation pluie-débit de l'évènement Gamède

- **Dumile (01/01/2013 – 03/01/2013)**
  - Paramètres du modèle

P5j à Cilaos = 14 mm, Ip = 69 mm, CN moyens

Sous-bassin versant	Pluie considérée	Pertes initiales (mm)	Curve Number	Référence temporelle
BC_cirque_ilets	0.31 x Ilet à Cordes + 0.26 x Palmiste Rouge + 0.43 x Cilaos	86	30	Cilaos
BC_cirque_remparts	Cilaos	16	45	Cilaos
BC_gorges	Bras Long	16	45	Cilaos

Tableau 79 : Paramètres du modèle pluie-débit pour Dumile

  - Résultats

L'hydrogramme du Bras de Cilaos au Pavillon et le hyétogramme utilisé sont présents sur la figure suivante.

Le débit de pointe et le volume de crue sont synthétisés sur le tableau suivant.

Point de calcul	Débit de pointe (m^3/s)	Volume de la crue (Mm^3)
Pavillon	600	33

Tableau 80 : Débit de pointe et volume de la crue estimés pour Dumile

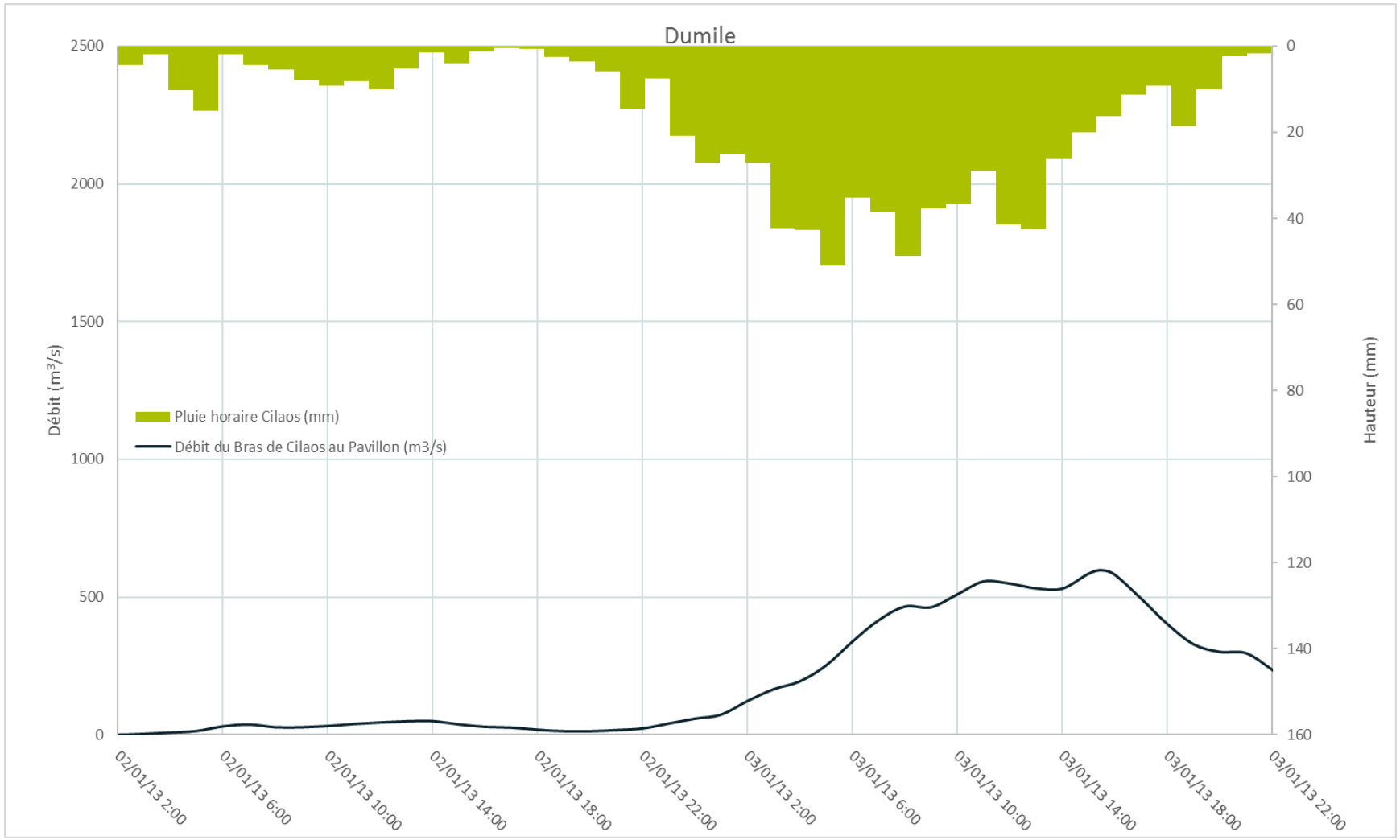


Figure 144 : Modélisation pluie-débit de l'évènement Dumile

- **Feeleng (31/01/2013 – 03/02/2013)**
  - Paramètres du modèle

P5j à Cilaos = 107 mm, Ip = 608 mm, CN forts

Sous-bassin versant	Pluie considérée	Pertes initiales (mm)	Curve Number	Référence temporelle
BC_cirque_ilets	0.31 x Ilet à Cordes + 0.26 x Palmiste Rouge + 0.43 x Cilaos	0	40	Cilaos
BC_cirque_remparts	Cilaos	0	60	Cilaos
BC_gorges	Bras Long	0	60	Cilaos

