



Évaluation technique des menaces naturelles des communes de Jacmel, Petit Goâve, Grand Goâve (Haïti)

Utilisation SIG dans la gestion des risques naturels

Novembre 2011 – Avril 2012

Azzurra Lentini - Hydrogéologue

Marco Di Cecco - DRR Tech. Advisor Welthungerhilfe Haiti

REMERCIEMENTS

La WELTHUNGERHILFE et Azzurra Lentini ont le plaisir de mettre à la disposition des autorités nationales et locales, des ONG partenaires, de la DPC (Direction de la Protection civile), des organisations internationales, etc., les résultats d'une évaluation technique des risques naturels, les guides méthodologiques et l'élaboration des cartes des menaces d'Haïti.

L'étude technique de terrain dans les communes de Petit Goâve, Grand Goâve et Jacmel, a été conduite de Novembre 2011 à Avril 2012.

Les objectifs principaux sont d'accompagner la prise des décisions des autorités nationales, régionales et la communauté internationale, afin de transférer les connaissances et les expériences aux professionnels haïtiens et aux ONGs.

La WELTHUNGERHILFE et Azzurra Lentini présentent leurs sincères remerciements à tous ceux et à toutes celles qui ont contribué à la réalisation de cette étude, principalement:

Ing. Emmanuel Bobby Piard directeur du Centre National d'Information Géospatiale (CNIGS, Port Au Prince, Haïti, <http://cnigs.ht/CNIGS/Accueil.html>) et l'ing. Geol. Samuel Genea, pour la mise à disposition des cartes, du matériel informatique, pour leur appui technique et leur constante collaboration.

Prof. Géomorphologue Claudio Puglisi de l'ENEA (*Agenzia Nazionale per le nuove tecnologie, l'energia e lo sviluppo economico sostenibile* "Agence National pour les nouvelles technologies, l'énergie et le développement économique durable", Italia, <http://www.enea.it/it>) pour l'appui technique aux études sur les glissements de terrain.

Dr. Géologue Gabriele Leoni consultant sig pour l'appui technique aux élaborations des cartes des menaces naturelles en SIG, calculs de susceptibilité aux glissements.

L'organisation italienne Geologia Senza Frontiere (GSF - Géologie Sans Frontières, <http://www.gsf.it/>), en particulier le group du projet "FORGEO", dr. Geol. Luca Falconi, dr.ssa Simona Savini, dr. Federico Rottura et dr.ssa Chiara Lesti pour l'appui technique aux études sur les glissements de terrain.

Dr. Geol. Christian Iasio, *Senior researcher* et le dr. Geol. Marco Mulas, *Junior researcher*, del'*Institute for Applied Remote Sensing*", (*European Academy*, Bolzano, Italie) pour l'analyse de densité de végétation à travers la photo-interprétation.

Le dr. Ingénieur Géologue Sergio Mora Castro consultant de la Banque Mondiale (*World Bank*) dans le projet NATHAT, pour les conseils techniques, matériels bibliographique et contacts avec ses collaborateurs.

Le docteur géologue Giandomenico Fubelli de l'Université Italienne "Roma Tre" pour l'appui technique et matériel bibliographique dans l'étude sur les glissements de terrain et les inondations.

Dr. Marco Caciagli du centre de recherche Italienne "INGV" de Bologna (Institut National de Géophysique et Vulcanologie) pour l'appui technique et matériel bibliographique dans l'analyse de la menace sismique.

Un remerciement spécial est adressé aux ingénieurs et agents de terrain, à la responsable base de données, aux leaders communautaires et la population des zones qui ont participé à cette évaluation.

Remerciements aussi à la Direction de la Protection Civile (DPC).

La chaleur, la gentillesse, la forte personnalité et l'intuition des haïtiens rencontrés au cours de ce travail ont été des composantes majeures de ma motivation, enthousiasme et exécution de mon étude.

Mesi anpil!!!

Préface

Ces dernières quinze années ont été marquées par l'essor de l'information géographique et un fort développement informatique, qui ont donné lieu à l'avènement de la géomatique. Actuellement, les données géographiques, définies comme des données à référence spatiale, sont largement disponibles sous la forme traditionnelle des cartes, avec possibilité de numérisation manuelle ou automatique, sous forme de bases de données ou d'images.

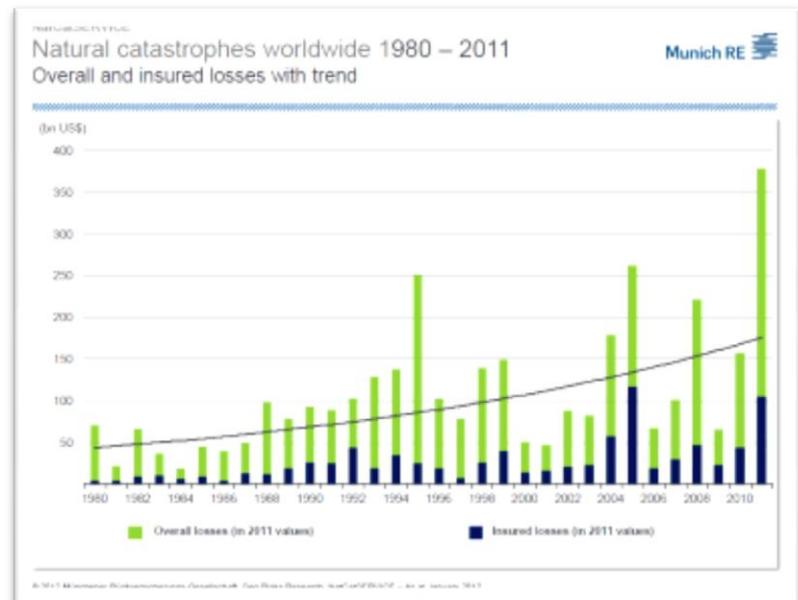
Depuis les années 1990, on assiste à une forte augmentation des

catastrophes naturelles d'origine climatique dans le monde (inondations, orages tropicaux, sécheresses) notamment dans les pays du Sud.

En plus de l'impact des catastrophes naturelles sur la vie de la population, leurs impacts socio-économiques sont souvent non négligeables, et se décomposent en deux types :

- d'une part, les impacts tangibles (ceux qui peuvent faire l'objet d'une estimation monétaire car ils concernent des biens et des services marchands), et les impacts intangibles (qui, en l'état actuel des connaissances, ne sont pas traduits en termes monétaires, comme la dégradation des milieux naturels et la perte de biens irremplaçables comme le patrimoine) ;
- d'autre part, les effets directement liés aux phénomènes et les conséquences indirectes des événements.

Une estimation récente du CEPAL¹ recense plus de 150 millions de personnes touchées par des catastrophes en Amérique latine et aux Caraïbes au cours des trente dernières années, dont plus de 12 millions de victimes directes et 108 000 morts. En outre, le montant total des dommages — sans qu'il s'agisse là d'une estimation véritablement exhaustive pour toute la région — s'est élevé à plus de 50 milliards de dollars en 1998 pour arriver à plus de 350 Bm de US\$ en 2011². Ils sont concentrés dans les



¹ Commission Economique pour l'Amérique Latine et les Caraïbes www.eclac.cl

² Source Munich RE. Natural Catastrophes worldwide 1980-2011 report

pays les plus petits et relativement les moins développés, notamment dans les sous-régions d'Amérique centrale, des Caraïbes et des Andes.

L'introduction des systèmes d'information dans le domaine des risques étant assez récente, de nombreux aspects restent encore à explorer. L'utilisation des résultats de recherches dans la prévision, et la perception des risques dans les systèmes d'information est toujours une question d'actualité. Cependant, la simulation par l'informatique de ces concepts reste souvent peu appropriée, et les techniques de visualisation utilisées sont aussi peu adaptées aux besoins de gestion des risques.

En général, le développement d'un système d'information pour la gestion des risques naturels à l'échelle d'un territoire donné (la commune, la région, ou autres), se résume à répondre aux préoccupations suivantes :

1. connaître les risques qui menacent un territoire donné et les modéliser en fonction d'autres informations géographiques ou non.
2. connaître les enjeux ou les éléments exposés qui existent sur le territoire, ainsi que les caractéristiques du territoire : comme la géologie, et les informations altimétriques.
3. Et finalement appréhender l'interaction entre les risques et les éléments exposés, ceci revient à évaluer par exemple la vulnérabilité dans certains cas, ou à organiser les secours et à évaluer les pertes dans d'autres.

Développer un système d'information sur les risques naturels nécessite la prise en compte de nombreux paramètres comme les données, les acteurs, leurs besoins, ainsi que les éventuels systèmes préexistants.

Recenser l'ensemble des éléments déterminants pour le système et identifier clairement le rôle joué par chacun d'entre eux est un pré-requis. Ensuite, il faut considérer la multiplicité et l'hétérogénéité des données et des acteurs, qui constituent une des principales difficultés dans le développement d'un tel système.

L'approche numérique dans l'analyse des risques devient de plus en plus l'outil pour l'identification des actions de mitigation et prévention et, sans oublier certaines difficultés, aussi l'outil de planification des administrations locales de leurs activités d'urbanisation et gestion du territoire.

Ce passage vers une représentation visuelle des caractéristiques du territoire nécessite une certaine introduction au sein de la catégorie connue comme celle des « *Policy Makers* », facilitée par l'inclusion des différents départements techniques dans le processus de réalisation de l'analyse et au même temps le développement des capacités d'interpolation des différentes informations disponibles. Ce dernier facteur

représente l'outil plus approprié pour une correcte action de gestion des risques, et l'élément sur la quelle le gestionnaire du territoire doivent concentrer leur effort (analyse causes-conséquences).

La Welthungerhilfe dans le procès de évolution de l'analyse du risque a voulu impliquer le plus possible les autorités et les communautés locaux, a travers toutes les phases de l'analyse. Identification de la vulnérabilité, la représentation et l'identification des menaces fait par les communautés même va a s'ajouter à l'outil scientifique présenté ici. L'avantage c'est aussi de représenter le point de vue de qui, le plus souvent, est assujetti aux désastres à travers un langage plus accessible aux dirigeants, et qu'il donne aussi l'information sur la différence identification de la menace au sein des populations ; différences capables d'indiquer et prioriser les interventions nécessaires à la réduction du risque.

Marco Di Cecco

DRM Technical Advisor

LISTE DES ANNEXES

ANNEXE 1: Fiches de terrain pour la classification et caractérisation des glissements.

ANNEXE 2: Tableau des glissements recensés dans les trois communes.

ANNEXE 3: Tableaux des indices discriminants et prédisposant et formules de susceptibilité.

ANNEXE 4: Cartes des menaces inondations.. Explications de lecture.

ANNEXE 5: Cartes de susceptibilité aux détachements des glissements (débris flow, éboulements, rotationnelles, translationnelles). Explications de lecture.

ANNEXE 6: Cartes de densité de végétation pour chaque commune et cartes de chaque section. Explications de lecture.

ANNEXE 7: Résultats et analyse de criticités de la menace inondation, dégâts ruissellements, sur les trois communes.

ANNEXE 8: Résultats et analyse des criticités de susceptibilité aux glissements de terrain, sur les trois communes.

ANNEXE 9: Photos et figures.

ANNEXE 10: Tableau des coordonnées et structures des bâtiments publics (marchés, hôpitaux, écoles, églises, camps idp).

ANNEXE 11: Glossaire

ANNEXE 12: Fichiers SIG et Google Earth©.

Rapport final d'évaluation technique des menaces naturelles des communes de Jacmel, Petit Goâve, Grand Goâve (Haïti)

Contacts

AZZURRA LENTINI

azzurralentini@gmail.com

MARCO DI CECCO

marco.dicecco@welthungerhilfe.de

marcodicecco@gmail.com

SOMMAIRE

REMERCIEMENTS et Préface	Error! Bookmark not defined.
LISTE DES ANNEXES	7
Liste des sigles et abréviations et symboles:	11
Introduction	12
Objectif et cadre d'étude	15
Contexte Haïtien et justification.....	15
L'organisation en place: les instances de la gestion des risques en Haïti	18
Le Système National de Gestion des Risques et Désastres (SNGRD).....	18
Direction de la Protection Civile (DPC).....	19
Comités Départementaux, Communaux et Locaux pour la Gestion des Risques et des Désastres (CDGRD, CCGRD, CLGRD)	19
L'organisation en place en cas de risque matérialisé (urgence).....	20
Faiblesses du système.....	20
Les projets de la Welthungerhilfe.....	22
Méthodologie d'étude et cadre des menaces en Haïti	23
Objectifs.....	23
Présentation administrative des trois (3) communes de Petit Goâve, Grand Goâve et Jacmel	24
Analyse des menaces naturelles, la vulnérabilité et le risque en Haïti avec détaillles pour les trois communes	24
La menace sismique et tsunami en Haïti	25
Amplification locales des ondes sismiques et zonage	30
Menace tsunami	30
Incertitudes du future séismique de Haïti	32
La vulnérabilité d'Haïti	33
Menace liquéfaction.....	34
Menace volcanique.....	37
Menaces hydrométéorologiques et climatiques: sécheresses, cyclones, inondations.....	38
Les sécheresses et El Niño Oscillation Sud (ENOS)-2011	38
Cyclones et inondations.....	39
Érosion	40
Érosion et inondation côtières	41
Menace des glissements.....	42
L'état de la connaissance sur les mouvements des terrains en Haïti	42

Déforestation	43
Recrutement et formation de l'équipe	45
Formation et collaboration avec les autorités locales (DPC, CLPC, CASEC, ASEC) et Nationales (CNIGS) ..	46
MÉTHODE D'ANALYSE DES MENACES NATURELLES, EXPOSITION ET RISQUE	47
Facteurs généraux qui influencent les inondations, les ruissellements, les glissements de terrain et les cyclones	47
ZONAGE DE LA MENACE D'INONDATION	53
Objectifs et méthodologie	53
Approche hydro-géomorphologique	55
Typologie des menaces	56
Collecte des données sur le terrain	60
Les zones pilotes étudiées	62
SUSCEPTIBILITÉ' AUX GLISSEMENTS DE TERRAIN	64
Objectifs et méthodologie	64
Analyse susceptibilité à l'activation des glissements (Méthode Enea-Roma 3, 2008)	65
1) Collecte des données	65
2) Analyse de site	66
3) Macro-area analyse	66
4) Analyse de susceptibilité.....	67
Recensement et classification de glissements de terrain.....	68
Résultats recensement des glissements de terrain	77
Résultats analyse facteurs discriminants et prédisposant	78
FORMULES CALCULE SUSCEPTIBILITÉ	81
Conclusions et analyse des criticités.....	82
MENACE DE IMPACT DE CYCLONE.....	92
Introduction.....	92
Objectifs et méthodologie d'étude d'impact cyclone	96
Étude de vulnérabilité des bassins versants par rapport aux cyclones	96
Inventaire des enjeux publiques exposées	100
Proposition d'action en mitigation des risques inondation, glissements et cyclones	106
MÉTHODOLOGIE SIG	112
Conclusion	113
Bibliographie et web sites	116

Liste des sigles et abréviations et symboles:

* : ce symbole indique chaque mot inclus dans le glossaire (ANNEXE 11).

ASTER GDEM: ADVANCED SPACEBORNE THERMAL EMISSION AND REFLECTION RADIOMETER (ASTER)

GLOBAL DIGITAL ELEVATION MODEL (GDEM)

CASEC/ASEC : Conseil Administratif des Sections Communales/Assemblées de Section Communale

CLPC : Comité Local de Protection Civile

CNIGS : Centre National de l'information Géo-Spatiale

CNMH : Centre National de Météorologie d' Haïti

DIPECHO : *Disaster Preparedness ECHO*

DPC : Direction de la Protection Civile

ENEA : Agenzia Nazionale per le nuove tecnologie, l'energia e lo sviluppo economico sostenibile "Agence National pour les nouvelles technologies, l'énergie et le développement économique durable"

IDP : *Internal displaced persons* - Déplacés internes

METI : *Ministry of Economy Trade and Industry*, Ministère de L'économie et Commerce

NASA : *National Aeronautics and Space Administration*, Aéronautique National et Administration Spatiale

NATHAT: *Analysis of Multiple Natural hazards in Haiti*, Analyze des menaces multiples (Haïti).

ONG: organisation non gouvernementale

PNGRD : Plan national de gestion des risques et des désastres

SIG : système d'information géographique

SNGRD : Système national de gestion des risques et des désastres

UNU-EHS : *the United Nations University Institute for Environment and Human Security*

USGS : *United States Geological Survey* - Institut d'études géologiques des États-Unis

WRI : *World Risk Index*

WHH : *Welthungerhilfe*

WB : *World Bank*, Banque Mondiale

Introduction

Le 96 % de la population en Haïti habite dans des zones menacées par des cyclones, tempêtes tropicales, sécheresse. Ces phénomènes causent l'activation des glissements de terrain et de violentes inondations. La plupart des villes à forte densité démographique se situent soit dans des plaines inondables, soit en bordure de mer, en pente ou près d'éléments sismiques.

Le niveau de déboisement (2% seulement de couverture forestière) et d'érosion est très important.

Ils manquent les connaissances techniques, l'éducation, les instrumentations pour exécuter une politique de prévention des désastres (gestion de causes).

Dans ce cadre National et Local l'étude a été réalisée avec le but principal de donner des instruments et connaissances aux autorités Nationales et Locales, qui travaillent dans la planification du territoire, d'exécuter une politique de prévention aux désastres (gestion de causes), au lieu de la gestion des catastrophes.

