



**PRÉFET
DE LA RÉGION
GUADELOUPE**

*Liberté
Égalité
Fraternité*

Commune du Moule

Plan de prévention des risques naturels (PPRN)

Note de présentation

Vu pour être annexée à l'arrêté préfectoral du **07 AVR. 2026**

Table des matières

Table des matières	2
Table des illustrations.....	3
1. Objectifs et démarche.....	5
1.1 Préambule	5
1.2 Les risques naturels en Guadeloupe	5
1.3 Les objectifs de la politique de prévention des risques	6
1.4 La démarche PPRN	6
1.5 Pourquoi réviser le PPRN ?.....	7
2. Zone d'étude : présentation et environnement.....	8
2.1 Situation géographique	8
2.2 Contexte climatique	8
2.3 Contexte hydrographique.....	9
2.4 Contexte géologique et hydrogéologique	11
2.4.1 Géologie et hydrogéologie régionale et locale.....	11
2.4.2 Spécificités morphologiques du territoire communal	12
2.4.3 Zonage géotechnique.....	13
2.4.4 Effets de site topographiques	14
3. Les aléas : les phénomènes naturels.....	15
3.1 Généralités	15
3.1.1 Phénomènes historiques.....	15
3.1.2 Arrêtés de catastrophes naturelles.....	17
3.1.3 Typologie des inondations	25
3.1.4 Typologie des mouvements de terrain	30
3.1.5 Typologie des submersions marines	35
3.2 Caractérisation et cartographie des aléas	38
3.2.1 Définitions et notions générales	38
3.2.2 Aléa inondation	38
3.2.3 Aléa mouvements de terrain.....	53
3.2.4 Aléa submersion marine	71
3.2.4.3 Classification de l'aléa submersion marine.....	79
3.2.5 Aléa liquéfaction	81
3.3 Les aléas sur la commune du Moule	81
4. Les enjeux : recensement et cartographie.....	82
4.1 Définition	82
4.2 Méthodologie	82
4.2.1 Utilisation des bases de données.....	83
4.2.2 Atelier de cartographie des enjeux avec les communes.....	83
4.3 Les enjeux sur la commune du Moule.....	83
5. Annexes.....	84
5.1 Glossaire	84
5.2 Lexique des sigles	84

Table des illustrations

Figure 1 : Normales annuelles (1981-2010) en mm de la pluviométrie en Guadeloupe (Source : Météo France).....	9
Figure 2 : Réseau hydrographique [Source DEAL].....	10
Figure 3 : Réseau hydrographique de la commune Source : BDTOPO HYDROGRAPHIE 2019, IGN.....	11
Figure 4 : Zonage géologique [Source : rapport BRGM/RP-61989-FR]	12
Figure 5 : Zonage géotechnique [Source : rapport BRGM/RP-61989-FR]	13
Figure 6 : Inondation de la RN2 à la hauteur de l'échangeur de Beausoleil à Baie Mahault par débordement de cours d'eau (en mai 2017) [Source : Alain Hannibal Canal 1o Télévision/97Land].....	26
Figure 7 : Inondation de Pointe-à-Pitre en janvier 2011 par ruissellement [Source : http://www.atout-guadeloupe.com/ ; Photos de Eliane Rascar].....	27
Figure 8 : Crue torrentielle au niveau de la rivière aux Herbes à Basse-Terre (lors du cyclone MARYLIN en 1995) [Source : Météo-France]	28
Figure 9 : Lave torrentielle sur la rivière du Prêcheur en Martinique (en janvier 1998) [Source : BRGM]	29
Figure 10 : Embâcle au niveau du Pont-Vert au Lamentin (en novembre 1966) [Source : France-Antilles]...	30
Figure 11 : schéma [Source : BRGM] et photographie d'une doline à Montaigu-de-Quercy (Tarn-et-Garonne) [Source : IMSRN].....	31
Figure 12 : Schéma [Source : BRGM] et photographie d'un fontis à Roquefort (Landes) [Source : IMSRN] ..	32
Figure 13 : Schéma [Source : BRGM] et photographie d'un effondrement généralisé à Saint-Emilion (Gironde) [Source : CG 33].....	32
Figure 14 : Schéma conceptuel du phénomène d'éboulements / chutes de blocs (à gauche) et escarpement avec éboulis en pied à Aspres-sur-Buech, Hautes-Alpes (à droite) [Source : IMSRN]	33
Figure 15 : Schéma conceptuel du phénomène de glissement de terrain (à droite) et glissement en bordure de l'Oued Nekor, au Maroc (à gauche) [Source : IMSRN]	34
Figure 16 : Schéma conceptuel du phénomène de recul de falaise [Source : MEDD]	35
Figure 17 : Schéma des différentes contributions au niveau du plan d'eau lors d'une tempête jusqu'au rivage (Source : BRGM).....	37
Figure 18 : Exemple de chronologies possibles en cas de submersion marine (franchissement par paquets de mer / dégradation des ouvrages / débordement - Source : BRGM)	38
Figure 19 : Localisation des données récentes intégrées dans la cartographie de l'aléa inondation de la révision des PPRN	42
Figure 20 : Logigramme des principes retenus pour le tracé de l'enveloppe de la zone inondable.....	45
Figure 21 : Classification qualitative de l'aléa dans la première génération de PPRN	46
Figure 22 : Coupe transversales d'une vallée – Approche hydrogéomorphologique.....	46
Figure 23 : Caractérisation de l'aléa en fonction de la hauteur et de la dynamique	48
Figure 24 : Croisement hauteur vitesse pour les zones urbaines - Source : Direction de la Prévention, des pollutions et des risques, 2004. Plans de prévention des risques naturels - Les risques d'inondation - Le ruissellement péri-urbain - Note complémentaire	48
Figure 25 : Déplacement d'une personne en fonction de la hauteur d'eau et de la vitesse d'écoulement. Source : Guide méthodologique pour l'élaboration des PPR.....	49
Figure 26 : Détection des dépressions (en rouge) avec l'outil StochasticDepressionAnalysis de WhiteboxTools sur la commune de Petit-Canal [Source : Ginger CEBTP].....	54
Figure 27 : Exemple de dépression sur la commune de Petit-Canal (à gauche) [Source : Ginger CEBTP] correspondant à une ancienne carrière visible sur la photo aérienne IGN de 1978 (à droite) [Source : https://remonterletemps.ign.fr/].....	55
Figure 28 : Dépressions déconnectées du réseau hydrographique sur la commune de Petit-Canal [Source : Ginger CEBTP].....	55
Figure 29 : Extrait de l'aléa Affaissements / Effondrements finalisé sur la commune de Petit-Canal [Source : Ginger CEBTP].....	56
Figure 30 : Organigramme de Rockyfor3D. Les cercles colorés en bleu indiquent les étapes du modèle où des changements de direction sont susceptibles de se produire dans la chute du bloc simulé. [Source : Ecorisq]	58
Figure 31 : Extrait des résultats de la modélisation trajectographique 3D (nombre de passages) sur La	

Désirade [Source : Ginger CEBTP]	59
Figure 32 : Extrait des résultats de la modélisation trajectographique 3D (énergie au 95ième percentile) sur La Désirade [Source : Ginger CEBTP]	60
Figure 33 : Extrait des résultats de la modélisation trajectographique 3D (probabilité d'atteinte) sur La Désirade [Source : Ginger CEBTP]	60
Figure 34 : Extrait de l'aléa Eboulements / Chutes de blocs brut issu du croisement entre l'énergie et la probabilité d'atteinte sur La Désirade [Source : Ginger CEBTP].....	61
Figure 35 : Extrait de l'aléa Glissements de terrain brut sur Marie-Galante [Source : Ginger CEBTP]	63
Figure 36 : Extraits des aléas Glissements de terrain Fort (à gauche), Moyen (au centre) et Faible (à droite) nettoyées, lissées et avec tampons sur Marie-Galante [Source : Ginger CEBTP]	63
Figure 37 : Extrait de l'aléa Glissements de terrain finalisé sur Marie-Galante [Source : Ginger CEBTP].....	64
Figure 38 : Zones de falaises concernées par un aléa Recul de Falaise [Source : Ginger CEBTP]	65
Figure 39 : Exemple d'estimation du recul potentiel des falaises au regard de la morphologie du trait de côte sur Grande-Terre (à gauche) et de prise en compte du sous-cavage au niveau de Gueule Grand Gouffre à Marie-Galante (à droite) [Source : Ginger CEBTP].....	66
Figure 40 : Extrait de la saisie manuelle de l'aléa Recul de Falaise brut (grandes falaises) sur Marie-Galante [Source : Ginger CEBTP].....	67
Figure 41 : Extraits des aléas Recul de Falaise Fort assemblés (à gauche), Moyen (au centre) et Faible (à droite) avec tampons et lissée sur Marie-Galante [Source : Ginger CEBTP].....	67
Figure 42 : Extrait de l'aléa Recul de Falaise finalisé (méthodologie « simplifiée ») sur Marie-Galante [Source : Ginger CEBTP].....	68
Figure 43 : Comparaison du littoral de Gosier entre les photos aériennes IGN de 1963 (en haut, à gauche), 1968 (en bas, à gauche) [Source : https://remonterletemps.ign.fr/] et les images satellite de 2022 (à droite) [Source : Google Earth].....	69
Figure 44 : Comparaison du littoral de Gosier entre les photos aériennes IGN de 1968 (à gauche) [Source : https://remonterletemps.ign.fr/] et les images satellite de 2022 (à droite) [Source : Google Earth].....	69
Figure 45 : Extrait de l'aléa Recul de Falaise sur une zone à enjeux forts à Gosier sur Grande-Terre [Source : Ginger CEBTP].....	70
Figure 46 : Extrait de l'aléa Mouvements de terrain finalisé sur la commune du Gosier [Source : Ginger CEBTP].....	71
Figure 47 : Site du Moule : (a) : emprise spatiale du domaine de calcul et données topo-bathymétriques ; (b) Maillage de calcul et point de forçage (en violet) ; (c) topo-bathymétrie et lignes de contraintes (violet et bleu) dans la ville du Moule ; (d) zoom du m	76
Figure 48 : implantation des profils sur le site du Moule pour le calcul de la submersion et des débits franchissant avec SWAS. A : Vue de l'ensemble des 41 profils ; B : exemple de profils à franchissements ; C : exemple de profils pour le calcul de la submersion	77
Figure 49 : Scénario de référence actuel : extension de la submersion et hauteur d'eau maximale calculées sur la Ville du Moule.....	78
Figure 50 : Scénario de référence actuel : vitesse maximale des courants moyennées calculées sur la ville du Moule	78
Figure 51 : scénario de référence à 2100 : extension de la submersion et hauteur d'eau maximale calculées sur la ville du Moule.	79
Figure 52 : Scénario de référence à 2100 : vitesse maximale des courants moyennées calculées sur la ville du Moule.	79
Figure 53 : Qualification de l'aléa de submersion marine en fonction des classes de hauteur d'eau et des courants à terre	80

1. Objectifs et démarche

1.1 Préambule

La commune du Moule se situe sur l'île de Guadeloupe, dans les Antilles françaises.

De par cette situation, la commune est exposée à de nombreux risques naturels : cyclones, inondations, mouvements de terrains (éboulements / chutes de blocs et de pierres, glissements de terrain) et activité sismique.

Ces différents phénomènes naturels, pouvant avoir des conséquences diverses sur l'intégrité des biens et des personnes, représentent un risque reconnu comme tel par la loi N° 2004-811 du 13 août 2004 de modernisation de la sécurité civile et le code de l'environnement (Articles L. 562-1 à L. 563-1).

La commune a fait l'objet d'un Plan de Prévention des Risques (Inondation – Mouvements de terrain – Houle cyclonique), approuvé le 24 juin 2010.

À la demande de la DEAL Guadeloupe (Direction de l'Environnement de l'Aménagement et du Logement de la Guadeloupe), dans le but de considérer l'actualisation des zones à risques, et de prendre en compte le développement de la commune, plusieurs bureaux d'études ont été chargés de la révision de l'actuel PPR de la ville du Moule chacun dans les domaines qui les concernent :

- SAFEGE pour l'aléa inondation (débordement de cours d'eau, ruissellement, crue torrentielle, ...)
- GINGER GEODE pour l'aléa mouvement de terrain ;
- C2R pour l'actualisation des enjeux ;
- BRGM pour l'aléa submersion marine et l'aléa érosion du littoral ;
- BRGM et université de Montpellier pour l'aléa tsunami (valorisation des données existantes).

Les aléas liés à l'activité sismique et volcanique sont donnés à titre informatif, le zonage réglementaire étant réalisé sur les aléas Littoraux, Inondations et Mouvements de terrain.

1.2 Les risques naturels en Guadeloupe

La Guadeloupe, en raison de sa position géographique au cœur de la Caraïbe, est particulièrement exposée aux aléas naturels. Ces phénomènes, souvent intenses et récurrents, constituent une menace importante pour les populations, les infrastructures et les écosystèmes locaux. Parmi ces risques, les cyclones tropicaux occupent une place centrale. Ils génèrent des vents violents, des pluies diluviennes et des marées de tempête qui peuvent entraîner des dégâts matériels considérables et mettre en danger les vies humaines.

En parallèle, le territoire guadeloupéen est également vulnérable aux inondations. Ces dernières, souvent déclenchées par des épisodes de fortes pluies ou des débordements de cours d'eau, affectent particulièrement les zones littorales et les vallées. Elles provoquent des dommages sur les habitats, perturbent les réseaux de communication et peuvent engendrer des pertes économiques substantielles, notamment dans l'agriculture et le tourisme.

Enfin, les mouvements de terrain, tels que les glissements de terrain et les chutes de blocs, représentent une autre menace majeure. Ces phénomènes sont fréquemment observés dans les zones escarpées et volcaniques, comme Basse-Terre. Les sols instables, combinés à des conditions météorologiques extrêmes, augmentent les risques pour les habitations, les routes et les activités humaines.

Outre les cyclones, inondations et mouvements de terrain, la Guadeloupe est également exposée à des risques géologiques majeurs. Les séismes, fréquents en raison de la position de l'archipel à la frontière des plaques tectoniques caraïbe et nord-américaine, peuvent occasionner des dommages significatifs, en particulier sur les infrastructures vulnérables. Le volcanisme, avec la présence de la Soufrière, constitue une autre menace potentielle. Enfin, bien que moins probables, les tsunamis représentent un risque à ne pas négliger, notamment en cas de séismes sous-marins majeurs dans la région.

Ces aléas soulignent l'importance d'un plan de prévention des risques naturels (PPRN) adapté, visant à protéger les habitants et à mieux gérer les conséquences des catastrophes naturelles dans un environnement aussi fragile.

1.3 Les objectifs de la politique de prévention des risques

Les politiques de prévention des risques naturels poursuivent avant tout des objectifs de réduction de la vulnérabilité et de préservation des biens et des vies humaines. Elles s'appuient sur une planification rigoureuse, l'identification des aléas, ainsi que l'analyse des enjeux humains, économiques et environnementaux. L'approche adoptée vise à anticiper autant que possible les effets potentiels des catastrophes, à mettre en place des mesures de protection structurantes et, in fine, à instaurer une culture de la résilience.

Au-delà de la simple anticipation, ces politiques tendent également à renforcer les capacités de gestion en situation de crise. Cela se traduit notamment par la mise en place de systèmes d'alerte performants, la coordination efficace des secours, l'amélioration continue de la formation des intervenants, ainsi que par l'information et la sensibilisation des populations exposées. L'objectif final est de créer un environnement dans lequel les différents acteurs – collectivités, entreprises et particuliers – peuvent collaborer afin de limiter les impacts des aléas.

En Guadeloupe, où le contexte insulaire et tropical amplifie la fréquence et l'intensité de certains risques (cyclones, séismes, submersions marines), la politique de prévention s'articule autour d'actions adaptées au milieu naturel et bâti. Les autorités locales mettent ainsi l'accent sur l'amélioration de la qualité des infrastructures, la mise en œuvre de plans communaux de sauvegarde, la préservation des mangroves, et le renforcement des normes de construction. L'objectif est de doter le territoire guadeloupéen d'outils et de dispositifs permettant d'affronter au mieux les aléas, tout en préservant un cadre de vie sûr et durable.

1.4 La démarche PPRN

La première étape de l'élaboration d'un Plan de Prévention des Risques Naturels (PPRN) consiste à réaliser une cartographie détaillée des aléas, c'est-à-dire des phénomènes naturels susceptibles d'affecter le territoire (inondations, glissements de terrain, séismes, etc.). Cette analyse s'appuie sur des données scientifiques, des études techniques, ainsi que sur l'observation historique des phénomènes. L'objectif est de déterminer la nature, la fréquence et l'intensité des aléas afin d'obtenir une vision précise et objective des zones exposées.

Une fois les aléas définis, on procède à la cartographie des enjeux, en étroite concertation avec les communes concernées. Cette étape permet d'identifier et de localiser les éléments humains (populations, infrastructures essentielles), économiques (zones d'activité, réseaux de transport) et environnementaux (zones naturelles sensibles) susceptibles d'être impactés. La mise en commun des connaissances locales et l'implication des acteurs du territoire assurent une représentation équilibrée des vulnérabilités, facilitant ainsi l'élaboration de mesures adaptées et réalistes.

Le croisement des cartes d'aléas et des cartes d'enjeux aboutit à la création d'un Plan de Zonage Règlementaire (PZR), qui délimite les zones à risques et précise les règles d'urbanisme et de construction à respecter. Ces mesures peuvent impliquer des dispositions réglementaires ciblant l'occupation des sols, l'urbanisme et la construction, l'obligation de travaux de sécurisation ou l'adoption de normes parasismiques.

Le PZR constitue le volet opérationnel du PPRN et s'intègre pleinement dans la stratégie globale de prévention, visant à réduire la vulnérabilité et à améliorer la résilience des territoires face aux risques naturels.

1.5 Pourquoi réviser le PPRN ?

La révision du Plan de Prévention des Risques Naturels (PPRN) communal se justifie d'abord par l'évolution constante des connaissances et des méthodologies de cartographie des aléas. Les progrès dans les modélisations hydrologiques, l'identification des zones sujettes aux chutes de blocs/glissement de terrain ou l'analyse des risques potentiels en cas de submersion marine permettent de mieux quantifier la fréquence et l'intensité des phénomènes, et d'affiner le zonage des territoires exposés. En intégrant ces avancées, le PPRN actualisé devient un outil plus fiable et opérationnel, mieux adapté aux réalités du terrain.

Parallèlement, la révision du PPRN répond à la nécessité de prendre en compte de nouvelles normes et réglementations, telles que celles introduites par le décret PPRI de juillet 2019. Ces textes encadrent plus strictement l'aménagement des zones à risque, imposent des exigences techniques supplémentaires ou adaptent les critères d'évaluation des dangers.

Enfin, la révision s'impose face à l'évolution des enjeux sur le territoire. L'urbanisation croissante ces vingt dernières années, l'émergence de nouvelles activités économiques ou la modification des milieux naturels influent sur la vulnérabilité des biens et des personnes. De plus, l'acquisition récente de données topographiques, climatiques ou environnementales permet de prendre en compte des phénomènes auparavant mal connus, voire négligés. En révisant le PPRN, on assure ainsi une prise en compte globale et dynamique des risques, adaptée à un contexte territorial en constante

2. Zone d'étude : présentation et environnement

2.1 Situation géographique

La Guadeloupe est un archipel des Petites Antilles, situé dans l'arc volcanique, au cœur de la mer des Caraïbes. Composée principalement de deux îles principales, la Basse-Terre, volcanique et montagneuse, et la Grande-Terre, plus plate et calcaire, elle offre une variété de paysages et de milieux naturels. Entre littoraux, forêts tropicales, mangroves et récifs coralliens, la Guadeloupe se démarque par son climat tropical, sa biodiversité riche et son positionnement stratégique entre l'Atlantique et la Caraïbe.

La commune du Moule est située sur la côte nord-est de l'île de Grande-Terre, face à l'océan Atlantique. D'une superficie de 82 km², elle se distingue par un relief relativement plat, caractéristique des formations calcaires de cette partie de l'île. Son territoire est marqué par l'alternance de plaines agricoles et de zones littorales, où les falaises côtoient des plages de sable. L'ouverture directe sur l'Atlantique confère à la commune un climat plus exposé aux alizés, favorisant la pratique des sports nautiques et la formation de paysages côtiers spectaculaires.

Traversée par plusieurs cours d'eau, dont la rivière de l'Audoin et la rivière du Nord-Ouest, la commune bénéficie d'un réseau hydrographique qui façonne ses terres et contribue à l'équilibre de ses milieux naturels. Le littoral est essentiellement bordé de falaises calcaires et de récifs coralliens. À l'intérieur des terres, les vastes plaines agricoles, autrefois dominées par la culture de la canne à sucre, s'étendent jusqu'aux premières ondulations du relief vers l'ouest. Cette diversité géographique, entre espaces marins et terrestres, façonne l'identité du Moule et son développement.

2.2 Contexte climatique

Le climat de la Guadeloupe est déterminé par l'action des cellules de hautes pressions de l'Atlantique Nord (principalement l'Anticyclone des Açores). Celles-ci dirigent toute l'année un flux variable d'alizés de secteur Est dominant, chauds et humides, maintenant sur l'île une température moyenne de l'ordre de 26,5 °C et une humidité moyenne de 80 à 90 %.

Ce flux est alimenté par les masses d'air boréales qui se dirigent vers les Caraïbes, plus ou moins réchauffées et chargées d'humidité. Pendant l'hiver austral (second semestre) cette action est renforcée par la montée des anticyclones de l'Atlantique Sud qui repoussent vers le nord une zone de dépression plus ou moins perturbée, la « Zone Intertropicale de Convergence » (ZIC).

On distingue deux saisons : l'hivernage, saison des pluies de juin à décembre et la saison sèche avec le carême, période relativement sèche de janvier à mai.

La première partie de la saison des pluies (juin - juillet) est caractérisée par l'établissement d'un puissant courant d'est. C'est le régime des alizés tropicaux humides. Puis à l'automne (août – novembre), la ZIC est repoussée vers le nord des Petites Antilles laissant place sur les Caraïbes à une large dépression, siège de formations pluvio-orageuses avec précipitations intenses et ventilation affaiblie.

La saison des cyclones couvre la période allant de juin à novembre. Le nombre de tempêtes et cyclones (phénomènes au cours desquels le vent dépasse 35 nœuds) sur 100 ans passant à moins de 200 milles nautiques de la Guadeloupe est de l'ordre de 82, soit en moyenne un phénomène tous les 1 ans et 2 mois. Les précipitations engendrées par un cyclone tropical prennent le plus souvent un caractère torrentiel (200 à 500 mm en 24 h) pouvant provoquer des inondations et des mouvements de terrains.

La saison sèche, qui apporte malgré tout 1/3 de la pluviométrie annuelle, est également divisée en deux périodes. La première, de décembre à février, est caractérisée par une réapparition des vents, principalement du secteur Est-Nord-Est, les alizés frais, accompagnés de grains et d'une diminution rapide de la pluviosité. La seconde, de mars à mai ou carême, voit la mise en place des alizés francs, rapides et

secs de secteurs Est à Sud-Est et la pluviosité la plus faible de l'année, sujette cependant à des variations importantes suivant les années (carême humide ou carême sec).

La pluviométrie moyenne annuelle (Figure 1) varie de 1 000 mm sur les petites îles, l'est de Grande-Terre et une étroite bande côtière de Basse-Terre, jusqu'à 10 000 mm au sommet de Basse-Terre (8 568 mm au poste de St-Claude-Soufrière). L'ensemble de la Guadeloupe reçoit en moyenne 4 milliards de mètres cubes d'eau par an, répartis en 3 milliards sur Basse-Terre et 1 milliard sur Grande-Terre.

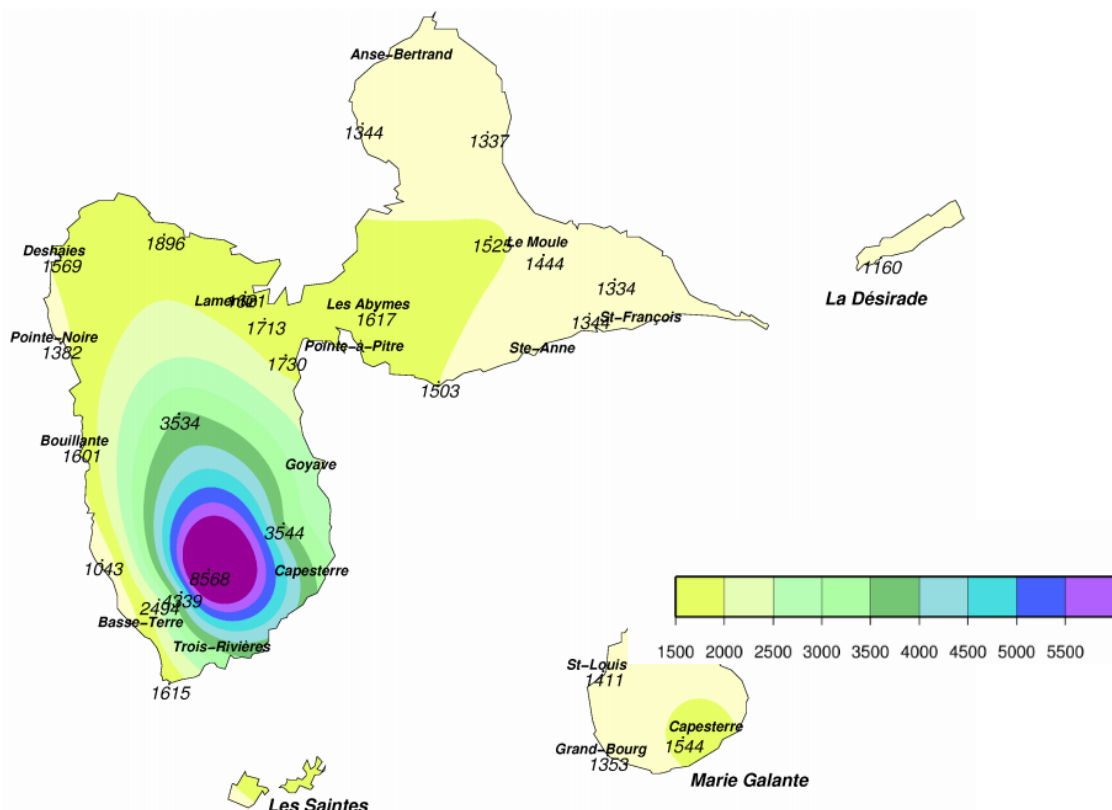


Figure 1 : Normales annuelles (1981-2010) en mm de la pluviométrie en Guadeloupe (Source : Météo France)

Du fait du changement climatique, les études récentes (source : Météo France dans le cadre du projet C3AF) montrent une augmentation de 15 à 20% des intensités des précipitations liées aux phénomènes extrêmes.

Concernant l'évolution des caractéristiques des épisodes pluvieux, il s'avère que le nombre de jour de pluie seront moins nombreux, les épisodes de sécheresse plus réguliers.

2.3 Contexte hydrographique

Le réseau hydrographique de la Guadeloupe est très diversifié. Ceci s'explique par la variété des reliefs qui entraîne une irrégularité spatiale des précipitations. La saisonnalité des précipitations explique une variation des débits importante entre la saison du carême et l'hivernage.

L'arrêté préfectoral du 18 décembre 2008 relatif à l'identification et à la gestion du domaine public fluvial de l'État en Guadeloupe définit la liste des canaux, rivières, bras, ravines, étangs et lacs faisant partie du domaine public fluvial de l'État. La majorité des cours d'eau sont situés en Basse-Terre, alimentés par le massif montagneux. Il est décompté plus de 55 cours d'eau à écoulement permanent. Parmi eux, 47 masses d'eau sont considérées en tant que cours d'eau au sens de la Directive Cadre sur l'Eau (DCE).

Le plus grand bassin versant est celui de la Grande Rivière à Goyaves (158 km²). Les cours d'eau de la Basse-Terre ont un faible linéaire et sont alimentés par des bassins versants de petite surface (10 à 30 km²). Cette particularité rend difficile la prévision des crues puisqu'elles surviennent très rapidement.

En Grande-Terre, en dehors des 4 canaux et 3 ravines identifiés par l'arrêté du 18/12/08, les rivières sont intermittentes. Il s'agit de ravines, qui ne coulent que lors de précipitations importantes.

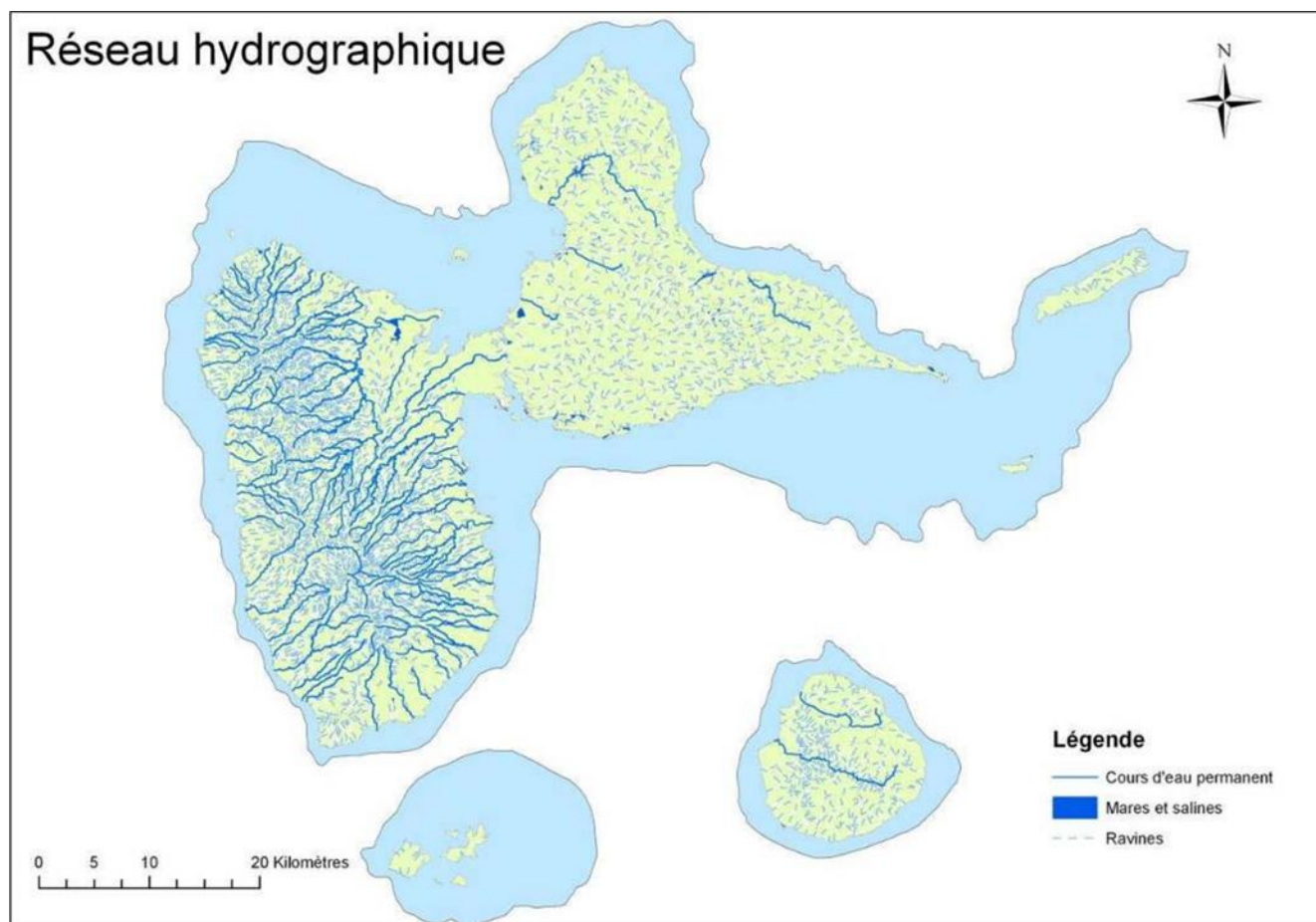


Figure 2 : Réseau hydrographique [Source DEAL]

La commune du Moule est traversée par plusieurs ravines, rivière et canaux. Les éléments les plus importants de ce réseau hydrographique sont :

- La ravine Nord-Ouest draine un bassin versant de 24 km². Elle se jette dans l'océan Atlantique au lieu-dit la Baie, à l'entrée nord de la zone urbaine du Moule,
- Le canal des Rotours draine un bassin versant de 70 km². Seule la partie amont de ce bassin versant s'inscrit sur le territoire communal du Moule, il s'agit alors de la ravine des Coudes,
- La ravine Lemercier draine un bassin versant de 3.4 km². Elle traverse la commune du Moule en son bourg où elle se jette dans l'océan Atlantique.
- La rivière Audouin draine un bassin versant de 50 km². Il s'agit du principal bassin versant de la commune. La ravine Gardel, son affluent, alimente de façon intermittente la retenue de Letaye. Il s'agit d'un barrage utilisé pour l'irrigation.