Tableau 81 : Paramètres du modèle pluie-débit pour Feeleng

  - Résultats

L'hydrogramme du Bras de Cilaos au Pavillon et le hyétogramme utilisé sont présents sur la figure suivante.

Le débit de pointe et le volume de crue sont synthétisés sur le tableau suivant.

Point de calcul	Débit de pointe (m^3/s)	Volume de la crue (Mm^3)
Pavillon	360	22

Tableau 82 : Débit de pointe et volume de la crue estimés pour Feeleng

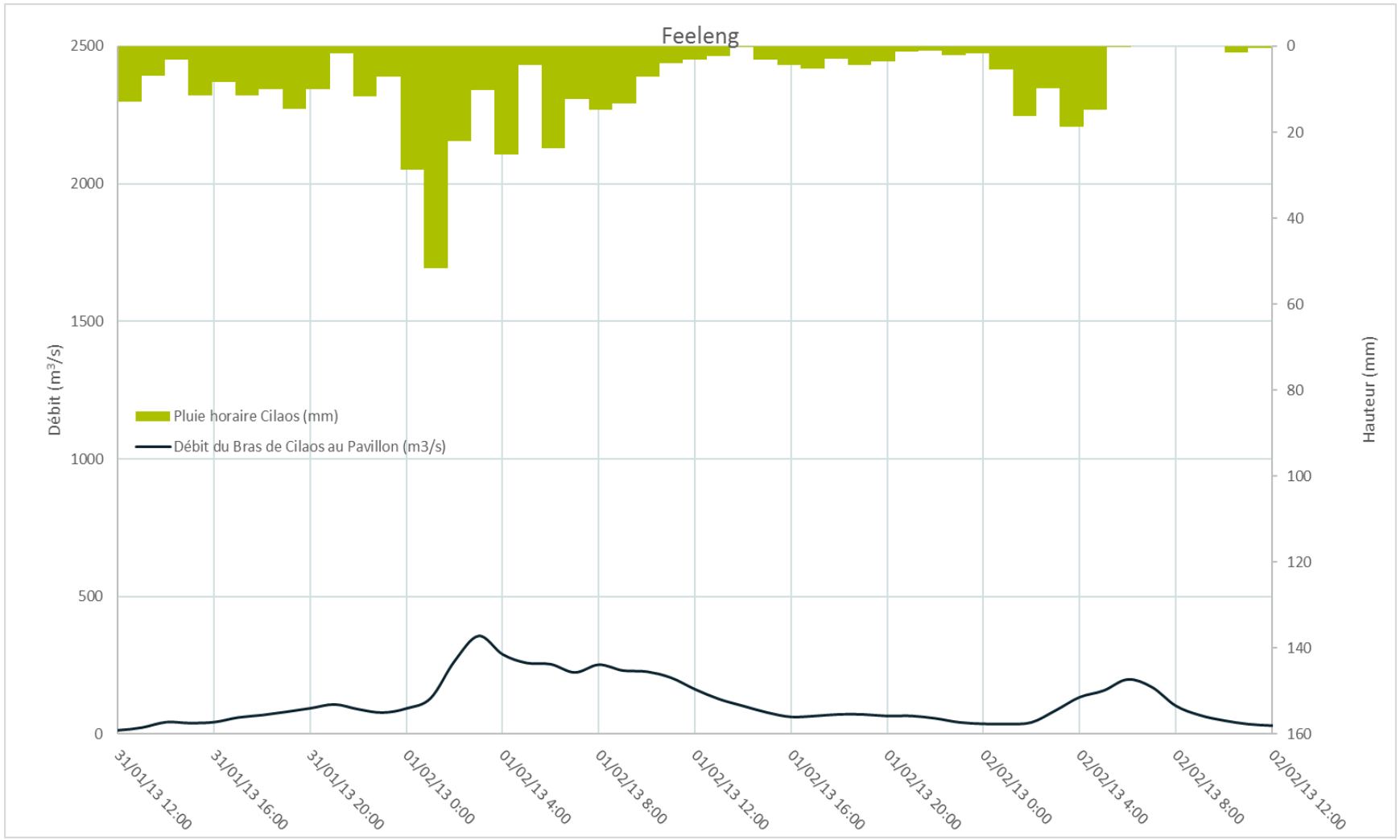


Figure 145 : Modélisation pluie-débit de l'évènement Feeleng

- **Bejisa (01/01/2014 – 04/01/2014)**
  - Paramètres du modèle

P5j à Cilaos = 14 mm, Ip = 70 mm, CN moyens

Sous-bassin versant	Pluie considérée	Pertes initiales (mm)	Curve Number	Référence temporelle
BC_cirque_ilets	0.31 x Ilet à Cordes + 0.26 x Palmiste Rouge + 0.43 x Cilaos	86	30	Cilaos
BC_cirque_remparts	Cilaos	16	45	Cilaos
BC_gorges	Bras Long	16	45	Cilaos