L'équipe d'experts ingénieurs a été accompagnée sur le terrain par les autorités locales de protection civile, les CASEC, ASEC, avec comme objectifs :

- Avoir des informations au niveau des dégâts et morts causés par les différents événements.
- Transférer des connaissances sur les méthodologies d'études pour permettre aux autorités locales une appropriation active et durable.

La collaboration au niveau des autorités nationales (CNIGS, Bureau de Mine et Énergie) pour la mise en place de la stratégie d'étude fut constante. Cela nous a permis de récolter les informations et le matériel, de discuter sur les méthodes d'études et d'échanger sur les idées et nos expériences.

La déforestation d'Haïti a aggravé l'érosion et a produit d'énormes volumes de sédiments instables sur les versants en bord de mer.

Pendant le séisme plusieurs zones côtières, surtout au niveau des embouchures des rivières se sont effondrées à cause des phénomènes de liquéfaction et des tsunamis locaux se sont formés. Ces phénomènes ont causé dégâts et morts, dans les zones de Petit Paradis, Fauché (Grand Goâve) et Petit Guinée (Petit Goâve).

Les climatologies tropicales (températures élevées et saison des pluies) favorisent les phénomènes d'altération chimique et mécanique des roches. Ces phénomènes provoquent la formation des élevées épaisseurs de débris qui subissent l'érosion et le transport par les eaux superficielles.

Les perturbations locales peuvent causer des dégâts et devenir particulièrement dangereuses lorsqu'elles traversent des petits bassins versants à pente forte et lorsque les ravines sont croisées par des ponts sous-dimensionnés et des passages à gué.

Les pluies et cyclones peuvent être les facteurs déclenchant des glissements de terrain, surtout au niveau des débris flow* (écoulements rapides des boues, débris). L'infiltration de la pluie dans le terrain trouve son

origine auprès des pressions hydrauliques interstitielles produisant des déséquilibres et des instabilités dans les pentes.

La menace la plus connue et étudiée en Haïti est l'inondation. Malgré cela, force est de constater que de nombreuses maisons et abris ont été construits par les ONGs et privés (surtout depuis le séisme de 2012) dans des zones inondables.

Avant notre étude, sur les trois communes il n'existait pas de cartes d'aléas d'inondation. Nous avons seulement eu connaissance de la délimitation des zones inondables par photo-interprétation, mais il n'y a jamais eut d'études de terrain.

Les autorités locales font la confusion entre dégâts par ruissellement et le phénomène d'inondation et dans les zones inondables ni le facteur d'hauteurs d'inondation:

- La délimitation du lit mineur de la rivière est importante pour empêcher la construction des structures directement dans le lit de la rivière et pour planifier une distance entre les enjeux et le lit mineur de celle-ci.
- Une délimitation précise de la zone d'embouchure de la rivière serait importante pour en interdire la construction.
- L'estimation d'hauteurs des inondations est importante pour vérifier si c'est possible de construire des bâtiments dans cette zone et si la structure doit être surélevée et les hauteurs de surélévation.

Avant notre étude, il n'existait en Haïti, qu'un seul inventaire disponible et très partiel, des mouvements de terre, qui contient environ 14 glissements de terrain depuis 1954. L'étude Nathat de la Banque Mondiale a élaboré des cartes des menaces et susceptibilités, qui donnent une idée générale de la situation dans le Pays. A notre connaissance, il n'existait pas d'études de terrain pour l'identification, classification des glissements et individuation des facteurs influençant les glissements, dans les trois communes concernées par l'étude réalisée.

Les autorités locales et les habitants ne connaissaient pas les zones susceptibles d'être affectées par des glissements ni les facteurs qui causent les glissements³.

Après le séisme la plupart des personnes et ONGs ont construit dans les zones de pente des trois villes d'étude sans compter la menace de glissements de terrain, ni à l'exposition aux vents des cyclones.

Les cartes de susceptibilité aux détachements de glissements de terrain sont important pour:

- Délimiter les zones où il faut faire des interventions (structurelles (gabionnages etc) et/ou non structurelles (reboisements, terrassement etc);
- Empêcher la construction dans les zones à forte (et très forte) susceptibilité;
- Identifier les zones de passage des glissements de terrain.

³ Rapport Final d'enquête sur le connaissances, aptitudes et pratiques Welthungerhilfe 2012. M.Ventalon, M. Di Cecco
<http://www.preventionweb.net/english/professional/publications/v.php?id=25148>

Avant notre étude aucune carte de végétation mise à jour et aucune étude de vulnérabilité des bassins versant par rapport aux cyclones, existait.

Objectif et cadre d'étude

Contexte Haïtien et justification

Haïti est un pays exposé à plusieurs typologies des catastrophes naturelles⁴ (FIG 1).

Haïti, selon l'indice mondial de risque (World Risk Index, WRI) élaboré par l'Institut Universitaire des Nations Unie pour l'Environnement et la Sécurité humaine (UNU-EHS), présenterait en 2011:

- L'un des indices de prédisposition (probabilité qu'une société ou qu'un écosystème donné soit endommagé en cas de catastrophe naturelle) les plus élevés au monde (parmi les 15 premiers)
- L'un des indices de capacités à faire face aux catastrophes naturelles (en fonction du type de gouvernance, du niveau de préparation, du degré d'anticipation des systèmes d'alertes, des services médicaux et du niveau de sécurité sociale et matérielle), est le plus bas au monde (parmi les 15 premiers).

96% de la population habite dans une zone menacée par des : cyclones, tempêtes tropicales, sécheresse, qui activent des glissements de terrain et de violentes inondations.

Ces dernières années plusieurs cyclones: Jeanne (2004), Dean et Noel (2007), Fay, Gustav, Hanna et Ike (2008) et Thomas 2010 ont touché le pays et ont causé de forts vents, des inondations, des pertes des cultures, des glissements de terrain, des destructions des maisons, des maladies et des morts.

Jusqu'à maintenant aucune solution n'est pas envisagée concernant le déboisement (2% seulement de couverture forestière dans tout le Pays) et l'érosion massive des terres.

Les écosystèmes naturels (mangroves, delta, etc.), les parcs naturels et les sites historiques, où ce qu'ils en restent, sont également en danger car la pression sur les ressources naturelles a augmenté, à cause de l'augmentation de la population.

Haïti se situe dans une zone très active au niveau sismique et est menacé par des séismes, tsunamis, liquéfaction* et menaces des volcans voisins.

La plupart des villes à forte densité démographique se situent soit dans des plaines inondables, soit en bord de mer, en pente ou près des éléments sismiques.

Le 12 janvier 2010 Haïti a subi un violent séisme de $M_w^* = 7$ avec des tsunamis locaux et 7000 glissements de terrain ont été recensés à travers la photo-interprétation* sur des versants avec pente entre 25° et 65° (S. Mora Castro et al. 2010). La plupart était constitué de mouvements lents (planaires ou courbes) et mouvements rapides (chute de roches, coulées rapides en débris), réactivés par les intenses pluies ou les mouvements sismiques "after shock"*.

⁴ Rapport d'enquête sur les paramètres socioéconomiques dans les communes de Petit Goâve, Grand Goâve et Jacmel, Haïti. Emmanuel Charles, Marco Di Cecco. Welthungerhilfe 2012.

<http://www.preventionweb.net/english/professional/publications/v.php?id=25187>

Les estimations évoquent 230.000 personnes mortes, 100.000 blessées et 600.000 résidents ayant perdu leur maison et 300.000 déplacés. La perte économique a été estimée à 8 Milliards de dollars US\$ (PDNA, 2010).

Au cours du 20^{ème} Siècle, Haïti a connu une période assez calme, ne présentant pas de séisme. Ce qui a eut pour effet dans l’imaginaire de la population et dans la planification du territoire, d’oublier cette priorité. Pourtant les risques naturels sont connus comme ayant un potentiel destructeur majeur de l’île Hispaniola. Cet événement à lui seul, ne peut pas expliquer son degré énorme de destruction. En effet à ces caractéristiques naturelles, s’ajoutent les facteurs sociaux, économiques, politiques d’un pays très pauvre, qui contribuent à accentuer sa vulnérabilité et anéantir les efforts faits pendant des années en termes de développement du pays.

77% de la population Haïtienne vit avec moins de 2 dollars américains par jour.

Les lois de planification du territoire sont presque inexistantes et celles qui existent, ne sont, généralement, pas respectées.

Le manque des connaissances techniques, d’éducation, d’instrumentation pour exécuter une politique de prévention des désastres (gestion de causes) oblige les institutions à appliquer des interventions des opérations des réponses aux catastrophes naturelles, ce qui est une approche couteuse et bien souvent peu efficace et peu durable.

Les préoccupations liées aux menaces environnementales passent bien souvent en deuxième plan. D’autres facteurs viennent encore d’aggraver cette fragilité, comme par exemple l’analphabétisme, l’accès difficile aux services sociaux, la forte densité de population, l’insécurité alimentaire et la situation sanitaire critique. Certaines familles ne sont jamais arrivées à se relever après le passage des catastrophes, ce qui entraîne comme conséquences une baisse de leur niveau de vie.

Hazards	No. events	%	Fatalities	%	Affect.	%
Hydro-meteorological (cyclonic, non-cyclonic)	97	70	19269	7	5420856	46
Drought	20	14	-		2668000	22
Earthquakes, tsunami, liquefaction	13	10	235952	92	3721730	31
Slope failure & torrential debris flow events	10	6	635	1	10509	0.1
TOTAL	140	100	255856	100	11821095	100
Sources: 1701-1963/Observatoire du Petit Collège Saint-Martial (in Mora, 1986); 1968-1985/Croix Rouge Haïtienne; 1983-1997/OPDES; 2000-2001/DPC; 2002-2008/CRED; other periods lack data.						

Fig. 1 Les grands désastres en Haïti depuis le 18 siècle.

L'organisation en place: les instances de la gestion des risques en Haïti

Le Système National de Gestion des Risques et Désastres (SNGRD)

En Haïti la gestion des risques et des désastres est depuis 2001, le domaine du Système National des Risques et Désastres d'Haïti (SNGRD), FIG 2. Celui-ci est basé sur le Plan National de Gestion des Risques et Désastres (PNGRD). Ce système est piloté par le Comité National de Gestion des Risques et Désastres (CNGRD), présidé par le Ministre de l'Intérieur et des Collectivités Territoriales (MICT). Le mandat global de cette institution est d'organiser des opérations d'urgence et de gérer le risque des catastrophes. Chaque institution composant le "système" dispose ensuite de son propre mandat et niveau d'action (national, régional, local).

Le SNGRD se compose des personnalités suivantes:

- Le Ministre de l'Intérieur et des Collectivités Territoriales
- Le Ministre de la Santé Publique et de la Population (MSPP)
- Le Ministre des Travaux Publics, des Transports et des Communications
- Le Ministre de l'Agriculture, des Ressources Naturelles et du Développement Rural
- Le Ministre de l'Environnement
- Le Ministre de la Planification et de la Coopération Externe
- Le Ministre des Affaires Étrangères
- Le Ministre de la Justice et de la Sécurité Publique
- Le Ministre de l'Économie et des Finances
- Le Ministre de l'Éducation Nationale, de la Jeunesse et des Sports
- Le Président de la Croix Rouge Haïtienne (CRH)
- Le Directeur Général du Ministère de l'Intérieur et des Collectivités Territoriales



Fig. 2 Le Système National de Gestion des Risques et Désastres (SNGRD), (Source S. Mora Castro,2010)

La mise en œuvre du PNGRD est assurée par le Secrétariat Permanent de Gestion des Risques et Désastres (SPGRD), présidé par le Directeur Général du Ministère de l'Intérieur et des Collectivités Territoriales. Le PNGRD compte un représentant de chacun des organisations et ministères suivants:

- Le Ministère de la Santé Publique et de la Population (MSPP)
- Le Ministère des Travaux Publics, des Transports et des Communications (MTPTC)
- Le Ministère de l'Agriculture, des Ressources Naturelles et du Développement Rural (MARNDR)
- Le Ministère des Affaires Sociales (MAS)
- Le Ministère de l'Environnement (MDE)
- Le Ministère de la Planification et de la Coopération Externe (MPCE)
- Le Ministère des Affaires Etrangères et des cultes (MAE)
- Le Ministère de la Justice et de la Sécurité Publique (Police Nationale d'Haïti)
- Le Ministère de l'Éducation Nationale, de la Jeunesse et des Sports (MENJS)
- Le Ministère de l'Économie et des Finances (MEF)
- La Croix Rouge Haïtienne (CRH).

Direction de la Protection Civile (DPC)

La Direction de la Protection Civile et le bras exécutif de ce système.

Créée en 1997 et rattachée au Ministère de l'Intérieur et des collectivités territoriales, la DPC coordonne le Secrétariat Permanent de Gestion des Risques et Désastres (SPGRD), ainsi que les entités relevant de cette structure, dont les comités départementaux, communaux et locaux de protection civile.

Son mandat consiste en la coordination de la formation, la sensibilisation, la mise en œuvre d'actions préventives et la gestion des désastres.

La DPC via le SPGRD, est également en charge de la mise en œuvre du Plan National gestion des risques et des désastres (PNGRD) adopté en 2001.

Comités Départementaux, Communaux et Locaux pour la Gestion des Risques et des Désastres (CDGRD, CCGRD, CLGRD)

Ces comités ont comme rôle de définir un plan de gestion spécifique des risques et des désastres à l'échelle de leur territoire. Ils sont composés des autorités publiques (Maire, CASEC, ASEC, police, juge de paix) et des organisations départementales, communales et locales. Un cadre de la DPC coordonne les activités sur le terrain pour chaque comité départemental.

L'organisation en place en cas de risque matérialisé (urgence)

En cas d'évènement à risques matérialisé (urgence), le SPGRD se transforme en Centre d'Opération d'Urgence National (COUN).

Le diagramme suivant présente le schéma de fonctionnement de la gestion de risque en Haïti (FIG. 3):

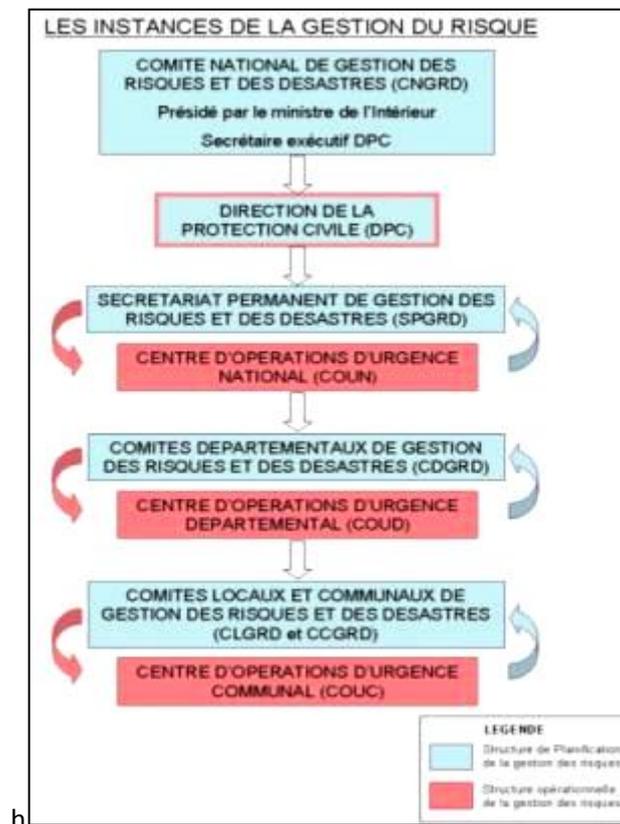


Fig. 3 Schéma de synthèse du fonctionnement de la gestion du risque en Haïti

(Source S. Mora Castro, 2010)

Faiblesses du système

Le système est faible et parmi les principales faiblesses il faut noter:

- L'absence de capacité d'intervention liée au manque de ressources (matérielles, humaines et financières),
- Une décentralisation inachevée (les comités communaux n'existent que dans 110 de 265 communes du pays),
- Le manque de continuité en politique, lié à l'instabilité politique du pays.

Le SNGRD ne peut pas faire une politique de prévention des désastres (gestion des causes) car il manque d'une structure réelle l'obligeant prioriser la gestion des catastrophes naturelles plutôt que leur préparation.

Cette approche est très couteuse et n'est pas efficace au niveau de la réduction des risques sur le long et le moyen terme et n'a pas permis d'investir durablement et rentablement, ni de profiter des bénéfices économiques d'une stratégie de prévention des désastres.

Les projets de la Welthungerhilfe

La Welthungerhilfe intervient en Haïti depuis 1975. Depuis le 12 Janvier 2010 l'organisation a orienté ses interventions dans le cadre d'un programme de cinq ans (2010-2014), élaboré à partir du plan d'action du gouvernement haïtien.

La prévention des catastrophes naturelles est le domaine d'intervention prioritaire de ce programme, dont le projet financé par le programme DIPECHO, est l'un des projets phares.

Le projet « *Disaster Risk Reduction in Haiti: Enhancing disaster preparedness and awareness capacities in three multi-risks exposed communities* », a débuté le 1er juillet 2011 pour une durée de quinze mois.

Ce programme vise à accroître la résilience et à réduire la vulnérabilité de la population des trois communes ciblées, via un renforcement des capacités institutionnelles (DPC) et une gestion communautaire des risques liés aux catastrophes naturelles.

C'est dans le cadre de la mise en place de ces objectifs que l'évaluation technique des menaces naturelles a été effectuée.