Il convient de noter que les autres ravines dont certaines ont un écoulement intermittent, sont susceptibles de se gonfler très rapidement lors de forts épisodes pluvieux.

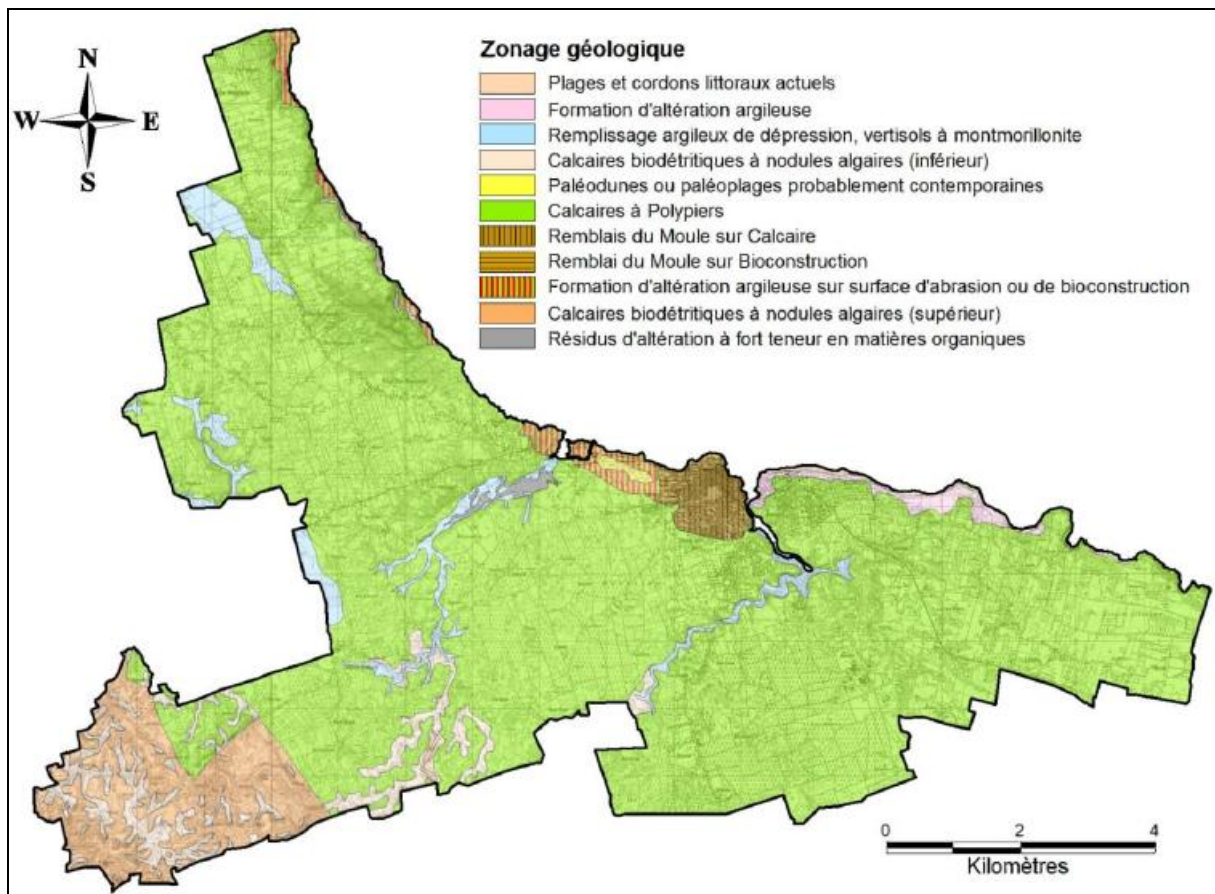


Figure 4 : Zonage géologique [Source : rapport BRGM/RP-61989-FR]

Les plus anciens dépôts connus sont les calcaires riches en foraminifères planctoniques du Pliocène inférieur (p1 à p2-IV, pvs). Les calcaires à polypiers (IVI) datés du Pléistocène inférieur affleurent sur la plupart de la Grande Terre et très ponctuellement dans le secteur des Grands Fonds. Les divers faciès à polypiers présentent des degrés très variés de cimentation.

Les formations superficielles et les dépôts quaternaires récents et actuels sont caractérisés par :

- Des plages et des cordons littoraux actuels ;
- Des remplissages argileux dans les zones de dépressions topographiques ;
- Des argiles de décalcification provenant de l'altération des calcaires en place.

Les sondages réalisés sur la commune du Moule permettent d'avoir des renseignements sur la profondeur du substratum, sur la nature des formations rencontrées et sur leur comportement. La profondeur du substratum marno-calcaire a été rencontré entre 1 et plus de 8 mètres.

L'altitude de la nappe phréatique sur l'ensemble de la commune du Moule est comprise entre 0 et 10 mètres.

2.4.2 Spécificités morphologiques du territoire communal

Morphologiquement, on distingue :

- La zone des Grands-Fonds qui ne représente qu'une faible superficie du territoire communal en limite Ouest (soit 8 km²) ;
- Une succession d'anses et de falaises calcaires, de longues plages ;

- Des plateaux de basses altitudes ;
- Des zones marécageuses.

A l'intérieur des terres, la majorité des ravines du Moule se caractérise par un écoulement intermittent (ravines « sèches » liées aux épisodes pluvieux intenses). Des cours d'eau pérennes existent également : ravine du Nord-Ouest, rivière d'Audoin. En zone littorale et à proximité des zones d'émergence de la nappe, il peut se développer des zones marécageuses et des mangroves.

2.4.3 Zonage géotechnique

Dans son étude de microzonage de la commune du Moule, le BRGM propose un zonage géotechnique de la commune permettant de distinguer 4 zones types :

- Zone « calcaire » : cette zone occupe la majorité du territoire étudié sur la Grande Terre, le secteur des Grands fond y est entièrement englobé. Ces formations calcaires sont recouvertes de formations superficielles peu épaisses (moins d'un mètre) constituées par des argiles de décalcifications et d'un sol argileux peu développé ;
- Zone « calcaires altérés » : cette zone se retrouve sur le littoral du Moule (plage de l'autre Bord, Morel). Il s'agit de formations d'altération argileuse surmontant des calcaires ;
- Zone « argile de dépression » : cette unité se retrouve essentiellement dans les plaines de dépression, il s'agit d'argiles de remplissage surmontant les calcaires altérés ;
- Zone « argiles sableuses du Moule » : cette unité se retrouve exclusivement à l'Ouest du bourg du Moule, reposant sur des calcaires massifs.

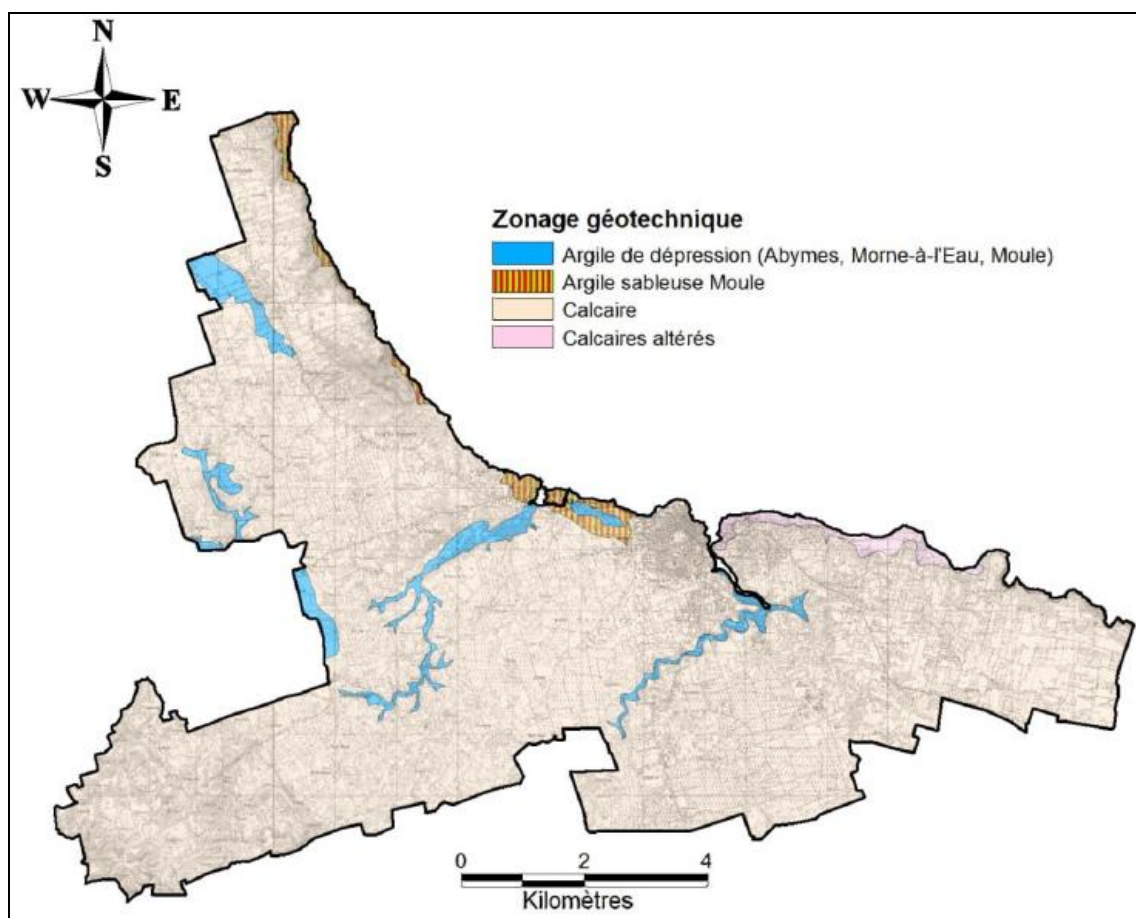


Figure 5 : Zonage géotechnique [Source : rapport BRGM/RP-61989-FR]

2.4.4 Effets de site topographiques

Certaines configurations topographiques peuvent entraîner des amplifications notoires d'un signal sismique, entraînant une augmentation locale de l'intensité d'un tremblement de terre. Il s'agit de zones de rupture de pente, de crête, de bordure de plateau, de sommet.

Ces effets de sites topographiques induisent en cas de seime une augmentation de fait des aléas mouvements de terrain et doit donc être pris en compte dans l'évaluation de ce dernier.

Dans son étude de microzonage sismique, le BRGM a cartographié les différentes zones susceptibles de présenter un effet de site topographique sur la commune du Moule. Cette cartographie est reprise ci-après.

3. Les aléas : les phénomènes naturels

3.1 Généralités

3.1.1 Phénomènes historiques

Bien que les cyclones génèrent la plupart du temps de fortes, des inondations peuvent survenir en dehors de ces phénomènes.

Phénomène	Date	Lame d'eau moyenne	Zones touchées
Episode pluvio-orageux	10/11/2018	Episode de 1 jour, du 10 novembre 2018 à 8 h au 11 novembre 2018 à 8 h : <ul style="list-style-type: none"> Lame d'eau moyenne : 28 mm, Volume : 40 millions de m³. 	Guadeloupe
Ouragan Maria	18/09/2017	Episode de 2 jours, du 18 septembre 2017 à 8 h au 20 septembre 2017 à 8 h : <ul style="list-style-type: none"> Lame d'eau moyenne : 241 mm, Volume : 343 millions de m³. 	Guadeloupe les 18 et 19 septembre 2017.
Tempête tropicale Rafael	12/10/2017	Episode de 3 jours, du 12 octobre 2012 à 8 h au 15 octobre 2012 à 8 h : <ul style="list-style-type: none"> Lame d'eau moyenne : 200 mm, Volume : 285 millions de m³. 	Guadeloupe du 12 au 16 octobre 2012
Episode pluvio-orageux	03/01/2011	Episode de 3 jours, du 3 janvier 2011 à 8 h au 6 janvier 2011 à 8 h : <ul style="list-style-type: none"> Lame d'eau moyenne : 182 mm, Volume : 259 millions de m³. 	Guadeloupe du 3 au 5 janvier 2011
Ouragan Earl	03/08/2011	Episode de 1 jour, du 29 août 2010 à 8 h au 30 août 2010 à 8 h : <ul style="list-style-type: none"> Lame d'eau moyenne : 74 mm, Volume : 106 millions de m³. 	Guadeloupe du 29 au 30 août 2010
Ouragan Dean	17/08/2007	Episode de 1 jour, du 17 août 2007 à 8 h au 18 août 2007 à 8 h : <ul style="list-style-type: none"> Lame d'eau moyenne : 58 mm, Volume : 83 millions de m³. 	Guadeloupe du 16 au 17 août 2007
Ouragan Lenny	18/11/1999	Episode de 3 jours, du 17 novembre 1999 à 8 h au 20 novembre 1999 à 8 h : <ul style="list-style-type: none"> Lame d'eau moyenne : 271 mm, Volume : 386 millions de m³. Valeurs remarquables de la station du Raizet : <ul style="list-style-type: none"> 2 jours, du 18 à 04h00 au 20 à 04h00 : 332 mm 24 heures, du 18 à 16h18 au 19 à 16h18 : 	Guadeloupe du 17 au 19 novembre 1999

		<p>301 mm,</p> <ul style="list-style-type: none"> • 2heures, le 19 de 7h54 à 9h54 : 152mm, • 1heure, le 19 de 8h30 à 9h30 : 90mm, • 15minutes, le 19 de 8h56 à 9h12 : 28mm. 	
Ouragan José	21/10/1999	<p>Episode de 3 jours, du 20 octobre 1999 à 8 h au 23 octobre 1999 à 8 h :</p> <ul style="list-style-type: none"> • Lame d'eau moyenne : 82 mm, • Volume : 117 millions de m³. 	Guadeloupe du 19 au 22 octobre 1999
Tempête tropicale Hortense	07/09/1996	<p>Episode de 1 jour, du 7 septembre 1996 à 8 h au 8 septembre 1996 à 8 h :</p> <ul style="list-style-type: none"> • Lame d'eau moyenne : 62 mm, • Volume : 88 millions de m³. 	Guadeloupe du 7 au 8 septembre 1996
Ouragan Luis	04/09/1995	<p>Episode de 2 jours, du 4 septembre 1995 à 8 h au 6 septembre 1995 à 8 h :</p> <ul style="list-style-type: none"> • Lame d'eau moyenne : 206 mm, • Volume : 294 millions de m³. 	Guadeloupe du 4 au 6 septembre 1995
Tempête tropicale Iris	27/08/1995	<p>Episode de 2 jours, du 26 aout 1995 à 8 h au 28 aout 1995 à 8 h :</p> <ul style="list-style-type: none"> • Lame d'eau moyenne : 93 mm, • Volume : 133 millions de m³. 	Guadeloupe du 26 au 27 août 1995
Ouragan Marilyn	14/09/1995	<p>Episode de 2 jours, du 14 septembre 1995 à 8 h au 16 septembre 1995 à 8 h :</p> <ul style="list-style-type: none"> • Lame d'eau moyenne : 213 mm, • Volume : 303 millions de m³. 	Guadeloupe du 14 au 15 septembre 1995
Tempête tropicale Cindy	15/08/1993	<p>Episode de 1 jour, du 14 aout 1993 à 8 h au 15 aout 1993 à 8 h :</p> <ul style="list-style-type: none"> • Lame d'eau moyenne : 58 mm, • Volume : 83 millions de m³. 	Guadeloupe du 14 au 15 août 1993
Ouragan Klaus	03/10/1990	<p>Episode de 4 jours, du 9 octobre 1990 à 8h au 13 octobre 1990 à 8 h :</p> <ul style="list-style-type: none"> • Lame d'eau moyenne : 197 mm, • Volume : 280 millions de m³. 	Guadeloupe du 7 au 12 octobre 1990
Ouragan Hugo	17/09/1989	<p>Episode de 2 jours, du 16 septembre 1989 à 8h au 18 septembre 1989 à 8 h :</p> <ul style="list-style-type: none"> • Lame d'eau moyenne : 228 mm, • Volume : 325 millions de m³. 	Guadeloupe du 17 au 18 septembre 1989
Ouragan David	29/08/1979	<p>Episode de 1 jour, du 29 août 1979 à 8 h au 30 août 1979 à 8 h :</p> <ul style="list-style-type: none"> • Lame d'eau moyenne : 174 mm, • Volume : 248 millions de m³. 	Guadeloupe le 29 août 1979

3.1.2 Arrêtés de catastrophes naturelles

Depuis 1990, 72 arrêtés de catastrophes naturelles ont été recensés sur l'archipel de Guadeloupe dont 7 ont concernés la commune du Moule

Type de catastrophe	Commune	Début le	Fin le	Arrêté du	Parution au JO le
Inondation et/ou Coulées de Boue	POINTE NOIRE	13/08/2024	13/08/2024	24/03/25	03/04/2025
Chocs mécaniques liés à l'action des vagues	BOUILLANTE SAINTE ANNE	13/08/2024	14/08/2024	24/02/25	01/03/2025
Inondations et/ou Coulées de Boue	BOUILLANTE DESHAIES PETIT BOURG SAINT FRANCOIS VIEUX HABITANTS	06/11/2022	13/08/2024	20/01/25	06/02/2025
Inondations et/ou Coulées de Boue	BASSE TERRE BOUILLANTE CAPESTERRE BELLE EAU GOURBEYRE POINTE NOIR SAINT FRANCOIS TERRE DE BASSE-TERRE VIEUX FORT	01/07/24	27/09/2024	16/12/24	21/12/2024
Mouvement de Terrain	BAILLIF GOURBEYRE GOYAVE SAINT CLAUDE	21/10/23	26/10/23	14/10/24	01/11/24
Chocs Mécaniques liés à l'action des Vagues	BAILLIF BOUILLANTE TERRE DE HAUT	16/09/22	18/09/22	23/09/24	28/09/24
Vents Cycloniques	BAIE MAHAULT GOURBEYRE SAINTE ANNE	16/09/22	18/09/22	21/05/24	09/06/24
Vents Cycloniques	SAINT CLAUDE	02/10/23	03/10/23	15/04/24	27/04/24
Inondations et/ou Coulées de Boue	GOYAVE	21/10/23	22/10/23	12/02/24	23/02/24
Inondations et/ou Coulées de Boue	SAINTE ANNE	21/10/23	22/10/24	30/01/24	09/02/24
Inondations et/ou Coulées de Boue	BASSE-TERRE TERRE DE BAS TERRE DE HAUT VIEUX FORT	02/10/23	03/10/23	18/01/24	30/01/24
Inondations et/ou Coulées de Boue	LES ABYMES BAILLIF BASSE TERRE CAPESTERRE BELLE EAU GOURBEYRE LA DESIRADE LE GOSIER SAINT-CLAUDE TROIS RIVIERE	21/10/23	22/10/23	20/11/23	10/12/23

Mouvement de Terrain	BAIE MAHAULT BAILLIF CAPESTERRE BELLE EAU GOURBEYRE PETIT BOURG SAINT CLAUDE SAINTE ROSE TERRE DE HAUT TROIS RIVIÈRES	16/09/22	19/09/22	24/04/23	10/06/23
Mouvement de Terrain	LES ABYMES LE GOSIER POINTE-A-PITRE	29/04/22	01/05/22	19/12/22	30/12/22
Inondations et/ou Coulées de Boue	SAINTE ANNE TERRE DE BASSE-TERRE TERRE DE HAUT	16/09/22	18/09/22	17/10/22	29/10/22
Inondations et/ou Coulées de Boue	LES ABYMES BAIE MAHAULT BAILLIF BASSE-TERRE BOUILLANTE CAPESTERRE BELLE EAU GOURBEYRE LA DESIRADE DESHAIES LE GOSIER	16/09/22	23/09/22	23/09/22	24/09/22
Inondations et/ou Coulées de Boue	LES ABYMES LE GOSIER MORNE A LEAU POINTE-A-PITRE	29/04/22	01/05/22	30/05/22	25/06/22
Inondations et/ou Coulées de Boue	CAPESTERRE BELLE EAU LE GOSIER LAMENTIN MORNE-A-LEAU PETIT-BOURG SAINTE-ANNE	09/11/20	14/11/20	14/12/20	22/12/20
Inondations et/ou Coulées de Boue	SAINTE-ROSE	10/11/2020	10/11/2020	23/11/2020	03/12/2020
Mouvement de terrain	PETIT-BOURG	09/11/2020	11/11/2020	23/11/2020	03/12/2020
Inondations et/ou Coulées de Boue	LES ABYMES BAIE-MAHAULT	09/11/2020	10/11/2020	23/11/2020	03/12/2020
Mouvement de terrain	GOURBEYRE SAINT-CLAUDE	17/09/2017	18/09/2017	25/03/2018	01/05/2018
Inondations et/ou Coulées de Boue	BOUILLANTE	21/12/2016	21/12/2016	20/02/2018	23/03/2018
Inondations et/ou Coulées de Boue	CAPESTERRE- BELLE-EAU	27/11/2016	28/11/2016	20/02/2018	23/03/2018
Vents Cycloniques	BAILLIF BASSE-TERRE BOUILLANTE	18/09/2017	18/09/2017	27/11/2017	28/11/2017

	CAPESTERRE- BELLE-EAU GOURBEYRE DESHAIES GOYAVE LAMENTIN PETIT-BOURG POINTE-NOIRE SAINT-CLAUDE SAINTE-ROSE TROIS-RIVIERES VIEUX-FORT VIEUX-HABITANTS				
Inondations et/ou Coulées de Boue	LES ABYMES ANSE-BERTRAND BAIE-MAHAULT BAILLIF BASSE-TERRE BOUILLANTE CAPESTERRE- BELLE-EAU CAPESTERRE-DE- MARIE-GALANTE GOURBEYRE LA DESIRADE DESHAIES GRAND-BOURG LE GOSIER GOYAVE LAMENTIN MORNE-A-L'EAU LE MOULE PETIT-BOURG PETIT-CANAL POINTE-A-PITRE POINTE-NOIRE PORT-LOUIS SAINT-CLAUDE SAINT-FRANCOIS SAINT-LOUIS SAINTE-ANNE SAINTE-ROSE TROIS-RIVIERES VIEUX-FORT VIEUX-HABITANTS	17/09/2017	18/09/2017	21/09/2017	23/09/2017
Chocs Mécaniques liés à l'action des Vagues	LES ABYMES ANSE-BERTRAND BAIE-MAHAULT BAILLIF BASSE-TERRE BOUILLANTE CAPESTERRE- BELLE-EAU CAPESTERRE-DE- MARIE-GALANTE GOURBEYRE	17/09/2017	18/09/2017	21/09/2017	23/09/2017

	LA DESIRADE DESHAIES GRAND-BOURG LE GOSIER GOYAVE LAMENTIN MORNE-A-L'EAU LE MOULE PETIT-BOURG PETIT-CANAL POINTE-A-PITRE POINTE-NOIRE PORT-LOUIS SAINT-FRANCOIS SAINT-LOUIS SAINTE-ANNE SAINTE-ROSE TERRE-DE-BAS TERRE-DE-HAUT TROIS-RIVIERES VIEUX-FORT VIEUX-HABITANTS				
Vents Cycloniques	TERRE-DE-BAS TERRE-DE-HAUT	17/09/2017	18/09/2017	21/09/2017	23/09/2017
Inondations et/ou Coulées de Boue	BASSE-TERRE CAPESTERRE- BELLE-EAU GOURBEYRE SAINT-CLAUDE VIEUX-FORT VIEUX-HABITANTS	12/10/2012	13/10/2012	10/03/2013	13/03/2013
Mouvement de Terrain	GOURBEYRE SAINT-CLAUDE VIEUX-HABITANTS	11/10/2012	13/10/2012	10/03/2013	13/03/2013
Mouvement de Terrain	LES ABYMES LE GOSIER	06/05/2012	07/05/2012	26/07/2012	01/08/2012
Inondations et/ou Coulées de Boue	LES ABYMES BAIE-MAHAULT LE GOSIER POINTE-A-PITRE	06/05/2012	07/05/2012	07/06/2012	13/06/2012
Inondations et/ou Coulées de Boue	BASSE-TERRE LE GOSIER TROIS-RIVIERES	26/11/2011	28/11/2011	03/06/2012	07/06/2012
Inondations et/ou Coulées de Boue	DESHAIES	28/09/2011	29/09/2011	29/02/2012	06/03/2012
Inondations et/ou Coulées de Boue Mouvement de Terrain	SAINTE-ROSE	16/05/2011	17/05/2011	11/12/2011	14/12/2011
Inondations et/ou	DESHAIES	02/01/2011	04/01/2011	14/07/2011	20/07/2011

Coulées de Boue					
Inondations et/ou Coulées de Boue	LES ABYMES MORNE-A-L'EAU	03/01/2011	04/01/2011	04/04/2011	09/04/2011
Inondations et/ou Coulées de Boue	GOURBEYRE	06/12/2010	06/12/2010	04/04/2011	09/04/2011
Inondations et/ou Coulées de Boue	BAILLIF BASSE-TERRE GOURBEYRE DESHAIES POINTE-NOIRE	05/10/2010	06/10/2010	29/03/2011	01/04/2011
Mouvement de Terrain	GOURBEYRE	05/10/2010	06/10/2010	29/03/2011	01/04/2011
Inondations et/ou Coulées de Boue	LAMENTIN	18/06/2010	18/06/2010	29/11/2010	02/12/2010
Inondations et/ou Coulées de Boue	GOURBEYRE SAINTE-ROSE	18/06/2010	18/06/2010	06/09/2010	09/09/2010
Inondations et/ou Coulées de Boue	BOUILLANTE	02/09/2009	02/09/2009	09/05/2010	12/05/2010
Inondations et/ou Coulées de Boue	GOYAVE	05/01/2009	05/01/2009	09/11/2009	13/11/2009
Chocs Mécaniques liés à l'action des Vagues	BAILLIF BASSE-TERRE BOUILLANTE GOURBEYRE DESHAIES GRAND-BOURG POINTE-NOIRE TERRE-DE-BAS TERRE-DE-HAUT VIEUX-FORT VIEUX-HABITANTS	14/10/2008	15/10/2008	08/02/2009	12/02/2009
Mouvement de Terrain	DESHAIES	14/10/2008	15/10/2008	08/02/2009	12/02/2009
Chocs Mécaniques liés à l'action des Vagues	DESHAIES LE MOULE	17/03/2008	20/03/2008	25/06/2008	04/07/2008
Inondations et/ou Coulées de Boue	BOUILLANTE	16/08/2007	17/08/2007	04/12/2007	07/12/2007
Inondations et/ou Coulées de Boue	LES ABYMES BASSE-TERRE POINTE-NOIRE SAINT-CLAUDE VIEUX-HABITANTS	15/08/2007	16/08/2007	13/11/2007	15/11/2007
Chocs Mécaniques liés à l'action des Vagues	BAIE-MAHAULT CAPESTERRE- BELLE-EAU CAPESTERRE-DE-	15/08/2007	16/08/2007	13/11/2007	15/11/2007

	MARIE-GALANTE GOURBEYRE LA DESIRADE GRAND-BOURG LE GOSIER GOYAVE PETIT-BOURG POINTE-A-PITRE SAINT-FRANCOIS SAINTE-ANNE TERRE-DE-BAS TERRE-DE-HAUT TROIS-RIVIERES				
Inondations et/ou Coulées de Boue	GOYAVE TROIS-RIVIERES	17/11/2004	17/11/2004	01/08/2005	09/08/2005
Mouvement de Terrain	LES ABYMES BAIE-MAHAULT	19/11/2004	19/11/2004	14/04/2005	02/05/2005
Inondations et/ou Coulées de Boue	BOUILLANTE POINTE-NOIRE	13/09/2004	13/09/2004	14/04/2005	22/04/2005
Inondations et/ou Coulées de Boue	LE GOSIER	20/11/2004	20/11/2004	03/02/2005	19/02/2005
Inondations et/ou Coulées de Boue	BAILLIF GOURBEYRE DESHAIES GRAND-BOURG POINTE-NOIRE SAINT-CLAUDE SAINT-LOUIS SAINTE-ROSE VIEUX-HABITANTS	12/09/2004	13/09/2004	10/01/2005	14/01/2005
Secousse Sismique	LES ABYMES ANSE-BERTRAND BAIE-MAHAULT BAILLIF BASSE-TERRE BOUILLANTE CAPESTERRE- BELLE-EAU CAPESTERRE-DE- MARIE-GALANTE GOURBEYRE LA DESIRADE DESHAIES GRAND-BOURG LE GOSIER GOYAVE LAMENTIN MORNE-A-L'EAU LE MOULE PETIT-BOURG PETIT-CANAL POINTE-A-PITRE	20/11/2004	20/11/2004	10/01/2005	14/01/2005

	POINTE-NOIRE PORT-LOUIS SAINT-CLAUDE SAINT-FRANCOIS SAINT-LOUIS SAINTE-ANNE SAINTE-ROSE TERRE-DE-BAS TERRE-DE-HAUT TROIS-RIVIERES VIEUX-FORT VIEUX-HABITANTS				
Inondations et/ou Coulées de Boue	CAPESTERRE- BELLE-EAU TERRE-DE-HAUT	17/11/2004	17/11/2004	10/01/2005	14/01/2005
Inondations et/ou Coulées de Boue	CAPESTERRE- BELLE-EAU	17/05/2004	17/05/2004	10/01/2005	14/01/2005
Inondations et/ou Coulées de Boue	GOYAVE	14/11/2003	14/11/2003	10/01/2005	14/01/2005
Inondations et/ou Coulées de Boue	GOYAVE	17/05/2004	17/05/2004	10/01/2005	14/01/2005
Mouvement de Terrain	PETIT-BOURG	16/05/2004	18/05/2004	10/01/2005	14/01/2005
Inondations et/ou Coulées de Boue	CAPESTERRE- BELLE-EAU	18/11/1999	18/11/1999	02/03/2000	18/03/2000
Chocs Mécaniques liés à l'action des Vagues	TERRE-DE-BAS TERRE-DE-HAUT	17/11/1999	18/11/1999	13/02/2000	02/03/2000
Inondations et/ou Coulées de Boue	LES ABYMES ANSE-BERTRAND BAIE-MAHAULT BOUILLANTE DESHAIES LE GOSIER GOYAVE MORNE-A-L'EAU LE MOULE PETIT-BOURG PETIT-CANAL POINTE-A-PITRE POINTE-NOIRE PORT-LOUIS	17/11/1999	18/11/1999	28/11/1999	03/12/1999
Chocs Mécaniques liés à l'action des Vagues	ANSE-BERTRAND BAILLIF BASSE-TERRE BOUILLANTE GOURBEYRE DESHAIES POINTE-NOIRE PORT-LOUIS SAINTE-ROSE	16/11/1999	18/11/1999	28/11/1999	03/12/1999

	VIEUX-FORT VIEUX-HABITANTS				
Inondations et/ou Coulées de Boue	SAINT-FRANCOIS SAINTE-ANNE	17/11/1999	18/11/1999	28/11/1999	03/12/1999
Inondations et/ou Coulées de Boue	BASSE-TERRE CAPESTERRE- BELLE-EAU GOURBEYRE LE GOSIER MORNE-A-L'EAU	19/10/1998	20/10/1998	04/03/1999	23/03/1999
Inondations et/ou Coulées de Boue Mouvement de Terrain	BAIE-MAHAULT TERRE-DE-BAS TERRE-DE-HAUT	13/09/1995	14/09/1995	05/11/1995	09/12/1995
Inondations et/ou Coulées de Boue Mouvement de Terrain	LES ABYMES ANSE-BERTRAND BAIE-MAHAULT BAILLIF BASSE-TERRE BOUILLANTE CAPESTERRE- BELLE-EAU CAPESTERRE-DE- MARIE-GALANTE GOURBEYRE LA DESIRADE DESHAIES GRAND-BOURG LE GOSIER GOYAVE LAMENTIN MORNE-A-L'EAU LE MOULE PETIT-BOURG PETIT-CANAL POINTE-A-PITRE POINTE-NOIRE PORT-LOUIS SAINT-CLAUDE SAINT-FRANCOIS SAINT-LOUIS SAINTE-ANNE SAINTE-ROSE TERRE-DE-BAS TERRE-DE-HAUT TROIS-RIVIERES VIEUX-FORT VIEUX-HABITANTS	03/09/1995	06/09/1995	18/09/1995	22/09/1995
Inondations et/ou Coulées de Boue Mouvement de Terrain	BAILLIF BASSE-TERRE BOUILLANTE CAPESTERRE- BELLE-EAU GOURBEYRE	13/09/1995	14/09/1995	18/09/1995	22/09/1995

	DESHAIES GOYAVE LAMENTIN PETIT-BOURG POINTE-NOIRE SAINT-CLAUDE SAINTE-ROSE TROIS-RIVIERES VIEUX-FORT VIEUX-HABITANTS				
Inondations et/ou Coulées de Boue	LES ABYMES LE GOSIER MORNE-A-L'EAU	08/10/1990	08/10/1990	06/02/1991	16/02/1991
Inondations et/ou Coulées de Boue	BAILLIF BASSE-TERRE BOUILLANTE GOURBEYRE SAINT-CLAUDE VIEUX-HABITANTS	10/10/1990	10/10/1990	06/02/1991	16/02/1991

3.1.3 Typologie des inondations

Toutes les communes de la Guadeloupe sont exposées au phénomène inondation. Par ailleurs malgré le caractère saisonnier des pluies (maximum de pluviométrie en période cyclonique), aucune période ne peut être considérée comme sans risque d'inondation.