Tableau 83 : Paramètres du modèle pluie-débit pour Bejisa

  - Résultats

L'hydrogramme du Bras de Cilaos au Pavillon et le hyétogramme utilisé sont présents sur la figure suivante.

Le débit de pointe et le volume de crue sont synthétisés sur le tableau suivant.

Point de calcul	Débit de pointe (m^3/s)	Volume de la crue (Mm^3)
Pavillon	780	54

Tableau 84 : Débit de pointe et volume de la crue estimés pour Bejisa

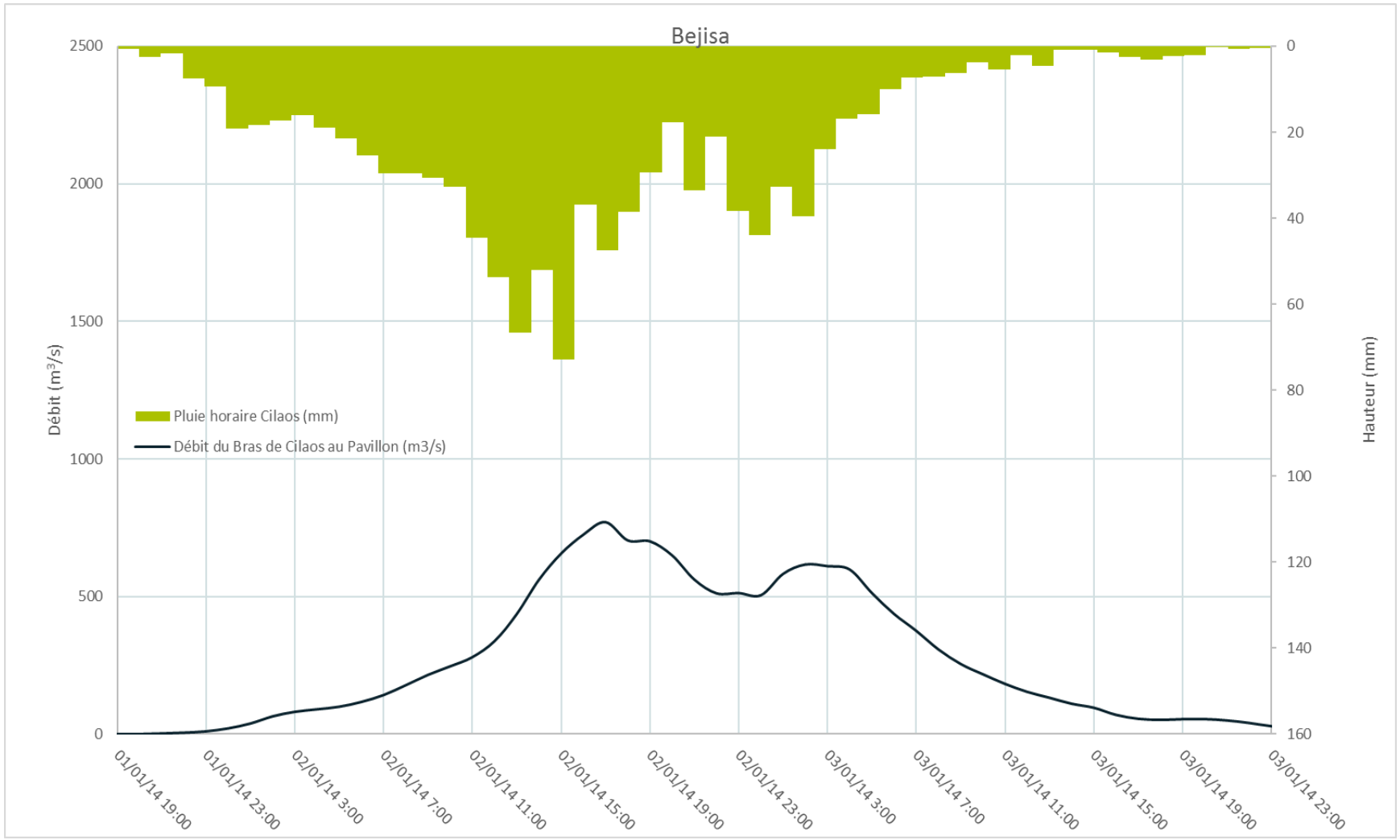


Figure 146 : Modélisation pluie-débit de l'évènement Bejisa

- **Haliba (07/03/2015 – 10/03/2015)**

  - Paramètres du modèle

P5j à Cilaos = 36 mm, Ip = 147 mm, CN moyens

Sous-bassin versant	Pluie considérée	Pertes initiales (mm)	Curve Number	Référence temporelle
BC_cirque_ilets	0.31 x Ilet à Cordes + 0.26 x Palmiste Rouge + 0.43 x Cilaos	64	30	Cilaos, Ilet à Cordes
BC_cirque_remparts	Cilaos	0	45	Cilaos
BC_gorges	Bras Long	0	45	Cilaos