L'étude technique d'évaluation des multi menaces naturelles devrait permettre d'atteindre trois objectifs :

- 1) Constituer un instrument technique de référence pour l'évaluation quantitative, spatiale et temporelle des menaces afin d'exécuter une politique de prévention des désastres dans la planification du territoire.
- 2) Améliorer les capacités techniques, la méthodologie de travail et les connaissances des risques naturels et la gestion des causes des autorités nationales et locales DPC/CLPC/CASEC/ASEC et mairie.
- 3) Fournir un outil de comparaison entre l'évaluation des menaces réelles et celles qui sont perçus par la communauté à travers autres sources d'enquête conduit par la Welthungerhilfe en parallèle.

Méthodologie d'étude et cadre des menaces en Haïti

Objectifs

Les objectifs de cette étude dans les trois communes de Petit Goâve, Grand Goâve et Jacmel, sont les suivants:

- A₁ Identification quantitative et qualitative des menaces;
- A₂ Élaboration des scénarios d'exposition des édifices et lieux publics;
- A₃ Proposition d'actions de réduction et mitigation des risques;
- A₄ Amélioration de la connaissance de la DPC, CLPC, CASEC, ASEC, des ONGs et des partenaires opérants dans les secteurs de réhabilitation et aménagement du territoire.

Selon les menaces à analyser, le temps disponible, la qualité et quantité des données existantes et collectées pendant l'étude, nous avons sélectionnées et priorisées les analyses et les études suivantes :

B₁ Analyse des menaces d'inondation (fréquente, rare et exceptionnelle). Élaboration des cartes des menaces avec les aléas en fonction des hauteurs d'eau pendant les grands événements cycloniques, les points d'érosion des berges* et les brèches* dans les gabionnages.

B₂ Analyse des menaces des glissements de terrain. Élaboration des cartes des zones susceptibles aux détachements des glissements de terrain (débris flow*, chute de blocs*, écoulements lent*, rotationnelles* et translationnelles*);

B₃ Évaluation des menaces de cyclone et élaboration des cartes de « densité végétation » pour chaque bassin versant.

B₄ Évaluation du degré des menaces auquel sont exposées les structures publiques (marchés hôpitaux/centres de santé, écoles, églises).

L'étude a été développée avec la participation et collaboration du CNIGS pour la fourniture des cartes, des photos aériennes, des bases de données, de la bibliographie ainsi que dans le cadre de la collaboration pour la mise en place de stratégies d'études et typologie des cartes.

Pendant l'étude nous avons priorisé la collaboration et la formation avec les institutions locales des DPC, CLPC, CASEC, ASEC afin d'obtenir:

- C₁ L'amélioration de la connaissance au niveau des menaces de l'environnement (cyclones, séisme, tsunami, glissements, inondations);
- C₂ La sensibilisation des autorités locales à une planification soignée de l'espace urbain : aménagement territorial pour réduire le degré d'exposition.
- C₃ La sensibilisation des autorités locales au respect et la conformité avec les normes et bonnes pratiques afin de réduire considérablement la vulnérabilité.
- C₄ La sensibilisation des autorités locales à exécuter une politique de prévention aux désastres.

Présentation administrative des trois (3) communes de Petit Goâve, Grand Goâve et Jacmel

L'étude a été mise en place sur les trois communes et organisée par sections communales.

Dans l'ANNEXE 9 les images représentent les limites administratives et les noms des sections communales sur les trois communes (de FIG 4 à FIG 6).

Analyse des menaces naturelles, la vulnérabilité et le risque en Haïti avec détails pour les trois communes

À travers l'élaboration en SIG des données des bases existantes et de la photo-interprétation* les cartes suivantes ont été obtenues (cf ANNEXE 9 de FIG. 7 à 15).

- La configuration physiographique et celle du relief haïtien, représentée par le modèle numérique DEM* avec maille 10 (source USGS-NASA et extraite de l'étude de l'équipe NATHAT de Sergio Mora, Banque Mondiale), fut obtenue par l'élaboration de la carte topographique à 1:250.000 de 1978, FIG 7; Ce DEM présente des imperfections dans les zones plaines.
- La configuration physiographique des trois (3) communes étudiées est représenté avec le "ASTER GDEM 2" * avec maille 30 (source METI - NASA), FIG 8. L'acquisition a été faite par interférométrie radar dans l'année 2010, donc est plus récente et précis du DEM* 10. Ce DEM* a été utilisé pour les élaborations des cartes des aléas des inondations et pour les calculs de susceptibilité* aux glissements de terrain.
- La carte des pentes dans le trois (3) communes élaborée en SIG avec le Aster GDEM 2*, FIG 9.
- La carte du réseau hydrographique extraite de l'Aster GDEM 2*, photo-interprétation*, études de terrain et données du CNIGS, FIG 10.
- La carte des bassins versants* extraite avec l'élaboration en SIG du Aster GDEM 2*, photo-interprétation* et études de terrain, FIG 11.
- Les cartes géomorphologiques, géologiques et hydrogéologiques, élaborées par le Bureau de Mine et Énergie à l'échelle 1:250.000, FIG 12, 13 et 14.
- La carte de « densité végétation » élaborée par photo-interprétation* effectuée par *l'Institute for Applied Remote Sensing" dell'European Academy of Bolzano, Italie*, FIG 15.

Ces données ont été utilisées pour définir et décrire l'influence des unités lithologiques et géomorphologiques dans la matérialisation des glissements de terrain, inondations, impact cyclone, liquéfaction*, sismiques etc.

La menace sismique et tsunami en Haïti

Haïti est une région sismique très active et le séisme du 12 Janvier ne fut pas une surprise, ce n'était qu'une question de temps par rapport au dernier séisme à forte amplitude de l'année 1842.

Le séisme s'est produit sur une faille transforme que sépare les deux plaques tectoniques (les plaques de la Caraïbe et de l'Amérique du Nord), FIG 16, qui glissent l'une sur l'autre; le mouvement est horizontal avec un mouvement relatif vers Ouest-Nord-Ouest, respect la plaque Américaine avec un taux de 2cm/an (DeMets et al. 2000).

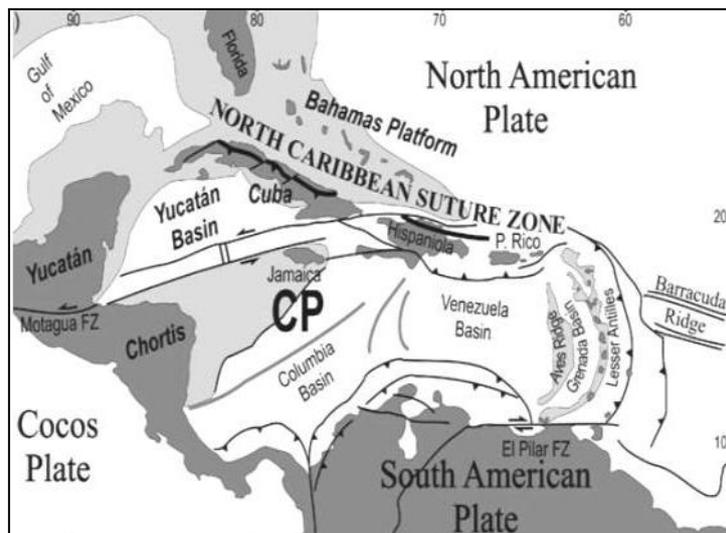


Fig. 4 Limite nord de la plaque des Caraïbes, avec le contact de la plaque Nord-américaine. Les séismes sont représentés par des cercles avec leur profondeur indiquée par les couleurs (images de l'étude de NATHAT, Sergio Mora)

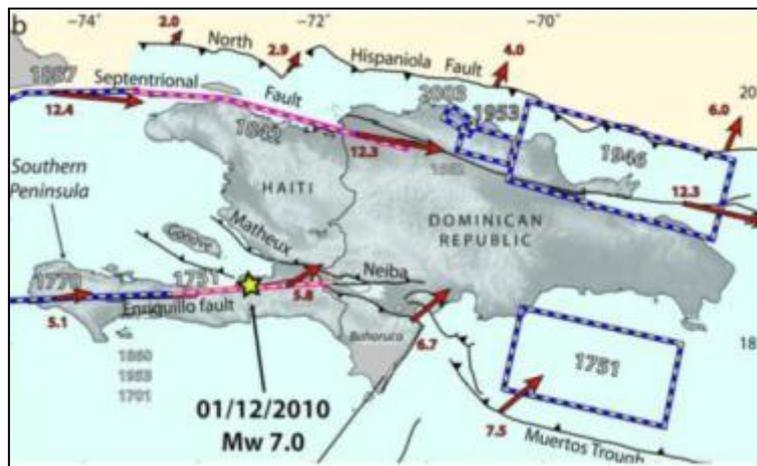


Fig. 5 Failles actives majeures d'Hispaniola, avec les dates des séismes historiques qui leurs sont attribuées (Mann et al. 2002; Calais et Haase, 2010).



Fig. 6 Limite nord de la plaque des Caraïbes, avec le contact de la plaque Nord-américaine. Les séismes sont représentés par des cercles avec leur profondeur indiquée par les couleurs. (Mann et al. 2002; Calais et Haase, 2010).

Les éruptions volcaniques et les séismes dans les Caraïbes, sont les résultats des processus géodynamiques qui se produisent aux limites des plaques tectoniques majeures.

Sur le bord Nord de la plaque Caraïbe le mouvement relatif, par rapport à la plaque Nord-américaine est de 18-20mm/an en déplacement oblique par rapport à la limite des plaques à l'Hispaniola (DeMets et al. 2000; Dixon et al. 1998). À Hispaniola, où le mouvement est oblique, il y a des failles de décrochement qui produisent des séismes peu profonds et la subduction mène à la production de séismes par des failles inverses plus profondes (Mann et al. 2002).

Les zones de failles principales (fig 16 et fig 17) qui menacent Haïti au long de cette limite des plaques sont:

-A₁ **La faille Septentrionale au nord d'Hispaniola**, où les contraintes se sont déjà accumulées pour générer un séisme M≈7.5 en République Dominicaine (Manaker et al. 2008) et un séisme M≈6.9 dans la section de la faille au nord d'Haïti en 1842 (Tanner et al. 1997). Cette faille représente une menace de tsunami significative. Elle se poursuit le long de la marge sud de Cuba, où elle a une composante inverse importante et donc une capacité majeure à déclencher des tsunamis. Un séisme sur cette faille serait une menace très forte pour la zone de Port-au-Prince et aussi sur les zones littorales de la Grande Anse, Nippes, et l'Artibonite.

-A₂ **La faille d'Hispaniola du nord** prend une partie des mouvements perpendiculaires à la limite de la plaque, où elle se prolonge à l'est de la fosse de Puerto Rico. Elle pourrait produire un séisme de M≈7 à 7,5 (LaForge et McCann, 2005) et des tsunamis.

-A₃ **La fosse de Muertos** a les caractéristiques de sismicité d'une zone de subduction, où un séisme s'est produit en 1751 avec un tsunami (McCann, 2006).

-A₄ **La faille Enriquillo-Plantain Gardens**, sur le côté sud d'Haïti, passe à proximité de la capitale, Port-au-Prince, avec environ 5 à 6 mm/an de déformation, ce qui a conduit à estimer la possibilité d'un séisme M≈7.2 (Manaker et al. 2008). La longueur de la zone de faille Enriquillo Plantain Gardens, à partir de la limite de la rupture 2010 jusqu'à l'intersection avec les failles inverses de la fosse Muertos et Neiba à l'est, est d'environ 55km.

Le lac Enriquillo est situé dans une vallée formée par la faille Enriquillo-Plantain Garden, FIG 19 et 20, qui s'étend sur 127 km de Port-au-Prince en Haïti à l'ouest, à la baie de Neiba en République dominicaine à l'est. La faille transformée Enriquillo-Plantain Garden n'est pas parfaitement parallèle à la direction du mouvement des plaques et donc provoque une compression dans une grande partie du sud de Haïti (Calais, E. *et al* (2010).

Les *failles* de chevauchement* et les *plis compressifs** causent le déplacement vers le haut des roches. Ces mouvements verticaux sont responsables de la formation des îles des Caraïbes (Prentice, C. *et al.* (2010), Pubellier, M., Mauffret, A., Leroy, S., Vila, J. M. & Amilcar, H.(2000).



Fig. 7 Vallée de la faille Enriquillo–Plantain Garden (vue de l'Ouest) image de Natural Géosciences.



Fig. 8 Tracé superficiel de la faille Enriquillo-Plantain Garden.

La faille s'étend de Pétionville, de l'est vers l'ouest, le long des vallées linéaires très visibles des rivières Forse et Momance. L'épicentre du séisme M 7.0 du 12 janvier est montré par une étoile rouge (image d'étude NATHAT, Sergio Mora Castro).

A₅ La faille de Léogâne (dans la zone de faille Enriquillo Plantain Gardens)

Cette faille a rompu lors du séisme M≈7,0 du 10 janvier 2010. Un séisme de ce genre et sur cette faille n'était pas inattendu étant donné que les mesures GPS de déformation de la croûte, ont indiqué que la contrainte s'accumulait à travers la zone de faille Enriquillo-Plantain Gardens à un taux de 5,8mm/an (Calais et al 2010; Manaker et al 2008). Cependant, aucune rupture de la faille en surface n'a été trouvée (Prentice et al 2010). Les comparaisons de la surface du sol en proximité de l'épicentre avant et après le séisme enregistrées avec un satellite radar et les données GPS, montrent clairement déplacement horizontal relatif du sol. Normalement pour un séisme de magnitude de Mw 7, le déplacement doit être un mètre ou plus, mais la surprise été de trouver que le 33-51% des déplacements du sol observés en Janvier 2010 été de convergence et soulèvement, au nord de la limite de plaque près de la ville de Léogâne. La surprise été forte quand on a constaté que le séisme à inversé le sens du soulèvement des montagnes en Haïti en causant subsidence par rapport à la mer et le soulèvement des communautés coralliennes de 60 cm et exposition au sur de Léogâne, FIG 21.



Fig. 9 Image de Google Earth © avec les zones de soulèvement des communautés coralliennes "reef appears to have been thrust above sea level.". (Source MarkoPolo, Jacen Solo, Google Community, 2010, <http://bbs.keyhole.com/ubb/ubbthreads.php?ubb=showprofile&User=290906>)

Dans la tableau suivant les événements historiques désastreux en Haïti pour lesquels existent des données disponibles et précises :

Séismes			Nombre de personnes	
Date		Localisation	Mortes	Affectées
9 nov.	1701	Léogane	7	121
15 sep	1751	Port-au-Prince	16	229
21 nov.	1751	Port-au-Prince	31	301

3 juin	1770	PAP, Léogane	250	250
20 nov.	1818	Cap Henri, Gonaïves	5	85
7 mai	1842	Cap H, Pt-de-Px, Gonaïves	5.500	15.000
8 mai	1842	Cap-Haïtien, fort Liberté, Gonaïves	19	646
11 mai	1910	Cap-Haïtien, Gonaïves	2	77
6 oct.	1911	Hinche, Gonaïves	9	22
27 mai	1924	Port-de-Paix	3	3
27 oct.	1952	Anse à Veau, Nippes	6	6
SOUS-TOTAL			5.952	21.370
12 janv.	2010	PauP, Léogâne, Jacmel, Grande et Petite Goâve	230.000	3.700.000
TOTAL			235.952	3.721.370
<p><u>Sources:</u> 1701-1963/Observatoire du Petit Collège Saint-Martial (in Mora, 1986); 1968-1985/Croix Rouge Haïtienne; 1983-1997/ OPDES; 2000-2001/DPC; 2002-2008/CRED; sept 97 à oct 2000 et oct 2002 à avril 2003/Période manquante d'information</p>				

Fig. 10 Liste des évènements historiques désastreux d'origine sismique en Haïti relevés depuis 1701.

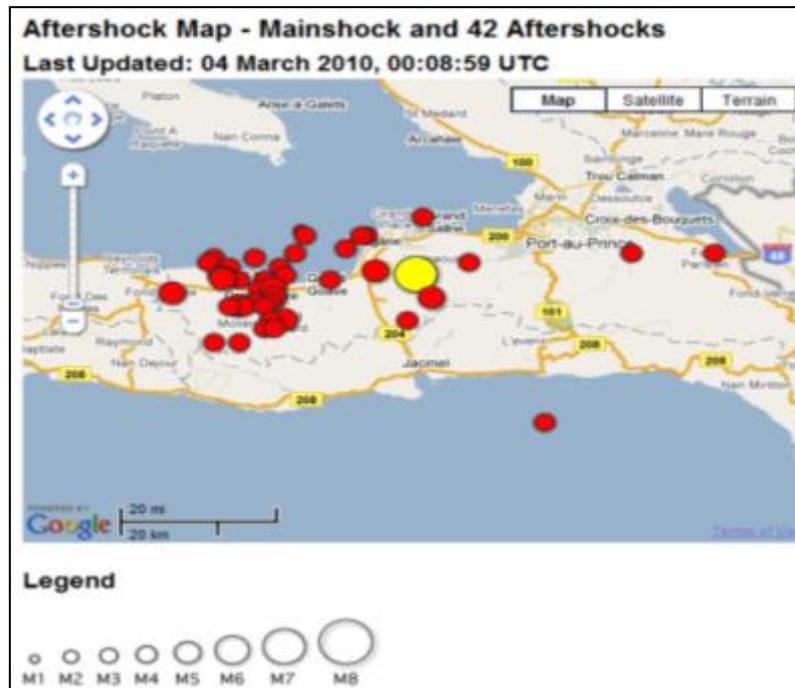


Fig. 11 Épicentres du séisme du 10 janvier 2010 et des répliques principales

La cumule entre le mouvement de « convergence » et le mouvement « transforme » du système de faille, n'est pas encore définit, car il n'y a pas suffisamment d'instrumentation de contrôle (sismographes) pour comprendre exactement la localisation des mouvements, typologie et intensité.