L'archipel de Guadeloupe est affecté par deux phénomènes d'inondation prépondérants, qui peuvent être concomitants :

Les inondations par débordement de cours d'eau

Les inondations par débordement de cours d'eau, liées aux débordements des rivières et ravines lors d'épisodes de crues. Le débit de crue, qui dépasse plusieurs fois le débit moyen annuel, est supérieur à la capacité du lit mineur et s'écoule dans le lit majeur, provoquant un débordement. L'intensité, la répartition et la durée de la pluie, mais aussi le comportement hydrologique du bassin versant sont des paramètres qui conditionnent l'étendue spatiale et l'intensité de l'inondation. En Guadeloupe, les pentes fortes, la petite taille des bassins versants ainsi que les linéaires réduits des cours d'eau impliquent une dynamique torrentielle. En crue, les débits et les vitesses d'écoulement sont élevés. Les pluies journalières ont une forte influence sur le débit. Le temps de concentration (temps écoulé entre les précipitations à l'origine de la crue et la crue elle-même) est de l'ordre de quelques heures. En outre, ces crues sont caractérisées par une vitesse d'écoulement élevée, qui implique d'une part une forte capacité de charriage (transport solide), d'autre part un pouvoir érosif important (affouillement de berges).



Figure 6 : Inondation de la RN2 à la hauteur de l'échangeur de Beausoleil à Baie Mahault par débordement de cours d'eau (en mai 2017) [Source : Alain Hannibal Canal 10 Télévision/97Land]

Les inondations par ruissellement

Les inondations par ruissellement sont fréquemment associées aux inondations par débordement de cours d'eau, car elles ont la même origine (un épisode de précipitations particulièrement intenses). Le ruissellement pluvial est la conséquence d'un phénomène d'anthropisation qui perturbe les conditions naturelles de l'écoulement. D'une part, la capacité d'infiltration des sols est diminuée du fait de leur imperméabilisation, ce qui augmente le ruissellement. D'autre part, des aménagements inconsidérés modifient les axes d'écoulement naturels, ce qui perturbe voire empêche l'évacuation de l'eau. Ainsi, dans un premier temps le ruissellement est diffus et généralisé, puis les surfaces imperméabilisées concentrent les écoulements et accélèrent le transit, enfin l'eau stagne dans les points bas, en particulier si le réseau d'assainissement pluvial est sous dimensionné ou mal entretenu. Les zones urbaines de la Guadeloupe sont concernées par ce phénomène d'inondation.



Figure 7 : Inondation de Pointe-à-Pitre en janvier 2011 par ruissellement [Source : <http://www.atout-guadeloupe.com/> ; Photos de Eliane Rascar]

Le point commun de ces deux principaux phénomènes d'inondation, est leur cinétique rapide (durées de crue et décrue infra-journalières). Les crues peuvent intervenir à n'importe quelle période de l'année compte tenu de l'imprévisibilité du climat. Des pluies dites "averses exceptionnelles" peuvent faire tomber plusieurs centimètres d'eau en quelques minutes. On retiendra que les inondations ne sont pas uniquement associées à des phénomènes atmosphériques de grande échelle comme les cyclones ou les ondes d'Est, mais peuvent aussi être provoquées par des perturbations atmosphériques stationnaires de petite échelle. Par ailleurs, les phénomènes cycloniques les plus forts ne s'accompagnent pas nécessairement de crues et d'inondations.

Dans le cadre de la révision des PPR, ces deux types d'inondation ont été distingué de la manière suivante :

- Pour toute surface drainée inférieure ou égale à 20ha, les inondations sont considérées comme concourantes aux débordements des réseaux d'assainissement des eaux pluviales ou à l'accumulation liée à l'absence d'un tel réseau,
- Pour toute surface drainée supérieur à 20 ha, les inondations sont considérées comme des inondations par ruissellement pluvial (voir débordement de cours d'eau pour certains cas)

Ainsi, le seuil quantitatif déclenchant la cartographie de l'aléa inondation par débordement est une superficie de bassin versant de 20 ha. Au-delà de cette superficie, il peut en effet être considéré que l'aléa est suffisamment conséquent pour être cartographié. En dessous de ce seuil, si les risques d'inondation importante sont plus réduits, ils ne peuvent être cependant considérés comme négligeables.

C'est pourquoi les axes d'écoulement d'un bassin versant inférieur à 20 ha ont été identifiés et cartographiés. Ils rendent compte de la caractérisation de l'aléa ruissellement pluvial. Ces conséquences de ces deux types d'inondation peuvent être aggravées par les phénomènes décrits ci-après :

Les crues torrentielles

Les crues torrentielles se forment par enrichissement du débit d'un cours d'eau, ravines, ... en matériaux solides qui accroissent très fortement son pouvoir érosif. L'enrichissement en matériaux peut provenir de leur arrachement des berges ou la mise en mouvement de blocs ou galets du fond du lit en raison du débit exceptionnel du cours d'eau ou à un ruissellement important sur le bassin versant amenant une importante charge solide. Le volume des matériaux transportés au cours d'une seule crue peut être considérable, il favorise la création d'embâcles (ex : troncs d'arbres arrachés), peut entraîner le déplacement du lit du cours d'eau et la destruction d'ouvrages et de constructions.

Là encore, les dégâts peuvent être très élevés.



Figure 8 : Crue torrentielle au niveau de la rivière aux Herbes à Basse-Terre (lors du cyclone MARYLIN en 1995) [Source : Météo-France]

Les laves torrentielles

Les laves torrentielles sont un phénomène de crue particulier, qui consiste en la propagation d'un volume considérable de boue dense charriant des blocs, le tout provenant de dépôts volcaniques superficiels.

Les laves torrentielles peuvent survenir le long d'une rivière lorsque :

- Son bassin versant présente une partie sommitale vaste, dans des zones à fortes pentes,
- Elle traverse des zones présentant un aléa mouvement de terrain affectant des formations géologiques particulières, peu cohérentes et présentant une quantité importante de matériaux fins.

Des écoulements de type laves torrentielles ont un pouvoir destructeur plus important qu'une crue torrentielle de débit équivalent, en raison, essentiellement, de la quantité de matériaux charriés ainsi que de la densité du fluide qui les transporte.

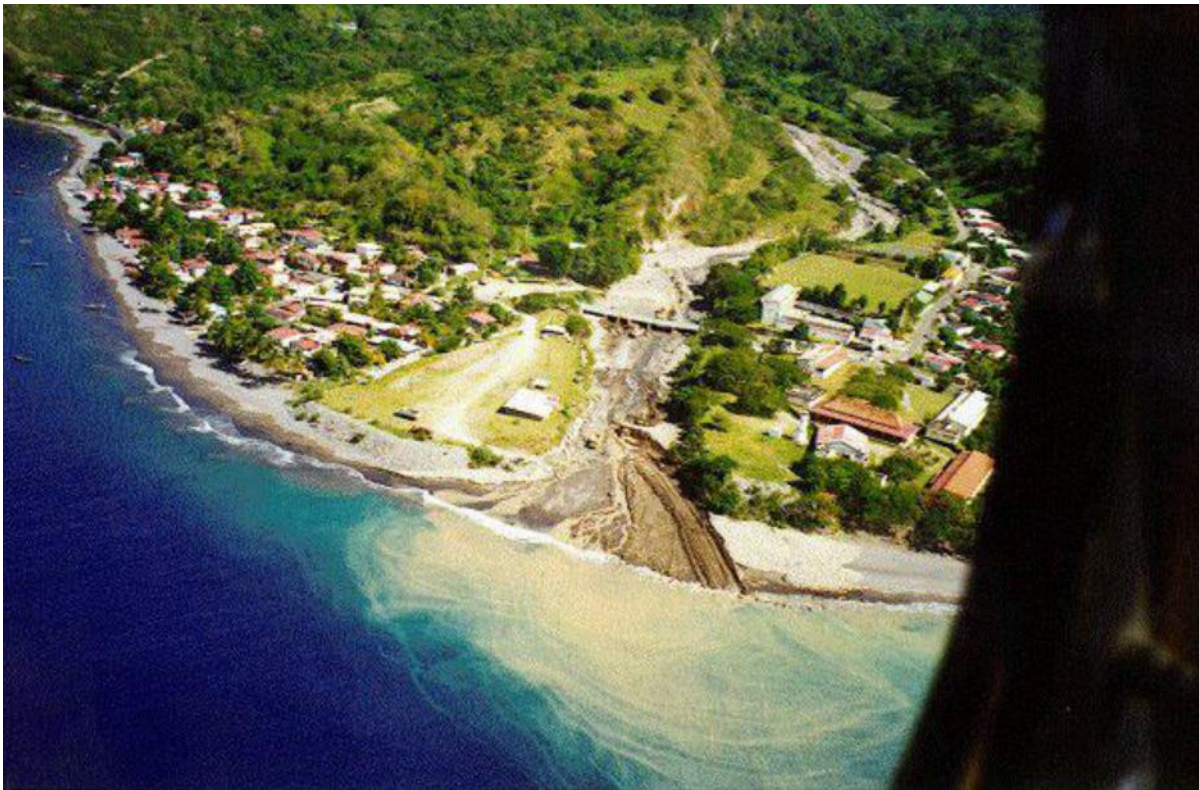


Figure 9 : Lave torrentielle sur la rivière du Prêcheur en Martinique (en janvier 1998) [Source : BRGM]

Un embâcle

Un embâcle consiste en l'obstruction d'un cours d'eau par la constitution d'une digue naturelle entraînant une retenue d'eau importante. La digue peut être constituée soit par des éléments solides arrachés à l'amont et charriés par les eaux, soit par l'obstruction de l'axe d'écoulement provoqué par un glissement de terrain.

En Guadeloupe, il s'agit généralement d'embâcles d'arbres, de bambous et de bananiers. Ceux-ci peuvent obstruer les ponts, ce qui inonde tous les terrains en amont du pont, et peut provoquer également la submersion de la chaussée et l'inondation en aval.

Les ruptures d'embâcles sont une rupture brutale de la digue ainsi que la propagation d'une onde de crue destructrice.

Si l'embâcle en lui-même ne provoque qu'une montée des eaux avec des risques limités en amont ; c'est surtout sa rupture qui peut se révéler extrêmement dommageable pour les personnes et les biens situés en aval.



Figure 10 : Embâcle au niveau du Pont-Vert au Lamentin (en novembre 1966) [Source : France-Antilles]

3.1.4 Typologie des mouvements de terrain

3.1.4.1 Généralités

Sous le terme "mouvements de terrain" sont regroupés tous les déplacements gravitaires de masses de terrain sous l'effet de sollicitations naturelles ou anthropiques. La cinématique peut être lente ou extrêmement rapide. Dans le cadre de cette étude, 4 familles de mouvements de terrain sont traitées :

- Affaissements / Effondrements ;
- Éboulements / Chutes de blocs ;
- Glissements de terrain ;
- Recul de falaise.

Il convient ici de rappeler les causes de ces instabilités qui sont à rechercher dans :

- La pesanteur (force de gravité) qui constitue le moteur essentiel des mouvements de terrain ;
- L'eau qui est le premier facteur aggravant des désordres. Ainsi les conditions climatiques et notamment la pluviométrie (période de pluies intenses ou longues), et les conditions hydrologiques (circulations superficielles ou souterraines) sont à prendre en considération ;
- La nature et la structure géologique des terrains présents sur le site (présence d'argiles ou de marnes, accidents tectoniques, fracturations, ...) ;
- La pente et la morphologie des versants (présence d'escarpements, talwegs concentrant les écoulements, ...) ;
- Le couvert végétal (racines s'insinuant dans les fractures et favorisant la déstabilisation des blocs, versant nu sensible à l'érosion, ...) ;

- l'action anthropique qui se manifeste de plusieurs façons et qui contribue de manière très sensible à déclencher directement des mouvements : modification de l'équilibre naturel de pentes (talutage ou déblais en pied de versant, remblaiement en tête de versant, carrières ou mines souterraines), modifications des conditions hydrogéologiques du milieu naturel (rejets d'eau dans une pente, pompages d'eau excessifs), ébranlements provoqués par les tirs à l'explosif ou vibrations dues au trafic routier, déforestation, etc.

3.1.4.2 Définitions

Affaissements / Effondrements

Les affaissements / effondrements sont des mouvements de terrain consécutifs à l'évolution de cavités souterraines d'origine naturelle (karsts, poches de gypse, ...) ou anthropiques (mines, carrières, ouvrages souterrains, ...). Cette évolution a pour origine la dégradation du toit ou des parois des cavités du fait des circulations d'eau, de surcharge en surface ou des vibrations (secousses sismiques, circulation routières, travaux, ...).

Ce phénomène peut correspondre :

- **Soit à un mouvement lent** (du fait de l'amortissement par les terrains de couverture) qui se traduit en surface par l'apparition d'une dépression topographique généralement circulaire ou ovoïdale sans présence de fissures ou de décalage en périphérie : on parle alors **d'affaissements**.

Ils ne font pas de victimes ; seul le bâti peut subir des dommages (fissuration voire ruine) du fait des efforts sur ses fondations.

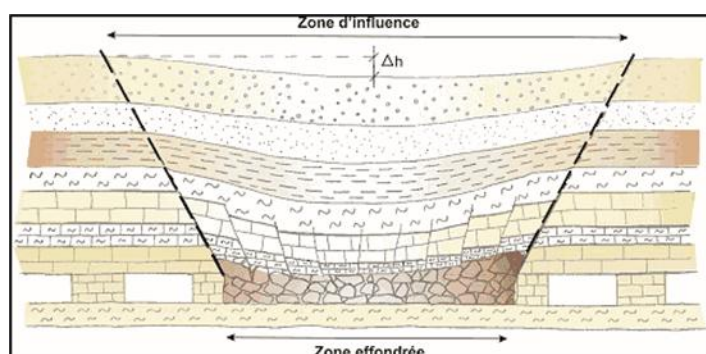


Figure 11 : schéma [Source : BRGM] et photographie d'une doline à Montaigu-de-Quercy (Tarn-et-Garonne) [Source : IMSRN]

- **Soit à un mouvement rapide (brutal)** : on parle alors **d'effondrements**.

Un fontis est un cratère d'effondrement, généralement circulaire, de quelques mètres de diamètre et de profondeur. Au niveau du sol, ses parois peuvent être verticales, présenter la forme d'un entonnoir ou au contraire être en dévers.

L'apparition d'un fontis est liée à la rupture du toit d'une cavité située à faible profondeur, de la rupture d'un pilier isolé dans une mine ou une carrière souterraines exploitées par la méthode des chambres et piliers (gisements horizontaux), ou à l'arrivée en surface d'une cloche d'effondrement remontant depuis une cavité plus profonde.

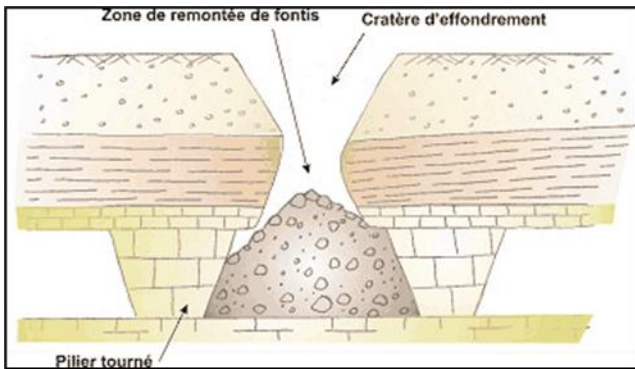


Figure 12 : Schéma [Source : BRGM] et photographie d'un fontis à Roquefort (Landes) [Source : IMSRN]

L'effondrement généralisé (ou effondrement de masse) se caractérise par l'instabilité d'une grande partie de l'exploitation qui entraîne un déplacement vertical soudain d'une hauteur de plusieurs mètres dans la partie centrale, et pouvant affecter une superficie de plusieurs hectares.

Il a pour origine la rupture en chaîne de plusieurs piliers entraînant la descente d'une partie du toit de l'exploitation.

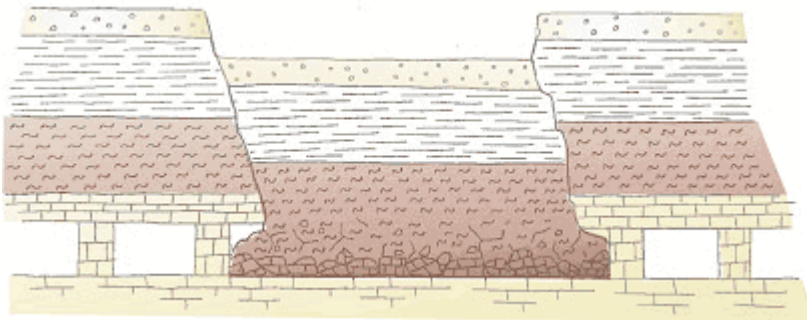


Figure 13 : Schéma [Source : BRGM] et photographie d'un effondrement généralisé à Saint-Emilion (Gironde) [Source : CG 33]

En raison de leur brutalité et de l'étendue de la zone impactée, ce phénomène peut faire un grand nombre de victimes [Source : BRGM] :

- Vieux-Ports (37) – 1800 : 26 morts ;
- Chancelade (24) – 1885 : 13 morts ;
- Pantin (93) – 1889 : 3 morts ;
- Clamart-Issy-les-Moulineaux (92) – 1961 : 21 morts, 36 blessés, 200 sinistrés ;
- Champagnole (39) – 1964 : 6 morts.

Éboulements / Chutes de blocs

L'éboulement est un phénomène qui affecte les roches compétentes et fracturées. Il se traduit par le détachement d'une portion de roche de volume quelconque depuis la masse rocheuse. La cinématique est variable : par basculement, rupture de pied, glissement banc sur banc, ... ; mais dans tous les cas elle est très rapide.

Le dépôt des éléments en pied d'escarpement à forte activité prend la forme d'un tablier ou d'un cône d'éboulis dont la végétalisation dépend de la fréquence des chutes (la végétation ne pourra pousser sur une zone régulièrement atteinte).

Pour les phénomènes plus ponctuels, les seules traces visibles sont généralement les blocs immobilisés dans le versant et les trouées qu'ils ont percées dans le couvert forestier.

On différencie les éboulements d'après la taille des éléments détachés (contrainte essentiellement par le degré de fracturation de la roche) :

- Éboulement en masse lorsque le volume total est supérieur à 1000 litres (1 m^3) ;
- Chute de blocs lorsque le volume est compris entre 1 et 1000 litres (1 dm^3 à 1 m^3) ;
- Chute de pierres lorsque le volume est inférieur ou égal au litre (1 dm^3).

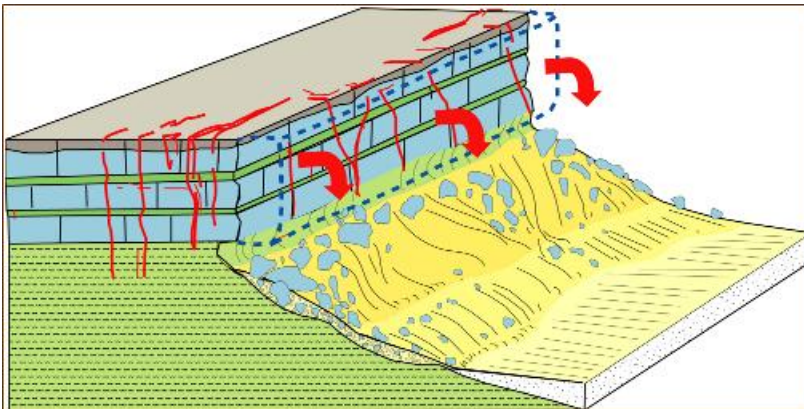


Figure 14 : Schéma conceptuel du phénomène d'éboulements / chutes de blocs (à gauche) et escarpement avec éboulis en pied à Aspres-sur-Buech, Hautes-Alpes (à droite) [Source : IMSRN]

La trajectoire des blocs suit généralement la ligne de plus grande pente mais peut varier du fait de la forme des éléments et de la topographie.

Les distances atteintes sont également fonction de ces 2 paramètres mais également de la hauteur de chute et de la taille du bloc (accumulation d'énergie cinétique), du couvert végétal et des éventuels obstacles (murs, bâtiments, ...). A noter que certaines topographies, telles que les replats, peuvent avoir un effet de tremplin permettant à des blocs mêmes volumineux d'effectuer des bonds de plusieurs mètres de haut.

Le facteur déclenchant principal de ce type de mouvement est la gravité, mais les phénomènes climatiques (pluies, cycles gel-dégel) jouent également un rôle important.

La présence de végétation au niveau des fractures est un phénomène aggravant.

Glissements de terrain

Le glissement de terrain est un phénomène qui affecte, en général, des lithologies incompetentes et qui provoque le déplacement d'une masse de terrain avec rupture (surface de cisaillement). Cette rupture peut se localiser soit au sein du même matériau (rupture circulaire), soit le long d'une discontinuité telle qu'un joint de stratification ou alors le long d'une interface entre les matériaux de couverture et le substratum.

Dans les cas les plus développés, il se caractérise par la formation d'une niche d'arrachement en amont et d'un bourrelet de pied en aval et être limité sur les côtés par des rampes latérales. L'instabilité des terrains peut le plus souvent se manifester par de légères déformations topographiques (moutonnement, ondulations du versant) Les volumes mis en jeu sont très variables.

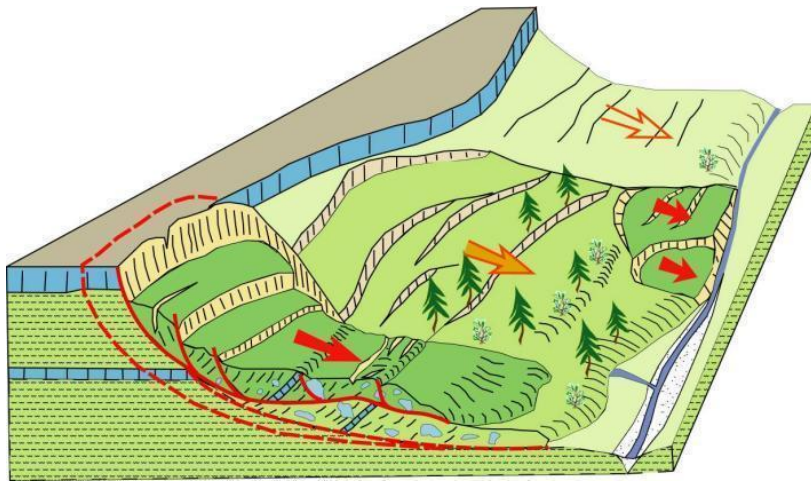


Figure 15 : Schéma conceptuel du phénomène de glissement de terrain (à droite) et glissement en bordure de l'Oued Nekor, au Maroc (à gauche) [Source : IMSRN]

L'apparition du phénomène est étroitement liée à la nature des matériaux ainsi qu'à la pente. D'autres facteurs entrent ensuite en jeu tels que les écoulements (cours d'eau en bas de versant qui favorisent l'érosion de la butée de pied et circulations internes qui « lubrifient » la surface de rupture) ou encore le couvert végétal susceptible de retenir et de drainer les instabilités superficielles.

Les facteurs déclenchants peuvent être naturels : fortes pluies saturant les couches instables (donc les alourdissant et augmentant la pression interstitielle), crues augmentant l'érosion en pied, séisme, ... mais également anthropiques (terrassement, modification des conditions hydrauliques, vibrations et secousses, ...).

Quand la masse glissée se propage à grande vitesse sous forme visqueuse avec une teneur en eau très élevée, on parle alors de coulée de boue.

Aussi, une coulée de boue se caractérise donc comme un glissement par une niche d'arrachement en amont. En revanche la propagation se fait généralement dans un couloir de faible largeur (au regard de la longueur de la coulée). La zone de dépôt en pied présente le plus souvent un évasement.

La coulée de boue peut également prendre naissance dans la partie aval d'un glissement de terrain.

Ce type de phénomène concerne exclusivement les formations à cohésion faible et de composition granulométrique adéquate, telles des colluvions ou des éboulis de pente reposant sur un versant constitué de marnes, d'argiles ou même de formations morainiques. Le facteur de déclenchement principal des mouvements est la pluie qui favorise le décollement de la couche superficielle. La pente (parfois aggravée par l'absence de la végétation) est un facteur de prédisposition principal.

Recul de Falaise

Le recul de falaise est un phénomène qui affecte les sections littorales constituées de terrains plus ou moins compétents sous la forme d'escarpements plus ou moins élevés.

Il est principalement lié aux effets mécaniques de la houle (impact des vagues) et des courants de marée qui vont entraîner une fragilisation des sols, une érosion (pouvant aller jusqu'à un sous-cavage dans les roches les plus compétente) et à terme la suppression de la butée de pied des terrains littoraux et leur déstabilisation par éboulement ou glissement.

Les zones littorales sont par ailleurs particulièrement soumises aux vents et aux précipitations qui sont également des facteurs de déstabilisation.

A noter que les matériaux éboulés / glissés vont constituer une protection temporaire de la falaise avant leur entraînement et/ou leur érosion par les sollicitations hydromarines.

Le recul de falaise sera accentué lors de phénomènes cycloniques du fait de l'action intense des vents, de la marée de tempête et de la houle cyclonique.

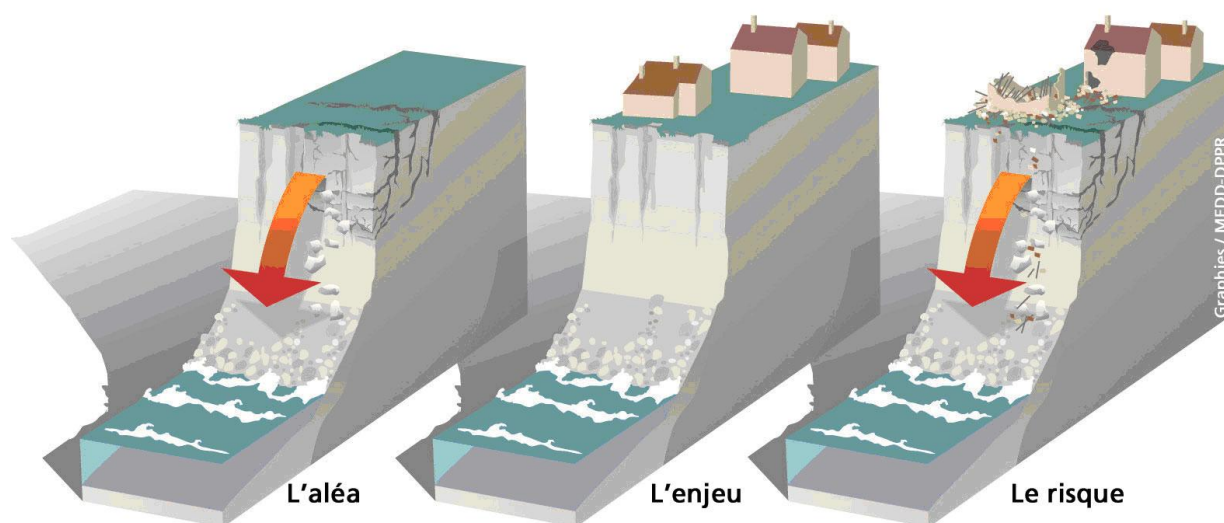


Figure 16 : Schéma conceptuel du phénomène de recul de falaise [Source : MEDD]

3.1.4.3 Analyse du territoire communal

Recensement des mouvements de terrain

Dans le cadre de cette révision, aucun phénomène de mouvement de terrain récent affectant la commune du Moule n'a été porté à notre connaissance.

On se reportera au chapitre 4.2.2.2 du rapport de présentation du PPRN 1^{ière} génération pour connaître les principales marques de mouvement de terrain recensées sur la commune du Moule.

Etudes relatives à des mouvements de terrain

Dans le cadre de cette révision, aucune étude récente relative à des phénomènes de mouvement de terrain affectant la commune du Moule n'a été portée à notre connaissance.

A noter, la réalisation en mai 2013, d'un microzonage sismique de la commune du Moule (rapport BRGM/RP-61989-FR).

3.1.5 Typologie des submersions marines

L'archipel guadeloupéen est exposé à divers types de houles, classées selon leurs caractéristiques. Les houles d'alizés, provenant de l'est, affectent les côtes tout au long de l'année, touchant principalement cette façade. Les houles du nord sont engendrées par les tempêtes hivernales traversant l'Atlantique Nord entre décembre et mars, pouvant provoquer des vagues de plusieurs mètres sur la côte. Enfin, les houles cycloniques, résultant du passage d'événements cycloniques au large de la Guadeloupe, peuvent engendrer des vagues extrêmement violentes, pouvant dépasser 10 mètres de hauteur significative. Ces dernières sont susceptibles d'affecter l'ensemble des façades littorales, puisque l'orientation des vagues dépend de la trajectoire du cyclone.

Chaque façade de l'archipel est exposée plus ou moins directement à ces différents régimes de houle.

Les cyclones, phénomènes à l'origine de la plupart des événements de submersion marine sont des phénomènes météorologiques très complexes à prévoir et les conséquences qu'ils peuvent provoquer dépendent fortement de leurs caractéristiques. Effectivement, divers éléments tels que l'intensité, la taille, la vitesse de déplacement et la trajectoire des cyclones ont un impact sur l'intensité de la submersion. Ces facteurs influencent notamment :

- L'intensité de la surcote, qui résulte de la dépression atmosphérique et des forts vents liés au passage du cyclone ;
- La durée pendant laquelle la submersion se produit ;
- Les zones touchées par la submersion.

D'après le guide méthodologique relatif aux plans de prévention des risques littoraux, « Les submersions marines sont des inondations temporaires de la zone côtière par la mer lors de conditions météorologiques et océaniques défavorables (basses pressions atmosphériques et fort vent d'afflux agissant, pour les mers à marée, lors d'une pleine mer) ; elles peuvent durer de quelques heures à quelques jours » (MEDDE,2014). Elles sont le plus souvent associées à des surélévations temporaires du niveau de la mer lors de tempêtes ou de cyclones.

Les surcotes marines sont contrôlées par deux processus principaux (qui peuvent s'additionner) :

- La surcote atmosphérique : Le passage d'un événement tempétueux dépressionnaire entraîne des perturbations atmosphériques qui influent sur le niveau d'eau selon deux mécanismes.
- La chute de la pression atmosphérique, elle contribue directement à une surélévation du niveau marin. Ce type de surcote est particulièrement important lors des tempêtes et des cyclones. Une diminution d'1 hPa entraîne une élévation du niveau d'eau d'1 cm.
- La surcote liée au vent (wind setup) : en fonction de son intensité et de sa direction, le vent peut provoquer une accumulation de l'eau à la côte et ainsi une élévation du niveau d'eau
- La surcote liée aux vagues (wave setup) : Le mouvement des vagues pousse de l'eau vers la côte, peut créer une surélévation temporaire du niveau de la mer. De la même manière, un vent fort soufflant vers la côte peut entraîner une montée du niveau de la mer. Cet effet est particulièrement notable pendant les tempêtes lors que les vagues et le vent sont importants, et sur des types de côtes enclavées (plages récifales, baies, etc.)