Tableau 85 : Paramètres du modèle pluie-débit pour Haliba

  - Résultats

L'hydrogramme du Bras de Cilaos au Pavillon et le hyétogramme utilisé sont présents sur la figure suivante.

Le débit de pointe et le volume de crue sont synthétisés sur le tableau suivant.

Point de calcul	Débit de pointe (m^3/s)	Volume de la crue (Mm^3)
Pavillon	340	25

Tableau 86 : Débit de pointe et volume de la crue estimés pour Haliba

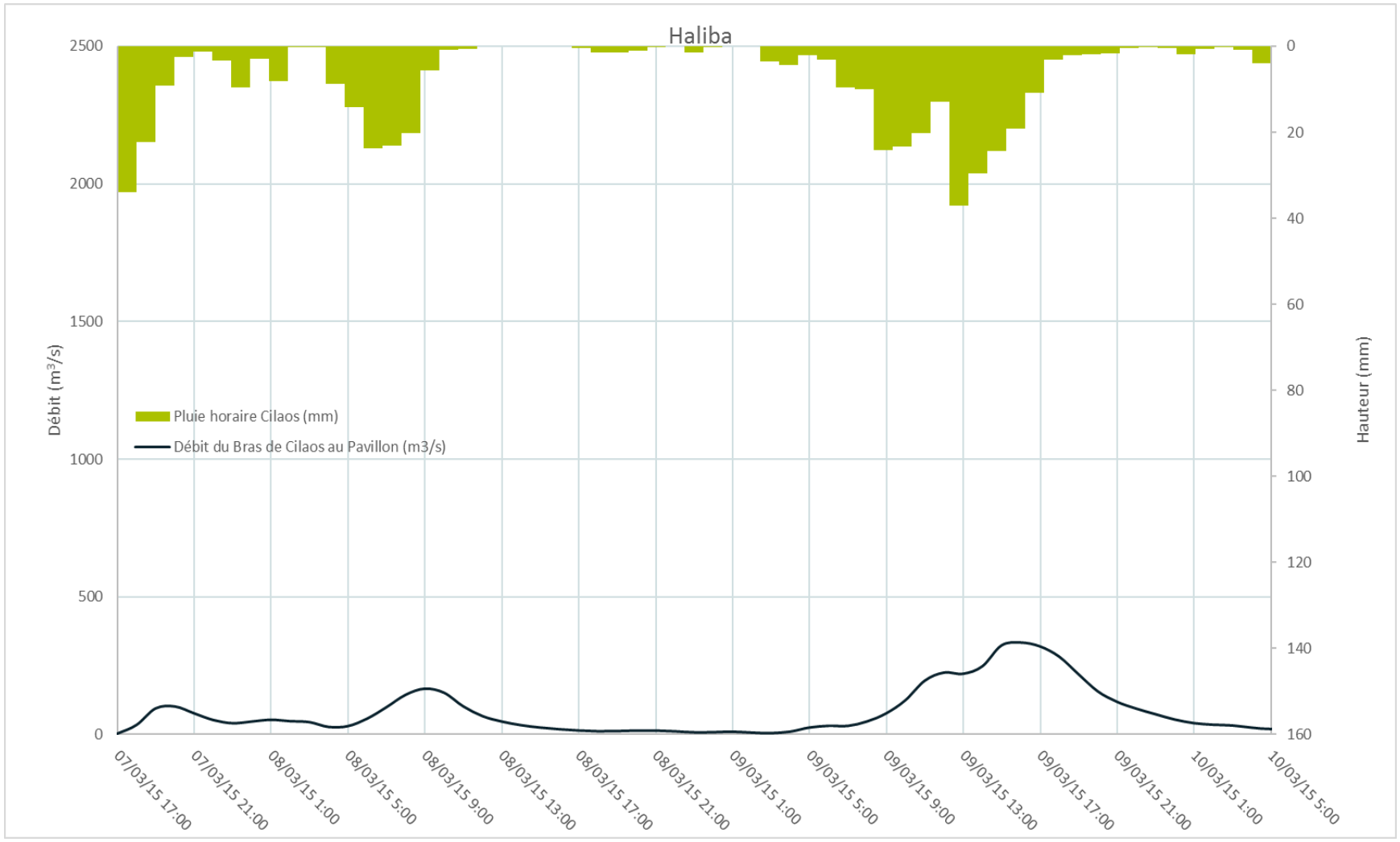


Figure 147 : Modélisation pluie-débit de l'évènement Haliba

- **Daya (05/02/2016 – 09/02/2016)**
  - Paramètres du modèle

P5j à Cilaos = 0 mm, Ip = 107 mm, CN moyens

Sous-bassin versant	Pluie considérée	Pertes initiales (mm)	Curve Number	Référence temporelle
BC_cirque_ilets	0.31 x Ilet à Cordes + 0.26 x Palmiste Rouge + 0.43 x Cilaos	100	30	Cilaos
BC_cirque_remparts	Cilaos	30	45	Cilaos
BC_gorges	Bras Long	30	45	Cilaos