Les études géophysiques en cours montrent que le séisme du 12 janvier 2010 en Haïti résulte d'un déplacement d'environ 4m pendant 10 secondes et qui a rompu une portion de faille d'environ 40km de long, entre Petit Goâve et Gréssier, FIG 23.

Amplification locales des ondes sismiques et zonage

Avant de reconstruire il devrait être bien définis l'effort des ondes sismiques sur les bâtiments et les zones d'amplification sismique. À distance de 2 ans il n'y a pas suffisamment d'études et information pour planifier une reconstruction, et déjà plusieurs bâtiments publics, maisons, structures touristiques ont été reconstruits exactement comme, et où, ils étaient construit avant le séisme. Pendant les secousses du 12 janvier, les bâtiments ont fluctué pour 35 secondes avant de s'effondrer.

L'amplitude du mouvement dépend aussi des caractéristiques géologiques, morphologie et topographie du sol et sous-sol. Ces propriétés déterminent le facteur d'atténuation des ondes sismiques ou d'amplification. Les terrains peu compétents tels que les sédiments meubles ou alluvions amplifient le mouvement du sol par rapport aux terrains rocheux.

Hough, S. et al. (2010) ont observé comment les parties de Port Au Prince situées dans les sédiments peu compétents et les parties situées dans crête rocheux ont répondu aux mouvements sismiques "*after shock*"* qui continuent à Port Au Prince, FIG 23.

Les accélérations de mouvements du sol connus par des structures construites sur les sédiments meubles au nord de la ville étaient, comme prévu, à peu près le double de ceux expérimentés par les bâtiments situés sur le roc solide.

Mais il y a eu des exceptions, par exemple, il a été découvert que certains des mouvements forts du sol ne se sont pas produits sur les sédiments meubles, mais sur les crêtes où la ville a été construite. Par exemple, les mouvements du sol ont été amplifiés par un facteur de $3,6 \pm 0,7$ sur la crête sur laquelle l'Hôtel Montana a été construit, sa position a contribué clairement à son effondrement.

Hough et al. 2010 suggèrent que la morphologie et la topographie d'une ville, doivent être prises en compte afin de comprendre les zones d'amplification sismique.

Menace tsunami

Un quatrième document publié par Hornbach et al. 2010 s'étend à des études dans la région extracôtière, par la cartographie de la bathymétrie détaillée de la Baie de Grand-Goâve au nord de l'épicentre. Ils trouvent des failles dans les sédiments des fonds marins de la même direction du système Enriquillo-Plantain Garden. Ils ont découvert aussi nombreux glissements de terrain sous-marins, dont certains étaient manifestement déclenchés par la secousse de Janvier 2010, avec d'autres profondément enterrés associés aux séismes plus anciens.

Puisque le tracé de la faille d'Enriquillo-Presqu'île du Sud est essentiellement à terre, la probabilité d'un tsunami majeur est faible. Ceci dit, des glissements sous-marins ou l'étalement latéral, peuvent engendrer

des tsunamis locaux, comme il a été observé dans les régions de Jacmel et de Grand Goâve lors du séisme du 12 janvier 2010, les vagues tsunamigènes étaient de 3m près de Grand Goâve et ont causé 3 morts. De nombreux témoignages à Petit Paradis et Fauché (Grand Goâve) et aux Gonaïves confirment que ces vagues y étaient très significatives (S.M. Castro, 2010).

La déforestation d'Haïti a aggravé l'érosion et a produit des énormes volumes de sédiments instables sur les versants en bord mer, surtout en correspondance de l'embouchure des rivières.

Grosse quantité des sédiments causés par des taux élevés d'érosion, peuvent provoquer des tsunamis locaux

Dans le suivant tableau en FIG 24 les tsunamis en Haïti (HA) et République Dominicaine (RD) depuis 1751.

Date	Localization	«Runup» (m) et description	
18 Octobre 1751	Azua de Compostela, Santo Domingo (RD)	Vagues ont causé des dégâts	
3 Juin 1770	Arcahaïe, Port-au-Prince, La Saline, Golfe de la Gonave (HA)	Tsunami en HA	
11 Février 1775	Hispaniola	Tsunami a causé des dégâts importants	
7 Mai, 1842	Côte septentrionale d'HA	2,1m	97 personnes tuées à PauP et 19 à Cap Haïtian; 2130 affectés
	Port-de-Paix (HA)	4,6m	
	Santo-Domingo, (RD)	1,6m	
8 Avril 1860	Les Cayes, Aquin, Golfe de la Gonave (HA)	Tsunami en HA	
23 Septembre 1887	Anse d'Hainault, Golfe de la Gonave, Jeremie, Môle St. Nicolas (HA)	Tsunami en HA, 7 personnes tuées et 2.500 affectés	
4 Août 1946	Côte de Matancitas (RD)	2,4m; 1.790 personnes tuées	
	Northern coast of Hispaniola	4,6m	
8 Août 1946	Sabana del Mar, Santo Domingo (RD)	Tsunami en RD	
31 Mai 1953	Puerto Plata (RD)	Tsunami en RD	
12 Janvier 2010	Santo Domingo (RD)	5-15cm	
	Petit Paradis (HA)	3m	
Sources: 1701-1963/Observatoire du Petit Collège Saint-Martial (in Mora, 1986); 1968-1985/Croix Rouge Haïtienne; 1983-1997/ OPDES; 2000-2001/DPC; 2002-2008/CRED; sept 97 à oct 2000 et oct 2002 à avril 2003: période manquante d'information			

Fig. 12 Les tsunamis en Haïti (HA) et République Dominicaine (RD) depuis 1751.

Dans les figures suivants (FIG 25 et 26) les hauteurs des vagues tsunamigènes, la position géographique et les sources respectives.

Les côtes du Nord, les côtes caribéennes et de l'extrême Ouest d'Haïti sont très peu impactées par le tsunami (FIG 26), tandis que toutes les côtes de la baie, de Léogâne à la Baie-de-Henne, subissent des hauteurs significatives, allant de 1 à 3,5m.

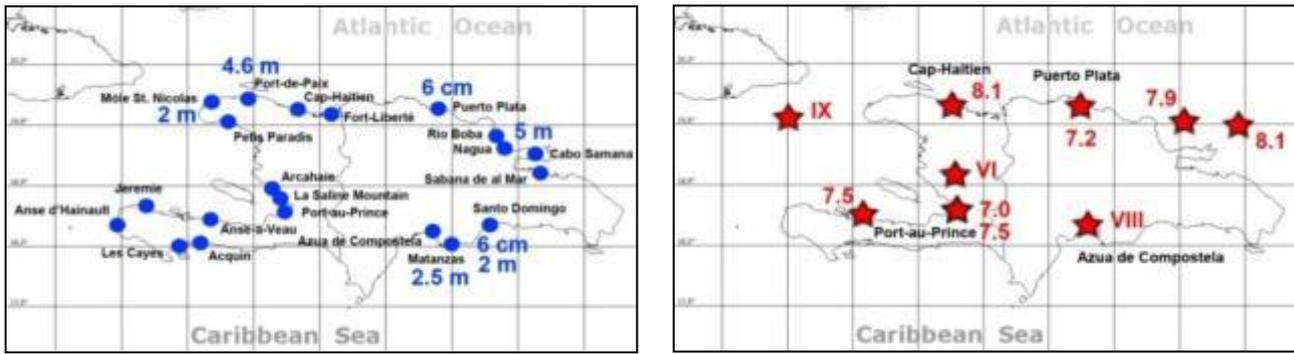


Fig. 13 «Runup» des tsunami et localisation des sources respectives (1751-2010).

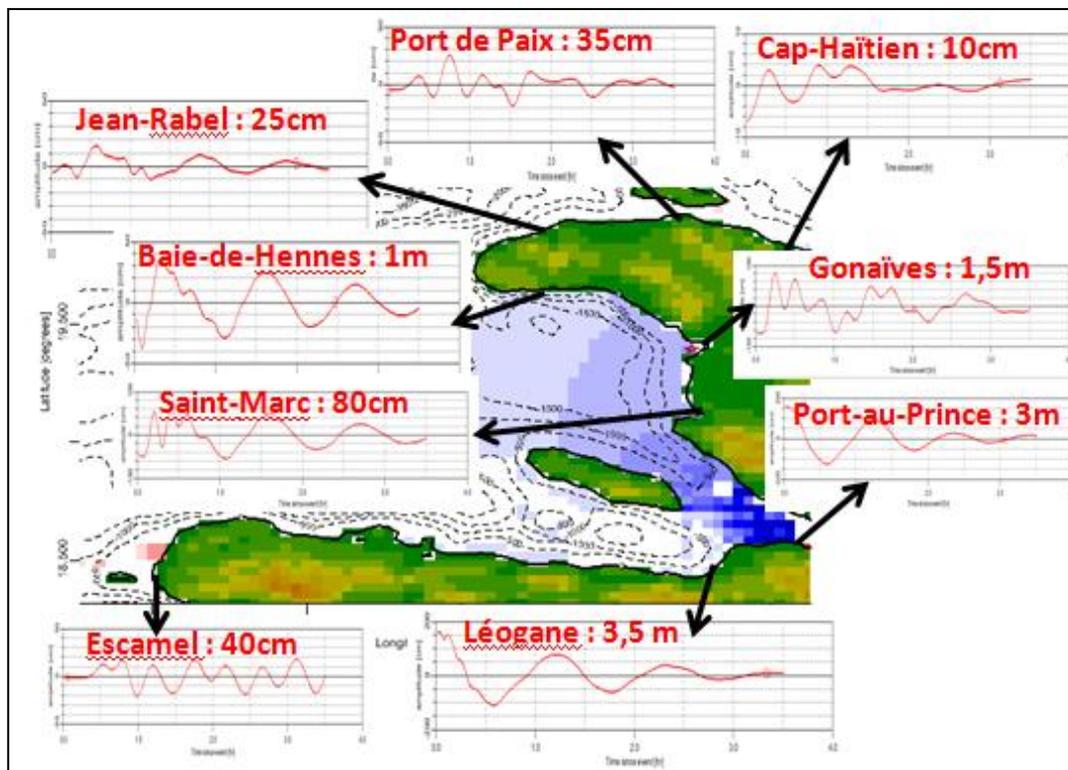


Fig. 14 Comparaison des hauteurs des vagues tsunamigènes pour un même évènement.

Incertitudes du future séismique de Haïti

La plus grande question est sur quand sera le prochain séisme.

Les documents scientifiques de *Nature Geoscience* expliquent les complexités associées à la frontière des plaques tectoniques près de Port-au-Prince, datent les séismes à partir de l'époque Pré-Colombienne.

Il n'existe pas encore de réponses aux questions qui préoccupent le plus en Haïti, concernant le calendrier et la magnitude des séismes à venir.

La vulnérabilité d'Haïti

La FIG 27 montre le nombre de personnes tuées et affectées lors des 10 désastres sismiques majeurs. Le cas d'Haïti, tant sur le nombre de morts que celui d'affectés (directement et indirectement) reste, parmi les plus importants de l'histoire, un des événements les plus impactant, du 20^{ème} siècle.

Il est important de souligner que parmi tous ces événements, la magnitude du séisme du 12 janvier en Haïti est la plus faible.

Séismes	Date	No. Total Affecté
China P Rep, Earthquake (seismic activity), M=8.1	5/12/2008	45.976.596
India, Earthquake (seismic activity), M=7.8	8/21/1988	20.003.766
India, Earthquake (seismic activity), M=7.7	1/26/2001	6.321.812
Pakistan, Earthquake (seismic activity), M=7.7	10/8/2005	5.128.000
China P Rep, Earthquake (seismic activity), M=7.9	2/3/1996	5.077.795
Guatemala, Earthquake (seismic activity), M=7.5	2/4/1976	4.993.000
Haïti, Earthquake (seismic activity), M=7.0	1/12/2010	3.700.000
Peru, Earthquake (seismic activity), M=8.0	5/31/1970	3.216.240
Indonesia, Earthquake (seismic activity), M=9.2	5/27/2006	3.177.923
China P Rep, Earthquake (seismic activity), M=7.7	11/1/1999	3.020.004
<u>Source:</u> "EM-DAT: The OFDA/CRED International Disaster Database; www.em-dat.net - Université Catholique de Louvain - Brussels - Belgium"		
Séisme	Date	No. Morts
China P Rep, Earthquake (seismic activity), M=8.3	7/27/1976	242000
Haïti, Earthquake (seismic activity), M=7.0	1/12/2010	222570
China P Rep, Earthquake (seismic activity), M=8.1	5/22/1927	200000
China P Rep, Earthquake (seismic activity), M=8.2	12/16/1920	180000
Indonesia, Earthquake (seismic activity), M=9.2	12/26/2004	165708
Japan, Earthquake (seismic activity), M=8.0	9/1/1923	143000
Soviet Union, Earthquake (seismic activity), M=7.8	10/5/1948	110000
China P Rep, Earthquake (seismic activity), M=8.1	5/12/2008	87476
Italy, Earthquake (seismic activity), M=7.2	12/28/1908	75000
Pakistan, Earthquake (seismic activity), M=7.7	10/8/2005	73338
<u>Source:</u> "EM-DAT: The OFDA/CRED International Disaster Database; www.em-dat.net - Université Catholique de Louvain - Brussels - Belgium"		

Fig. 15 Désastres sismiques ayant causé le plus grand nombre de morts depuis le 20^{ème} siècle, suivant les statistiques disponibles (www.em-dat.net)

La vulnérabilité en Haïti est liée aux:

B₁ Lacune des connaissances des éléments sismiques: il n'y a pas une connaissance de toutes les failles actives en Haïti, ni de leur période de récurrence. Un travail de terrain détaillé reste à faire.

B₂ Incertitudes sur les taux de sismicité en Haïti: l'absence de réseau sismologique ne permet pas de dresser un catalogue de la sismicité locale.

B₃ Incertitudes sur la nature du sol et du sous-sol: il n'y a pas en Haïti de mesure directe des vitesses des ondes sismiques de cisaillement* du sol et du sous-sol.

B₄ Absence d'études complètes d'amplification locale des ondes sismiques: la lithologie, typologie de sol, morphologie et topographie peuvent provoquer des zones d'amplification sismique, qui doivent être prises en compte pour la planification du territoire.

B₅ Absence d'études de résistance sismiques sur les bâtiments: pendant le séisme les bâtiments ont fluctué pendant 35 secondes avant de s'effondrer.

B₆ Absence d'une réglementation efficace au niveau de la construction, manque d'éducation, instruction et connaissances.

B₇ La condition de pauvreté, d'éducation, de contrôle de l'Etat.

Menace liquéfaction

La liquéfaction des sols se manifeste dans des zones le plus souvent plates, dans des matériaux granulaires fins (sable) et avec une nappe phréatique sommaire. C'est une menace difficile à repérer car elle n'a pas de signature morphologique et c'est donc par des analyses géotechniques qu'elle doit être étudiée.

Elle se manifeste que sous sollicitations sismiques intenses.

Elle représente le changement de comportement du sol, de l'état solide initial à un état liquide durant la période de plus fortes vibrations sismiques. Le sol, particulièrement lorsqu'il est composé de sables fins et saturés ou presque, se voit soumis à une augmentation transitoire des pressions hydrauliques interstitielles (pression de l'eau) et donc à la perméabilité et au volume, en même temps que la perte de sa résistance au cisaillement*. Le «gonflement» des couches liquéfiées typiquement induit l'extrusion mécanique des volumes d'eau mélangée avec le sol vers la surface, formant des «volcans» exhalations de sable et laissant des cratères et des coulées tout autour.

Facteur lithologique

À partir de la carte géologique de Cox et al. 2011, modifiée par Mora (2011), les lithologies ont été reclassées du rang 0 à 5 suivant leur susceptibilité à la liquéfaction. En ANNEXE 9 la FIG 28 montre le tableau de classification, description de la susceptibilité à la liquéfaction des unités lithologiques en Haïti (S.M. Castro 2010).

La FIG 29 montre la menace de liquéfaction en Haïti, (S.M. Castro et Saborio 2010).