Le niveau moyen du plan d'eau (ou niveau statique) lors d'une tempête résulte ainsi de la contribution de la surcote atmosphérique, de la surcote des vagues et de la marée. Ces facteurs peuvent s'additionner ou se soustraire en fonction de leur direction et de leur magnitude, ce qui peut soit atténuer soit exacerber les effets d'une surcote marine.

Enfin, le niveau instantané du plan d'eau dépendra du jet de rive (swash), c'est-à-dire le flux et le reflux des vagues sur l'estran. Le "swash" est le mouvement de l'eau sur la plage après le déferlement d'une vague. On appelle runup la cote maximale atteinte par la mer au-dessus d'un niveau de référence, généralement mesurée par rapport à un niveau bas de la marée ou à un autre point fixe.

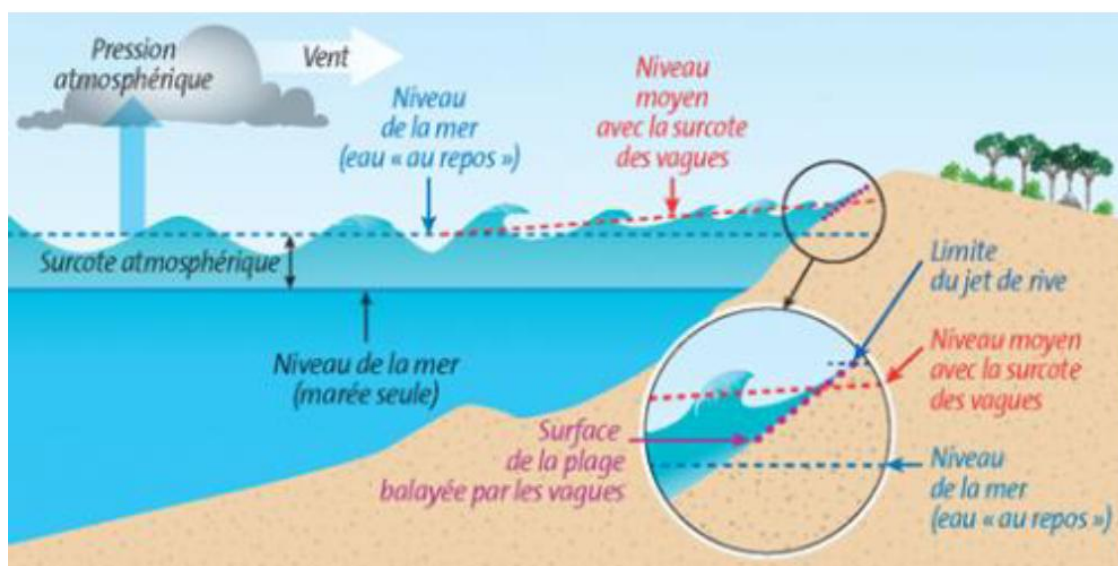


Figure 17 : Schéma des différentes contributions au niveau du plan d'eau lors d'une tempête jusqu'au rivage (Source : BRGM)

La submersion marine des zones côtières peut se manifester de trois manières distinctes :

- **Le franchissement par paquets de mer** : Lorsque les vagues passent de manière intermittente par-dessus les ouvrages de protection côtière ou les cordons naturels (sans que le niveau moyen soit supérieur à l'altitude du terrain naturel).
- **Le débordement** : Cette situation se produit lorsque le niveau d'eau moyen dépasse de manière continue les ouvrages de protection côtière ou les cordons naturels jusqu'à ce que l'intensité de l'événement diminue et que le niveau d'eau moyen revienne à une hauteur inférieure à celle des structures de protection ou des cordons naturels.
- **La rupture de structure de protection** : En cas de contraintes extrêmes provoquées par les masses d'eau et les vagues, les ouvrages de protection ou les cordons naturels peuvent se rompre, permettant ainsi à l'eau de s'écouler librement et de submerger les zones côtières protégées.

Un épisode de submersion peut résulter de la succession de ces différents processus (Figure 18), voire de leur occurrence simultanée, en des endroits différents. Lors de tempêtes, on assiste à une caractérisation des zones basses potentiellement exposées aux submersions marines en Haute-Corse généralement à une montée progressive du niveau statique et à un renforcement de l'intensité des vagues (temps 1). Au-delà d'une certaine intensité, il peut y avoir franchissements par paquets de mer, la submersion associée restant en général limitée (temps 2). Si le niveau statique continue à s'élever et dépasse la cote maximale des défenses côtières, la submersion passe alors en régime de débordement (temps 3A). Lorsque le niveau statique diminue du fait de la marée et/ou de la baisse de la surcote, on peut observer, suivant la configuration, une « vidange » partielle de l'eau accumulée à terre vers la mer ou de nouveaux franchissements jusqu'à ce que les conditions de mer diminuent en intensité (temps 3B). En cas de rupture d'un ouvrage de protection, il peut y avoir submersion par débordement alors que le niveau statique ne dépasse pas la cote maximale de l'ouvrage avant rupture (temps 3C).

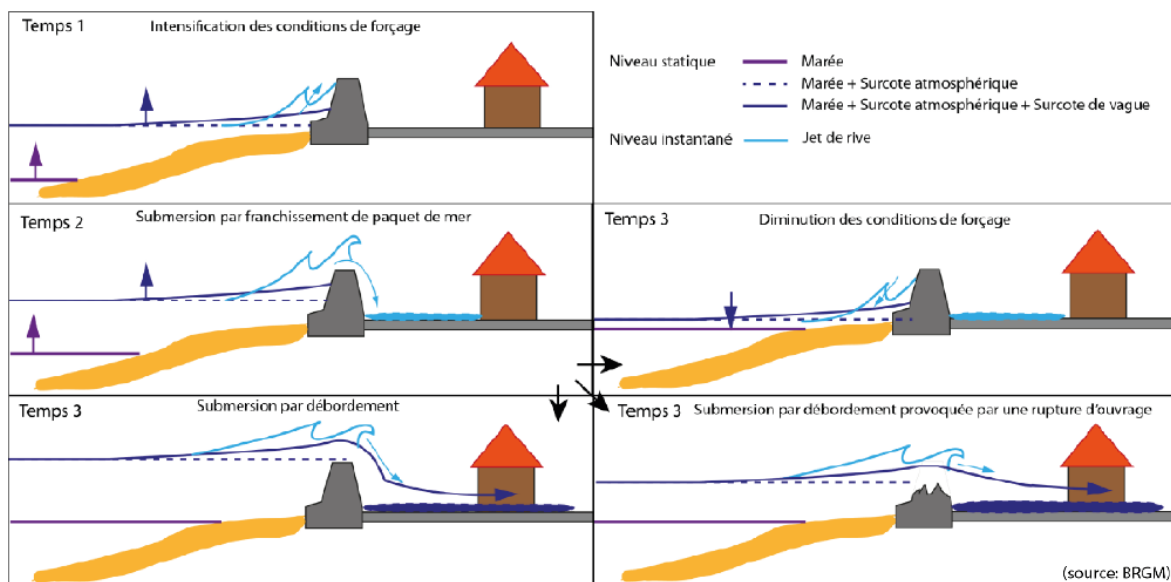


Figure 18 : Exemple de chronologies possibles en cas de submersion marine (franchissement par paquets de mer / dégradation des ouvrages / débordement - Source : BRGM)

3.2 Caractérisation et cartographie des aléas

3.2.1 Définitions et notions générales

3.2.2 Aléa inondation

3.2.2.1 Les données disponibles

La première génération de PPRN en Guadeloupe a été prescrite entre 1997 et 2007. Cette donnée est très hétérogène.

Plusieurs méthodes ont été déployées. Le tracé de l'enveloppe de la zone inondable a été réalisée sur la base de l'atlas communal des risques, d'analyses hydrogéomorphologiques, d'approches typologiques, d'enquêtes de terrain ou de modélisations hydrauliques. Il en résulte des classifications de l'aléa très différentes suivant les communes. Il est à noter par ailleurs que, globalement, aucun réel suivi méthodologique ne permet de distinguer les différents modes de traitement selon les secteurs considérés, ce qui rend délicat leur évaluation, leur traçabilité et leur pertinence.

En plus de cette hétérogénéité de traitement, est également relevée une diversité de représentation cartographique de l'aléa inondation. Aussi, dans certains cas, l'aléa fort, ou parfois l'enveloppe totale de l'aléa inondation, sont cartographiés de façon linéaire (polyligne) par une bande de largeur constante. Dans d'autres cas, les différentes classes d'aléas (y compris l'aléa fort) sont représentées par un zonage (polygone).

Le seuil (i.e. surface de bassin versant intercepté) à partir duquel l'aléa inondation est cartographié est également très variable d'une commune à l'autre.

En résumé, la difficulté dans l'exploitation de la première génération de PPRN réside donc dans l'hétérogénéité de la donnée, que ce soit en termes de méthode, de classification ou de représentation cartographique. La principale limite est liée à l'absence de données quantitatives qui ne permet pas de disposer de données quantifiées (hauteur et/ou vitesse d'écoulement) pour un évènement de référence donné. Ce constat a également été fait lors des études d'évaluation des PPRI 1ère génération de Guadeloupe (DEAL).

En complément de cette évaluation de la première génération de PPRN, les représentants (élus et techniciens) de la commune du Moule ont été rencontrés en mai 2016 afin de recueillir le témoignage de la collectivité concernant la pratique du PPR 1ere génération par les services municipaux, les projets de développement, les enjeux futurs, le recueil des études existantes sur les dix dernières années, le recensement des phénomènes sur les dix dernières années, les demandes de précision sur les aléas.

Toutes les informations et témoignages collectés, cadre de la révision des PPRN, ont mis en évidence la nécessité d'intégrer les données récentes permettant de prendre en compte les connaissances nouvelles sur les inondations, principalement sur les zones à enjeu du territoire guadeloupéen. Il s'agit de :

La cartographie détaillée du TRI Centre et du TRI Basse-Terre/Baillif

La cartographie détaillée du TRI Centre et du TRI Basse-Terre/Baillif (source DEAL 971) a été produite en 2014 à partir de l'outil CARTINO (modélisation 1D simplifiée) qui intègre une approche hydrologique régionalisée et le traitement de la Litto 3D. La Litto 3D est un modèle numérique altimétrique continu terre-mer sur la frange littorale. Le maillage du terrain de la Litto 3D se présente sous forme d'une grille régulière au pas de 1 mètre ($\Delta X = \Delta Y = 1\text{m}$). L'altitude de chacun des nœuds de cette grille correspond à l'altitude du terrain nominal au point défini par le nœud de la grille. La technologie Lidar a été déployée sur l'ensemble de l'archipel. La précision altimétrique a été contrôlée à +/- 30 cm et la précision planimétrique à +/- 40 à 50 cm.

Sur la base du diagnostic de l'EPRI (évaluation préliminaire des risques d'inondation, arrêtée le 16 mars 2012, qui pose un diagnostic global à l'échelle du département) et d'une concertation avec les parties prenantes du bassin, deux territoires à risque d'inondation important (TRI) ont été identifiés par arrêté du préfet coordonnateur de bassin du 17 décembre 2012. Le TRI « Basse--Terre – Baillif » regroupant ces deux communes et le TRI « Centre Guadeloupe », qui regroupe les communes de Baie-Mahault, Pointe-à-Pitre, Les Abymes, Morne-à-l'Eau, Le Moule, Sainte-Anne et Le Gosier ; et le TRI « Basse-Terre Baillif ».

La cartographie détaillée des TRI traite des inondations par débordement de cours d'eau et par ruissellement. Le seuil à partir duquel l'aléa est représenté n'est pas défini.

Trois types de scénarios de crues sont considérés :

- Le scénario fréquent : période de retour est comprise entre 10 et 30 ans,
- Le scénario moyen : période de retour est comprise entre 100 et 300 ans,
- Le scénario extrême : période de retour d'au moins 1000 ans.

L'avantage de la cartographie détaillée des TRI est l'homogénéité de traitement sur les territoires concernés.

Elle permet une classification de l'aléa qui peut être qualifiée de quantitative c'est-à-dire qui dépend d'une hauteur d'eau et/ou d'une vitesse d'écoulement.

Comme toute modélisation 1D à surface libre la cartographie détaillée des TRI est en limite de validité sur les secteurs urbains denses, les zones de plaines et d'embouchures, les cours d'eau aux lits peu marqués et aux déversements transversaux.

La méthode Exzeco est un code d'EXtraction des Zones d'ÉCOulement

La méthode Exzeco est un code d'EXtraction des Zones d'ÉCOulement. Ce code se base sur l'utilisation de méthodes classiques d'analyse topographique pour l'extraction du réseau hydrographique à partir de bruitage du Modèle Numérique de Terrain (MNT) initial. Cette méthode à grand rendement est équivalente au remplissage des fonds de thalwegs avec une certaine hauteur d'eau comme paramètre d'entrée. Développé initialement par le CETE Méditerranée, il a été adapté et développé par SAFEGE dans le cadre de ses activités fluviales et traitement de données LIDAR.

Les zones basses hydrographiques créées sont une approximation des zones potentiellement inondables dans les parties amont des bassins versants.

En effet Exzeco n'est pas adapté à tous les cas de figures et notamment aux fonds de vallon peu encaissés, aux plaines, aux centres urbains denses et aux embouchures des cours d'eau.

La méthode Exzeco a été appliquée sur l'ensemble de l'archipel à partir du traitement de la Litto 3D en 2015.

Différents paramétrages ont été déployés sur l'archipel pour pallier les limites d'application de l'outil Exzeco sur les zones de fond de vallons peu encaissés que l'on retrouve généralement sur la Grande-terre et sur les zones de plaine que l'on retrouve sur le sud-est de la Grande-Terre.

Secteur	Taille de maille	Hauteur de bruitage	Nombre d'itérations
Sud-est de la Grande-Terre	5 m x 5 m	1 m	800
Autres secteurs de la Grande-Terre	5 m x 5 m	3 m	500
Reste du territoire	5 m x 5 m	5 m	500

Paramétrage déployé pour l'application de la méthode Exzeco

L'avantage de l'outil Exzeco est l'homogénéité de traitement sur l'ensemble de l'archipel et l'homogénéité du seuil de surface de bassin versant à partir duquel l'aléa est représenté (seuil de surfaces : 1, 10, 20 et 100 ha).

Toutefois les résultats permettent uniquement de définir une enveloppe potentielle de zone inondable mais en aucun cas une classification de l'aléa dans cette enveloppe.

Aussi l'outil Exzeco ne permet pas de classification de l'aléa.

La méthode Exzeco a ainsi permis de déterminer sur l'ensemble du territoire guadeloupéen :

- Les axes d'écoulement et les bassins versants interceptés en tout point de leur linéaire,
- Les zones potentiellement inondables.

Les études hydrauliques « ponctuelles ». L'ensemble du territoire est couvert par plusieurs études hydrauliques qui ont été menées ponctuellement :

- Par différents maîtres d'ouvrage,
- Sur diverses thématiques : recalibrage d'ouvrages hydrauliques de traversée, étude d'inondabilité, étude d'aménagement, ...,
- A plusieurs échelles d'étude.

Toutes ces études n'ont pas été prises en compte dans le cadre de la révision des PPRN. Le préalable indispensable est d'abord de retenir uniquement les études hydrauliques dites d'inondabilité dont l'objectif était de préciser l'aléa inondation. Aussi toutes les études dont l'objectif n'est pas de préciser l'aléa inondation ne sont pas réutilisées dans le cadre de la révision des PPRN. Par exemple les études hydrauliques dont la vocation est uniquement de dimensionner un ouvrage hydraulique de traversée sont directement exclues.

Ensuite, toutes les études d'inondabilité ont été analysées sur la base de plusieurs critères afin de retenir uniquement les plus pertinentes.

Les critères de sélection des études hydrauliques ont été déterminés en cohérence avec :

- La circulaire sur la mise en œuvre de la phase de cartographie de la directive inondation,

- La phase 3 de l'évaluation de la première génération de PPRN en Guadeloupe, sur les perspectives pour l'élaboration des PPRN,
- Les guides méthodologiques du ministère.

Les critères retenus sont présentés ci-dessous :

Paramètre	Critère	Remarques
Cartographie hauteurs d'eau	Cartographie des hauteurs d'eau disponible ou topographie ayant servi de base à la modélisation fournie	Prise en compte des études pour lesquelles : <ul style="list-style-type: none"> - Une cartographie des zones inondables est disponible (en H), Ou <ul style="list-style-type: none"> - La topographie qui a servi de base à la modélisation est explicitement fournie. En effet, il sera alors possible de retrouver les hauteurs d'eau par différentiel ligne d'eau : cote TN. Cette méthode implique un travail conséquent de digitalisation.
Evènement de référence	L'évènement de référence est défini et correspond à l'évènement centennal ou à un évènement historique de période de retour supérieure à 100 ans	
Topographie	Un levé topographique spécifique à l'étude a été réalisé	<ul style="list-style-type: none"> - La topographie est un critère difficile à évaluer. - Concernant la précision de la donnée, il n'est pas toujours spécifié la technique ou la précision de levé topographique - Concernant la densité des profils levés elle varie entre les études. Toutefois il est à noter que le nombre et la densité de profils permettant de caractériser un cours d'eau varient en fonction de la morphologie des cours d'eau.
Législation	La réutilisation est autorisée juridiquement	
Format	La réutilisation est rendue possible par le format des données	Deux niveaux sont à distinguer : <ul style="list-style-type: none"> - Format des données disponibles : PDF, Scan ou SIG - Format de la donnée SIG si elle existe : données sources de hauteurs et de vitesses ou seulement données résultant d'un croisement hauteur vitesse
Echelle de restitution des cartes	Doit être compatible avec une restitution au 1/10 000 ^e	<ul style="list-style-type: none"> - Ce critère est difficile à évaluer. En effet il faut distinguer l'échelle de restitution des cartes et les possibilités d'utiliser les résultats d'une étude à une échelle plus précise que le rendu de cette étude. - Les études dont le rendu a été réalisé à une échelle supérieure au 1/10000^e seront conservées, tandis que pour celles dont le rendu est à une échelle inférieure il s'agira d'analyser les possibilités de réutilisation des résultats pour une restitution au 1/10 000^e. Cette analyse sera réalisée en fonction des données utilisées et des hypothèses de travail si elles sont disponibles.
Modèle hydraulique	Traçabilité : avoir des informations sûres : <ul style="list-style-type: none"> - Le modèle hydraulique utilisé - Le calage du 	<ul style="list-style-type: none"> - Ce critère est très subjectif car les informations sur le modèle hydraulique utilisé sont très disparates d'une étude à une autre. - On considèrera qu'à partir du moment où des informations sont disponibles sur le nom du modèle et les

	<p>modèle</p> <ul style="list-style-type: none"> - Les conditions aux limites (paramètre obligatoire) - Le pas spatial de modélisation et le type d'interpolation <p>Les incertitudes</p>	<p>conditions aux limites, le critère est respecté. En effet, lorsque l'on ne dispose pas d'informations détaillées sur le calage ou les paramètres du modèle, on supposera que le bureau d'études en charge de la modélisation a fait le nécessaire afin de construire un modèle adapté et calibré sur les crues de référence.</p> <ul style="list-style-type: none"> - Ce critère reprend les objectifs de traçabilité et d'analyse des incertitudes
Hydrologie	L'hydrologie doit être récente ou encore valable	<ul style="list-style-type: none"> - Il existe une trop grande disparité dans les méthodologies et modèles hydrologiques employés entre les études hydrauliques pour définir des critères de sélection précis. - Néanmoins, SAFEGE utilise son expertise pour : <ol style="list-style-type: none"> 1) extraire les débits spécifiques correspondants aux débits injectés dans les modèles 2) analyser leur cohérence dans le contexte hydrogéomorphologique de la zone d'étude.

La répartition géographique des études retenues est illustrée ci-dessous :

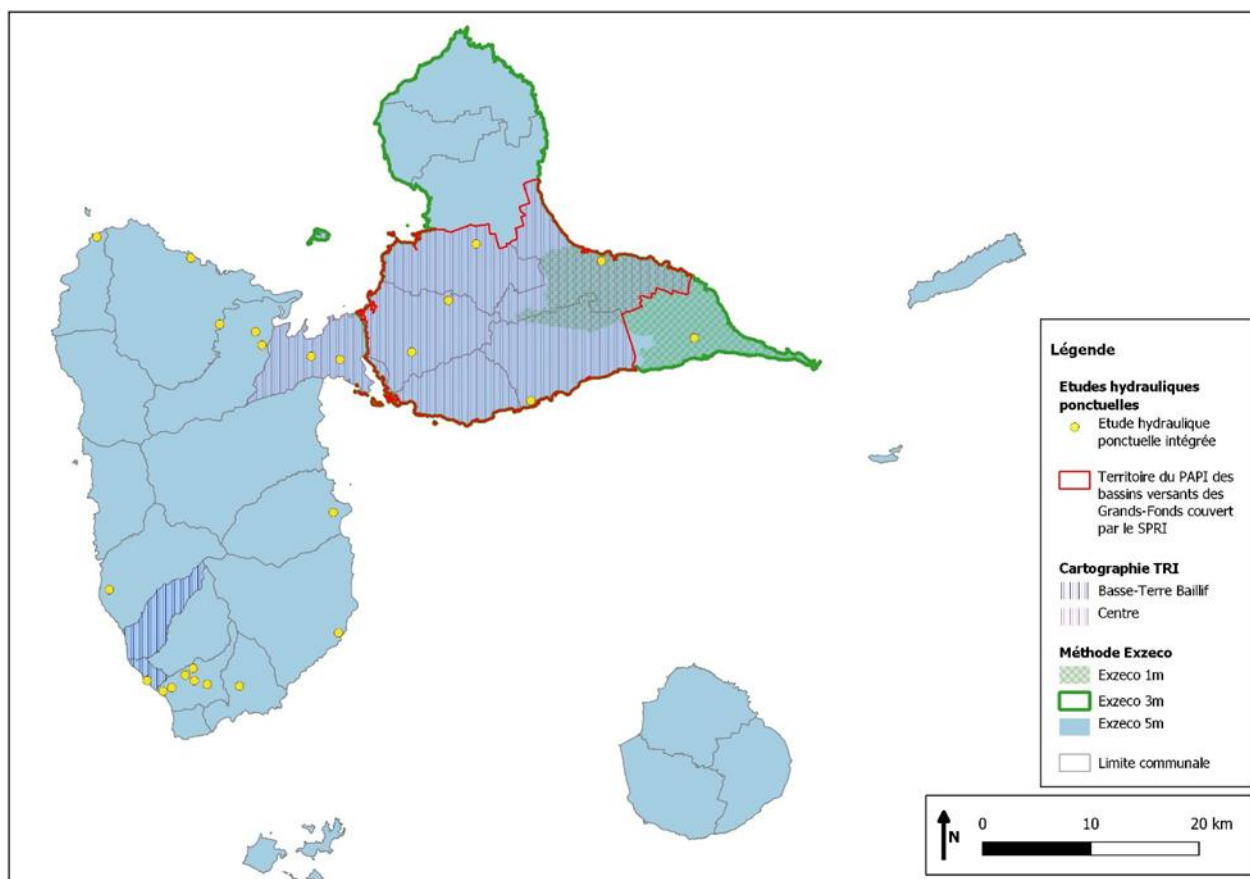


Figure 19 : Localisation des données récentes intégrées dans la cartographie de l'aléa inondation de la révision des PPRN

Ainsi, sur le territoire communal du Moule, la cartographie de l'aléa inondation révisée intègre les résultats des modélisations menées dans le cadre de l'étude hydraulique ponctuelle suivante :

- Le territoire du PAPI des bassins versants des Grands-Fonds intègre les communes de Pointe-à-Pitre, Les Abymes, Morne-à-l'Eau, Le Moule, Sainte-Anne et Le Gosier. Les principaux bassins versants de ses communes ont été couverts par des modélisations hydrauliques dans le cadre du Schéma de Prévention des Risques d'Inondations (Ville des Abymes, 2019. SPRI. Suez Consulting).

Il a notamment été modélisé :

- L'occurrence de crue centennale : une pluie longue (48h) rendant compte d'un épisode cyclonique et pluie courte (12h) rendant compte d'un épisode pluvieux du carême,
- Un événement pluvieux du type de celui ayant accompagné l'ouragan Maria.

Afin de respecter le décret n° 2019-715 du 5 juillet 2019, la cartographie de l'aléa inondation établie dans le cadre de la révision du PPRn du Moule repose sur les hauteurs d'eau maximales résultant de ces trois scénarii de modélisations.

- Une étude hydraulique a été menée sur le bassin versant de la ravine Lemercier dans le cadre de la présente révision des PPR Inondation (Suez Consulting pour la DEAL Guadeloupe, 2019). Son objectif était de caractériser l'aléa de référence, c'est-à-dire la crue d'occurrence centennale et ainsi d'avoir une cartographie fine de l'aléa inondation.

Ainsi sur le secteur couvert par cette étude et afin de respecter le décret n° 2019-715 du 5 juillet 2019, la cartographie de l'aléa inondation établie dans le cadre de la révision du PPRn du Moule repose sur les hauteurs d'eau maximales résultant de la modélisation de la crue d'occurrence 100 ans.

En cohérence avec la résolution des données produites sur le territoire et leur domaine de validité, la cartographie « inondation » est présentée sur fonds IGN SCAN 25 EXPRESS à l'échelle 1/10 000.

3.2.2.2 Évaluation de l'aléa inondation

3.2.2.2.1 Principe général

Le principe général retenu est de se servir de la donnée la plus précise, la plus récente et la plus homogène disponible et de la compléter par les autres données disponibles (et notamment la 1ère génération de PPRN).

Pour conclure, les données les plus précises, récentes et homogènes sont par ordre de préférence :

1. Les études hydrauliques ponctuelles,
2. La cartographie détaillée des TRI,
3. La première génération de PPRN,
4. La méthode Exzeco.

Un des objectifs visés est d'homogénéiser les critères de cartographie de l'aléa inondation sur l'ensemble du territoire.

Pour garder une cohérence entre la 1ère et la 2ème génération de PPRN, il s'agit de préserver autant que possible le zonage de la 1ère génération de PPRN tout en la complétant et en la précisant avec les données plus récentes disponibles. En effet, il peut être délicat de revoir significativement le zonage de l'aléa de la 1ère génération de PPRN en le majorant ou en le minorant. Il s'agit donc de proposer une transition douce entre la 1ère et la 2ème génération de PPRN.

Dans le cadre de l'évaluation de l'aléa inondation en dehors des zones d'apport de connaissance par modélisation, il s'agit alors de définir :

- L'enveloppe de la zone inondable, c'est-à-dire les limites de la zone potentiellement en eau,

- La classification de l'aléa dans cette enveloppe selon différents critères qui peuvent être qualitatifs ou quantitatifs selon la donnée disponible.

Les chapitres suivants présentent la méthodologie proposée pour définir l'enveloppe de la zone inondable et la classification de l'aléa.

3.2.2.2.2 Seuil de cartographie de l'aléa inondation

Pour homogénéiser les critères de cartographie de l'aléa inondation sur l'ensemble du territoire, il s'agit de cartographier systématiquement une zone inondable à partir d'une surface drainée supérieure à 20 ha. L'objectif étant d'inscrire toutes les communes de l'archipel sur un pied d'égalité vis-à-vis de l'aléa.

Ce seuil de 20 ha est mentionné dans la phase 3 de l'évaluation des PPRn de Guadeloupe sur les perspectives pour l'élaboration des PPRN. Il est souligné la difficulté de déterminer des critères quantitatifs ou qualitatifs permettant de déclencher ou non la cartographie de l'aléa inondation pour un axe d'écoulement. Un critère qualitatif pourrait être de ne cartographier que les axes d'écoulement correspondant à la définition d'un cours d'eau au sens du Code de l'Environnement telle qu'appliquée en Guadeloupe. Cependant il est précisé que ce choix ne serait pas le plus judicieux, car peu d'axes seraient alors cartographiés sur la Grande-Terre et les îles du Sud. Des critères quantitatifs pourraient être un débit ou une superficie de bassin versant. Cependant, la détermination d'une valeur de débit dépend de la qualification de l'aléa de référence, et un débit ne serait pas forcément représentatif du risque.

Concernant la superficie de bassin versant, il est souligné qu'il est peu opportun d'associer un seuil de dangerosité à une valeur de bassin versant. Cependant, la rubrique 2.1.5.0 de la nomenclature relative à la loi sur l'eau consiste en :

Rubrique 2.1.5.0 : Rejet d'eaux pluviales dans les eaux douces superficielles ou sur le sol ou dans le sous-sol, la surface totale du projet, augmentée de la surface correspondant à la partie du bassin naturel dont les écoulements sont interceptés par le projet, étant :

1° Supérieure ou égale à 20ha (autorisation)

2° Supérieure à 1ha mais inférieure à 20 ha (déclaration)

Bien que cette rubrique ne concerne que les rejets d'eaux pluviales, il est d'usage que les axes d'écoulement qui ne sont pas des cours d'eau au sens du code de l'environnement soient concernés par cet article. Afin de garder une cohérence avec cette réglementation, il a été décidé que le seuil quantitatif pour la cartographie de l'aléa inondation soit une superficie de bassin versant de 20ha. Pour les bassins versants de superficie supérieure à 20ha l'aléa inondation serait considéré comme assez conséquent pour être évalué, tandis que pour ceux de superficie inférieure, les risques seraient plus réduits. Les axes d'écoulement correspondant à un bassin versant inférieur à 20ha seraient alors à traiter au cas par cas.

Au regard des spécificités des bassins versants et des crues de l'archipel Guadeloupe, le choix d'un seuil de cartographie des zones inondables à 20ha semble opportun.

3.2.2.2.3 Tracé de l'enveloppe de la zone inondable

Concernant le tracé de l'enveloppe de la zone inondable, les grands principes proposés sont les suivants :

- Cas n°1 - Les tronçons traités dans une étude hydraulique validée : la cartographie de la zone inondable correspond à l'enveloppe inondable maximale entre les crues centennales et les événements observés modélisés ; complétée par l'enveloppe des TRI et/ou de la 1ère génération de PPRN et/ou par Exzeco en fonction de la validité de ces données,
- Cas n°2 – Les tronçons traités dans les TRI : l'enveloppe de la zone inondable correspond à l'enveloppe inondable pour un événement moyen (T= 100 ans) complétée par l'enveloppe de la 1ère génération de PPRN et/ou par Exzeco en fonction de la validité de ces données,

- Cas n°3- Les tronçons couverts uniquement par la 1ère génération de PPRN : l’enveloppe de la zone inondable correspond à celle de la 1ère génération de PPRN, complétée par l’enveloppe de Exzeco en fonction de la validité de ces données,
- Cas n°4 : Enfin sur les zones où seule la donnée Exzeco est disponible, celle-ci déterminera le tracé de l’enveloppe de la zone inondable.

Ces différents cas sont valables pour une surface drainée supérieure à 20 ha.

Pour les zones inférieures à 20 ha, seuls les axes d’écoulement issus de la Litto3D sont conservés, sans zone tampon. Ce sont des secteurs à vocation pluviale, pour lesquels sera prescrite une notion de respect des axes dans le règlement, sur la base d’un plan topographique figurant l’axe de ruissellement au moment de la délivrance du permis de construire.

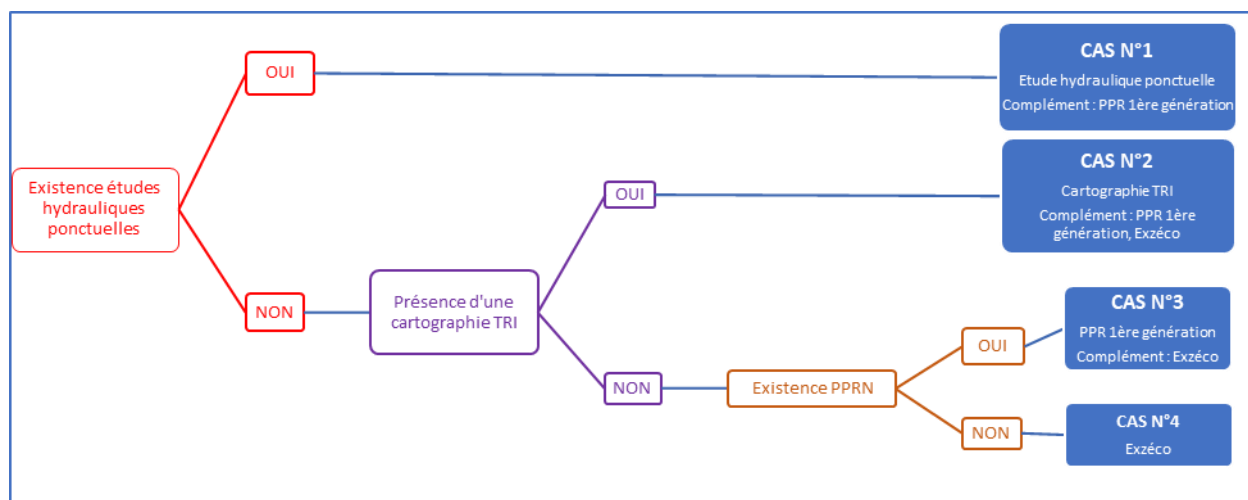


Figure 20 : Logigramme des principes retenus pour le tracé de l’enveloppe de la zone inondable

3.2.2.3 Classification de l’aléa inondation

3.2.2.3.1 Rappel des méthodes de classification existantes

Deux types de classifications de l’aléa existent :

- Qualitatives s’appuyant sur la nature du terrain ou le type d’inondation,
- Quantitatives basées sur des notions de hauteur d’eau et/ou de vitesses d’écoulement.