Tableau 87 : Paramètres du modèle pluie-débit pour Daya

  - Résultats

L'hydrogramme du Bras de Cilaos au Pavillon et le hyétogramme utilisé sont présents sur la figure suivante.

Le débit de pointe et le volume de crue sont synthétisés sur le tableau suivant.

Point de calcul	Débit de pointe (m^3/s)	Volume de la crue (Mm^3)
Pavillon	240	11

Tableau 88 : Débit de pointe et volume de la crue estimés pour Daya

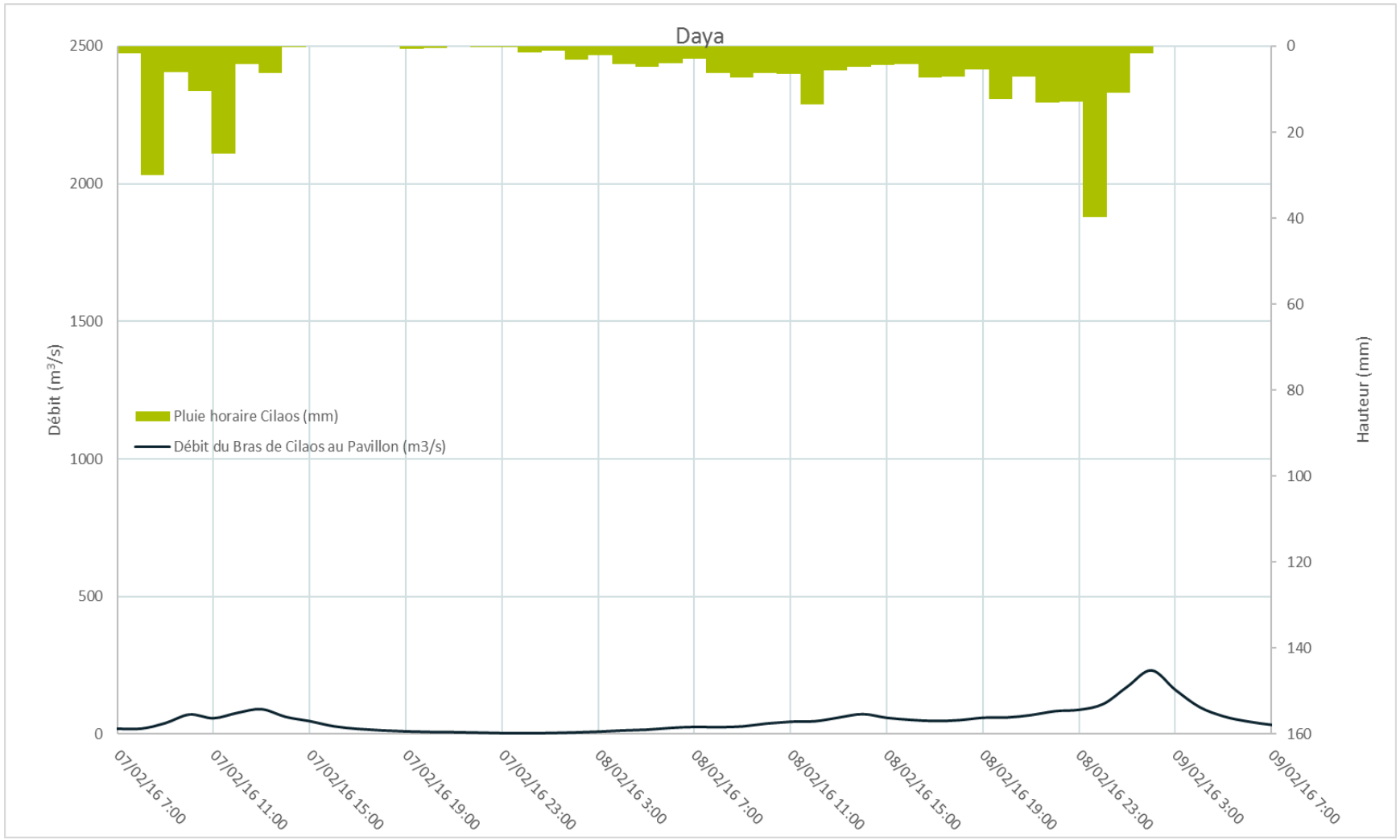


Figure 148 : Modélisation pluie-débit de l'évènement Daya

- **Berguitta (17/01/2018 – 19/01/2018)**
  - Paramètres du modèle

P5j à Cilaos = 148 mm, Ip = 568 mm, CN forts

Sous-bassin versant	Pluie considérée	Pertes initiales (mm)	Curve Number	Référence temporelle
BC_cirque_ilets	0.31 x Ilet à Cordes + 0.26 x Palmiste Rouge + 0.43 x Cilaos	0	40	Cilaos
BC_cirque_remparts	Cilaos	0	60	Cilaos
BC_gorges	Bras Long	0	60	Cilaos