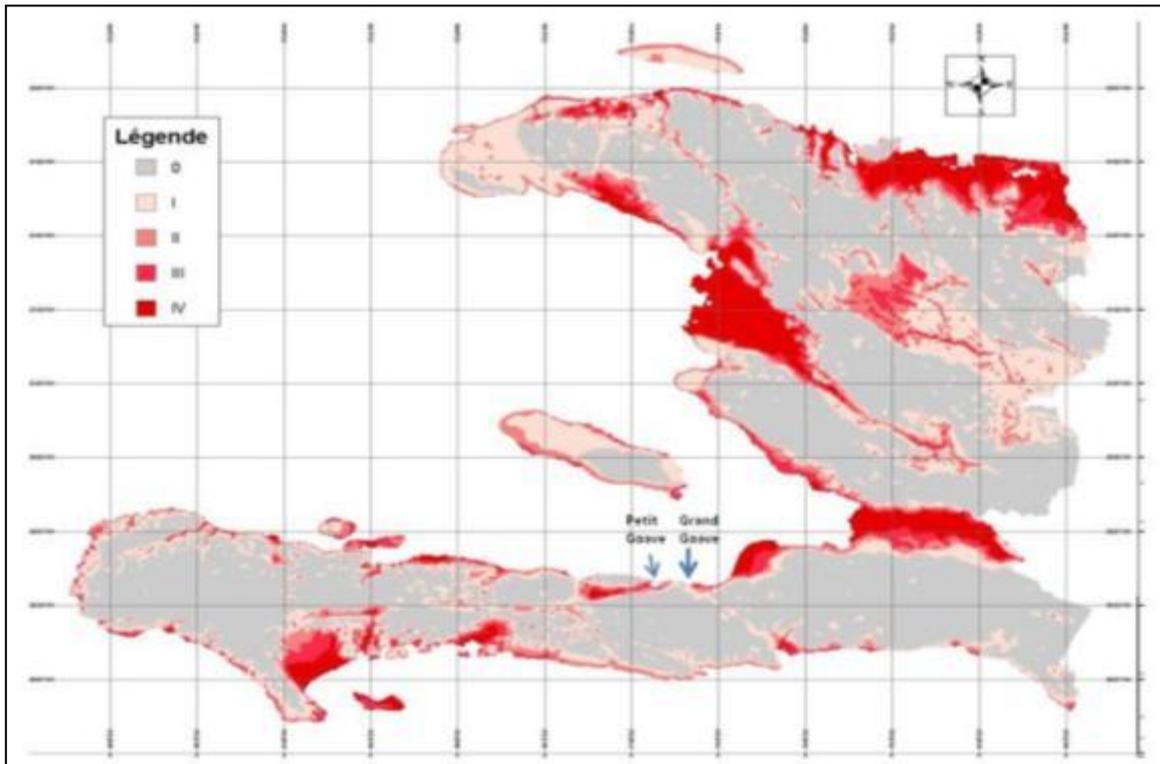


Fig. 16 Carte de liquéfaction en Haïti (Méthode Mora-Saborio, 2010, NATHAT)

Dans les images Google Earth© suivantes, les phénomènes de liquéfaction dans la commune de Grand Goave (7eme Section) à Fauché et à Petit Paradis, où pendant le séisme du 12 Janvier 4 personnes ont perdu la vie.



Fig. 17 Images Google Earth qui montrent l'effondrement à cause de liquéfaction à Grand Goâve localité Fauché à la zone d'embouchure de la rivière Lavagne, à gauche avant le séisme et à droite après le 12 Janvier 2012. (Sources données MarkoPolo, Jacen Solo, Google Community, 2010, <http://bbs.keyhole.com/ubb/ubbthreads.php?ubb=showprofile&User=290906>).



Fig. 18 Images Google Earth que montrent l'effondrement à cause de liquéfaction à Grand Goâve localité Petit Paradies à la zone d'embouchure de la Rivière de Grand Goâve, à gauche avant le séisme et à droite après le 12 Janvier 2012. (Sources données MarkoPolo, Jacen Solo, Google Community, 2010, <http://bbs.keyhole.com/ubb/ubbthreads.php?ubb=showprofile&User=290906>).

Menace volcanique

Bien qu'en Haïti, il n'y ait pas des volcans actifs actuellement, il est toujours possible que le territoire soit affecté par des effets secondaires issus de l'activité paroxysmale et celle d'un volcan situé dans l'arc des Antilles Mineures. Dans ce contexte, il serait toujours possible d'avoir l'influence d'un tsunami volcanogène et, suivant la direction des vents prédominants, des nuages de cendres et peut être des pluies acides. La Fig. 32 montre une image satellite de l'éruption du volcan Soufrière Hills à l'île de Montserrat du 12 octobre 2009 et la dispersion des plumes éruptives de pyroclastes fins dans la haute atmosphère.



Fig. 19 Éruption du volcan Soufrière Hills, Montserrat, le 12 octobre 2009; (Source: <http://www.ssd.noaa.gov/VAAC/vaftad.html>)

Menaces hydrométéorologiques et climatiques: sécheresses, cyclones, inondations

Haïti, est situé au Nord de la Caraïbe avec un climat tropical. La saison des pluies s'étend d'Avril à Juin/Juillet et s'intensifie dans la période d'Octobre-Novembre. La saison cyclonique s'intercale de Juin à Novembre. Pendant l'hiver boréal, l'influence des fronts polaires peut aussi apporter des pluies importantes comme celles qui ont affecté la Presqu'île du Sud à la fin de Février et au début de Mars 2010. Au cours de ces périodes les processus atmosphériques peuvent être intenses et provoquer des fortes précipitations suivies d'inondations et glissements de terrains.

Les sécheresses et El Niño Oscillation Sud (ENOS)-2011

Des déficits prolongés dans le bilan hydrique se sont présentés de manière récurrente en Haïti. Pendant le 20ème siècle les documents historiques montrent des épisodes en 1923-24, 1946-47, 1958-59, 1966-68, 1974-1977 et 1981-1985 (Mora et al. 1986). Ces périodes de sécheresse comportent des baisses considérables dans la productivité agricole et dans l'approvisionnement en eau potable, conduisant à des conditions de vulnérabilité alimentaire, des famines, maladies et à la dégradation intense des terres.

Les régions les plus touchées de manière chronique par des périodes d'augmentation de la vulnérabilité alimentaire ont été recensées par la FAO (2002). L'origine des sécheresses en Haïti peut être connectée et corrélée avec les épisodes «chauds» intenses d'El Niño/ENOS.

La sécheresse, a été l'une des menaces naturelles de plus fort impact dans l'histoire du pays.

La figure 33 montre les zones dans les trois communes, les plus touchées par les sécheresses.

Dans l'ANNEXE 9 le Tableau 34 avec une liste d'évènements de sécheresses relevés depuis 1726 en Haïti.

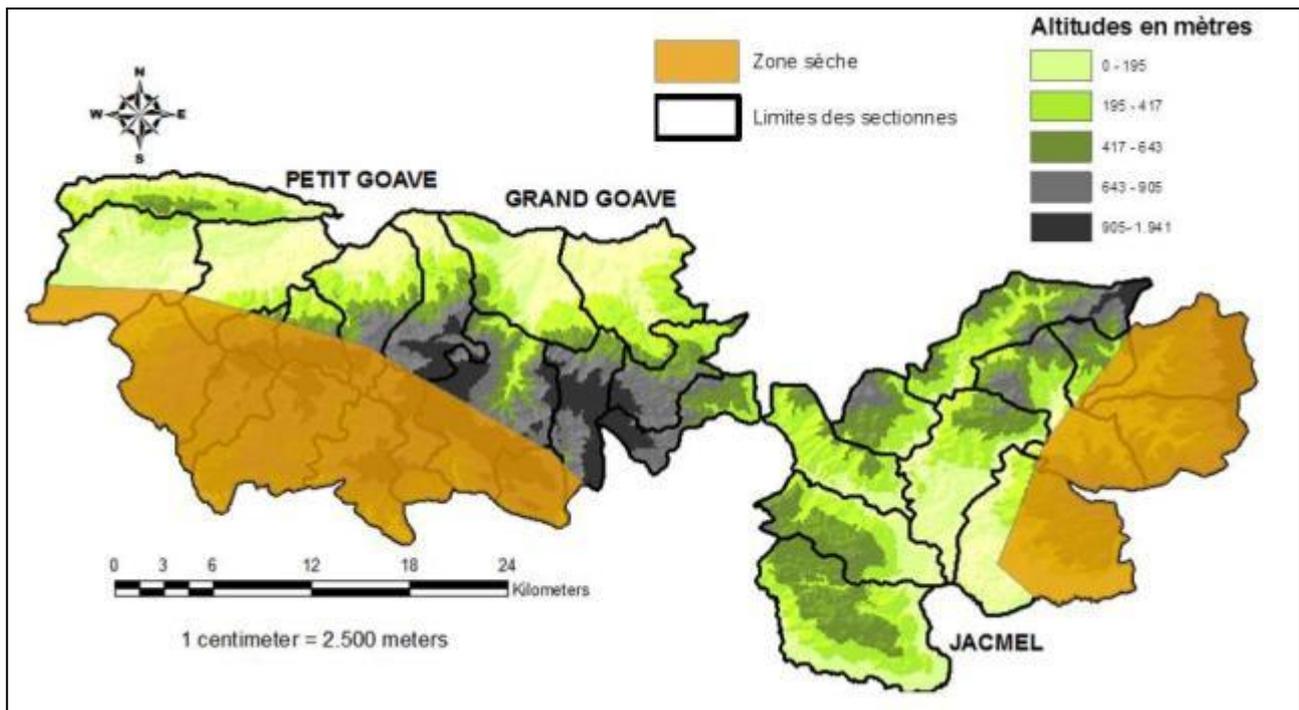


Fig. 20 Zones intéressée par sécheresse (source S. Mora Castro, NATHAT) et ASTER GDEM2 maille 30 (Source NASA-METI)

Cyclones et inondations

Haïti se trouve sur la route des cyclones et des tempêtes tropicales dont la saison se situe entre Juin et Novembre.

Les services des météorologies ont permis de déclencher des systèmes d'alerte, mais les pertes en vies humaines et les dégâts matériels dus aux vents et aux inondations ont été considérables à cause de:

- La faiblesse des infrastructures publiques;
- La fragilité des habitations;
- Haut degré de déforestation;
- L'absence de planification du territoire ;
- La faiblesse du système d'alerte précoce

Au cours de la saison des pluies et plus particulièrement au cours de la saison cyclonique, comme l'ensemble du bassin de la Caraïbes, Haïti est principalement soumis à des perturbations (orages* plus ou moins organisés), parfois influencées par la Zone de Convergence Intertropicale et véhiculées d'Est en Ouest par les alizés (circulation moyenne de l'atmosphère) et des ondes tropicales. Ces perturbations de basse pression peuvent évoluer vers une cyclogenèse tropicale et donner naissance à des systèmes cycloniques générateurs d'abondantes précipitations et des vents intenses. La plus part des trajectoires cycloniques traversent l'île d'Hispaniola d'Est en Ouest.

L'activité cyclonique de l'année 2008 a été particulièrement importante en Haïti. Quatre cyclones ont généré des impacts significatifs sur une période de moins de trois semaines (entre le 16 août et le 8

septembre 2008): la tempête tropicale Faye et les ouragans Gustav, Hanna et Ike. En 2010, l'ouragan Thomas a aussi causé des dégâts.

Récemment, les événements météorologiques à l'origine des inondations ont été très fréquents en Haïti, avec notamment le passage de plusieurs cyclones.

En ANNEXE 9 la fig. 35 montre le tableau du recensement des cyclones tropicaux ayant occasionnés des dégâts importants de 1935 à 2008 (Source: Centre National de Météorologie d'Haïti).

Les cyclones et les dépressions tropicales dans une moindre mesure, peuvent générer des problèmes de submersions marines. La côte Sud est particulièrement sensible à ce genre de situation.

Pour le zonage de la menace inondation il y a trois types de contextes (méthode Sergio Mora Castro, 2010, NATHAT).

A1 Orages convectifs: Le Centre National de Météorologie d'Haïti (CNMH) a évalué leur capacité de produire des pluies de jusqu'à 200mm en quelques heures, sur des surfaces très localisées. C'est une menace de type «fréquent».

A2 Les ondes tropicales concernent des perturbations beaucoup plus larges, avec des cumuls de 400mm en 24 heures. C'est une menace de type «rare»

A3 Les cyclones (tempêtes et ouragans) et les fronts froids peuvent apporter autour de 600mm/24h, voire plus. Ils peuvent concerner l'ensemble du pays (en 1994 Gordon). C'est une menace de type «exceptionnel»

En ANNEXE 9 dans les FIG. 36 et 37 les listes des événements historiques désastreux en Haïti pour lesquels existent des données concernant leur date, type (cyclonique ou non-cyclonique), localisation et dégâts produits.

Érosion

Les figures 38 et 39 (Source: CATHALAC; www.servir.net) montrent la distribution des zones les plus menacées par l'érosion intense et la perte des sols dans la région sud d'Haïti (i.e. Cul-de-Sac, Port-au-Prince, Massif de la Selle, Jacmel, Léogane, -Petit Goâve). Dans une grande proportion, la menace d'érosion est «moyenne» et peut atteindre aussi des niveaux «très graves» dans des zones assez larges en Haïti. La carte ne décrit pas la méthodologie appliquée pour sa construction.

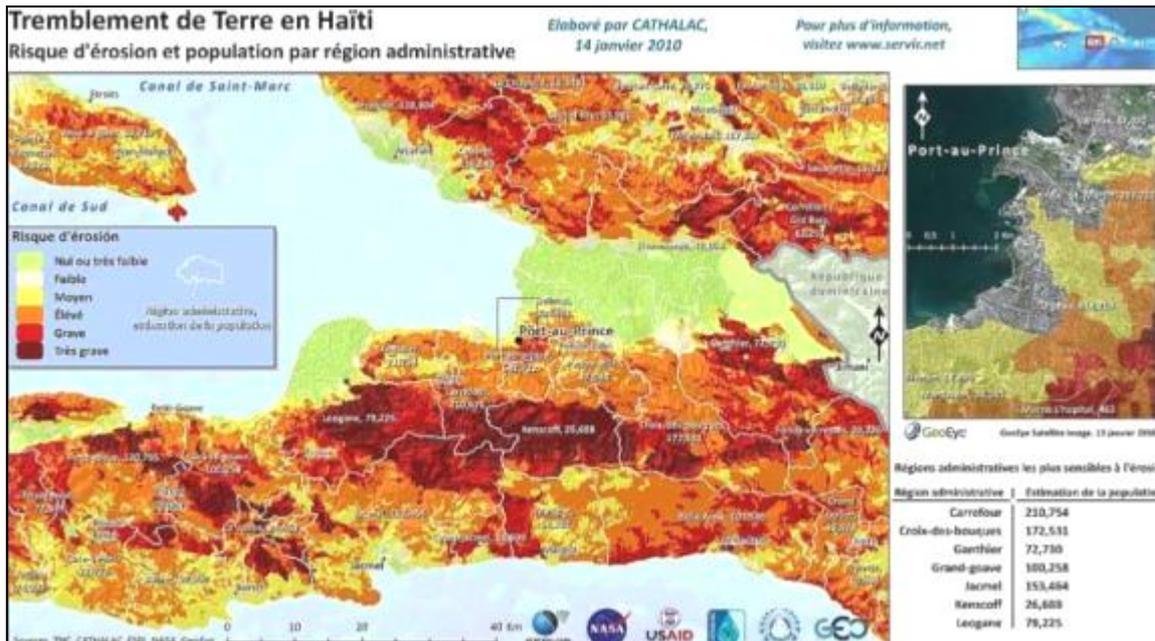


Fig. 21 Zones les plus menacées par l'érosion intense et la perte des sols dans le sud d'Haïti (CATHALAC; www.servir.net)

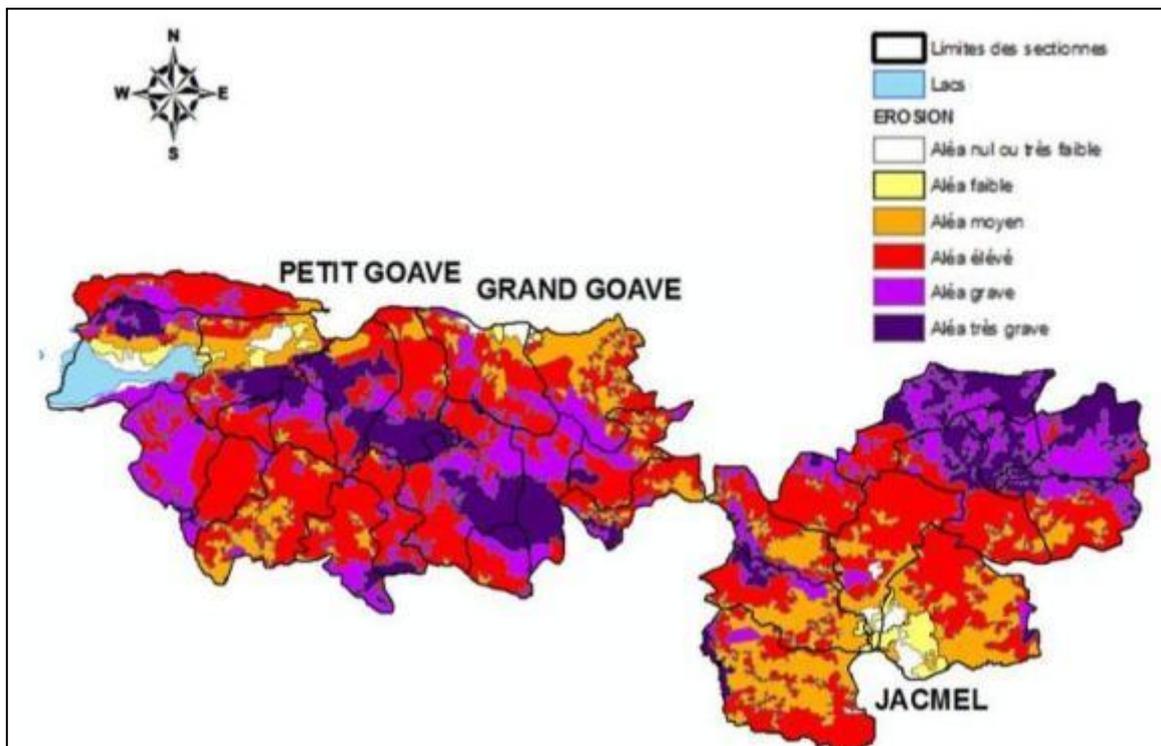


Fig. 22 Carte d'érosion (source CATHALAC, élaborée par A. Lentini)

Érosion et inondation côtières

A cause de sa position géographique et de son contexte géodynamique, Haïti est régulièrement sous la menace des tsunamis dérivés des séismes, des éruptions volcaniques, des cyclones tropicaux et à plus long terme la montée des eaux marines. Ces menaces naturelles causent des menaces liées à l'inondation marine (submersion) et à l'érosion côtière. Les populations, l'infrastructure et les activités économiques dans les zones littorales sont donc exposées et vulnérables face aux menaces côtières.