Ils sont présentés dans le détail ci-dessous.

Classification qualitative de l’aléa inondation

Bilan de la 1ère génération de PPRN :

Dans l’évaluation de la première génération de PPR en Guadeloupe, un bilan des méthodes de classification de l’aléa utilisées dans les différents PPRN a été réalisé. En ce qui concerne la classification qualitative de l’aléa les niveaux d’aléa retenus ont été les suivants :

Typologie	Niveau d'aléas associé
Lit mineur	Fort
Lit moyen	Fort
Crue torrentielle	Fort
Ravine	Fort
Accumulation pérenne	Fort
Lit majeur	Moyen
Accumulation temporaire	Moyen
Inondation pluviale	Moyen
Inondation de débordement	Moyen
Inondation torrentielle	Moyen
Mangrove	Moyen

Figure 21 : Classification qualitative de l'aléa dans la première génération de PPRN

Bilan des préconisations méthodologiques du ministère :

A travers les différents guides méthodologiques du Ministère aucune préconisation n'est donnée quant à la méthodologie de classification de l'aléa sur la base de la typologie fonctionnelle des cours d'eau.

Toutefois le guide méthodologique pour la réalisation des PPR spécifique au risque inondation indique que les crues fréquentes correspondent au lit mineur et au lit moyen alors que les crues rares à exceptionnelles couvrent davantage le lit majeur.

Il est d'ailleurs distingué deux types de lit majeur, le lit majeur ordinaire emprunté par les crues rares et le lit majeur maximal emprunté par les crues exceptionnelles.

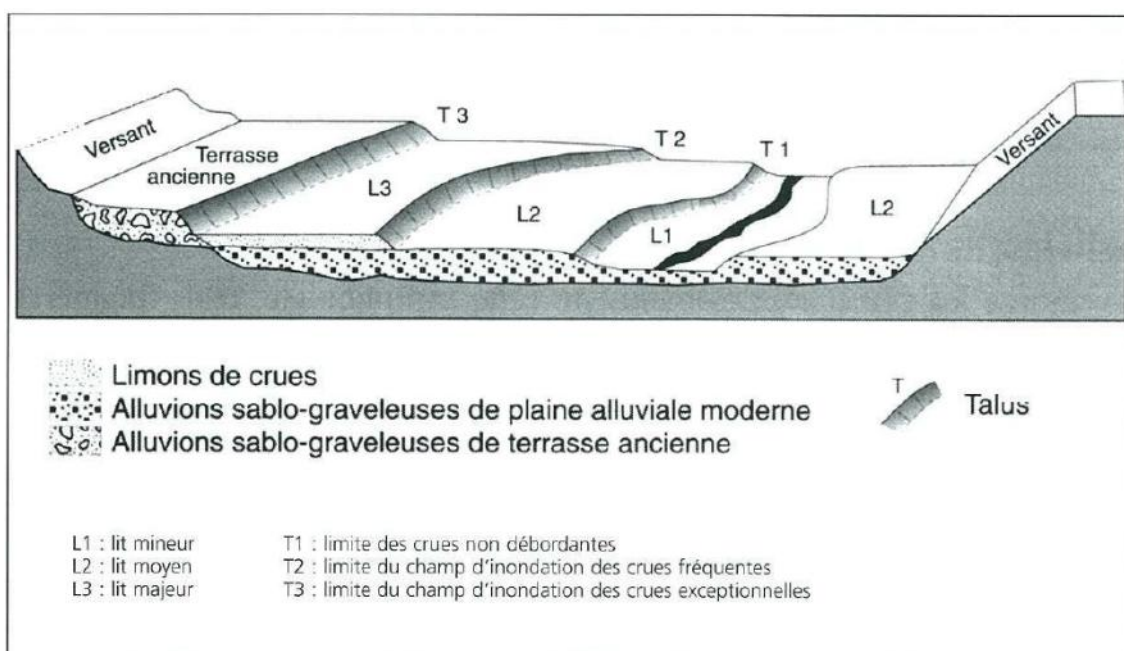


Figure 22 : Coupe transversales d'une vallée – Approche hydrogéomorphologique.

Classification quantitative de l'aléa inondation

Bilan de la 1ère génération de PPRN :

Lors du bilan de la première génération de PPR, il n'est pas apparu de classification unique, chaque bureau d'étude ayant adopté une méthode différente. Dans certaines communes seules les vitesses ont été utilisées pour déterminer le niveau d'aléa, tandis que dans d'autres un croisement hauteur/vitesse a été réalisé.

Par ailleurs, les valeurs seuils de vitesses et hauteurs définissant les niveaux d'aléas varient entre les PPRN des différentes communes.

Les vitesses peuvent être regroupées en deux ou trois catégories suivant les cas, avec des valeurs seuils de 0,5 ou 1 m/s, ou être simplement caractérisées par les termes « faible », « moyenne » et « forte ».

Les hauteurs sont quant à elles regroupées en deux ou trois catégories suivant les cas, avec des valeurs seuil de 0,5 et 1 m.

Bilan des préconisations méthodologiques du ministère :

Le décret n° 2019-715 du 5 juillet 2019 relatif aux plans de prévention des risques concernant les « aléas débordement de cours d'eau et submersion marine », dit « décret PPRI », vient compléter le cadre juridique existant pour ce qui concerne l'inondation.

Les modalités de détermination, de qualification et de cartographie de l'aléa de référence, ainsi que les principes généraux du zonage réglementaire et du règlement pour ce qui concerne les constructions nouvelles, sont désormais codifiés aux articles R. 562-11-1 à R. 562-11-9 du Code de l'environnement.

Ce décret s'applique aux PPRI, dont l'élaboration ou la révision est prescrite après le 7 juillet 2019, date de la publication du décret. Néanmoins, concernant les PPR inondations prescrits avant la publication du décret n° 2019-715 du 5 juillet 2019, il est recommandé, dans la mesure du possible, d'appliquer le contenu du décret.

Il précise que :

- **L'aléa de référence est déterminé à partir de l'événement le plus important connu et documenté ou d'un événement théorique de fréquence centennale, si ce dernier est plus important, combiné avec des scénarios de défaillance sur le système d'endiguement.**

Ceci vise à assurer au mieux la protection des personnes et des biens dans la durée, mais aussi l'information de chacun sur l'exposition de son habitation ou son activité à un risque d'inondation

- Les secteurs protégés par des systèmes d'endiguement sont toujours affichés comme soumis à un aléa, correspondant à des scénarios de défaillance.

Conformément à l'article R. 562-11-4 du Code de l'environnement, l'aléa de référence est qualifié et représenté de manière cartographique, selon au maximum quatre niveaux : « faible », « modéré », « fort » et « très fort », en fonction de la hauteur d'eau ainsi que de la dynamique liée à la combinaison de la vitesse d'écoulement de l'eau et de la vitesse de montée des eaux. La vitesse d'écoulement et la vitesse de montée des eaux sont en effet des facteurs d'aggravation de l'aléa et doivent être pris en compte, notamment pour la sécurité des populations (possibilité d'évacuation).

Dans le cadre de l'élaboration ou de la révision des plans de prévention des risques concernant les « aléas débordement de cours d'eau et submersion marine », les modalités de qualification des niveaux de l'aléa de référence sont synthétisées dans le tableau ci-après.

Dynamique \ Hauteur	Dynamique lente	Dynamique moyenne	Dynamique rapide
H < 0,5 mètre	Faible	Modéré	Fort
0,5 < H < 1 mètre	Modéré	Modéré	Fort
1 < H < 2 mètres	Fort	Fort	Très fort
H > 2 mètres	Très fort	Très fort	Très fort

Figure 23 : Caractérisation de l'aléa en fonction de la hauteur et de la dynamique

La qualification de la dynamique se détermine par la combinaison de l'intensité des 2 critères suivants : la vitesse d'écoulement de l'eau et la vitesse de montée des eaux.

La note complémentaire sur le ruissellement péri-urbain (Direction de la Prévention, 2004), spécifique aux petits bassins versants dont la taille est inférieure à quelques dizaines de km², reprend ce croisement pour les zones rurales ou péri-urbaines.

Pour les zones urbaines, où des vitesses fortes peuvent être atteintes plus facilement, un autre croisement hauteur vitesse est utilisé (cf. ci-dessous).

Tab.5 - Grille d'évaluation de l'aléa (cru centennale) sur les critères hauteur-vitesse applicables dans la zone urbaine

	Vitesse faible	Vitesse moyenne	Vitesse forte	Vitesse très forte
Hauteur < 0,20 m	Faible	Moyen	Fort	Très fort
Hauteur comprise entre 0,20 et 0,50 m	Moyen	Fort	Très fort	Très fort
Hauteur comprise entre 0,50 et 1 m	Fort	Très fort	Très fort	Très fort
Hauteur >1 m	Très fort	Très fort	Très fort	Très fort

Figure 24 : Croisement hauteur vitesse pour les zones urbaines - Source : Direction de la Prévention, des pollutions et des risques, 2004. Plans de prévention des risques naturels - Les risques d'inondation - Le ruissellement péri-urbain - Note complémentaire

Dans cette classification, les vitesses faibles sont inférieures à 0,2 m/s, les vitesses moyennes comprises entre 0,2 et 0,5 m/s, les vitesses fortes entre 0,5 et 1 m/s et les vitesses très fortes sont supérieures à 1 m/s.

Comme pour le guide méthodologique pour l'élaboration des PPR, ce croisement s'est appuyé sur les travaux de la Direction Départementale de l'Équipement du Vaucluse.

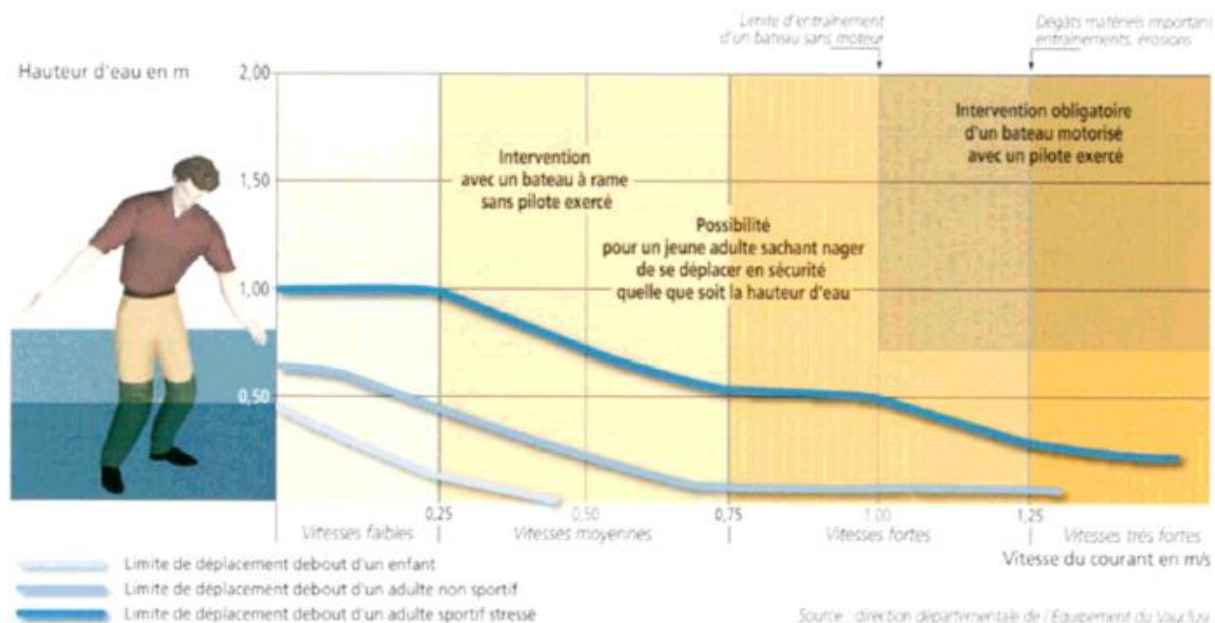


Figure 25 : Déplacement d'une personne en fonction de la hauteur d'eau et de la vitesse d'écoulement. Source : Guide méthodologique pour l'élaboration des PPR

Bilan des méthodes de classification existante

De l'évaluation de la première génération de PPR, il ressort que la classification qualitative de l'aléa est adaptée à une approche naturaliste et hydrogéomorphologique, mais peut présenter le risque de ne pas être représentative de l'ampleur de l'aléa en termes de hauteurs d'eau et de vitesses d'écoulement.

Une classification quantitative est plus représentative de l'ampleur de l'aléa et permet de définir facilement des niveaux d'aléa, mais requiert une certaine précision dans la quantification de l'aléa.

Par ailleurs, cette évaluation a souligné l'importance de prendre des précautions concernant les classifications quantitatives en hauteur/vitesse lorsqu'une approche hydrogéomorphologique est utilisée pour le tracé de l'enveloppe, afin de ne pas porter à confusion quant à la précision de la carte d'aléa.

Une classification quantitative donne une impression de forte précision, qui peut être faussée lorsqu'une approche naturaliste de faible précision a permis d'évaluer l'aléa.

Le croisement hauteur/vitesse est donc plus approprié pour l'exploitation de résultats de modélisations hydrauliques, tandis que pour une approche hydrogéomorphologique, il est plus pertinent de classer les lits mineurs, moyens, majeurs selon un niveau d'aléa.

Enfin, lors de l'utilisation d'une classification basée à la fois sur un croisement hauteur vitesse et sur des approches naturalistes, il est important de préciser la distinction entre l'utilisation des deux critères, afin de connaître les raisons du classement de l'aléa pour une zone donnée et ne pas créer de confusion à la lecture des cartes.

3.2.2.3.2 Classification de l'aléa retenu

Considérant les différents types de données utilisées il est proposé l'utilisation d'une classification à la fois qualitative et quantitative. **La méthode de classification proposée est basée sur 3 degrés d'inondation : fort, modéré et faible.**

En ce qui concerne la classification quantitative seules les données des études retenues (études hydrauliques ponctuelles, TRI) fournissent des classes d'iso-hauteurs. Toutefois les indications de vitesses sont rares (uniquement pour les modélisations menées dans le cadre de la révision des PPRN et celles issues du SPRI).

Globalement le territoire de la Guadeloupe est concerné par :

- Des bassins versants de petites tailles (au maximum 30km²),
- Le caractère intense et souvent localisé des événements pluviométriques difficilement anticipables (dépressions et tempêtes tropicales),
- Les temps de concentration et de propagation des crues courts (seulement quelques heures, et toujours inférieurs à 6 heures).

Ces derniers sont caractéristiques de la **typologie de dynamique rapide, au regard principalement de la montée des eaux, mais également des écoulements de l'eau sur les axes d'écoulement et de grands écoulements. La dynamique rapide est donc retenue sur l'ensemble du territoire.**

Toutefois, afin de prendre en compte l'intégralité des configurations d'écoulement observé sur le territoire, il apparaît nécessaire de compléter l'analyse des vitesses d'écoulements en dehors des axes de grands écoulements, notamment dans la configuration de larges plaines de stockage (rencontré sur la quasi-totalité des parties aval des bassins versants du territoire où se situent les zones urbanisées) :

- Les vitesses qualifiées de moyenne à fortes, soient supérieures à 0.5 m/s, sont observées principalement dans les axes d'écoulement et de grand écoulement où les hauteurs d'eau sont de l'ordre de 1m, et toujours supérieures à 0.5 m,
- Sur les secteurs dont les hauteurs d'eau, en dehors des axes de grands écoulements, sont inférieures à 50 cm, les vitesses sont faibles (inférieures à 0.5 m/s) et caractéristiques de zones d'expansion de crues.

Aussi, **comme le stipule le décret n° 2019-715 du 5 juillet 2019, et dans le cas des spécificités admises au « Cas d'une hauteur inférieure à 0,5 mètre et d'une dynamique rapide », il a été retenu de qualifier le niveau de l'aléa de référence pour des hauteurs < 50 cm en aléa modéré** (et non en aléa fort).

Cette disposition de qualification d'aléa permet ainsi de distinguer les zones d'aléa modéré tout en rappelant le caractère de dynamique rapide caractéristique du territoire.

La qualification de l'aléa de référence apparaît alors comme adaptée aux spécificité locales (tout en rappelant les qualifications faites lors de la 1ère génération de PPRN). Le croisement aléa - enjeu, et l'application des principes de préservation des zones d'expansion de crues sur les secteurs peu ou faiblement urbanisés en aléa modéré (soit non constructibilité), permettra de maintenir la libre expansion des crues en réglementant les urbanisations futures.

En ce qui concerne **la classification qualitative**, considérant la réutilisation des **données issues de la 1ère génération de PPRN**, un troisième type de classification peut être distingué. En effet les données issues de la 1ère génération de PPRN ne donnent pas toujours d'information de hauteur, de vitesse ou de typologie fonctionnelle permettant une classification quantitative ou qualitative. Toutefois la classe d'aléa retenue selon des critères prédéfinis à l'époque est tout de même donnée.

Aussi il est proposé de réutiliser ces classes en considérant que l'aléa fort reste fort, l'aléa moyen correspond à un aléa modéré et l'aléa faible reste faible.

L'enveloppe complémentaire issue de la méthode Exzeco est classée en aléa faible.

	Classification quantitative	Classification issue de la 1 ^{ère} génération de PPRN	Exzeco
Aléa fort	$H \geq 0,5 \text{ m}$	Aléa Fort	-
Aléa modéré	$H < 0,5 \text{ m}$	Aléa moyen	-
Aléa faible	Reste de l'enveloppe	Aléa faible	Toute l'enveloppe

Classification de l'aléa inondation

Les différents cas présentés au chapitre précédent pour le tracé de l'enveloppe de la zone inondable sont repris ci-dessous en détaillant la classification associée :

Cas n°1 - Les tronçons traités dans une étude hydraulique validée : la cartographie de la zone inondable correspond à l'enveloppe inondable maximale entre les crues centennales et les événements observés modélisés ; complétée par l'enveloppe des TRI. La classification retenue est :

- Aléa Fort : Cartographie des études hydrauliques ponctuelles (hauteur maximale de l'occurrence centennale et événement observé), hauteurs d'eau supérieures ou égales à 0,5 m,
- Aléa modéré : Cartographie des études hydrauliques ponctuelles (hauteur maximale de l'occurrence centennale et événement observé), hauteurs d'eau inférieures à 0,5 m,
- Aléa faible : Cartographie des études hydrauliques ponctuelles modélisée

Cas n°2 - Les tronçons traités dans les TRI : l'enveloppe de la zone inondable correspond à l'enveloppe inondable pour un événement moyen (T= 100 ans) complétée par l'enveloppe de la 1^{ère} génération de PPRN et/ou par Exzeco en fonction de la validité de ces données. La classification retenue est :

- Aléa Fort : Cartographie détaillée des TRI (scenario moyen), hauteurs d'eau supérieures ou égales à 0,5 m,
- Aléa modéré : Cartographie détaillée des TRI (scenario moyen), hauteurs d'eau inférieures à 0,5 m,
- Aléa faible : Reste de l'enveloppe de la zone inondable composée par l'enveloppe du PPRN 1^{ère} génération et/ou l'Exzeco.

Cas n°3 - Les tronçons couverts uniquement par la 1^{ère} génération de PPRN : l'enveloppe de la zone inondable correspond à celle de la 1^{ère} génération de PPRN, complétée par l'enveloppe de Exzeco en fonction de la validité de ces données. La classification retenue est :

- Aléa Fort : Aléa fort de la 1^{ère} génération de PPRN,
- Aléa modéré : Aléa moyen de la 1^{ère} génération de PPRN,
- Aléa faible : Aléa faible de la 1^{ère} génération de PPRN et l'enveloppe Exzeco.

A noter : Comme décrit plus haut le PPR est parfois représenté de façon linéaire, ou par une bande de largeur constante autour d'un axe d'écoulement. Dans ce cas, l'aléa fort est rendu par une zone tampon autour de l'axe d'écoulement issu de la Litto3D.

Cas n°4 - Enfin sur les zones où seule la donnée Exzeco est disponible, celle-ci déterminera le tracé de l'enveloppe de la zone inondable. La classification retenue est :

Sur la Grande-Terre - hors secteur des Grands-Fonds :

- Aléa fort : tampon autour des axes d'écoulement issus de la Litto3D (surface drainée supérieure à 100ha),
- Aléa moyen : tampon autour des axes d'écoulement issus de la Litto3D (surface drainée supérieure à 20ha et inférieure à 100ha)
- Aléa faible : Enveloppe de la zone inondable.

Sur la Basse-Terre et secteur des Grands-Fonds :

- Aléa fort : tampon autour des axes d'écoulement issus de la Litto3D (surface drainée supérieure à 20ha),
- Aléa faible : Enveloppe de la zone inondable.

3.2.2.3.3 Axes d'écoulement

Afin de prendre en compte le risque d'érosion des berges lié aux écoulements rapides observés dans les lits mineurs des axes d'écoulement, il a été pris en compte une zone tampon d'une largeur de 20 m (10 m de part et d'autre de l'axe). Cette largeur se veut conservatrice.

Les axes d'écoulement concernés sont ceux issus de la méthode Exzeco (traitement de la Litto3D) dont le bassin versant présente une superficie supérieure ou égale à 20ha.

Deux-cas sont présentés pour la classification de l'aléa inondation sur les axes d'écoulement selon la topographie, le zonage des pluies et la géologie des bassins versants.

Sur la Grande-Terre - hors secteur des Grands-Fonds, cette zone tampon sera classé en :

- Aléa fort si la surface drainée est supérieure à 100ha,
- Aléa moyen si la surface drainée est inférieure à 100ha mais supérieure à 20 ha.

Ce secteur concerne les communes du Moule, de Saint-François, de Petit-Canal, de Port-Louis, d'Anse-Bertrand, de Marie-Galante, de Sainte-Anne et de Morne-A-L'eau.

Sur la Basse-Terre et secteur des Grands-Fonds, cette zone tampon sera classé en :

- Aléa fort si la surface drainée est supérieure à 20ha.

3.2.3 Aléa mouvements de terrain

3.2.3.1 Définition

De façon générale, l'**aléa** peut être défini comme la **probabilité d'apparition** d'un **phénomène de nature et d'intensité données** sur un **territoire donné**, dans une **période de référence donnée**.

Cette définition comporte donc les éléments suivants :

- La **référence à un ou plusieurs phénomènes bien définis et d'une intensité donnée** : cette dernière sera estimée la plupart du temps en fonction de la possibilité de mettre en œuvre une parade technique pour s'en prémunir et du coût de sa réalisation. Ces paramètres seront évalués à l'aide des caractéristiques des phénomènes répertoriés.
- Une **composante spatiale** : un aléa donné s'exerce sur une zone donnée, qu'il faut délimiter. Des difficultés peuvent surgir dans le cas de phénomènes pouvant affecter des zones au-delà de leurs limites visibles : exemple de la régression vers l'amont de certains glissements de terrain ou la propagation vers l'aval des chutes de blocs.
- Une **composante temporelle** : c'est la probabilité plus ou moins grande d'occurrence temporelle du phénomène. Vis-à-vis des inondations l'événement de référence est d'après le guide PPR « la plus forte crue connue et, dans le cas où celle-ci serait plus faible qu'une crue de fréquence centennale, cette dernière ». Pour les mouvements de terrain, la complexité du milieu naturel géologique et son évolution ne permettent pas de quantifier la probabilité d'occurrence : la seule voie actuellement opérationnelle consiste en une approche plus qualitative, dite de prédisposition du site à un type de phénomène donné.

Ainsi la cartographie des aléas Mouvements de terrain s'appuiera sur l'analyse :

- De la **probabilité d'occurrence** : prédisposition que présente un site à être affecté par un phénomène,
- Et de l'**intensité** : ampleur des désordres, impacts ou nuisances susceptibles de résulter du phénomène redouté.

La révision des aléas Mouvements de terrain (Affaissements / Effondrements, Eboulements / Chutes de blocs, Glissements de terrain et Recul de Falaise) a été effectuée simultanément sur l'ensemble du territoire Guadeloupéen par des méthodologies, décrites ci-après (si l'aléa est présent sur le territoire communal), combinant traitements informatiques des données topographiques LIDAR RGE ALTI® 1 m et analyse des images aériennes.

3.2.3.2 Aléa Affaissements / Effondrements

La révision de la cartographie de l'aléa Affaissements / Effondrements s'est effectuée selon une méthodologie élaborée par Ginger CEBTP et ajustée suite aux résultats préliminaires en concertation avec le Pôle Risques Naturels de la DEAL Guadeloupe.

La cartographie de l'aléa Affaissements / Effondrements est basée sur l'exploitation des données topographiques du RGE ALTI® 1 m (Modèle Numérique de Terrain – MNT) à l'aide d'un outil de détection des dépressions topographiques.

Cette méthodologie comprend une série de routines de calculs sous le logiciel Q-GIS.

L'ensemble de la méthodologie est décrit ci-après.

Détection des dépressions :

Dans un premier temps, le MNT issu du RGE ALTI® 1 m est traité avec l'outil StochasticDepressionAnalysis de WhiteboxTools pour détecter les dépressions.

Ne sont conservés ensuite que les dépressions d'une superficie supérieure à 5 000 m².

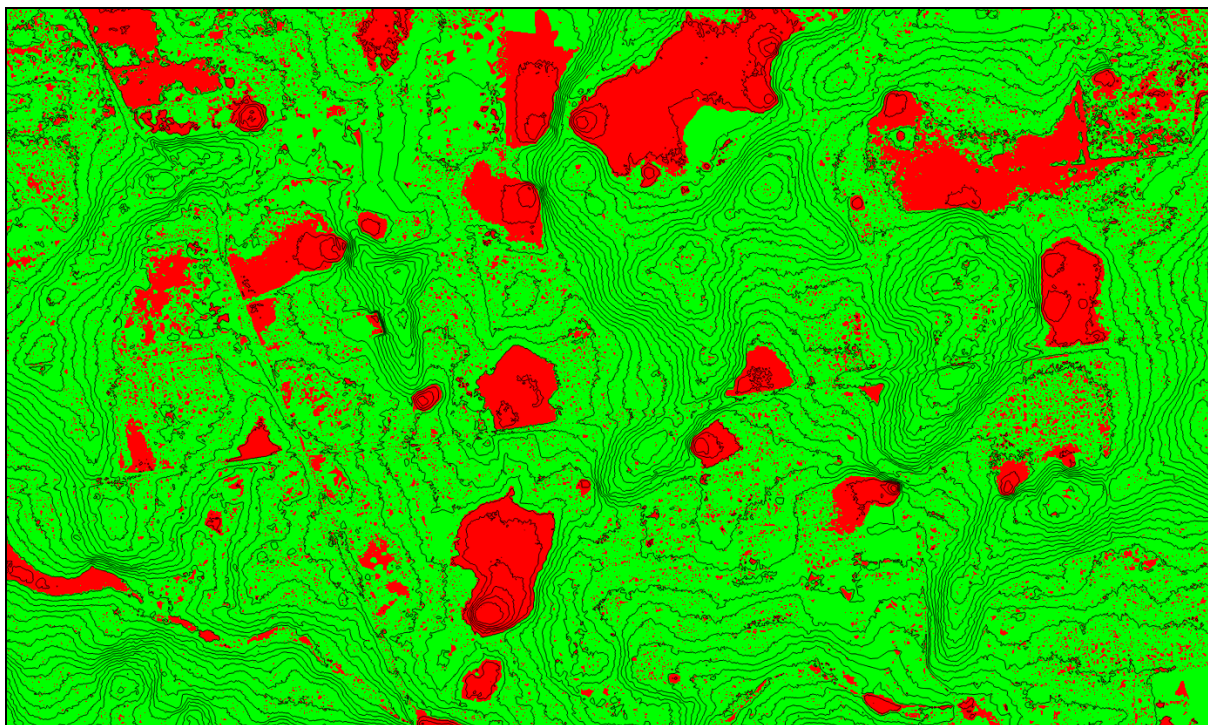


Figure 26 : Détection des dépressions (en rouge) avec l'outil StochasticDepressionAnalysis de WhiteboxTools sur la commune de Petit-Canal [Source : Ginger CEBTP]

Nettoyage des dépressions

Une suppression des dépressions ne correspondant pas à des dolines est effectuée manuellement. Ce type de dépression peut avoir pour origine :

- un talweg ou une vallée barrée par un ouvrage anthropique surélevé (route, remblai de construction, ...);
- un bassin anthropique;
- une ancienne carrière plus ou moins remblayée;
- une excavation liée à des travaux de terrassement;

Ce nettoyage est réalisé à l'aide de l'analyse de photographies aériennes actuelles via Google Earth et anciennes via le site <https://remonterletemps.ign.fr/>.



Figure 27 : Exemple de dépression sur la commune de Petit-Canal (à gauche) [Source : Ginger CEBTP] correspondant à une ancienne carrière visible sur la photo aérienne IGN de 1978 (à droite) [Source : <https://remonterletemps.ign.fr/>]

Les dépressions considérées comme des dolines sont généralement déconnectées du réseau hydrographique.

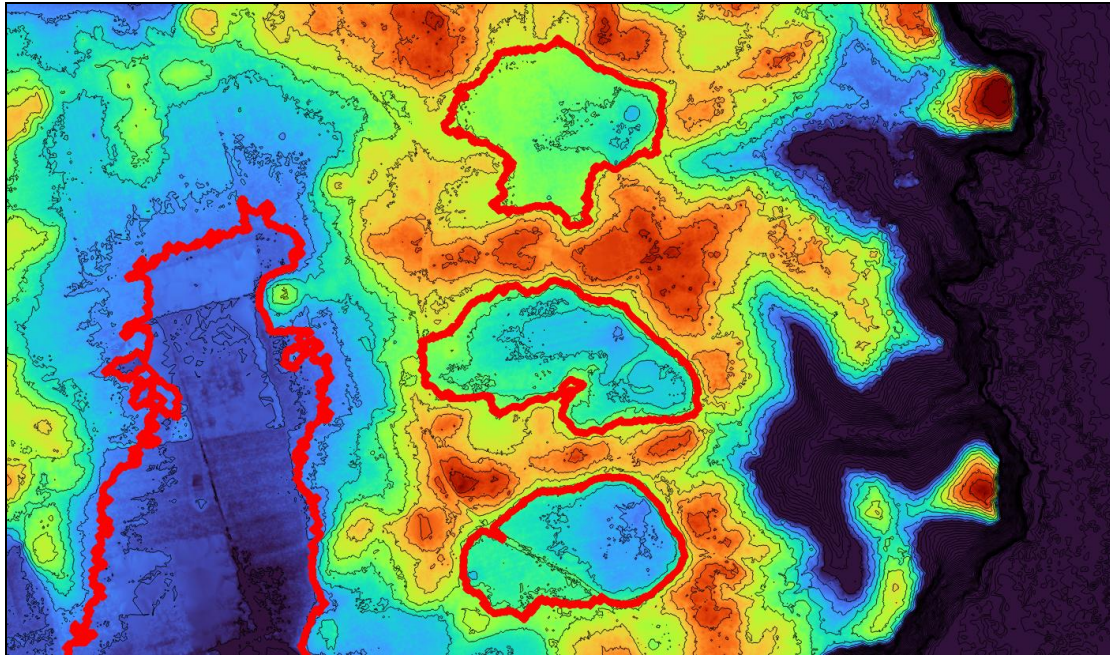


Figure 28 : Dépressions déconnectées du réseau hydrographique sur la commune de Petit-Canal [Source : Ginger CEBTP]

Finalisation de l'aléa Affaissements / Effondrements

Pour finir la cartographie des dépressions est convertie en aléa Affaissements / Effondrements ; chaque doline est affectée d'un niveau Faible – F1.

Enfin la cartographie est lissée.