Tableau 89 : Paramètres du modèle pluie-débit pour Berguitta

  - Résultats

L'hydrogramme du Bras de Cilaos au Pavillon et le hyétogramme utilisé sont présents sur la figure suivante.

Le débit de pointe et le volume de crue sont synthétisés sur le tableau suivant.

Point de calcul	Débit de pointe (m^3/s)	Volume de la crue (Mm^3)
Pavillon	500	26

Tableau 90 : Débit de pointe et volume de la crue estimés pour Berguitta

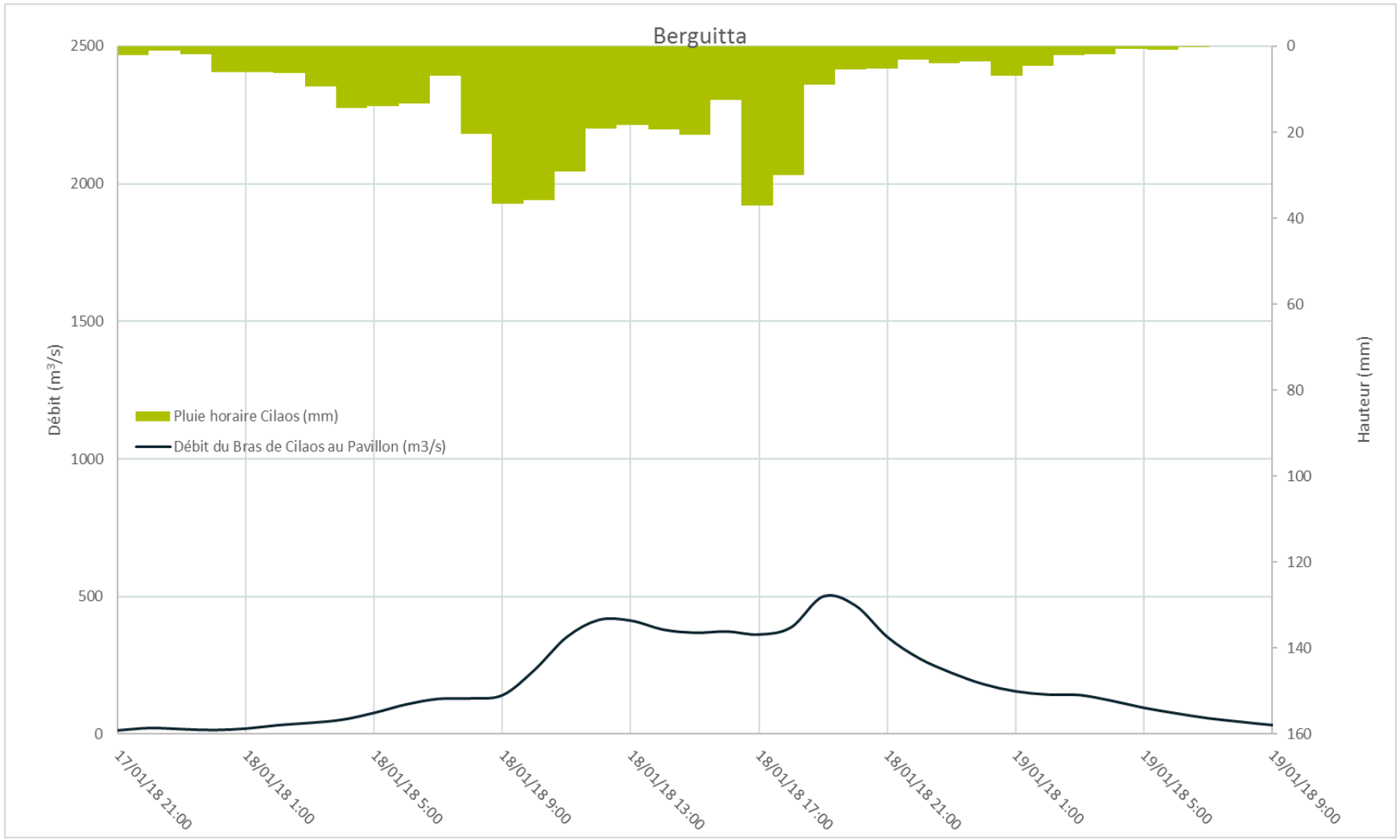


Figure 149 : Modélisation pluie-débit de l'évènement Berguitta

- **Dumazile (03/03/2018 – 06/03/2018)**

  - Paramètres du modèle

P5j à Cilaos = 33 mm, Ip = 206 mm, CN forts

Sous-bassin versant	Pluie considérée	Pertes initiales (mm)	Curve Number	Référence temporelle
BC_cirque_ilets	0.31 x Ilet à Cordes + 0.26 x Palmiste Rouge + 0.43 x Cilaos	67	40	Cilaos
BC_cirque_remparts	Cilaos	0	60	Cilaos
BC_gorges	Bras Long	0	60	Cilaos

Tableau 91 : Paramètres du modèle pluie-débit pour Dumazile

  - Résultats

L'hydrogramme du Bras de Cilaos au Pavillon et le hyétogramme utilisé sont présents sur la figure suivante.