Les sources de menaces côtières proviennent généralement de l'action des vagues dues au vent local, de la houle générée par des perturbations atmosphériques, des tsunamis et de l'érosion, auxquelles il faut rajouter les menaces d'inondations liées à l'augmentation -à long terme- du niveau de la mer sous l'influence du changement climatique.

La zone littorale est impactée par les déséquilibres «érosion-sédimentation» provoqués par l'évolution naturelle de la dynamique côtière et par l'action anthropogénique.

La détérioration des récifs coralliens et la disparition des mangroves ou d'autres espèces végétales stabilisant et protégeant les vases et les dunes a renforcé le processus d'érosion du littoral. En plus de l'hypothèse de la menace d'inondation liée au changement climatique, l'augmentation du niveau des océans et le retrait du trait des côtes constituent des facteurs additionnels aggravant potentiellement l'érosion.

Menace des glissements

L'état de la connaissance sur les mouvements des terrains en Haïti

Il y a un seul inventaire disponible et très partiel des mouvements des terrains.

Le tableau de figure 40 présente une liste d'évènements de mouvements de terrain désastreux pour lesquels des données sont disponibles.

Notre étude révèle qu'il y a plusieurs événements qui ne sont pas enregistrés même s'ils ont causés des morts et des dégâts. A chaque saison des pluies et cyclones force est de constater qu'il y a de nombreux dégâts et morts dus aux glissements de terrains.

Mouvements de terrains				Nombre des personnes	
DATE		TYPE	LOCALISATION	MORTES	AFFECTEES
22 oct	1954	Glissem.terrain	Berly	262	4.250
19 nov	1963	Glissem terrain	Petionville	16	500
29 jan	1988	Glissem.terrain	Treuil G.Morne	5	30
16-22oct	1989	Glissem. terrain	Delmas 32 PAP	3	1.000
2 oct	1994	Glissement terrain	Port-Salut	1	20
23 mar	1996	Glissement T.	Port Margot	6	8
28-29mai	1996	Glissement T.	Cité Mil. PI Moral	1	6
15 juin	1996	Éboulement	Ganthier	1	20
20 juin	1996	Glissement T.	Guillaumonde SE	3	600
23 oct	1996	Eboulement	Carrefour	2	6
mai	1997	Éboulement	Carrefour	5	19
4 mai	2004	Coulée torrentielle	Malpasse, Mopou, riv. Fonds Parisien, Fonds Verrette, Grand Gossier	329	3.967
7 juin	2005	Glissements	Côtes-de-Fer	1	83
			TOTAL	635	10.509

Sources: 1701-1963/Observatoire du Petit Collège Saint-Martial (in Mora, 1986); 1968-1985/Croix Rouge Haïtienne; 1983-1997/ OPDES; 2000-2001/DPC; 2002-2008/CREDE; sept 97 à oct 2000 et oct 2002 à avril 2003/Période manquante d'information

Fig. 23 Événements désastreux causés par des mouvements de terrain en Haïti

Parmi les facteurs déclenchant, il faut mentionner les séismes occasionnant surtout des chutes de roches et les cyclones, les pluies et cyclones occasionnant principalement des écoulements rapides de débris.

Pendant le séisme du 12 janvier 2010 plus de 7000 glissements de terre ont été activés, FIG 41 (S. Mora Castro et al. 2011) et plusieurs personnes sont mortes. Ces glissements se sont formés dans des versants de pente entre 25°-65°.



Fig. 24 Glissements de terrain activés pendant le séisme du 12 Janvier 2012 (fresh landslides). ((Source MarkoPolo, Jacen Solo, Google Community, 2010, <http://bbs.keyhole.com/ubb/ubbthreads.php?ubb=showprofile&User=290906>)

Déforestation

La déforestation, FIG 42, des bassins versants renforce la vulnérabilité du territoire haïtien aux inondations, augmente l'impact des cyclones, augmente l'érosion, augmente la susceptibilité* aux glissements de terre et aux tsunamis (destruction des mangroves) etc., car la déforestation provoque les phénomènes suivants:

- L'accélération du ruissellement : les versants nus des montagnes ne présentant pas l'effet de protection fournis par la végétation en augmentant le *splash effect** de la pluie.
- La couche superficielle du sol est capable d'absorber que une certain quantité d'eau dans la phase initial des pluies ; dus aux précipitations, souvent très intenses et prolongées, l'eau ne viens plus absorbée par le terrain (avec comme conséquence une réduction du taux d'infiltration). Ce procès se traduit par des coefficients de ruissellement élevés (parfois supérieurs à 40% du volume d'eau) et des débits spécifiques très importants dans les ravines et rivières. Au cours des ces pluies, les temps de concentration entre "pic des pluies" et "pic de crue" provoque aussi le phénomène connue sous le nom: *flash flood**.
- L'augmentation du transport solide des rivières en crue : L déforestations accélère l'érosion des sols et augmente la charge solide (roches, sable, particules en suspension) des ravines et rivières. La quantité de charge solide est une menace pour les infrastructures (ponts, routes, habitations) se trouvant dans le lit des cours d'eau, et aussi pour la biodiversité littorale et marine.

- L'augmentation de l'ampleur des zones inondables. Les nombreux dépôts sédimentaires dans les plaines sur le littoral, ont pour conséquence l'élévation des chenaux d'écoulement* de la base des cours d'eau. Cela se traduit dans de nombreuses zones de plaine, par l'élargissement des zones d'expansion de crues, à cause de la réduction de la capacité hydraulique des cours d'eau. Ces zones plaines ne représentent pas des terrains exploitables au niveau de l'agriculture par manque de matière organique.
- La déforestation aggrave l'érosion. les glissements produisent d'énormes volumes de sédiments instables sur les versants (débris). Les cyclones, pluie ou séismes, peuvent générer des écoulements rapides de débris. Le manque de structure végétale réduit aussi le bio-clastisme*, les racines peuvent faciliter la fragmentation de la roche et augmenter le taux d'infiltration.
- La déforestation aggrave aussi l'impact des cyclones car il n'y a pas la protection des arbres contre le vent. L'effet de protection et réduction de la vitesse du vent peut être calculée en considérant la transmission optique de la végétation comme paramètre de densité d'obstacle à la pression effectuée par le vent. Moins d'obstacles sont présents, moins le vent subit une réduction de vitesse⁵
- La déforestation d'Haïti aggrave aussi la menace des tsunamis. Souvent les alluvions, surtout dans la zone d'embouchure de la rivière, effondrent à cause de liquéfaction. L'effondrement de ces sédiments génère des tsunamis locaux, dont plusieurs ont été observés peu après le séisme du 12 Janvier.

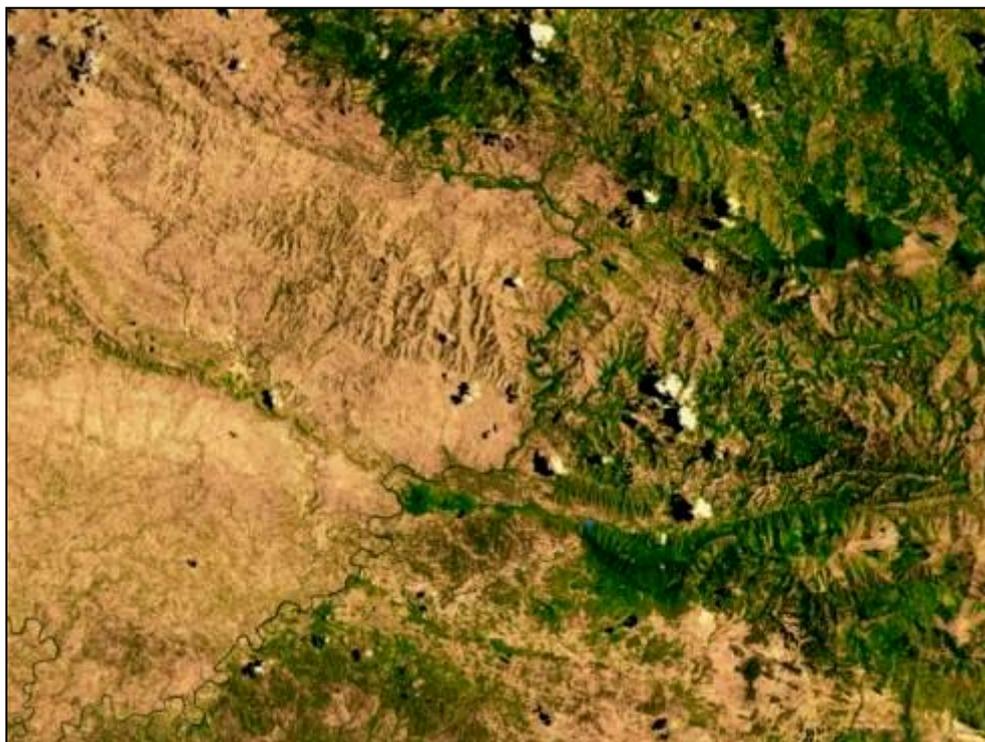


Fig. 25 Différence de couverture végétale entre Haïti à gauche et République Dominicaine à droite, zone de Anse à Pitre.

(Source: <http://svs.gsfc.nasa.gov> (NASA, Scientific Visualisation Studio).

⁵ L'analyse comprend plusieurs facteurs: typologie végétation, densité, élévation, morphologie du bassin versant, exposition aux directions préférentielles des cyclones.

Recrutement et formation de l'équipe

Six (6) ingénieurs dont trois (3) ingénieurs géologues, deux (2) ingénieurs agronomes et un (1) civil, pour le recensement des glissements de terrain et zones inondables et une (1) responsable pour la préparation de la base des données, ont été recrutés. Une formation technique a été organisée à leur intention, les trois premières (3) semaines de novembre 2011 au niveau d'évaluation de susceptibilité aux glissements et une deuxième la première semaine de Décembre en collaboration avec le CNIGS au niveau d'évaluation des menaces d'inondation.

Au cours de la première formation, les ingénieurs ont été instruits sur les sujets suivants :

A₁ Recensement et classification des glissements de terrain

A₂ Technique de remplissage des fiches de classification.

A₃ L'implication des autorités locales (CASEC, ASEC, CLPC, DPC) pour effectuer l'étude sur le terrain.

A₄ Méthodologie d'évaluation spatiale de susceptibilité aux glissements.

A₅ Lecture des cartes topographiques et de risques.

A₆ Utilisation de Google Earth®

A₇ Pratique de terrain.

Au cours de la deuxième formation, les ingénieurs ont été instruits sur les sujets suivants:

B₁ Approche hydro-géomorphologique pour l'étude de la menace inondation;

B₂ Photo-interprétation

B₃ Méthodologie d'évaluation des zones inondables et aléas.

B₄ Techniques de remplissage les fiches

B₅ Pratique de terrain.

Formation et collaboration avec les autorités locales (DPC, CLPC, CASEC, ASEC) et Nationales (CNIGS)

Des formations techniques ont été organisées pour les DPC, CLPC, CASEC, ASEC, et les ingénieurs des Mairies.

Au début du projet une présentation a été faite pour l'explication du projet et la méthodologie d'étude et pratique sur le terrain.

Le CNIGS a collaboré à la préparation des formations et aux pratiques de terrain.

Chaque semaine l'équipe des ingénieurs a rencontré les CASEC, ASEC et CLPC de chaque section communale afin de collaborer à l'évaluation sur le terrain des glissements et inondations.

En milieu et fin d'étude des rencontres de formation et présentation résultats de terrain avec l'ensemble des CASEC/ASEC/CLPC, DPC des chaque communes.

Pendant la présentation, la participation des autorités, aux discussions, a été active.

Un cours de formation SIG a été fait aussi avec les résultats de notre étude.

À la fin du projet les résultats et les cartes ont été présentés avec des explications sur les situations les plus problématiques.

Les formations et rencontres ont comme objectif de permettre aux autorités de s'approprier des résultats, de transférer la méthode et le savoir-faire aux acteurs locaux et, en parallèle, de tester l'applicabilité de la méthode dans les trois communes.

Dans l'ANNEXE 9 les photos des formations théoriques et pratiques (de FIG. 43 à FIG. 53).

MÉTHODE D'ANALYSE DES MENACES NATURELLES, EXPOSITION ET RISQUE

Pour chacune des menaces, l'étude procèdera à une identification, à la définition d'un zonage et à une caractérisation.

L'intégration des notices pour la gestion du risque dans les projets d'aménagements nécessite la définition des scénarios des menaces.

Le diagnostic des menaces naturelles dans les trois communes est basé sur une analyse multi-facteurs qui regroupe plusieurs niveaux d'expertise:

- Interprétation des photos aériennes en couple stéréoscopique*, des images issues de la télédétection* (satellites, aériennes) et des caractéristiques topographiques du terrain (p.ex. Google Earth®, DEM*).
- Analyse des données existantes (climatologie, géologie, géomorphologie, hydrométéorologie, administratives, etc.) et les données de terrain.
- Estimer de façon quantitative la distribution spatio-temporelle de l'intensité des menaces en objet.
- Étude et collecte des données de terrain afin de valider et/ou améliorer les données existantes, enrichir la base de données. L'étude de terrain a été effectuée par l'expertise des ingénieurs et la collaboration des communautés, DPC, CLPC, CASEC, ASEC, pour l'analyse des événements historiques connus dans les différents bassins-versants.

Par contre il est toujours possible d'enregistrer certains soucis concernant:

- L'inexistence des données historiques de climatologie, hydrométriques et les données géotechniques (cela permet l'évaluation intégrale et quantitative de l'instabilité des pentes, géologie à grande échelle).
- L'absence des données mises à jour d'utilisation du sol (les données existantes sont du 1998);
- L'inexistence d'une législation de planification du territoire et sur la gestion des bassins versants;
- L'absence des données quantitatives sur l'impact des cyclones.

Facteurs généraux qui influencent les inondations, les ruissellements, les glissements de terrain et les cyclones

Climatologie:

Les climatologies tropicales (températures élevées et fortes saisons des pluies) favorisent les phénomènes d'altération chimique des roches et l'altération mécanique.

Ces phénomènes provoquent la formation d'épaisseurs élevées de débris qui subissent l'érosion et le transport par les eaux superficielles et causent débris flow, inondations.

Les perturbations locales peuvent causer des dégâts et devenir particulièrement dangereuses, lorsqu'elles traversent des petits bassins versants à pente forte et lorsque les ravins sont croisés par des ponts sous-dimensionnés et des passages à gué.

Les pluies et cyclones peuvent être les facteurs déclenchant des glissements de terrain, surtout au niveau des débris flow* (écoulements rapides des boues, débris). L'infiltration de la pluie dans le terrain trouve son origine auprès des pressions hydrauliques interstitielles produisant des déséquilibres et des instabilités dans les pentes.

Absence d'entretien et nettoyage des systèmes de drainage, canaux, ponts, gabionnages (de la FIG 54 à 56): Plusieurs systèmes de drainage ne sont pas bien localisés et dimensionnée, car ils ont été construit quand le nombre d'habitants était largement inférieur à ce qu'il est aujourd'hui.

Les canaux et les systèmes des drainages sont souvent remplis par des sédiments arrachés et transportés au moment des pluies ainsi que déchets de toutes sortes y compris les eaux noires, qui diminuent le peu d'efficacité de drainage qu'il avait. Surtout après le séisme la quantité des ordures et des débris a augmentée par la destruction des bâtiments. Il faut noter une augmentation du niveau d'obstruction des différents ouvrages.

Il n'y a pas de nettoyages des ponts et peu d'entretien des gabionnages, qui, après quelques années présentent des brèches (ouvertures) ou sont recouvertes par les alluvions et les déchets.



**Fig. 265 Gabionnage dans la rivière Cayman à Petit Goâve,
un année après sa construction:
- il n'y pas d'entretien par la communauté.**



Fig. 54 Déchets, ordures, eaux usées (en haut dans la Rivière des Orangers, qui traverse la ville de Jacmel, en bas ordures, débris des bâtiments (ville de Petit Goâve)



Fig. 27 Rivière Dlo Petit à Violet (Petit Goâve),
le pont est endommagé et remplis des alluvions.

Déforestation: La déforestation des bassins versants renforce les inondations et l'instabilité des pentes en accélérant les mécanismes d'érosion des sols et limite l'action de protection contre les vents des cyclones. L'augmentation de la charge solide (sable, particules en suspension, conglomérats) transportée par les ravines et rivières lors des crues, représentent une menace pour les infrastructures (ponts, routes, habitations) se trouvant dans le lit des cours d'eau. L'épaisseur des alluvions couvre les gabionnages qui, après 2-3 ans commencent à perdre en efficacité.

Le manteau végétal servant d'écran pour les parties basses du bassin a disparu à cause des installations des constructions et de l'urbanisation.