Figure 29 : Extrait de l'aléa Affaissements / Effondrements finalisé sur la commune de Petit-Canal
[Source : Ginger CEBTP]

3.2.3.3 Aléa Éboulements / Chutes de blocs

La révision de la cartographie de l'aléa Eboulements / Chutes de blocs s'est effectuée selon une méthodologie élaborée par Ginger CEBTP et ajustée suite aux résultats préliminaires en concertation avec le Pôle Risques Naturels de la DEAL Guadeloupe.

La cartographie de l'aléa Eboulements / Chutes de blocs est basée sur la réalisation de modélisations trajectographiques 3D étendues à l'ensemble de la Guadeloupe. Elles sont effectuées à l'aide du logiciel Rockyfor3D® développé par Ecorisq (association Franco-Suisse : IRSTEA et l'EPFL).

Cette méthodologie comprend une série de routines de calculs sous le logiciel Q-GIS pour préparer les données d'entrée (rasters) de Rockyfor3D® et pour exploiter les résultats des modélisations trajectographiques. Afin d'automatiser certaines phases du traitement, des modèles (programmes utilisant les outils de Q-GIS) ont été créés par Ginger CEBTP.

L'ensemble de la méthodologie est décrit ci-après.

Préparation des données topographiques

Afin d'accélérer les simulations trajectographiques et d'obtenir un rendu compatible avec le PPR, le MNT 1 m issu du RGE ALTI® 1 m de l'IGN ainsi que toutes les données d'entrée du logiciel Rockyfor3D® ont été rééchantillonnés au pas de 5 m.

Extraction des zones sources

L'une des données d'entrée du logiciel Rockyfor3D® est constituée par un raster « rockdensity.asc » qui définit les zones sources (points de départ des blocs) et la densité de ces blocs.

Etant donnée la taille de la zone d'étude (totalité du territoire guadeloupéen), l'identification des zones

sources est faite de manière automatique par analyse des pentes.

Ainsi, conformément au guide MEZAP, toutes les pentes supérieures à 55° sont considérées comme des zones de départ. Cette valeur est issue des travaux de l'INRAE sur plusieurs sites d'étude en France, Suisse et Autriche. La formule suivante permet de caractériser la valeur seuil de pente au regard de la résolution du MNT utilisé :

$\alpha = 55 * RES - 0.075$ avec RES : résolution du MNT en mètre(s)

La densité affectée aux zones sources est de 2500 kg/m³. Il s'agit d'une valeur couramment utilisée pour ce type de modélisation. A noter d'une variation positive ou négative de 100 à 200 kg/m³ de cette valeur n'influe pas de manière notable sur le résultat final dans le cadre d'une étude type PPR (il n'en est évidemment pas de même pour des études de dimensionnement d'ouvrages de protection).

Une analyse rapide des photographies aériennes permet de constater la bonne représentativité de ces zones sources.

Préparation des autres données d'entrée du logiciel Rockyfor3D®

En plus du MNT et des zones sources, le logiciel Rockyfor3D® nécessite plusieurs autres rasters caractérisant :

- Le type de sol : roche, éboulis, pré, asphalte, ... ;
- La rugosité du sol : taille des éléments « dépassant » du sol répartis selon des proportions surfacique de 70 %, 20 % et 10 %.

Etant donnée la taille de la zone d'étude, l'identification des types de sol et des rugosités du sol est faite de manière automatique par analyse du MNT rééchantillonné au pas de 5 m.

Modélisation trajectographique sous le logiciel Rockyfor3D®

Principe

Rockyfor3D est un logiciel de trajectographie permettant de modéliser en 3D les déplacements de blocs rocheux sur un versant à l'aide d'algorithmes simulant les trajectoires en vol parabolique, les rebonds des éléments et les impacts sur les arbres le cas échéant.

C'est un modèle probabiliste de trajectographie de type process-based.

En chaque point de départ identifié, un nombre variable de blocs (paramètre défini par l'utilisateur) va être lancé. Comme indiqué ci-dessus, chaque trajectoire simulée est une combinaison de phases aériennes et de rebonds (voir d'impact sur des arbres si cette option est sélectionnée). La vitesse et la trajectoire du bloc en sortie d'un rebond dépend des paramètres du sol (élasticité, rugosité, orientation, pente) et des paramètres propres au bloc (volume, forme, masse volumique). La simulation d'une trajectoire s'arrête lorsque la vitesse du bloc est nulle, une nouvelle simulation est alors lancée.

La modélisation s'arrête lorsque l'ensemble des lancés sur l'ensemble des points de départs identifiés est effectué.

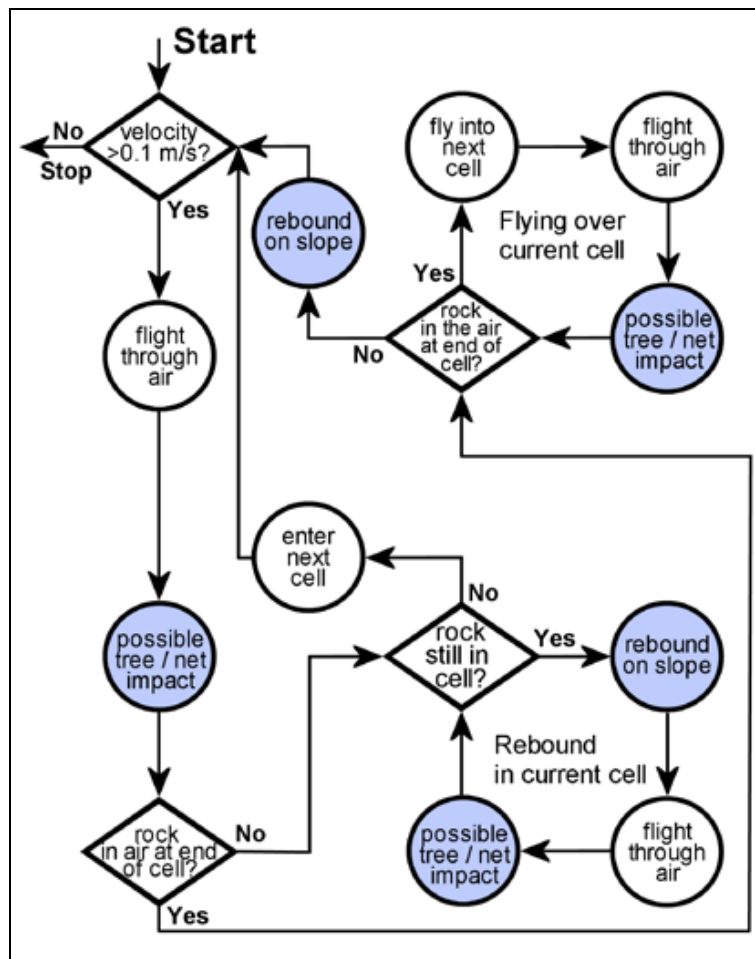


Figure 30 : Organigramme de Rockyfor3D. Les cercles colorés en bleu indiquent les étapes du modèle où des changements de direction sont susceptibles de se produire dans la chute du bloc simulé. [Source : Ecorisq]

Paramètres de modélisation trajectographique 3D

Au regard de la nature, de la stratification et de la fracturation des escarpements de la zone d'étude, les modélisations ont été effectuées avec des blocs d'un volume de référence de 2 m³.

Sur chaque pixel (5 x 5 m) identifié comme zone de départ 1000 blocs ont été lancés. La modélisation étant effectuée en conditions statiques, chaque lancé est effectué sans vitesse initiale.

L'analyse a été effectuée sans tenir compte de la forêt et du bâti comme il est d'usage dans les PPR (la forêt par exemple n'étant pas considérée comme pérenne).

La modélisation aboutit au calcul d'une dizaine de variables en chaque point du MNT (sous la forme de rasters) dont notamment le nombre de passages qui met en évidence les trajectoires préférentielles des blocs.

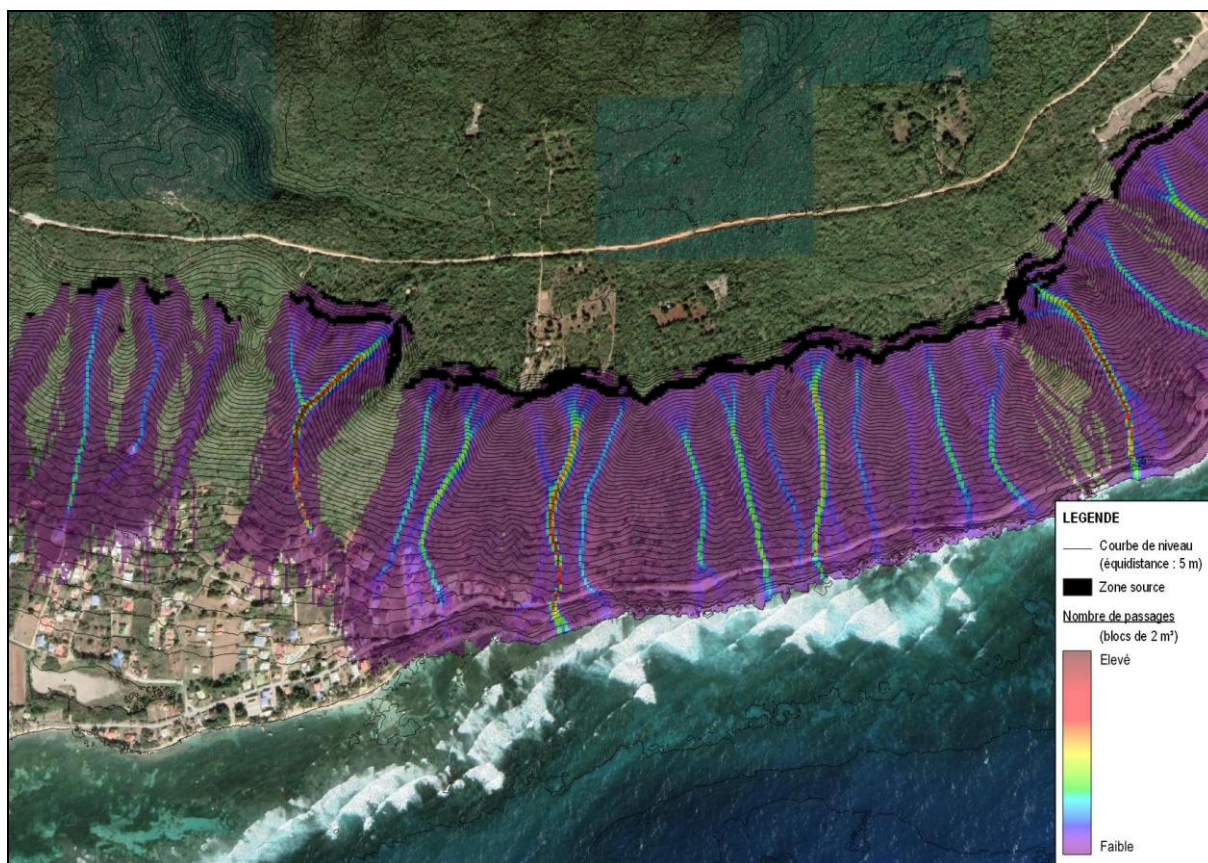


Figure 31 : Extrait des résultats de la modélisation trajectographique 3D (nombre de passages) sur La Désirade [Source : Ginger CEBTP]

Traitement des résultats de la modélisation trajectographique 3D

Comme expliqué précédemment, en chaque point du versant ont été calculées :

- L'énergie en kJ, correspondant au 95ième percentile ce qui permet d'éliminer les valeurs extrêmes du modèle, répartie selon les classes suivantes :
 - Faible : inférieur à 30 kJ ;
 - Moyenne : entre 30 et 300 kJ ;
 - Forte : supérieure à 300 kJ.
- Et la probabilité d'atteinte, correspondant au nombre de blocs traversant le pixel sur le nombre de trajectoires calculées, répartie selon les classes suivantes :
 - Négligeable : inférieure à 0,1 % (soit moins de 1 bloc pour 1000), ce qui correspond aux valeurs extrêmes du modèle ;
 - Faible : entre 0,1 et 0,2 % (soit entre 1 et 2 blocs pour 1000) ;
 - Moyenne : entre 0,2 et 0,5 % (soit entre 2 et 5 blocs pour 1000) ;
 - Forte : supérieure à 0,5 % (soit plus de 5 blocs pour 1000).

Les classes d'énergie et de probabilité d'atteinte ont été définies au regard des méthodologies employées dans les études de risques rocheux, notamment par le RTM.

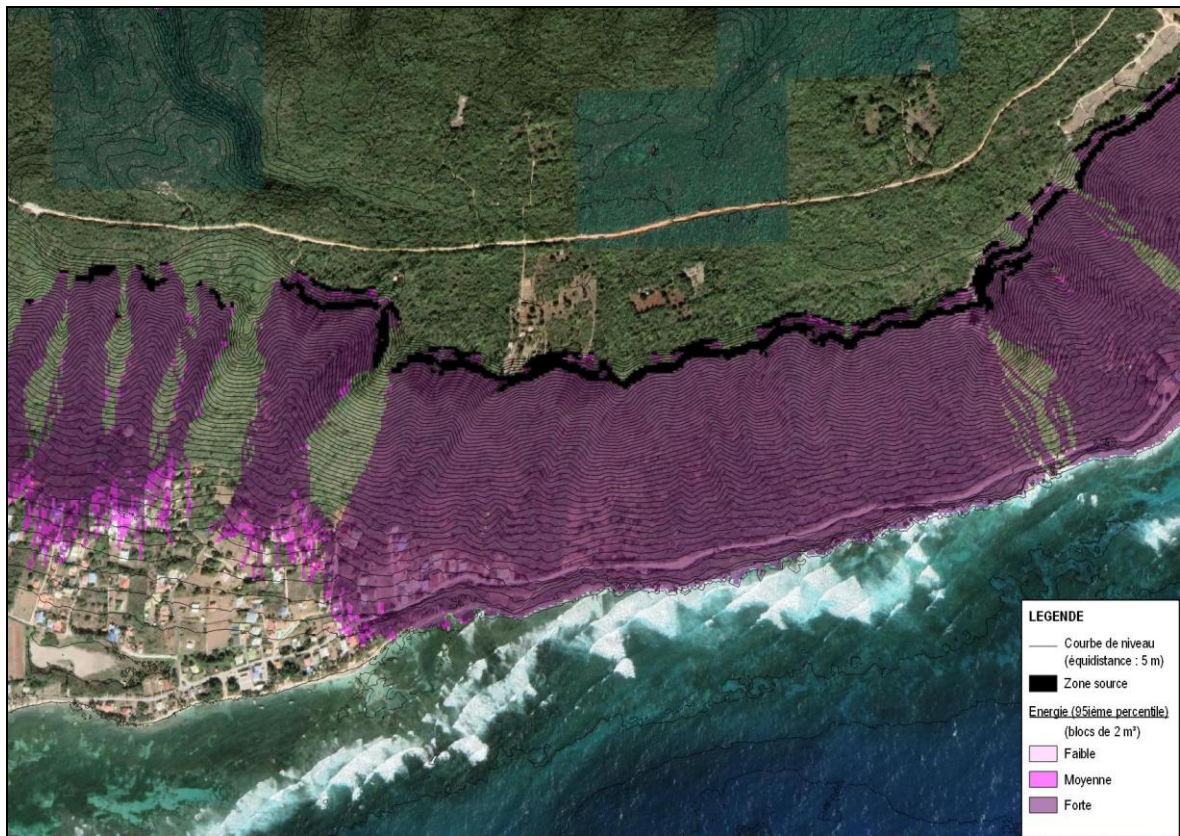


Figure 32 : Extrait des résultats de la modélisation trajectographique 3D (énergie au 95ième percentile) sur La Désirade [Source : Ginger CEBTP]

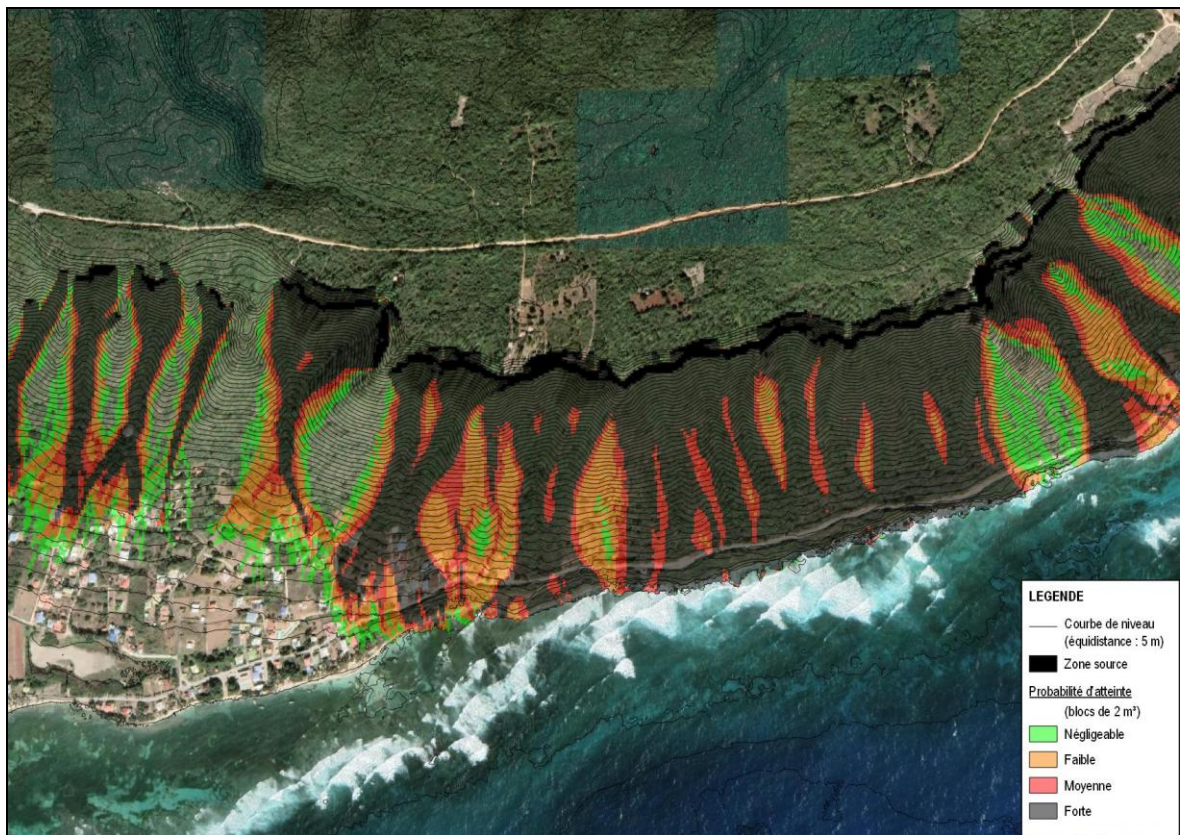


Figure 33 : Extrait des résultats de la modélisation trajectographique 3D (probabilité d'atteinte) sur La Désirade [Source : Ginger CEBTP]

L'aléa Eboulements / Chutes de blocs brut est ensuite obtenu par croisement entre l'énergie et la probabilité d'atteinte selon le tableau ci-après. Ce croisement est qualifié de brut.

Ces niveaux sont cohérents avec les préconisations du guide MEZAP.

PROBABILITE D'ATTEINTE	ENERGIE		
	FORTE (E > 300 kJ)	MOYENNE (30 kJ < E < 300 kJ)	FAIBLE (E < 30 kJ)
FORTE (> 0,5 %)	FORT P3	FORT P3	MOYEN P2
MOYENNE (ENTRE 0,2 ET 0,5 %)	FORT P3	MOYEN P2	MOYEN P2
FAIBLE (ENTRE 0,1 ET 0,2 %)	FORT P3	MOYEN P2	FAIBLE P1
NEGLIGEABLE (< 0,1 %)	FAIBLE P1	FAIBLE P1	NEGLIGEABLE



Figure 34 : Extrait de l'aléa Eboulements / Chutes de blocs brut issu du croisement entre l'énergie et la probabilité d'atteinte sur La Désirade [Source : Ginger CEBTP]

3.2.3.4 Aléa Glissements de terrain

La révision de la cartographie de l'aléa Glissements de terrain s'est effectuée selon une méthodologie élaborée par Ginger CEBTP et ajustée suite aux résultats préliminaires en concertation avec le Pôle Risques Naturels de la DEAL Guadeloupe.

La cartographie de l'aléa Glissements de terrain est basée sur l'exploitation des données topographiques du RGE ALTI® 1 m en appliquant une qualification des niveaux d'aléa en fonction de la pente.

Cette méthodologie comprend une série de routines de calculs sous le logiciel Q-GIS. Afin d'automatiser certaines phases du traitement, des modèles (programmes utilisant les outils de Q-GIS) ont été créés par Ginger CEBTP. L'ensemble de la méthodologie est décrit ci-après.

Préparation des données topographiques et qualification de l'aléa Glissements de terrain brut

Afin d'accélérer les traitements cartographiques et d'obtenir un rendu compatible avec le PPR, le MNT 1 m issu du RGE ALTI® 1 m de l'IGN a été rééchantillonné au pas de 10 m. Le niveau d'aléa Glissements de terrain brut est ensuite qualifié en fonction de la pente selon les seuils définis par la DEAL de Guadeloupe.

PENTE	NIVEAU D'ALEA BRUT
Inférieure à 15°	NUL
Entre 15 et 20°	FAIBLE G1
Entre 20 et 30°	MOYEN G2
Supérieure à 30°	FORT G3

Qualification de l'aléa Glissements de terrain brut [Source : Ginger CEBTP]

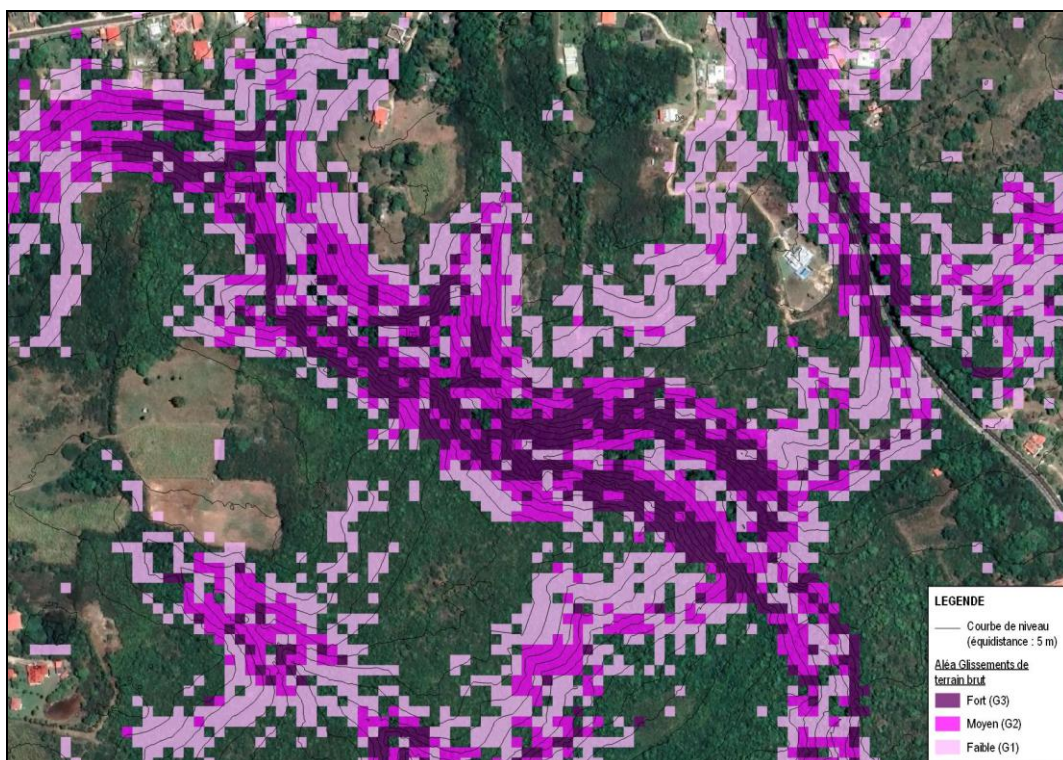


Figure 35 : Extrait de l'aléa Glissements de terrain brut sur Marie-Galante [Source : Ginger CEBTP]

Nettoyage et lissage de l'aléa Glissements de terrain brut

Dans un premier temps, la cartographie de l'aléa Glissements de terrain brut est d'abord nettoyée (suppression des polygones et comblement des trous de faible superficie) puis les différents niveaux d'aléas sont extraits et lissés.

Dans un second temps, un tampon de taille croissante est ensuite appliqué à chaque niveau d'aléa. Ces tampons permettent de garantir l'imbrication des niveaux d'aléa.



Figure 36 : Extraits des aléas Glissements de terrain Fort (à gauche), Moyen (au centre) et Faible (à droite) nettoyés, lissés et avec tampons sur Marie-Galante [Source : Ginger CEBTP]

Finalisation de l'aléa Glissements de terrain

Les 3 niveaux d'aléa sont superposés et regroupés, l'aléa le plus fort primant sur le plus faible.

Enfin la cartographie de l'aléa Glissements de terrain est de nouveau nettoyée.

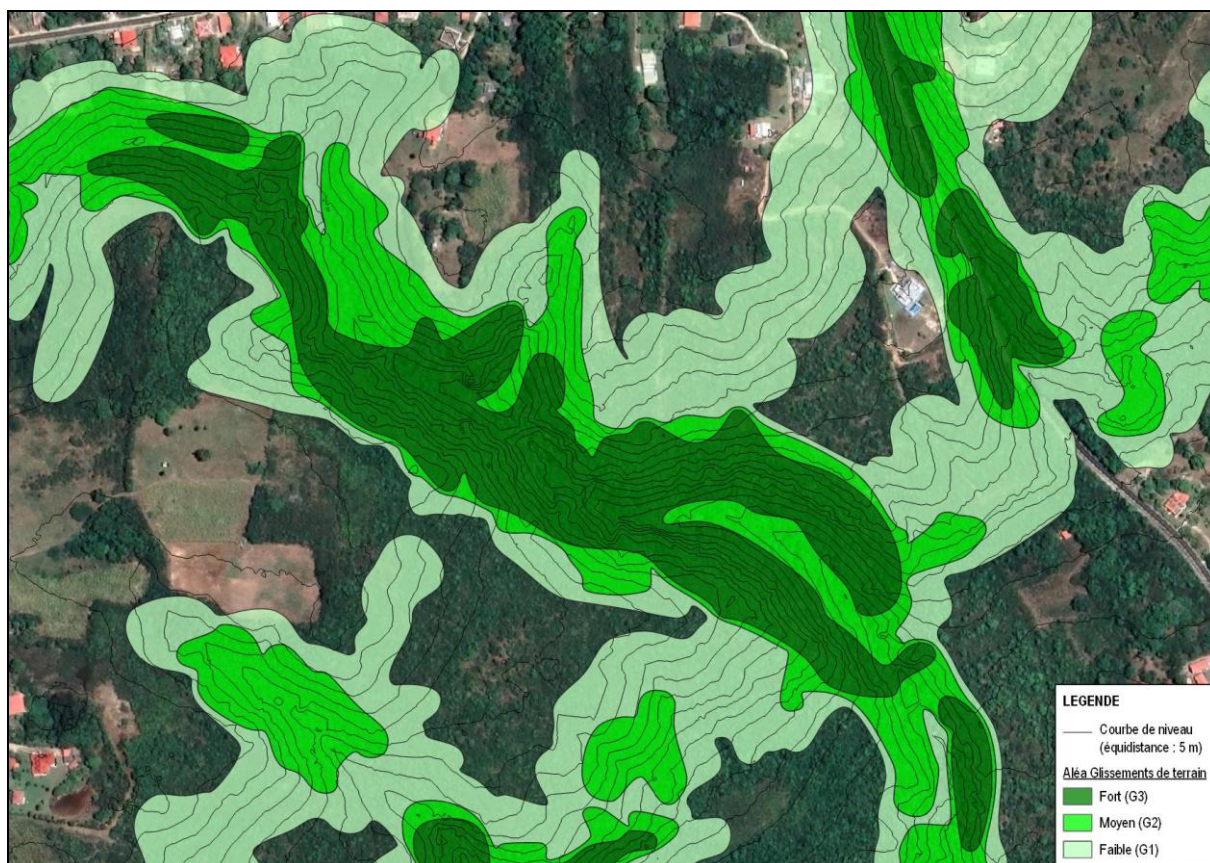


Figure 37 : Extrait de l'aléa Glissements de terrain finalisé sur Marie-Galante [Source : Ginger CEBTP]

3.2.3.5 Aléa Recul de Falaise

La révision de la cartographie de l'aléa Recul de Falaise s'est effectuée selon une méthodologie élaborée par Ginger CEBTP et ajustée suite aux résultats préliminaires en concertation avec le Pôle Risques Naturels de la DEAL Guadeloupe.

La cartographie de l'aléa Recul de Falaise est basée sur l'exploitation des données topographiques du RGE ALTI® 1 m en appliquant d'une part une méthodologie « simplifiée » pour la qualification des niveaux d'aléa en fonction de la pente et d'autre part d'une méthodologie « poussée » de qualification de l'aléa sur les zones à enjeux forts de Grande-Terre, faisant appel à une analyse du recul potentiel de la falaise.



Figure 38 : Zones de falaises concernées par un aléa Recul de Falaise [Source : Ginger CEBTP]

Cette méthodologie comprend une série de routines de calculs sous le logiciel Q-GIS. Afin d’automatiser certaines phases du traitement, des modèles (programmes utilisant les outils de Q-GIS) ont été créés par Ginger CEBTP.

L’ensemble de la méthodologie est décrit ci-après

Méthodologie « simplifiée »

L’aléa Recul de Falaise est d’abord qualifié en fonction de la pente du MNT 1 m issu du RGE ALTI® 1 m de l’IGN, selon les seuils définis par la DEAL de Guadeloupe.

PENTE	ALEA
Inférieure à 15°	NUL
Entre 15 et 25°	FAIBLE RF1
Entre 25 et 35°	MOYEN RF2
Supérieure à 35°	FORT RF3

La saisie de chaque niveau d'aléa Recul de Falaise est effectuée manuellement par analyse de la cartographie des pentes reclassées et des photographies aériennes. Une différenciation est faite entre les petites falaises de quelques mètres de hauteur et les grandes falaises de plusieurs dizaines de mètres.

Au niveau des falaises abruptes, cette cartographie une marge de recul est appliquée en prenant en compte la morphologie du trait de côte présentant une configuration similaire : hauteur, nature des terrains, présence de sous-cavage, ...