Le débit de pointe et le volume de crue sont synthétisés sur le tableau suivant.

Point de calcul	Débit de pointe (m^3/s)	Volume de la crue (Mm^3)
Pavillon	490	53

Tableau 92 : Débit de pointe et volume de la crue estimés pour Dumazile

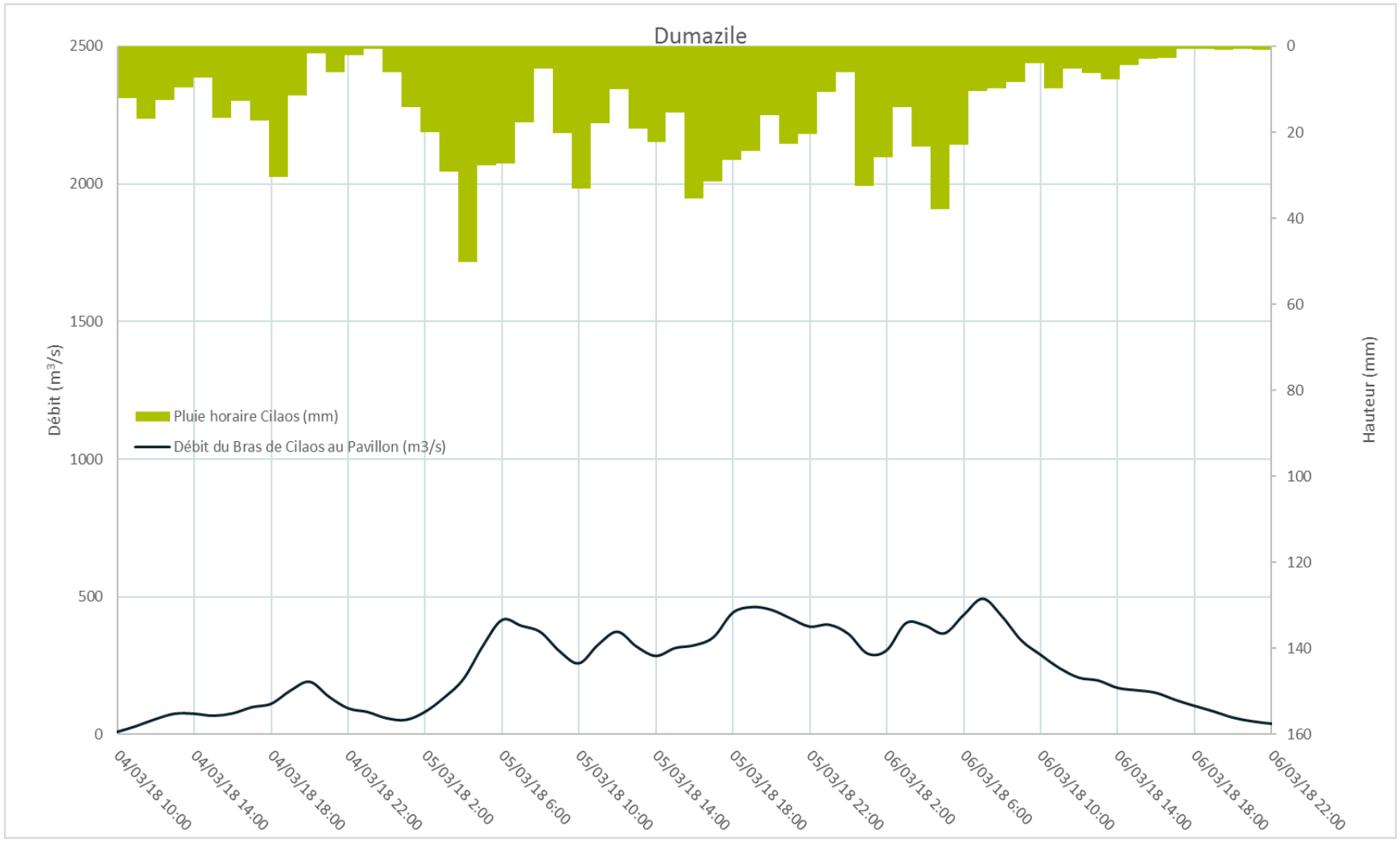


Figure 150 : Modélisation pluie-débit de l'évènement Dumazile

- **Fakir (21/04/2018 – 25/04/2018)**
  - Paramètres du modèle

P5j à Cilaos = 13 mm, Ip = 52 mm, CN forts

Sous-bassin versant	Pluie considérée	Pertes initiales (mm)	Curve Number	Référence temporelle
BC_cirque_ilets	0.31 x Ilet à Cordes + 0.26 x Palmiste Rouge + 0.43 x Cilaos	87	30	Plaine des Cafres
BC_cirque_remparts	Cilaos	17	45	Cilaos
BC_gorges	Bras Long	17	45	Cilaos