La déforestation est liée à l'absence de loi, de gestion et éducation environnementale et à la pauvreté.

Absence de connaissances, d'études spécifiques, d'instrumentation de mesure.

Absence d'une réglementation sur l'urbanisation, sur le risque d'inondation et sur l'étude d'impact environnemental pour chaque ouvrage :

- Les activités humaines et les habitations sont souvent concentrées dans le lit des rivières. la réglementation existante au niveau des mesures structurelles et des constructions n'est pas bien définie ni, souvent, respectée.
- Ils n'existent pas d'études d'impact environnemental des ouvrages (construction gabionnages etc);
- Les activités humaines et habitations sont souvent concentrées dans les versants instables (FIG 57).
- La réglementation pour l'exploitation des carrières n'est pas respectée (FIG. 57)
- Les pratiques de l'agriculture sont mauvaises et souvent augmente l'érosion du sol (FIG. 58).



Fig. 58 Manque d'urbanisation: à haut carrière à Jacmel exploitée sans une réglementation pour empêcher éboulements, ni évaluation d'impact de l'ouvrage. En bas des maisons construites dans zones à forte susceptibilité aux instabilités des pentes (Petit Goâve, Bassin versant de Desvignes).



Fig. 58 Mauvaises pratiques d'agriculture qui causent l'érosion du sol (Beatrice, Petit Goâve)

Glissements de terre, inondations et vents forts activés par les cyclones: pendant les fortes pluies il y a saturation en eau de la couche superficielle des terrains, qui cause l'instabilité et plusieurs glissements de terre, surtout débris flow.

Activité sismique: l'accélération sismique est un facteur déclenchant des glissements de terrain, provoquant des efforts transitoires dans les terrains, roches, surtout au niveau des éboulements*.

ZONAGE DE LA MENACE D'INONDATION

Objectifs et méthodologie

L'étude effectuée par une équipe d'experts ingénieurs de WHH et du CNIGS, en collaboration avec les acteurs humanitaires et institutionnels locaux (CLPC, DPC, CASEC, ASEC), dans le cadre du renforcement des capacités locales pour l'identification des risques.

Cette collaboration permettra de transférer la méthode et le savoir-faire aux acteurs locaux et, en parallèle, de tester l'applicabilité de la méthode dans les trois communes.

La participation à l'étude du professeur géologue Samuel Genea du CNIGS a été précieuse pour l'évaluation de terrain, pour la disponibilité du matériel et la préparation de l'équipe.

L'évaluation a permis de réaliser un zonage de la menace d'inondation à l'échelle des habitations*.

Il fallait obtenir un document qui soit le plus opérationnel possible.

Cette étude est le premier zonage de cette menace. Elle pourra être complétée par la suite, par une démarche plus classique de modélisation, via la mise en place d'instruments de mesures (hydromètres, pluviomètres) permanents et continus.

Cette démarche a eu pour objectif l'identification et une caractérisation des menaces hydrométéorologiques sur les zones concernées au niveau de :

Ruissellement: Le ruissellement désigne en hydrologie le phénomène d'écoulement des eaux à la surface des sols. Il s'oppose au phénomène d'infiltration.

Le ruissellement est un des moteurs de l'érosion : l'eau qui s'écoule entraîne avec elle des particules plus ou moins grosses en fonction de la quantité d'eau en mouvement et de la pente, ce qui peut avoir un effet abrasif sur le terrain soumis au ruissellement.

Le ruissellement est également un phénomène pris en compte lors de l'aménagement urbain, car la généralisation des sols imperméabilisés (routes, stationnement automobile, zones bâties, etc.) augmente le ruissellement aux dépens de l'infiltration, ce qui peut conduire à des crues violentes et augmente les risques de saturation des collecteurs d'eau et d'inondation en aval.

Ruissellement urbain: Le ruissellement urbain peut être défini comme la submersion de zones normalement hors d'eau et l'écoulement des eaux par des voies inhabituelles, suite à l'engorgement du système d'évacuation des eaux pluviales lors de précipitations intenses. Le risque encouru est alors d'autant plus élevé que l'aléa rencontre des enjeux - personnes et bien susceptibles d'être affectés - présentant une forte vulnérabilité.

Les ruissellements urbains sont largement conditionnés et complexifiés par les imperméabilisations des sols et l'entassement des ravines.

Ravines torrentielles: sont formées par un torrent (quels que soit sa taille, sa largeur, sa longueur, son débit). Les ravines prennent naissance dans la montagne et creusent leur lit profondément dans des reliefs escarpés, d'autant plus que les pluies sont diluviennes en temps de cyclone.

Inondations par débordement fluvial: Une inondation est un débordement d'un cours d'eau (du lit mineur), le plus souvent en crue, qui submerge les terrains voisins.

L'étude a constaté que les notions de ruissellement et d'inondation, sont souvent confuses aussi bien pour les autorités locales que pour les habitants. S'il y a des dégâts dans le lit de la rivière par le ruissellement, il y a tendance à le considérer comme étant issu d'une inondation.

La qualité et quantité des données historiques pluviométriques et hydrométriques sont insuffisantes pour réaliser une analyse quantitative statistique-probabiliste qui permettrait d'évaluer les périodes de retours des événements d'inondation:

A₁) Les stations de mesure de pluviométrie et d'hydrométrie sont inexistantes dans la plupart des bassins hydrographiques étudiés.

A₂) Les données existantes n'ont pas une continuité historique régulière et ne sont pas souvent corrélables.

A₃) La variation de climatologie en passant d'une zone à l'autre ne permet pas l'extrapolation des données des bassins contenant les stations de mesure applicables aux bassins limitrophes.

Pour le zonage de menace d'inondation l'orientation de WHH et du CNIGS a été de travailler avec une **approche hydro-géomorphologique** qui semblait la plus pertinente.

Les phases de travail ont été les suivantes:

B₁) Collecte des données existantes (hydrologie, climatologie, lithologie, pente);

B₂) Analyse des photo-aériennes* (parmi les CNIGS ont été obtenues des cartes en couple stéréoscopique* de 2002 et des ortho-photos* aériennes de 2010).

B₃) Recensement de terrain des hauteurs d'eau et étude géomorphologique.

B₄) Digitalisation des données en SIG, élaboration et calcul de menace avec la méthode d'interpolation*.

B₅) Formation et présentation des résultats des études aux DPC/CLPC/CASEC/ASEC

Approche hydro-géomorphologique

La méthode hydro-géomorphologique est une approche géographique qui étudie le fonctionnement naturel des cours d'eau en analysant la structure des vallées et en particulier les formes fluviales qui ont eu origine pendant des crues successives. Il s'agit d'observer et d'analyser les spécificités hydro-géomorphologiques du territoire concerné (identification des zones deltaïques, lacustres et humides, analyse du relief) pour déterminer les lits topographiques des cours d'eau.

Une plaine alluviale* est composée de plusieurs unités hydro-géomorphologiques, par les différents lits topographiques que la rivière a façonnés dans le fond de vallée pendant des siècles. Ils sont le résultat d'une combinaison de phénomènes d'accumulation des sédiments et d'érosion. En effet, chaque crue dépose des matériaux dans certains secteurs, tandis qu'elle érode ailleurs. C'est le rapport entre ces deux phénomènes qui préside au façonnement progressif des différentes unités. L'accumulation dans le temps des sédiments construit les lits hydro géomorphologiques tandis que l'érosion marque leurs limites (talus) et modèle leur surface.

L'étude de ces unités hydro géomorphologiques constitue la base de la méthode. Elles sont des témoins des crues passées et récentes dont elles traduisent le fonctionnement et l'extension, ce qui permet d'identifier les zones inondables correspondantes.

Pour identifier et délimiter les unités hydro-géomorphologiques, la méthode est basée sur les critères suivants:

- La morphologie: reconnaissance des talus, des ruptures de pente, des microtopographies de toutes les structures topographiques.
- La sédimentologie: analyse de la granulométrie, de la nature, de la couleur des formations superficielles, étude des coupes naturelles dans les terrains. La granulométrie des sédiments fournit une indication sur les vitesses des courants qui les ont déposés.
- Les traces d'inondation: laisses de crues, érosions, dépôts de sédiments dans le lit majeur, traces des courants sur les photographies aériennes.
- L'occupation du sol: la végétation diffère en fonction de la nature du sol et de ses caractéristiques hydriques et d'exposition au soleil.

La mise en œuvre de l'approche est basée sur deux outils complémentaires: la photo-interprétation* et l'évaluation sur le terrain.

Pour l'élaboration des cartes de menace d'inondation ont été reconnues dans le terrain les unités hydro morphologiques suivantes:

1- Le **lit mineur*** correspond au chenal principal du cours d'eau constitué par un chenal d'étiage* et d'atterrissements*

2- Le **lit moyen***, situé en proximité du lit mineur et inondé par les crues les plus fréquentes.

3- Le **lit majeur***, inondé par les grandes crues.

Autres unités géomorphologiques:

Les **plaines alluviales***, l'**encaissant ***, les **terrasses***, les **colluvions***.

Typologie des menaces

Pour évaluer les aléas des menaces et les fréquences, nous avons utilisés la méthode du CNIGS et des études de météorologie, effectués par le projet de la Banque Mondiale (S. M. Castro et l'équipe NATHAT).

-Il y a des **menaces fréquentes** correspondant à une précipitation de type orage localisé, intense, non stationnaire et générant essentiellement des ruissellements (en l'aval) ou des ravines torrentielles (en amont), qui intéresse généralement seulement le lit mineur.

Le lit mineur en amont de la rivière est composé principalement par "d'unités encaissantes" avec un relief très marqué. En aval de la rivière, le transport solide abondant (dépôts alluvionnaires) donne une morphologie plus large et visible, FIG 59.



Fig. 28 En rouge le lit mineur de la rivière La Gosseline de JACMEL:

En amont les vallées sont encaissées en aval, elles sont plus larges et visibles.

La prévention pour cette menace est d'éviter de construire et habiter dans le lit de la rivière ou dans les ravines et de respecter la distance établie par la loi et sur la base de l'identification des zones inondables.

Dans la zone concernée, il y a plusieurs villages et activités humaines situés directement dans la rivière. Le cas le plus grave (quantité des personnes) est le Village de Marbial (FIG 60), dans la 5ème section de JACMEL,

avec trois (3) écoles, deux (2) centres de santé, un (1) marché et une (1) église et environ cent (100) maisons situés dans le lit mineur de la rivière Gosseline.

Dans la FIG 61 le village de Prien dans la rivière Lillet à la 4eme Section de Grand Goâve.



Fig. 29 : Le village de Marbial (5eme Section de Jacmel) situé dans le lit de la rivière Gosseline. En rouge la délimitation du lit mineur et en évidence les bâtiments publics situés dans le lit: (trois (3) écoles, deux (2) centres de santé, une (1) église, un (1) marché et (100) cent maisons).



Fig. 30 Village de Prien situé dans la Rivière Lillet (,4eme et 3eme Section de à Grand Goâve);
en bas des ravines et glissements. En haut la photo et en bas la vue de Google Earth ©.

-La **menace «rare»** correspond plutôt à des précipitations stationnaires pouvant apporter un volume important d'eau sur quelques heures (dépression tropicale) et générant des débordements potentiels qui doivent être pris en compte dans les aménagements et concerne le lit moyen (FIG 62).

Le lit moyen est situé à coté du lit mineur et séparé du lit mineur par un talus* souvent érodé.

Contrairement aux lits mineur et majeur, le lit moyen ne se rencontre pas sur tous les cours d'eau. C'est une forme associée à des fonctionnements de type torrentiel et à ce titre des rivières peuvent ne pas avoir l'énergie nécessaire pour le façonner.



Fig. 31 Rivières de Jacmel, en jaune transparent la délimitation du lit moyen et le jaune intérieur représente le lit mineur

Pour prévenir ce type de menace il est important de respecter un distance entre les constructions et la rivière.

- Il y a la menace «**exceptionnelle**» qui correspond à une précipitation de cumul très important et généralisé, affectant une grande partie des bassins versants sur une longue durée (cyclone). La diagnostic de la menace exceptionnelle a été réalisé par l'identification du lit majeur des cours d'eau. Il s'agit de délimiter la plaine alluviale correspondante au champ d'expansion maximale de l'inondation, (FIG 63), donc la zone hydro-géomorphologique inondable maximale (jusqu'au limites de l'encaissant). Ces évènements doivent être bien contrôlés par des aménagements adéquats (reboisement, aménagement des bassins versants, réduction d'érosion, ouvrages de protection etc.) et la construction doit être réglementée en fonction des énergies et hauteurs d'eau.



Fig. 32 Rivières de Jacmel, en rouge transparent le lit majeur, orange le lit moyen.

Cette classification a permis la réalisation de cartes hydro-géomorphologiques des trois communes ainsi qu'un zonage des menaces d'inondation selon les hauteurs d'eau en cas d'extrêmes inondations, FIG. 64.

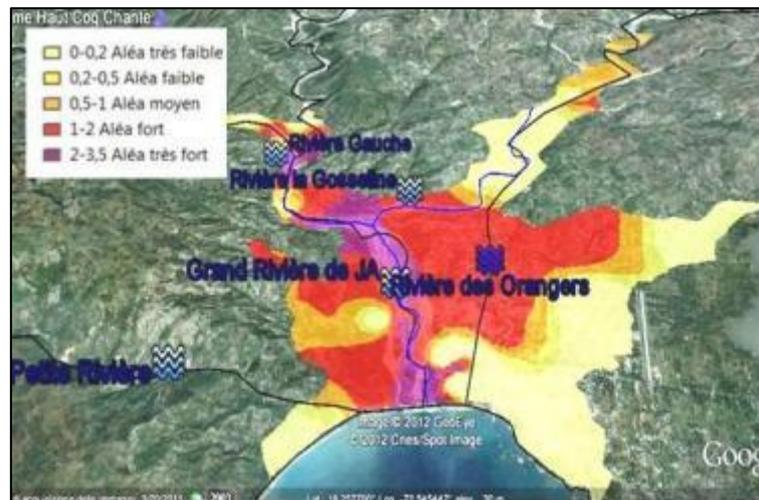


Fig. 33 Carte d'aléas de la ville de Jacmel

Collecte des données sur le terrain

La délimitation des menaces s'appuie aussi sur la connaissance du terrain et les retours historiques des événements d'inondations.

Pour réaliser cette évaluation l'équipe d'experts ingénieurs de WHH et du CNIGS accompagnée par le CLPC, DPC, CASEC, ASEC ont évalué les hauteurs d'eau pendant les grands cyclones: données obtenues après plusieurs enquêtes de terrain auprès des habitants et par la mesure des épaisseurs des dépôts fluviaux. (Fig 65, 66).



Fig. 34 Rivière la Digue "Localité FON FABRE" (PETIT GOÂVE):
maison recouverte d'alluvions (environ deux (2) mètres),



Fig. 35 Enquêtes des hauteurs d'eau auprès des habitants des zones inondables.

- L'équipe a recensé et cartographié tous les structures en gabionnages, leurs parties endommagées et tous les points d'érosion des berges qui peuvent devenir des points de sortie préférentielle d'eau (de FIG 67 et 68). Le recensement a permis de constater que la masse des ouvrages de protection réalisée après les cyclones du 2008 a commencé à perdre en efficacité. Il y a une lacune de maintenance et l'action des ouvrages ne peut pas être suffisante sans un aménagement correct des bassins versants (l'érosion cause une forte quantité des sédiments que recouvrent les gabionnages).



Fig. 36 Le gabionnage de la rivière Baret de PETIT GOÂVE,

Endommagé et recouvert de sédiments dans les premiers deux (2) mètres.



Fig. 37 en haut le gabionnage construit par WHH dans la rivière Cayman (PETIT GOÂVE) pour protéger la localité Nan Sinistré, en bas érosion de berges en formation dans la rivière Baret (localité l'Acu) qui peut causer le débordement de la rivière

Les zones pilotes étudiées

Les zones étudiées ont été choisies sur la base d'une priorisation des structures à risques effectuée ensemble aux responsables de la DPC

Des visites terrain ont été effectuées sur l'ensemble de ces secteurs permettant de faire une première analyse de la problématique de la menace hydrométéorologique et un premier calage de la méthodologie à appliquer.

Ces secteurs sont:

- PETIT GOÂVE: rivière la Digue (localité Fon Fabre, Borne Soldat, rue Benoit, la Hatte et toute la zone entre la rivière et le centre de ville); rivière Provence, rivière Cayman (centre ville, Petit Guinée, Nan Régat, route Nationale); rivière Baret (Fort Royal, l'Acul), rivière Dlo Pitit et rivière Kavanak (Violet).
- GRAND GOÂVE: rivière de Grand Goâve (centre ville, route Nationale), rivière Glaise (Petit Paradis) et rivière Canot (Fauché, route Nationale).
- JACMEL: rivière des Orangers quartiers de Siloe, la Gosseline, Marche Geffrard, Derriere Orangers et l'Acrobate; la rivière La Gosseline au niveau de Marbial où elle s'unie avec la rivière de Fond Melon, la plaine de Lafond, Grande Rivière de Jacmel (centre de Ville). La rivière Gauche et rivière Cambre ou Petite Rivière.

Dans ces zones la menace est liée à l'urbanisation des ravines, aux zones inondables et à la non-gestion des ruissellements. Le caractère à forte densité d'urbanisation dans certains secteurs rend très urgent les projets de réaménagement.

Dans l'ANNEXE4 les cartes des inondations et dans l'ANNEXE 7 l'analyse des résultats et critiques sur les trois communes.