Figure 39 : Exemple d'estimation du recul potentiel des falaises au regard de la morphologie du trait de côte sur Grande-Terre (à gauche) et de prise en compte du sous-cavage au niveau de Gueule Grand Gouffre à Marie-Galante (à droite) [Source : Ginger CEBTP]

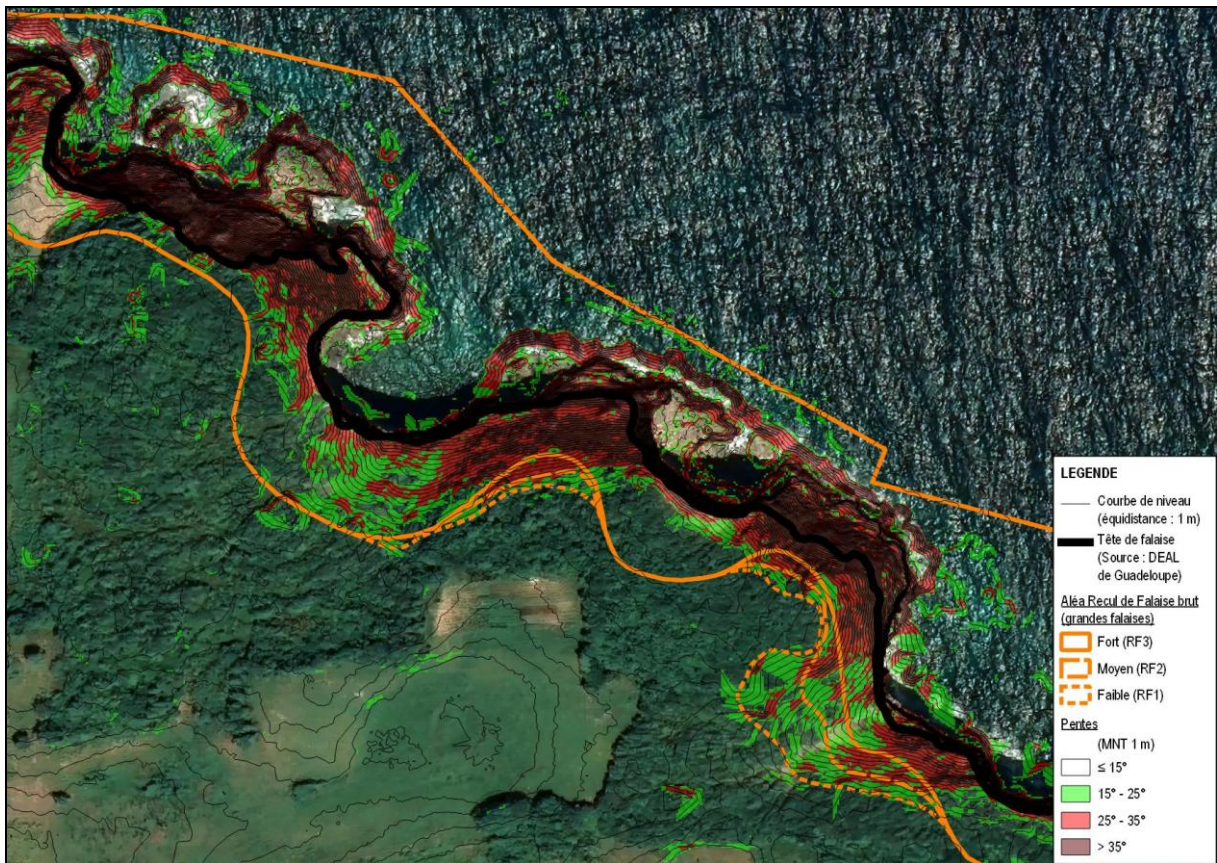


Figure 40 : Extrait de la saisie manuelle de l'aléa Recul de Falaise brut (grandes falaises) sur Marie-Galante [Source : Ginger CEBTP]

Afin d'intégrer le recul potentiel de la falaise dans le temps et de garantir l'imbrication des niveaux d'aléa, un tampon de taille croissante est ensuite appliqué à chaque niveau d'aléa pour chaque type de falaise. Un lissage est ensuite appliqué à chacun d'eux.

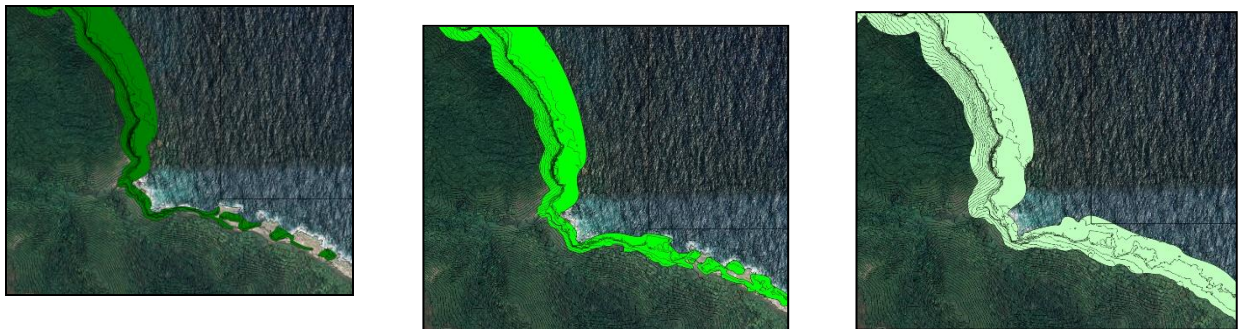


Figure 41 : Extraits des aléas Recul de Falaise Fort assemblés (à gauche), Moyen (au centre) et Faible (à droite) avec tampons et lissée sur Marie-Galante [Source : Ginger CEBTP]

Les 3 niveaux d'aléa sont superposés et regroupés, l'aléa le plus fort primant sur le plus faible.



Figure 42 : Extrait de l'aléa Recul de Falaise finalisé (méthodologie « simplifiée ») sur Marie-Galante [Source : Ginger CEBTP]

Les zones d'aléas en dehors du littoral (issues du traitement numérique de la saisie manuelle) sont ensuite supprimées.

Méthodologie « poussée »

Sur les zones à enjeux forts de Grande-Terre, la cartographie de l'aléa Recul de Falaise a été réalisée à l'aide d'une méthodologie plus « poussée ».

Cette méthodologie, en cours d'élaboration par un groupe d'experts national piloté par le BRGM, comprend plusieurs étapes :

- La définition d'un scénario de référence sur la période de référence du PPR (100 ans) ;
- La qualification de cet événement de référence en termes d'intensité (de limitée à très élevée) en fonction de son ampleur, c'est-à-dire le recul de la tête d'escarpement en mètres, cette distance est nommée Recul Unitaire (Rinst) ;
- L'évaluation de la probabilité de recul (activité) correspondant à une succession de reculs de la tête de falaise (de valeur Rinst) vers l'amont ; une série de reculs doivent se produire le long de la tête de falaise avant que le nouvel escarpement créé ne puisse être soumis au recul ;
- Le croisement de l'intensité et de l'activité.

La recherche bibliographique et historique n'a pas permis de recueillir des données précises concernant des événements survenus sur les zones à enjeux forts (littoral de Gosier et de St-Anne).

Des photographies aériennes anciennes de l'IGN, datée de 1963 et 1968 et recouvrant ce secteur, ont été

téléchargées depuis le site <https://remonterletemps.ign.fr/>. Elles ont été géoréférencées et comparées avec le trait de côte actuel.

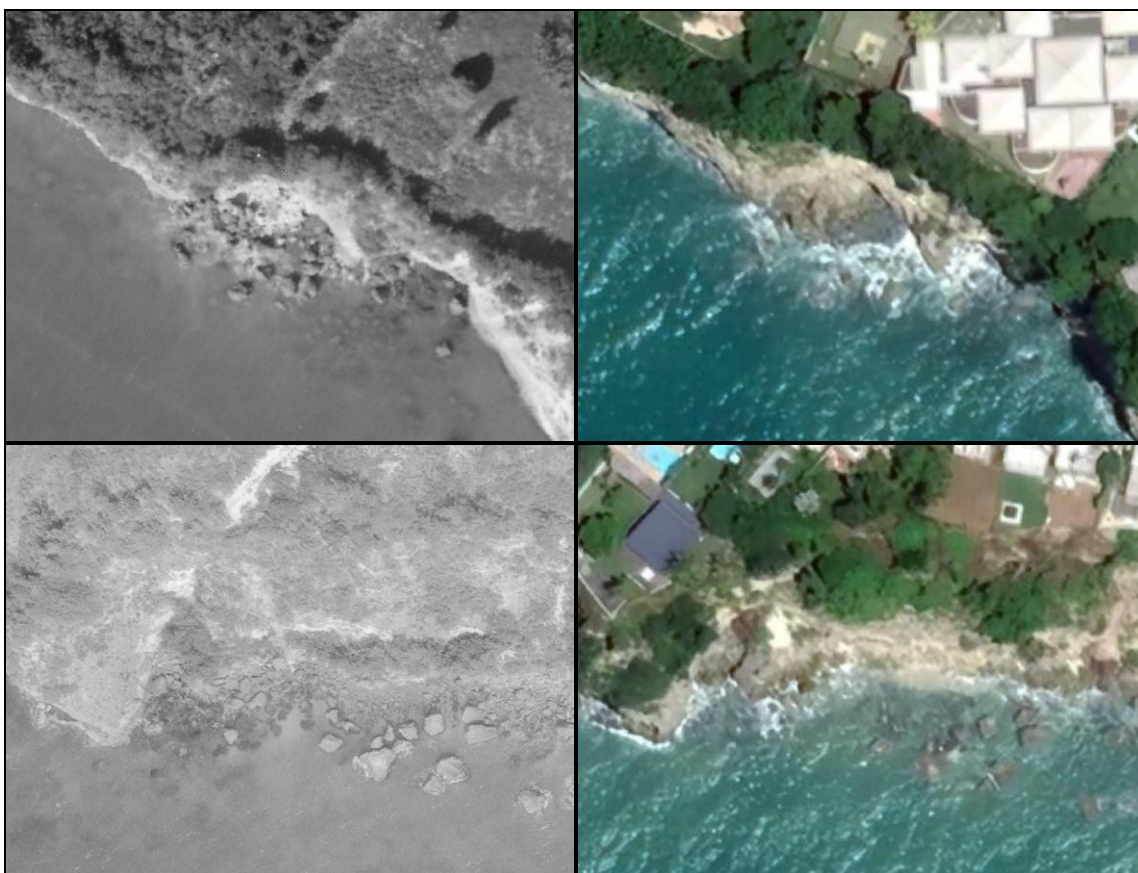


Figure 43 : Comparaison du littoral de Gosier entre les photos aériennes IGN de 1963 (en haut, à gauche), 1968 (en bas, à gauche) [Source : <https://remonterletemps.ign.fr/>] et les images satellite de 2022 (à droite) [Source : Google Earth]

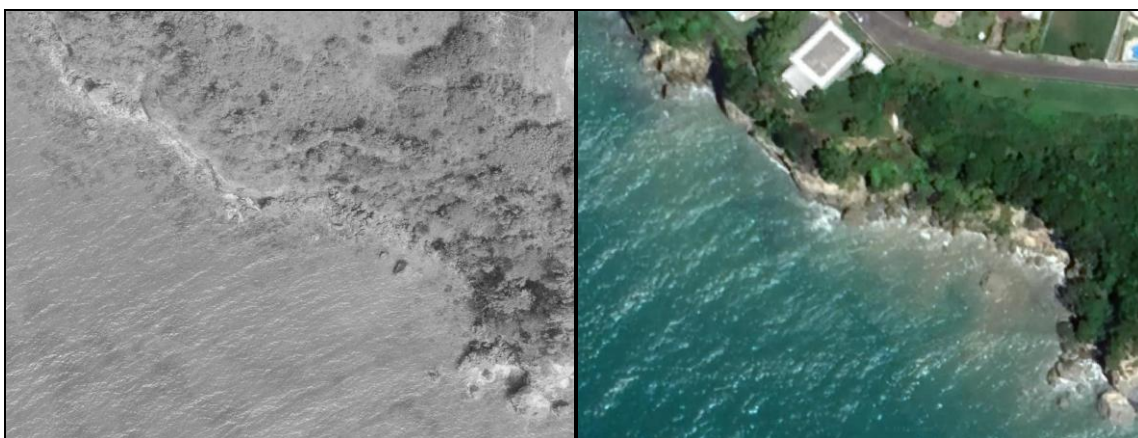


Figure 44 : Comparaison du littoral de Gosier entre les photos aériennes IGN de 1968 (à gauche) [Source : <https://remonterletemps.ign.fr/>] et les images satellite de 2022 (à droite) [Source : Google Earth]

L'analyse du trait de côte met en évidence par endroits un recul de l'ordre de quelques mètres sur une période d'environ 40 ans.

Cette mesure étant peu représentative au regard de la qualification de l'aléa Recul de Falaise sur ces zones à enjeux forts, la cartographie a été effectuée en prenant en compte un recul potentiel correspondant à une stabilisation à long terme du littoral.

Ainsi la largeur de la bande d'aléa Fort bordant les falaises côtières sera égale à la hauteur de ces falaises, ce qui représente un angle de stabilité de 45°.

Des bandes d'aléa Moyen et Faible sont ensuite cartographiées en amont de l'aléa Fort avec des largeurs dépendant de celle de l'aléa Fort et intégrant le cas échéant la pente comme dans la méthodologie « simplifiée ».

L'ensemble de la cartographie est effectué manuellement ; l'imbrication des aléas est donc systématique. Un lissage est ensuite réalisé.

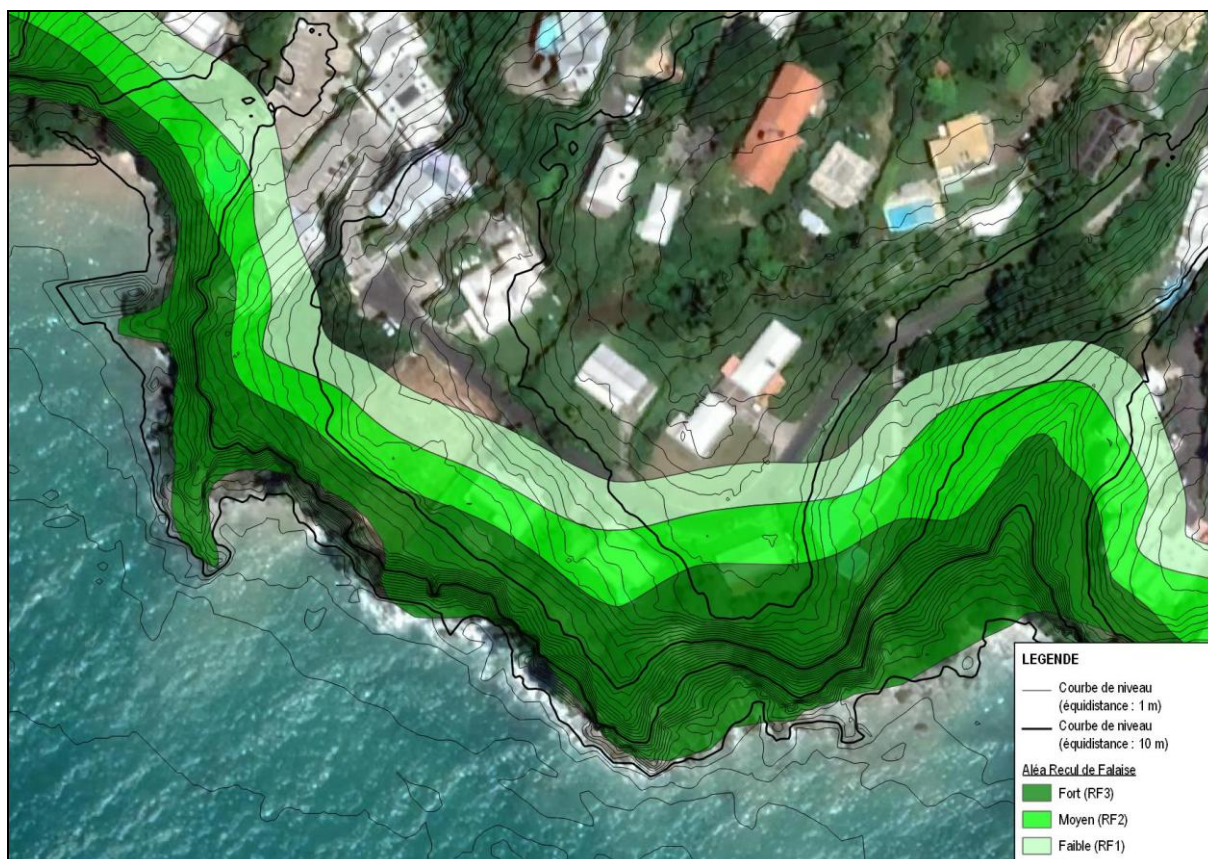


Figure 45 : Extrait de l'aléa Recul de Falaise sur une zone à enjeux forts à Gosier sur Grande-Terre
[Source : Ginger CEBTP]

Cela permet de constater notamment l'augmentation de la largeur de la bande d'aléa Fort en fonction de la hauteur des falaises côtières.

Finalisation de l'aléa recul de Falaise

Les cartographies de l'aléa Recul de Falaise issues des méthodologies « simplifiée » et « poussée » sont finalement regroupées au sein d'une même cartographie.

3.2.3.6 Finalisation de l'aléa Mouvements de terrain

Dans un premier temps, les cartographies des aléas Affaissements / Effondrements, Eboulements / Chutes de blocs, Glissements de terrain et Recul de Falaise sont croisées (superposées) et les niveaux d'aléas fusionnés pour aboutir à la cartographie de l'aléa Mouvements de terrain.

Dans un second temps, la cartographie est nettoyée manuellement pour :

- Supprimer les zones d'aléa de faible superficie ou très fines ;
- Éliminer les zones d'aléa englobées dans des zones d'aléas plus élevés, notamment dans les secteurs naturels afin de faciliter l'exploitation de la cartographie ;
- Éliminer des zones d'aléa aberrantes, tels que celles d'aléa Recul de Falaise Faible (RF1) situées en pied de falaise dans la bande de battement des marées (pente faible) ;
- ...

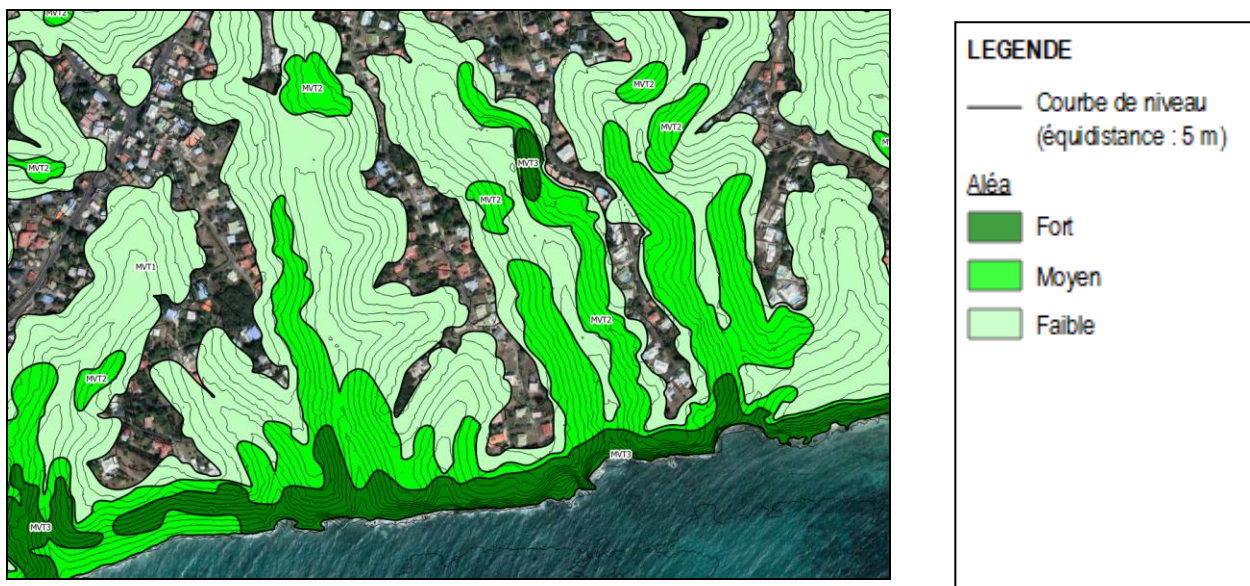


Figure 46 : Extrait de l'aléa Mouvements de terrain finalisé sur la commune du Gosier [Source : Ginger CEBTP]

3.2.4 Aléa submersion marine

En accord avec les directives du MEDDE (2014), la caractérisation et la cartographie de la submersion marine a été établie avec deux scénarios spécifiques :

- « Actuel » qui intègre une surcote de 20 cm rajouté au large pour une première prise en compte de l'élévation du niveau de la mer liée au changement climatique ainsi qu'une marge liée à l'incertitude de la méthode estimée à 15 cm ;
- « Horizon 100 ans » qui intègre une surcote de 60 cm rajouté au large pour la prise en compte de l'élévation du niveau de la mer liée au changement climatique ainsi qu'une marge liée à l'incertitude de la méthode estimée à 15 cm.

3.2.4.1 Données disponibles

3.2.4.1.1 Données Historique et théorique utiliser pour déterminer l'événement de référence

Dans le cadre du projet INTERREG CARIBCOAST, le BRGM a développé une approche qui utilise la base de données STORM (Bloemendaal, et al. 2020) de caractéristiques de cyclones synthétiques (trajectoire, intensité des vents, pression atmosphérique au niveau de l'oeil, rayon des vents max). C'est un jeu de données comprenant 10 tirages de 1 000 ans de cyclones représentatifs du climat actuel pour les différents bassins cycloniques (dont le bassin des Caraïbes). Il a été validé avec l'archive de données historiques globales IBTrACS (Knapp, et al. 2010) Comprenant pour les caraïbes HURDAT. La fréquence des cyclones, qui le composent, relative à chaque catégorie (de tempête tropicale à catégorie 5) montre un meilleur accord par rapport à IBTrACS que les autres bases de données existantes (e.g. MIT ou CHAZ) (Meiler, et al. 2022). Parmi tous les scénarios disponibles, environ 700 trajectoires (allant de tempête tropicales à des cyclones de catégorie 5) ont été sélectionnées par rapport à leur passage à proximité de l'île de la Guadeloupe.

3.2.4.1.2 Données topographique et bathymétriques

Les données topographiques et bathymétriques ont été recueillies et rassemblées pour constituer un Modèle Numérique de Terrain (MNT).

Trois principaux jeux de données ont été utilisés :

- Les données topo-bathymétriques à résolution de 1 m du programme Litto3D (SHOM, 2016)
- La bathymétrie SHOM a une résolution de 100M du programme HOMONIM (SHOM, 2015)
- Les sondes bathymétriques HISTOLITT du SHOM dans certains secteurs afin de combler les lacunes du modèle Litto3D. Ces sondes sont utilisées, après recalage altimétrique, dans les zones litto3D identifiées présentant un code qualité égal à 69 qui indique, selon les spécifications techniques (version 1.5) du Litto3D®.

Les bâtiments ainsi que la végétation ne sont pas représentés dans ces données.

3.2.4.1.3 Données d'occupation du sol

La prise en compte de l'occupation du sol dans le modèle conditionne les frottements que vont subir les écoulements durant l'inondation.

Les données utilisées dans le cadre de cette étude sont issues du référentiel d'occupation des sols à grande échelle de la Guadeloupe, KaruCover (Karugéo, KaruCover 2017 - Occupation du sol à grande échelle en 2 dimensions en Guadeloupe 2017). Il s'agit d'une base de données vectorielle à l'échelle du mètre permettant la description de l'occupation du sol selon : le type de « Couvert » qui donne lieu à une décomposition en 24 classes ; ou le type d'« Usage » qui se décompose en 53 classes.

Pour le besoin de la modélisation, il a été décidé de se limiter à l'usage du type « Couvert ».

Les données d'occupation du sol sont traduites en coefficients de frottements dans les maillages de calculs. En d'autres termes, chaque maille du modèle a une valeur de frottement qui lui est propre et qui correspond directement au type de couverture de sol.

3.2.4.1.4 Données sur le bâti

L'empreinte des bâtiments au sol influence les écoulements et doit donc être prise en compte. Cependant, à moins d'un besoin de représentation à très haute résolution (maillage métrique), les bâtiments sont rarement représentés dans les modèles et leur influence est prise en compte de manière indirecte par un

renforcement des frottements.

Dans le cadre de cette étude, c'est cette solution qui a été retenue et mise en œuvre en utilisant les données d'occupation du sol présentées au paragraphe précédent.

3.2.4.1.5 Connexions hydrauliques

Les ouvrages hydrauliques qui permettent le drainage ou l'évacuation des eaux peuvent avoir un impact considérable sur le phénomène de submersion marine. Ils sont donc pris en compte pour la caractérisation de l'aléa. Il s'agit principalement dans le cadre de cette étude d'ouvrages de franchissement routiers tel que des ponts cadre ou des buses. Il convient de rappeler que les réseaux d'évacuation d'eaux pluviales dans les zones urbaines n'ont pas été considérés dans cette étude.

Les connexions hydrauliques ont été identifiées sur le terrain et à partir des informations mises à dispositions par les collectivités à travers le schéma directeur et de gestion des eaux pluviales de la ville de Baie Mahault (SCE 2017), le Schéma de Prévention des Risques d'Inondation du Programme d'Actions de Prévention des Inondations (PAPI) des bassins versants des Grands Fonds (SAFEGE 2018) et le Schéma Directeur et de Gestion des Eaux Pluviales de Cap Excellence (Cap-Excellence 2019).

3.2.4.1.6 Autres éléments structurants

Les éléments structurants de la topographie ont également été intégrés au maillage du modèle par des lignes de contraintes associées au réseau hydrographique et routier à partir des données issues de la BD TOPO 2015 (IGN). Ce choix permet de garantir le positionnement de nœuds du maillage de calcul sur les points haut/bas et ainsi garantir l'incidence de ces structures dans les écoulements simulés par le modèle. Certaines structures constituent un frein voire un blocage à l'écoulement (notamment le bâti) et d'autres peuvent constituer des vecteurs à l'écoulement comme les routes, canaux, surfaces terrestres planes et à nue

3.2.4.2 Évaluation de l'aléa submersion marine

Pour caractériser l'aléa submersion marine, le guide méthodologique (MEDDE, mai 2014) prévoit la réalisation de plusieurs scénarios de référence basés sur des hypothèses combinant :

- La prise en compte des structures de protection côtière : ruine généralisée ou défaillances ponctuelles ;
- Événements naturels de référence (actuel et 2100).

A noter qu'il n'a pas été identifié d'ouvrage de protection contre la submersion marine sur le territoire étudié (selon la définition du MEDDE 2014). Il ne sera donc pas nécessaire de traiter des hypothèses de ruine ou de défaillance sur les ouvrages pour la simulation de la submersion marine.

Par contre, plusieurs routes, murs ou cordons ayant un impact potentiel sur les écoulements ont été identifiés et une attention particulière a été portée à leur bonne représentation dans le MNT/grille du modèle (voir chapitre 5). C'est également le cas des connexions hydrauliques (buses, ponts, etc.), comme il n'existe pas de connexion anti-submersion (type clapet), l'ensemble des connexions hydrauliques fonctionne dans les deux sens (amont-aval).

Les scénarios de références correspondent donc dans cette étude aux événements naturels de référence, c'est-à-dire sans modification de la configuration topographique du terrain naturel.

3.2.4.2.1 Évènement naturel de référence

D'après le guide PPRL (MEDDE, 2014), « L'évènement naturel de référence est l'évènement historique majeur s'il est supérieur à un évènement de période de retour 100 ans. Par défaut c'est l'évènement théorique de période de retour 100 ans. Il est caractérisé par deux paramètres au minimum, le niveau d'eau et la hauteur significative des vagues ». En ce qui concerne la Guadeloupe, il faudra également considérer le vent car ce sont les cyclones caractérisés par des vents violents qui sont à l'origine des submersions marines les plus importantes.

Par conséquent, la détermination de l'évènement naturel de référence nécessite de considérer les évènements historiques majeurs qui ont frappé la Guadeloupe (notamment les cyclones Hugo et Ouragan 1928) et de les comparer à des évènements de période de retour 100 ans, en analysant la concomitance entre les paramètres de niveau d'eau, des caractéristiques des vagues et de vent au large du site d'intérêt.

Le calcul de la période de retour des évènements nécessite de traiter plusieurs centaines de scénarios couvrant un intervalle de temps plus long que celui dont on veut estimer le retour. Cette exigence ne peut être satisfaite par le nombre d'observations historiques dûment documentées dans les bases de données (comme HURDAT pour la Caraïbe). En premier lieu car leur nombre est faible, et deuxièmement car ils couvrent une période temporelle inférieure au siècle, ce qui est limitant pour les analyses statistiques.

C'est pourquoi, dans le cadre de cette étude, les valeurs conjointes de période de retour centennale des paramètres de niveau d'eau, de vague et de vent ont été calculé à partir d'une base de données (BDD) répondant à ces 2 exigences (grand nombre de données et période temporelle suffisamment longue).

Ensuite ces valeurs ont été comparées site par site aux des données historiques colocalisées afin de déterminer l'évènement naturel de référence.

3.2.4.2.2 Modélisation de la submersion marine

Stratégie de modélisation

Une plate-forme de modélisation reposant sur 3 codes numériques de vagues et de niveaux d'eau (WW3, UHAINA et SWASH) a été mise en place à différentes résolutions spatiales afin de représenter la propagation de l'évènement naturel de référence depuis le large jusqu'à terre et simuler ainsi la dynamique de la submersion marine par débordement sur l'ensemble du domaine de calcul et localement par franchissement de paquets de mer. Les étapes principales sont :

1- WW3 propagation des vagues

WW3 est forcé à partir des séries temporelles instationnaires issues des cas historiques ou bien des évènements synthétiques (choisis à partir de l'analyse de probabilités conjointes centennale). Ils sont appliqués : a) de façon homogène sur sa frontière de marine concernant les spectres directionnels des vagues et les niveaux d'eau (marée + surcote) ; b) sur l'ensemble du domaine en ce qui concerne le vent (intensité et direction).

2 - Séries temporelles de niveaux eau haute fréquence

La construction de ces séries implique plusieurs sous-étape :

- **2A** : les caractéristiques des vagues (H_s , T_p , D_p) calculées par WW3 (pas de 30 minutes) sont extraites à l'extrémité de chacun des profils. Comme les directions de propagation des vagues (D_p) ont une incidence par rapport aux profils, une correction de la réfraction est appliquée de façon à diminuer celle-ci et obtenir des vagues dont les D_p sont alignées avec les profils. Cela a pour effet de diminuer les hauteurs significatives des vagues (H_s)
- **2B** : des spectres fréquentiels de vagues (de type Jonswap) sont ensuite calculés grâce aux H_s corrigés et aux T_p (période pic des vagues) à partir desquels des séries temporelles de vagues sont générées à une fréquence de 2 Hz. Ces opérations sont effectuées par pas de 30min pour toute la durée de l'évènement (peut atteindre plusieurs jours) grâce à la boîte à outils WAFO
- **2C** : enfin, les séries temporelles de vagues sont additionnées aux niveaux d'eau rééchantillonnés à 2 Hz pour obtenir une série temporelle de niveaux d'eau haute fréquence (combinant les effets des vagues, de la marée et des surcotes) sur l'ensemble de l'évènement considéré.

3A et B - Calcul des débits franchissant et de la submersion avec SWASH

Les séries temporelles des niveaux haute fréquence sont injectées dans SWASH qui est configuré en mode non-hydrostatique capable de propager chacune des vagues, de tenir compte des interactions entre elles et de simuler la submersion (hauteur, vitesses, débits, etc.). Les calculs sont faits avec un pas de temps de 0.05 s. En sortie de SWASH sont stockées :

- **Les vitesses des courants et les niveaux d'eau** pour l'ensemble du profil : résolution spatiale de 1m et toutes les 10 s
- **Les débits pour les profils rouges** : ils sont extraits à l'extrémité 'terre' des profils à un pas de temps de 1s.

Ces sorties sont ensuite post-traitées de façon à calculer les débits franchissant représentatifs de chacun des segments correspondant aux profils rouges et à cartographier la submersion pour chacun des profils (calcul d'un fichier de points shape/par profil contenant pour chacun des points d'altitude > 0 m, les maximums des vitesses, des niveaux et des hauteurs d'eau e l'aléa).

4 – UHAINA Calcul de la submersion

UHAINA est forcé :

- A partir des séries temporelles instationnaires issues des cas historiques ou bien des événements synthétiques (choisis à partir de l'analyse de probabilités conjointes centennale). Ils sont appliqués :
a) de façon homogène sur sa frontière de marine concernant les niveaux d'eau (marée + surcote) ;
b) sur l'ensemble du domaine en ce qui concerne le vent (intensité et direction)
- Avec les caractéristiques des vagues propagées par WW3 sur l'ensemble du domaine
- Avec les débits franchissants calculés à partir des profils SWASH
- Ainsi UHAINA est capable de simuler les niveaux et les courants tenant compte de la marée et de la surcote (dont celle générée par le vent local) et des vagues (wave setup) et les propager notamment dans les embouchures présentes sur le site et également la submersion engendrée par les paquets de mer.

5 – Cartographie de la submersion

Celle-ci est obtenue en fusionnant les résultats de simulation (hauteurs et vitesses maximums, aléa) issues d'UHAINA et de SWASH. Concrètement, les résultats d'UHAINA seront complétés manuellement :

- Avec l'interpolation les résultats des profils SWASH « submersion » en s'appuyant sur la topographie
- Et en ce qui concerne les profils de « franchissement », en tenant compte de la submersion calculée par SWASH dans le secteur compris entre le rivage et le point d'injection des débits dans UHAINA (secteur « aveugle » pour UHAINA).

La réalisation de l'ensemble de ces étapes est nécessaire pour les sites soumis à de la submersion par débordement et par franchissement alors que pour les sites concernés uniquement par du débordement, seules les étapes 1 et 4 sont nécessaires.

3.2.4.2.3 Modélisation du site du Moule

Ce site est principalement exposé à des submersions liées à des franchissements par paquets de mer.