Tableau 93 : Paramètres du modèle pluie-débit pour Fakir

  - Résultats

L'hydrogramme du Bras de Cilaos au Pavillon et le hyétogramme utilisé sont présents sur la figure suivante.

Le débit de pointe et le volume de crue sont synthétisés sur le tableau suivant.

Point de calcul	Débit de pointe (m^3/s)	Volume de la crue (Mm^3)
Pavillon	330	12

Tableau 94 : Débit de pointe et volume de la crue estimés pour Fakir

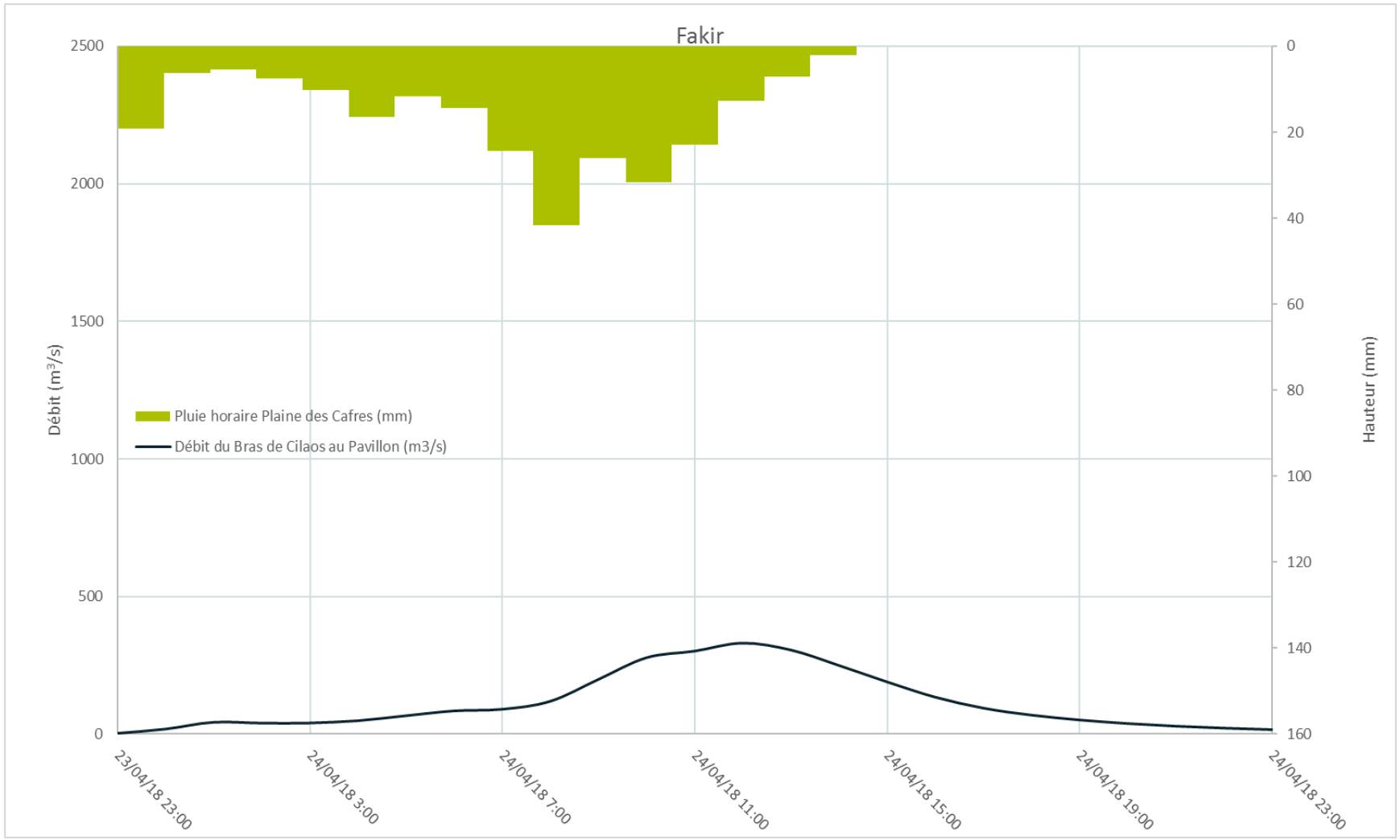


Figure 151 : Modélisation pluie-débit de l'évènement Fakir