La Figure 47 correspond à l'implantation (emprise, topo-bathymétrie et maillage) des modèles WW3 et UHAINA. Ce site est caractérisé par une plateforme insulaire étroite (l'isobathe 100m se situe à moins de 2km du rivage) et la présence d'un récif frangeant également étroit (largeur maximale d'environ 450m à l'est de la rivière d'Audouin) longeant le trait de côte du Moule. Au large de la plateforme, les pentes sont

fortes pour passer rapidement à des profondeurs supérieures à 500m. C'est une configuration de littoral ouvert, exposé aux vagues atlantiques, et défavorisant les surcotes engendrées par le vent. Le maillage (Figure 47b et d) s'adapte à cette morphologie : mailles larges d'environ 500m au large en eau profonde avec une meilleure résolution sur les pentes, la plateforme insulaire, le récif, les rivières et les zones urbanisées pour atteindre environ 10 à 20 m. A terre, les lignes de contraintes utilisées pour le maillage sur ce site (obstacles et vecteurs pour les écoulements) sont indiquées Figure 47c.

- Les 41 profils implantés sur le site pour effectuer les calculs avec SWASH sont présentés Figure 48A. Leur distribution spatiale tient compte de la configuration de la côte : orientation et altitude du rivage, caractéristiques du récif frangeant (crêtes, passes), relief à terre. Ils ont une résolution spatiale de 1m et s'étendent généralement en mer jusqu'à une profondeur de ~30 m. Deux types de profils sont à distinguer :
 - En rouge : à terre, les extrémités de ces profils se situent au niveau des dépressions qui peuvent être potentiellement atteintes par des franchissements de paquets de mer. Sur ces secteurs, le trait de côte a été segmenté de façon à associer à chaque profil un segment (Figure 48B). L'hypothèse est faite que les franchissements calculés au niveau du profil se répartissent de manière homogène sur la longueur du segment. Un exemple de ce type de profil, où SWASH permet de calculer les franchissements (qui seront injectés sur UHAINA, voir ci-après) et la submersion, est présenté ;
 - En vert : ce sont des profils positionnés sur des secteurs dépourvus de dépressions, c'est à-dire que l'altitude de l'arrière-plage ne cesse d'augmenter jusqu'à des valeurs importantes (> 10 m). Il n'y a donc pas à proprement dire des franchissements de paquets de mer. La submersion est ici calculée directement par SWASH. À terre : le domaine de calcul s'étend jusqu'à l'iso-contour à 10m d'hauteur pour la baie d'intérêt et, au contraire, il est arrondi sur celle opposée ; le maillage est raffiné pour l'étude de la submersion seulement sur la baie d'intérêt et largement de-raffiné sur celle opposée.

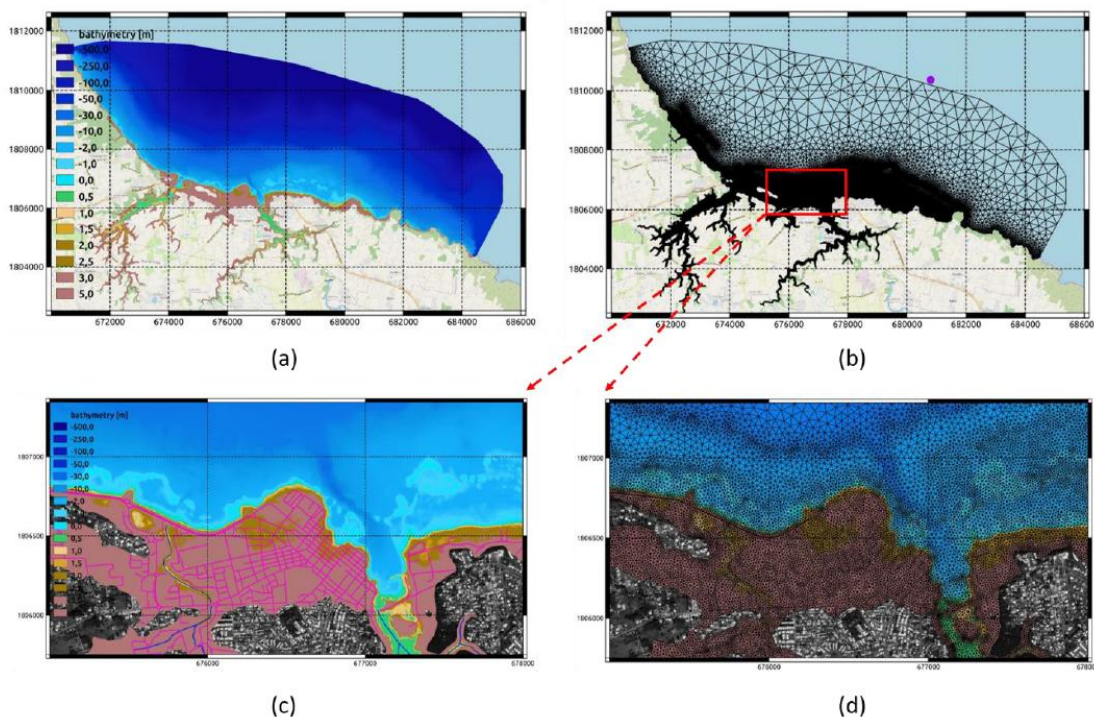


Figure 47 : Site du Moule : (a) : emprise spatiale du domaine de calcul et données topo-bathymétriques ; (b) Maillage de calcul et point de forçage (en violet) ; (c) topo-bathymétrie et lignes de contraintes (violet et bleu) dans la ville du Moule ; (d) zoom du m

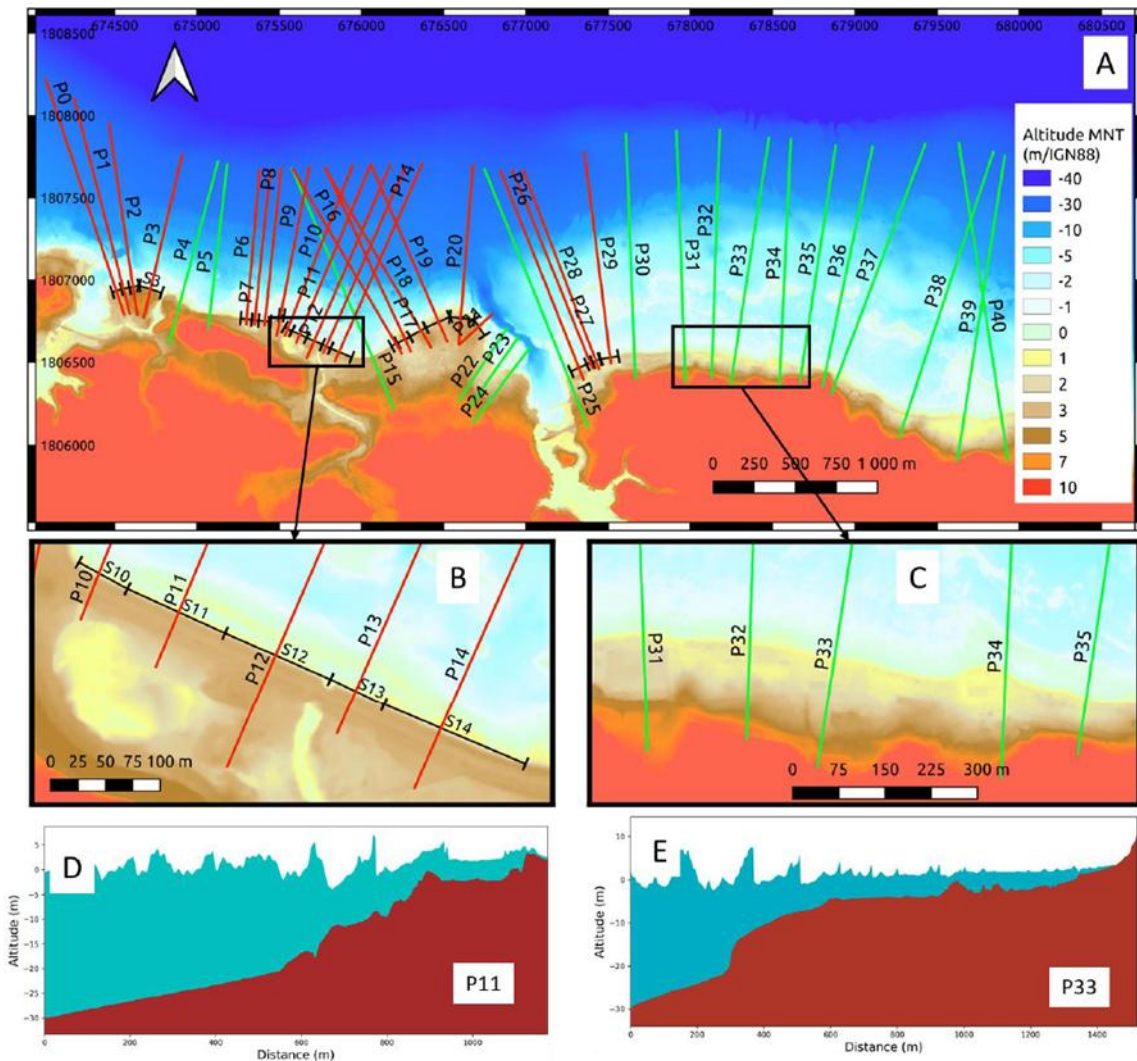


Figure 48 : implantation des profils sur le site du Moule pour le calcul de la submersion et des débits franchissant avec SWAS. A : Vue de l'ensemble des 41 profils ; B : exemple de profils à franchissements ; C : exemple de profils pour le calcul de la submersion

Le secteur du Moule a fait l'objet de simulations particulières fondées sur l'utilisation des modèles Uhaïna et SWASH permettant d'estimer la submersion par débordement d'une part et la submersion par franchissement d'autre part. Après les analyses statistiques d'événement sur la zone il a été choisi un événement théorique se rapprochant des données de l'ouragan Hugo (peu de données disponibles sur les événements historiques sur la zone du Moule).

3.2.4.2.4 Résultat de la modélisation site du Moule

Scénario de référence actuel :

À l'échelle actuelle, la commune du Moule est divisée en plusieurs zones présentant des degrés divers de vulnérabilité face à la submersion marine. La partie est de la commune est relativement épargnée ; néanmoins, la zone ouest de la plage des Alizés est susceptible d'expérimenter des hauteurs d'eau excédant 1 m (Figure 49), voire atteignant ponctuellement 2 m, avec des vitesses de courants dépassant les 0,5 m/s (Figure 50).

La submersion marine s'étend le long de la rivière d'Audouin, sans toutefois s'étendre au-delà des zones de mangrove adjacentes. En revanche, le secteur ouest est nettement plus affecté. Le promontoire central du bourg du Moule est particulièrement touché, avec des hauteurs d'eau maximales dépassant les 2 m et des courants maximaux excédant 0,5 m/s, notamment aux abords de la rue François Serdot et de la station-

service Sol-Esso. Une situation similaire est observée dans la cuvette formée près du gymnase Félix Aboua. Plus à l'ouest, le front de mer est également sévèrement impacté, avec des hauteurs d'eau fluctuant entre 1 et 2 m, et parfois même dépassant cette dernière mesure. Enfin, la portion est de la baie du Nord-Ouest n'est pas épargnée, présentant des hauteurs d'eau maximales pouvant surpasser 2 m et des courants excédant 0,5 m/s.

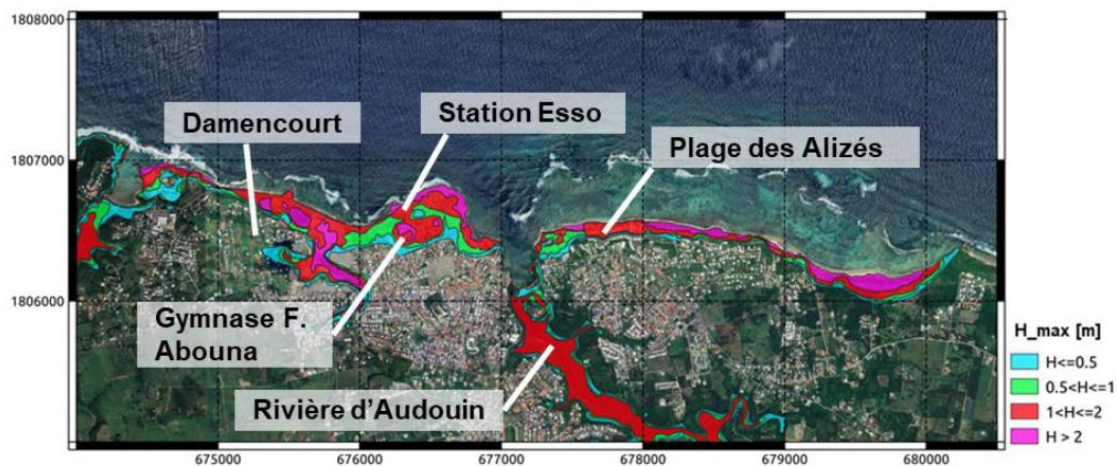


Figure 49 : Scénario de référence actuel : extension de la submersion et hauteur d'eau maximale calculées sur la Ville du Moule

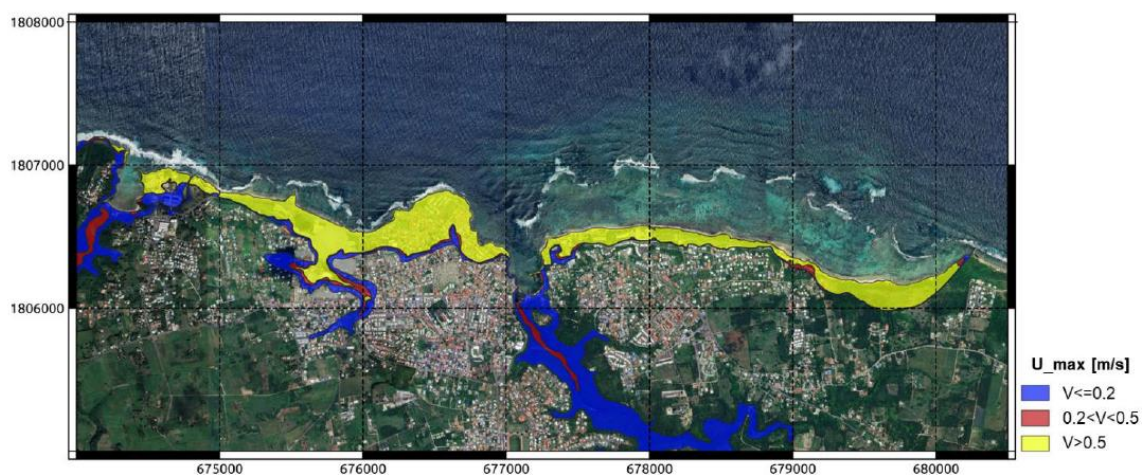


Figure 50 : Scénario de référence actuel : vitesse maximale des courants moyennées calculées sur la ville du Moule

Scénario de référence 2100 :

Pour l'horizon 2100, l'étendue de la zone submergée connaît une légère augmentation. La plus significative de ces augmentations se produit au niveau de l'arrière-plage du quartier de Damencourt. Dans les autres secteurs, l'expansion des zones submergées est relativement modeste. Cependant, il est important de noter que les hauteurs d'eau (Figure 51) et les vitesses de courant (Figure 52) connaissent une hausse substantielle dans les zones déjà vulnérables à la submersion marine à l'échelle actuelle.

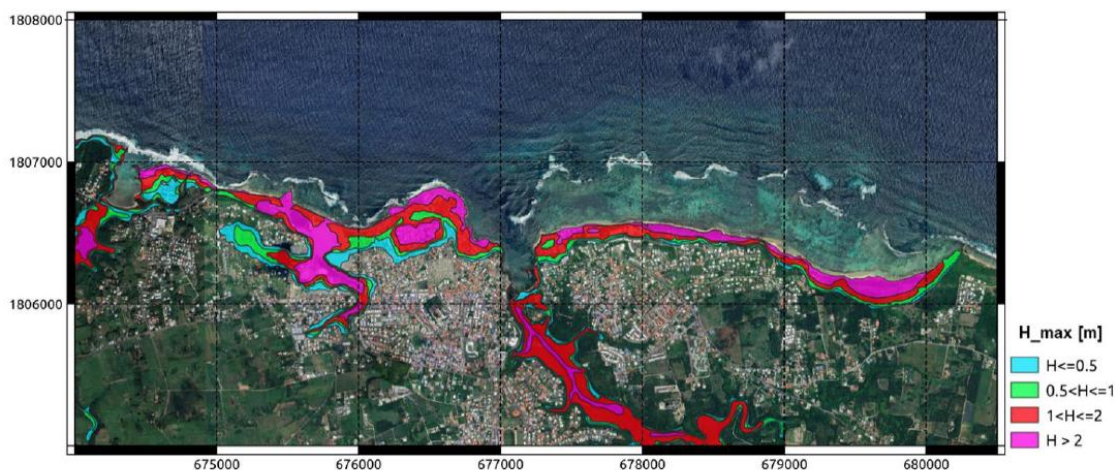


Figure 51 : scénario de référence à 2100 : extension de la submersion et hauteur d'eau maximale calculées sur la ville du Moule.

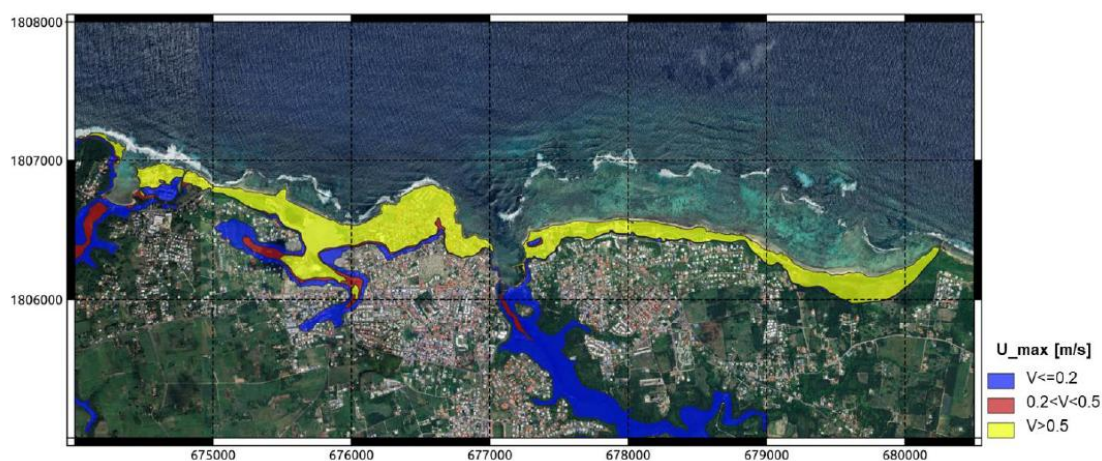


Figure 52 : Scénario de référence à 2100 : vitesse maximale des courants moyennés calculés sur la ville du Moule.

3.2.4.3 Classification de l'aléa submersion marine

3.2.4.3.1 Qualification de l'aléa

Pour les inondations par submersion marine, les hauteurs d'eau et la vitesse d'écoulement représentent le couple de critères pris en compte pour déterminer les niveaux d'aléas. Les résultats sont présentés sous forme de cartes de hauteurs d'eau maximale, de vitesse maximale et d'aléa maximal pour l'aléa actuel et l'aléa horizon 100 ans.

La notion de dynamique peut venir compléter à dire d'expert, elle permet d'ajuster le niveau d'aléa dans les secteurs où la vitesse d'écoulement horizontale est faible mais où la vitesse de montée des eaux peut être importante. Ce type d'écoulement est observé en particulier dans les secteurs dits en « cuvette ».

L'aléa maximal est défini par le croisement des hauteurs et des vitesses instantanées, et ce, à chaque pas de temps pour chaque maille de la modélisation.

L'aléa submersion marine s'exprime par la surface de la zone concernée et par « la gradation dans la manifestation du phénomène » (guide méthodologique, MEDDE, 2014). Cette gradation est liée à la

capacité d'un adulte à se mouvoir lors du phénomène en cours qui dépend de la hauteur d'eau et de la vitesse de l'écoulement produite par la submersion.

La modélisation numérique mise en œuvre fournit les hauteurs d'eau et les vitesses d'écoulement en tout point du domaine de calcul et à chaque instant de la propagation de la submersion. La gradation de l'aléa résulte du croisement de ces résultats selon les classes présentées dans le tableau ci-dessous.

		Vitesse des courants (m/s)		
		$V \leq 0,2$	$0,2 < V \leq 0,5$	$V \geq 0,5$
Hauteur d'eau (m)	$H \leq 0,5$	Faible	Modéré	Fort
	$0,5 < H \leq 1$	Modéré	Modéré	Fort
	$1 < H \leq 2$	Fort	Fort	Très Fort
	$H > 2$	Très Fort	Très Fort	Très Fort

Figure 53 : Qualification de l'aléa de submersion marine en fonction des classes de hauteur d'eau et des courants à terre

Une fois l'aléa actuel et l'aléa horizon 100 ans qualifié un nouveau croisement est opéré afin de prendre en compte ces deux données et d'obtenir l'aléa final :

Le croisement des deux aléas est défini selon le tableau ci-dessous selon le guide méthodologique, MEDDE, 2014 :

		Aléa échéance 100 ans			
		Faible	Modéré	Fort	Très Fort
Aléa actuel	Nul	Faible	Faible	Faible	Faible
	Faible	Faible	Faible	Faible	Moyen
	Modéré	Moyen	Moyen	Moyen	Fort
	Fort	Fort	Fort	Fort	Très Fort
	Très Fort	Très Fort	Très Fort	Très Fort	Très Fort

3.2.4.3.2 Le choc mécanique des vagues

Selon le guide PPRL (MEDDE, 2014), l'aléa "chocs mécaniques des vagues" est défini de la manière suivante :

- Pour des franchissements d'ampleur modérée, la zone concernée correspond à 25 m par défaut à partir du point de franchissement et peut être étendue à 50 m dans un contexte cyclonique.
- Pour des zones de franchissements importants, une évaluation spécifique des facteurs topographiques et des forces d'impact des vagues peut déterminer la largeur de la zone concernée.

La délimitation des zones à risque de chocs de vagues s'appuie sur la modélisation numérique de la hauteur (Hs), de la période (Tp) et de la direction (Dp) des vagues à la côte. Les zones côtières présentant des vagues supérieures à Hs = 2 m, Tp = 8 sec et une direction frontale par rapport à la côte (de -30° à 30°) sont identifiées comme potentiellement sujettes à l'aléa choc de vagues.

La largeur de la zone soumise à l'aléa « chocs mécaniques des vagues » varie alors en fonction de la nature du littoral :

- Littoral rocheux surélevé d'au moins deux mètres : bande de 10 m de large.
- Littoral protégé (enrochements, mur béton), bande de 20 m de large ; réduite à 15 m en présence d'une barrière corallienne.
- Plage (pouvant être érodée) : bande de 25 m de large en présence d'une barrière corallienne ; 50 m sans récif.

Ces largeurs de bande ont été adaptées selon la topographie d'arrière-côte et en présence de caractéristiques morphologiques côtières spécifiques (côtes mixtes) à dire d'expert.

3.2.5 Aléa liquéfaction

La liquéfaction du sol est un phénomène qui peut se produire lors d'un séisme : un sol gorgé d'eau perd sa solidité, ce qui peut entraîner l'affaissement ou l'effondrement des constructions.

3.3 Les aléas sur la commune du Moule

La commune du Moule est soumise à plusieurs aléas naturels, dont la répartition et l'intensité varient en fonction des caractéristiques locales du territoire.

L'aléa inondation est particulièrement marqué dans les zones basses et urbanisées de la commune, notamment dans les secteurs de Lemercier, Laureal, Boisvin et autour du bourg du Moule, en raison de la faible altitude, de la proximité de cours d'eau comme la rivière Canne et l'imperméabilisation progressive des sols.

L'aléa mouvement de terrain se concentre principalement dans la zone des Grands-Fonds, où son intensité varie de faible à forte selon l'inclinaison des pentes. Il est également présent le long de certaines falaises littorales, où il atteint un niveau fort.

Enfin, l'aléa submersion marine concerne principalement les zones littorales basses, exposées aux houles cycloniques et à la montée du niveau de la mer, notamment sur la frange côtière allant de la plage de la Baie du Nord-Ouest à la plage de Anse Conchou, en s'étendant le long de la rivière d'Audrouin ainsi que dans les secteurs de Damencourt et du Centre-Bourg.

4. Les enjeux : recensement et cartographie

4.1 Définition

Les enjeux, dans le cadre d'un Plan de Prévention des Risques (PPR), désignent l'ensemble des éléments qui peuvent être affectés, directement ou indirectement, par les aléas naturels identifiés sur un territoire. Ces éléments incluent les personnes, les biens matériels, les activités économiques, les infrastructures essentielles, ainsi que le patrimoine culturel et environnemental. L'objectif principal du PPRN (Plan de Prévention des Risques Naturels) est de minimiser les impacts potentiels de ces aléas sur les enjeux présents sur le territoire guadeloupéen.

Conformément à l'article R.256-11-6 du Code de l'environnement, les enjeux sont classés en différentes catégories, qui permettent de structurer les mesures de prévention et de protection à mettre en place. Ces catégories peuvent inclure des aspects tels que la sécurité des populations, la protection des biens économiques, la préservation des infrastructures critiques, et la sauvegarde du patrimoine naturel et culturel. Pour mieux répondre aux spécificités locales, certaines catégories d'enjeux ont été adaptées ou ajoutées, tenant compte des particularités géographiques, sociales et économiques du territoire guadeloupéen.

Les enjeux sur le territoire de la Commune du Moule sont répartis en 3 zones :

Enjeux A

Elle correspond essentiellement aux zones de centre urbain et zone fortement bâties. Elle se caractérise par une occupation du sol importante, une continuité bâtie et une mixité des usages entre logements, commerces et services. Il s'agit de zones denses dans lesquelles il reste peu de secteurs non construits et où, en conséquence, les constructions nouvelles n'augmenteront pas de manière substantielle les enjeux exposés. Le centre urbain justifie une identification particulière pour donner lieu à un zonage et à des règlements adaptés à ses spécificités (équipements publics particuliers, fonctionnement des commerces, problématiques des bâtiments mitoyens ou en pâtés de maisons, etc.).

Enjeux B

Elle correspond aux zones urbanisées hors-centre urbain. Il peut s'agir des bourgs, des villages, hameaux et les constructions sensibles (déchetterie, station de traitement des eaux, etc.). Si le contexte le justifie, ils peuvent contenir certains secteurs non urbanisés de taille réduite, en continuité immédiate de l'urbanisation existante.

Enjeux C

Ce sont les espaces non urbanisés, ceux qui ne sont pas situés dans les parties urbanisées : espaces agricoles, espaces forestiers, bâtis isolés, artificialisation diffuse, territoires non construits.

Il existe également une **zone réglementaire** spécifique : la **zone d'intérêt hydraulique (ZIH)**. Ces zones ne correspondent pas à des secteurs d'enjeux humains ou économiques, jouent un rôle essentiel dans la gestion du risque inondation et submersion marine. Elles regroupent des espaces naturels tels que les mares, les mangroves ou les prairies humides. Les thalwegs situés en amont des bassins versants, ainsi que les zones d'écoulement de bassins versants de taille réduite, ont également été classées en ZIH. Elles présentent donc un intérêt hydraulique réel et il est nécessaire de les préserver.

4.2 Méthodologie

La cartographie des enjeux A, B, C a été réalisée de différentes manières selon les zones.

L'identification des zones d'enjeux A, B et C s'est réalisée en 3 grandes étapes.

4.2.1 Utilisation des bases de données

L'identification des zones par croisement des bases de données disponibles sur l'urbanisation du territoire :

- Données d'occupation du sol issues de Karucover 2017
- Bureau d'étude (C2R) : évaluation du niveau d'enjeux des bâtis (faible, moyen, important)
- Tâches urbaines (Service PACT - DEAL)
- PLU de la commune
- Orthophotographie 2022

Procédure générale

Dans un premier temps, les données relatives à l'artificialisation du territoire (surface anthropisée Karucover 2017, zones d'enjeux anthropisées C2R, données de tâches urbaines de PACT, ainsi que les zones U et AU du PLU communal) ont été isolées. Après cette étape, un croisement a été réalisé afin de déterminer les zones urbaines communes. Par ailleurs, en procédant à ce travail, des zones identifiées comme urbaines, mais non concordantes entre les différentes sources de données, ont été mises en évidence. Pour statuer sur le caractère urbain ou non de ces espaces, un travail de photo-interprétation, basé sur une orthophotographie de la Guadeloupe datant de 2022, a été effectué.

La carte d'enjeux du PPRN devant faire ressortir les caractéristiques du territoire à un instant T, les frontières de la zone urbaine ont également été retravaillées manuellement par photo-interprétation, afin d'atteindre cet objectif. Une fois les zones urbaines délimitées, les zones non-urbaines ont été déterminées par inversion (zone d'enjeux C), permettant ainsi d'obtenir une répartition complète et structurée de l'occupation du territoire.

Enfin, afin de différencier la zone d'enjeu A (centre urbain très artificialisé) de la zone d'enjeu B (zone urbanisée hors centre urbain), les niveaux d'enjeux des bâtis, fournis par le bureau d'étude C2R, ont été analysés. Des compléments ont été apportés grâce à une étude de la densité effectuée par photo-interprétation, garantissant une caractérisation plus précise et nuancée de l'urbanisation.

4.2.2 Atelier de cartographie des enjeux avec les communes

Des ateliers, menés en étroite collaboration avec les communes, ont été organisés afin de délimiter et d'identifier précisément les zones d'enjeux sur le territoire communal. Le travail a été effectué à partir de scans IGN au 1/25 000, reproduits sur des plans papier de grand format (A0). Lors du premier atelier, la commune a pu faire part de sa propre représentation des enjeux territoriaux, ce qui a permis d'établir une première version de la carte des enjeux. Les projets en cours, susceptibles de modifier significativement l'urbanisation, ont également été recensés et localisés par la commune sur le plan au format A0.

Une fois ce premier atelier terminé, la DEAL a mené une analyse interne visant à affiner localement la cartographie des enjeux, en prenant en compte les observations exprimées lors de la séance initiale. Le second atelier a ensuite été dédié à la présentation de la cartographie des aléas révisée, dans le but d'en obtenir la validation en séance.

Pour la commune du Moule, les ateliers ont eu lieu le 12/10/2023 et le 06/12/2023.

4.3 Les enjeux sur la commune du Moule

La zone d'enjeux A regroupe les espaces les plus densément urbanisés du Moule. Elle inclut essentiellement le centre-bourg historique et le quartier de Lemercier. Les zones d'enjeux B s'étendent elle sur les zones urbanisées plus isolées du centre-bourg, comme Château Gaillard, Cocoyer, Oranger, la Baie, etc.

Les autres parties de la commune sont essentiellement classées en zone C, caractéristiques des zones naturelles ou agricoles.

5. Annexes

5.1 Glossaire

Aléa : Conséquences physiques résultant d'un scénario d'événements (par exemple : débordement de cours d'eau, submersion). La transcription spatiale de l'aléa permet de le représenter et de le qualifier. L'aléa est caractérisé par son occurrence et son intensité. Il peut être qualifié par différents niveaux (fort, moyen, faible).

Aléa de référence : Enveloppe des aléas correspondant aux scénarii de référence (événement historique ou événement d'occurrence centennale). L'aléa de référence est utilisé pour établir le zonage réglementaire du PPR.

Bassin versant : Un bassin versant est une zone géographique de collecte des eaux, délimitée en amont par les lignes de partage des eaux, ou lignes de crête, et en aval par l'exutoire (cours d'eau, plan d'eau, milieu marin). Ainsi, chaque goutte de pluie qui tombe sur cette surface va rejoindre l'exutoire par écoulement de surface le long des pentes.

NGG : le nivellement général de la Guadeloupe (Grande-Terre, Basse-Terre et les îles de la Petite Terre, Terre de Haut et Terre de Bas) constitue un réseau de repères altimétriques disséminés sur le territoire guadeloupéen. Le réseau NGG – IGN 1988 constitue le nivellement officiel sur les territoires évoqués. Le niveau de référence (« niveau zéro ») est déterminé par le niveau moyen de la mer à Pointe-Fouillole (rade de Pointe-à-Pitre) observé du 1er juillet 1947 au 30 juin 1948.

PAPI : Le Programme d'Actions de Prévention des Inondations (PAPI) est un outil de programmation financière opérationnel dédié à la thématique inondation sur un territoire cohérent du point de vue du risque, qui ouvre un droit prioritaire au financement de l'Etat.

5.2 Lexique des sigles

NGG : Nivellement général de la Guadeloupe

PAPI : Programme d'actions de prévention des inondations

SPRI : Schéma de prévention des risques d'inondations