SUSCEPTIBILITÉ' AUX GLISSEMENTS DE TERRAIN

Objectifs et méthodologie

L'étude a été effectuée avec une équipe d'experts en collaboration avec les acteurs institutionnels locaux (CLPC, DPC, CASEC, ASEC) et un centre de recherche national (CNIGS), dans le cadre du renforcement des capacités locales et Nationale pour l'identification des risques.

Dans l'étude a collaboré, le professeur géomorphologue Claudio Puglisi de l'Agence National Italienne l'ENEA (*Agenzia Nazionale per le nuove tecnologie, l'energia e lo sviluppo economico sostenibile* "Agence National pour les nouvelles technologies, l'énergie et le développement économique durable") et le professeur Gabriele Leoni de l'Université de Roma (Italie) "Roma Tre".

La menace des glissements est liée à différents facteurs déclenchant (cyclones, pluies, séismes) et aux facteurs prédisposant* et discriminants* (la géologie, pente, présence de rivières, utilisation du sol etc.).

L'évaluation a permis de réaliser:

- 1) Un recensement complet et une classification des glissements dans les trois communes;
- 2) Une zonage des zones susceptibles aux détachements des glissements de terrain afin d'appréhender la menace à l'échelle géographique locale des habitations *.

Cette méthode est un premier zonage de cette menace, elle pourra être complétée par la suite d'une étude plus détaillé au niveau de géologie, géotechnique, utilisation du sol afin de avoir plus des détails au niveau des:

A Distances de propagation;

B Énergies et intensités des phénomènes.

La méthodologie technique utilisée est "*ENEA-Roma3 methodology for landslide susceptibility* (Leoni et al., 2009)", qui peut être définie comme heuristique* statistique.

Cette méthodologie utilise des indicateurs géologiques morpho dynamiques, pour lesquels généralement l'information peut être simple à trouver. Les résultats obtenus dépendront de la qualité des indicateurs.

Les indicateurs mentionnés se combinent avec des poids spécifiques, ce qui définit leur degré d'influence à la menace des glissements. Les poids sont obtenus parmi un calcul statistique de nombre des évènements recensés (glissements) associés aux indicateurs (érosion des rivières, failles, découpage de la route etc) et à travers les observations de terrain.

L'étude procédera avec les phases de travail suivantes:

- 1) Recherche et collecte des données géologiques, administratives, hydrologiques, sismiques, pentes, routes et éléments exposées (bâtiments publics etc.) avec la collaboration du CNIGS.
- 2) Recensement de terrain et classification des glissements de terrain;
- 3) Individuation des facteurs pré-disposants et discriminants* aux glissements de terrain.

- 4) Élaboration en SIG des cartes de susceptibilité* aux détachements des différentes typologies de glissements.
- 5) Formation et présentation des résultats aux autorités locales DPC/CLCP/CASEC/ASEC et National CNIGS.

Analyse susceptibilité à l'activation des glissements (Méthode Enea-Roma 3, 2008)

La susceptibilité spatiale est la probabilité qu'une typologie de glissement peut se produire dans une zone. (Varnes, 1984).

La méthodologie suivra quatre phases opérationnelles:

- 1) Collecte des données;
- 2) Analyse des sites;
- 3) Macro area analyse;
- 4) Analyse de susceptibilité.

1) Collecte des données

La première phase comprend l'acquisition des données de base.

La qualité et quantité des données est souvent limitée: les cartes géologiques, géomorphologiques sont seulement à l'échelle de 1:250.000, la carte d'utilisation du sol est de l'année 1998, les couches des rivières, routes ne sont pas complètes et ne sont pas mises à jour.

La saisi des données initiales est composée de:

a₁) Carte géologique et failles que montrent la lithologie et les structures tectoniques: l'étude devrait être faite avec une carte géologique à grande échelle (1:25.000) mais la carte géologique de Haïti a une échelle de 1:250.000. Des études de détails à travers cette étude ont été misent en place dans les zones plus urbanisés et avec plusieurs glissements enregistrés.

a₂) Carte géomorphologique à 1.250.000 alors qu'elle aurait du être au moins à 1:25.000.

a₃) Recensement des glissements passés et actuels et classification (selon la classification de **Varnes 1978**) exécuté par une équipe d'experts. L'aide des DPC/CLPC/CASEC/ASEC pendant le travail de terrain a été précieuse et l'aide du CNIGS qui a fournis des photos aériennes* en couple stéréoscopique * de 2002 et ortho-photos* de 2010, pour le recensement parmi photo-interprétation*.

a₄) DEM* (modèle d'élévation digitale): le seul model d'élévation valide pour cet étude et disponible est un produit ASTER GDEM* téléchargé en ligne sur le website "[Geospatial Support for 2010 Haïti Earthquake](#)" le ASTER GDEM 2 (source METI -NASA). La dimension de la maille est de 30, l'acquisition a été faite par interférométrie radar dans l'année 2010.

L'autre DEM existant en Haïti avec maille 10 n'est pas techniquement utilisable dans notre étude car il est obtenu à travers la numérisation des courbes de niveau de la carte topographique à l'échelle de 250.000 de

l'année 1978. La numérisation à travers les courbes donne des erreurs dans les zones de plaine où il montre des fausses pentes en correspondance des courbes de niveau.

a₅) Carte d'Occupation du sol: la seule carte utilisable est celle datée de 1998 à l'échelle 1.250000, qui a été fourni par le CNIGS. Il est urgent et prioritaire pour les études de risque et dans le cadre de travaux d'aménagement du territoire de produire une carte mise à jour et plus détaillée.

a₆) Les cartes des voies principales et secondaires de communication ont été fournis par le CNIGS et dans notre étude, elles ont été corrigées et complétés. Le découpage de la route est un facteur prédisposant à l'instabilité et les routes sont des éléments exposées au risque à cause de leur importance économique et sociale.

a₇) Les coordonnées des rivières ont été fournies par le CNIGS et dans notre étude ont été complétées avec l'extraction en SIG des lignes de drainage.

2) Analyse de site

La deuxième étape de la procédure est l'analyse du recensement des glissements de terrain afin d'identifier:

b₁) Les paramètres discriminants et prédisposant.

Les facteurs discriminants sont généralement lithologie et morphométrie, qui sont des conditions nécessaires mais pas suffisantes pour activer une typologie de glissement.

Les paramètres prédisposant sont les facteurs qui augmentent l'instabilité des versants, mais qui ne sont pas suffisants pour activer une typologie de glissement, sans les facteurs discriminants: érosion de la rivière, failles et fractures, utilisation du sol et autres.

Aux facteurs prédisposant nous avons attribué un indice numéraire pour le calcul en SIG de la susceptibilité.

L'indice est choisi sur base de la fréquence de l'occurrence de glissement et quantifie la contribution de chaque facteur à l'instabilité des pentes.

3) Macro-area analyse

Dans cette phase l'étude procèdera avec les suivantes opérations:

c₁) Élaboration en SIG des Unités litho-morpho-métriques (ULM)* parmi la superposition des paramètres discriminants.

c₂) Élaboration en SIG des cartes des facteurs prédisposant, qui montrent la distribution spatiale des facteurs.

c₃) Pondération des facteurs prédisposant selon le niveau de déstabilisation d'un facteur prédisposant par rapport à d'autres facteurs. Cette opération peut être purement heuristique* (qui est basée sur

l'expérience opérateur) ou peut être réalisée par des procédures statistiques (selon l'analyse de la distribution des glissements de terrain autour des facteurs prédisposant).

Dans le présent travail l'approche heuristique* a été utilisée mais les calculs statistiques ont été fait pour comparer les méthodes.

4) Analyse de susceptibilité

La dernière étape de la procédure comprend:

d1) Génération en SIG des unités territoriales homogènes (UTH)*, parmi la superposition des ULM* et des cartes des facteurs prédisposant pour chaque typologie de glissement.

d2) Application de la fonction mathématique de susceptibilité pour chaque UTH:

$$S_l = (P_l P_s) \left(\frac{\sum_n (i_n w_n)}{\sum_n w_n} \right)$$

Sl est la susceptibilité (calculé pour chaque typologie de glissement);

Pl est la lithologie en affleurement (paramètre discriminants), est un indice (0 ou 1 selon l'absence ou la présence des paramètres);

Ps est la pente (paramètres discriminants) est un indice (0 ou 1 selon l'absence ou la présence de paramètres);

in est l'indice de n-nth facteurs prédisposant

wn est les poids de n-nth facteurs prédisposant

d3) Élaboration de cartes de susceptibilité aux détachements des glissements de terrain.

Le diagramme ci dessous présente la procédure (FIG. 132).

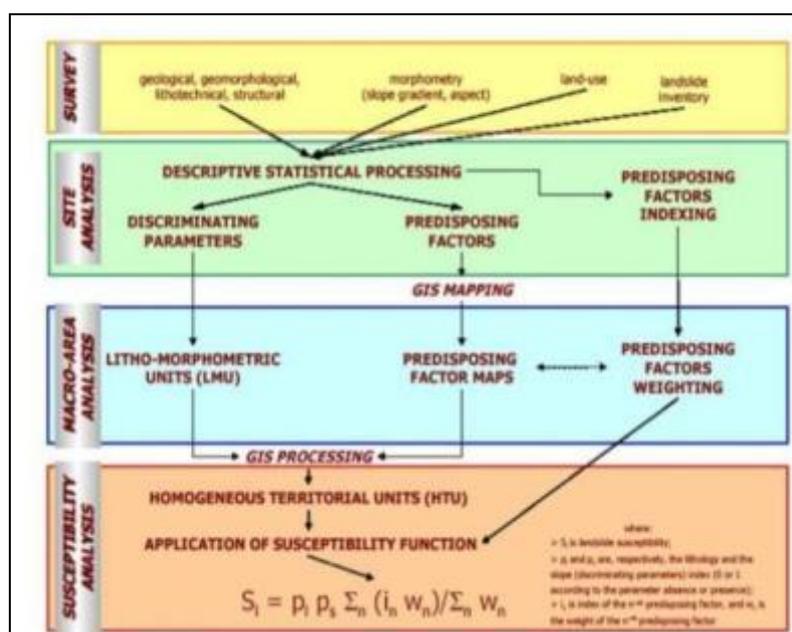


Fig. 38 Diagramme de flux de la procédure " ENEA-Roma3 methodology for landslide susceptibility"-

Source: ENEA-Roma3 methodology for landslide susceptibility (Leoni et al., 2009)

Recensement et classification de glissements de terrain

Les équipes d'experts (ingénieurs, géologues et agronomes) ont réalisées le recensement dans toutes les sections des trois communes, accompagnées par les autorités institutionnelles locales (CLPC, DPC, CASEC, ASEC). Dans les zones inaccessibles ou inhabitées le recensement a été fait à travers photo-interprétation *. Un micro-zonage* adéquat de la susceptibilité aux glissements de terrain est très dépendant du recensement de ces derniers et de leur classification correcte.

La classification a été réalisé parmi des éléments spécifiques, objectivement observables et mesurables: types des matériaux impliqués; caractéristiques géomorphologiques; taille du phénomène; le style de l'activité; les classes cinématiques (phénomènes rapides ou lents); la distribution de l'activité; les paramètres prédisposant*; les facteurs déclenchant*, la pente originaire du versant mesurée parmi l'utilisation de boussole avec inclinomètre (FIG 133).

Pendant le recensement de terrain l'équipe a rempli des fiches techniques pour chaque glissement, pour la définition pour les éléments spécifiés dans la liste ci-dessus (ANNEXE 1: model de fiches de recensement).



Fig. 39 Utilisation de boussole avec inclinomètre

Le système de classification utilisé est le système scientifique **Multilingual Glossary for Landslide (UNESCO WP/WLI, 1994)** qui utilise l'approche géomorphologique.

Il est basé sur la caractérisation du type de mouvement relatif entre le matériau en place et celui déplacé, surtout en ce qui concerne la distribution des mouvements dans l'espace et la vitesse; à ces facteurs sont aussi étroitement liée la forme de la surface de glissement (où existe), la forme des corps de glissement de terrain.

Cette classification a été simplifiée en 5 macro-classes selon les paramètres géomorphologiques, cinématiques et de la forme de la surface de glissement, que sont communs à deux ou plusieurs classes identifiées par Varnes (1978) et résumées comme suit:

GLISSEMENT ROTATIONNELS

Les glissements rotationnels sont caractérisés par des mouvements de rotation qui ont lieu autour d'un point extérieur, au-dessus du centre de gravité de la masse qui glisse. La forme des surfaces de glissement est généralement arquée et le mouvement est lent (FIG 134 et 135). La pente discriminatoire du versant d'origine est entre 13 - 35°. Les éléments morphologiques caractéristiques pour le reconnaître sont: les terrasses*, la couronne* circulaire etc..

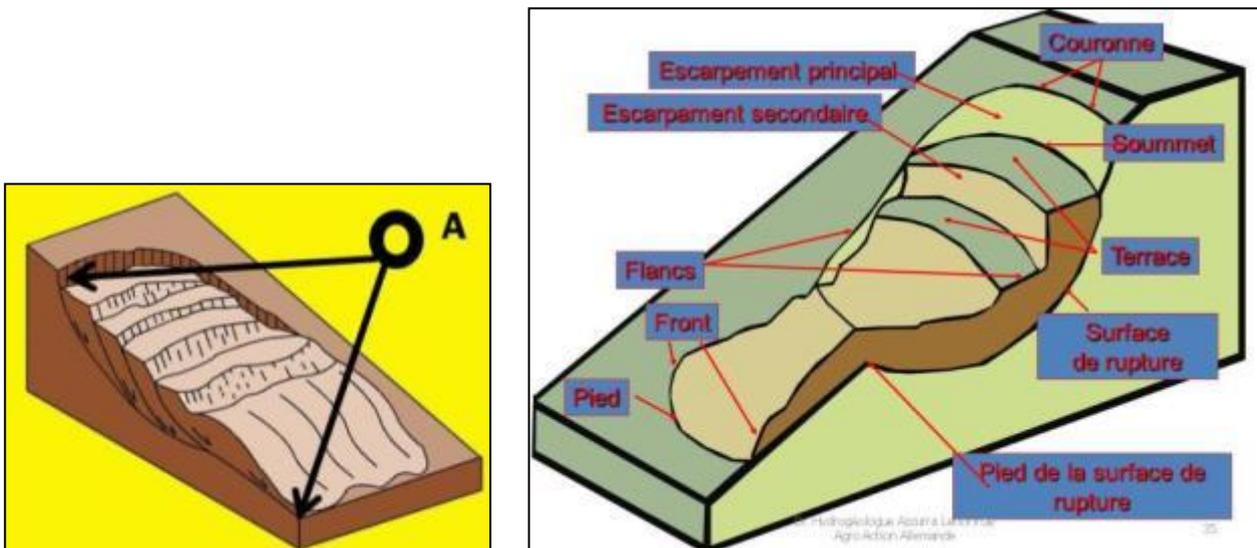


Fig. 40 Éléments géomorphologiques des glissements rotationnelles.



Fig. 41 Glissement rotationnelle dans la 1ere section de Petit Goâve à Peditan: terrasses.

GLISSEMENTS TRANSLATIONNELLES

Les glissements translationnelles (de FIG 136 à 138) sont caractérisés par un mouvement de translation long une surface de glissement plane, représentée par des surfaces de faiblesse préexistantes, disposées dans le même sens de la pente et avec une inclinaison égale ou inférieure à celle de la pente.

La pente discriminatoire du versant de détachement est entre 13 - 50°. Les éléments morphologiques caractéristiques pour les reconnaître sont: les tranchées*, la couronne* angulaire, la surface de rupture planaire etc.

Cette typologie de glissements est caractéristique dans les roches stratifiées ou dans complexes avec alternance de lithologie.

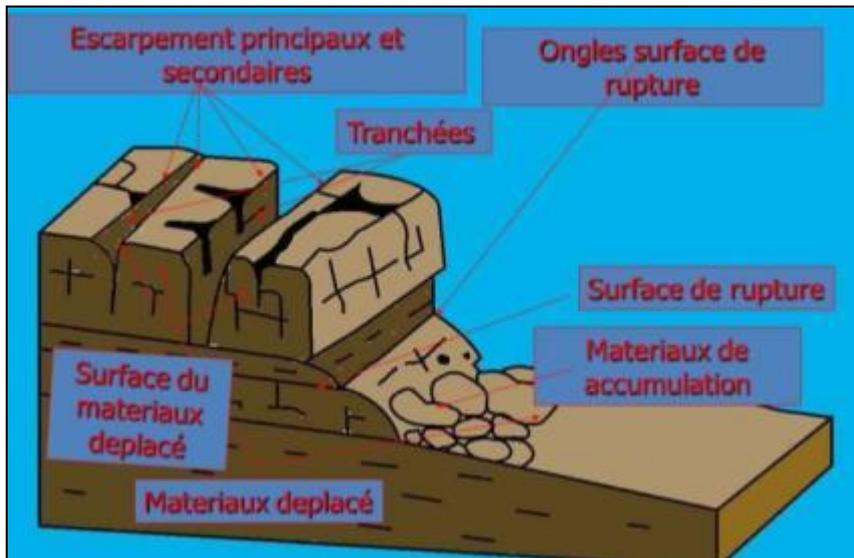


Fig. 42 Éléments géomorphologiques des glissements translationnelles



Fig. 43 Glissement translationnel 1ere section de Petit Goâve dans la rivière Kizin.



Fig. 44 Glissement translationnel dans la route de Beatrice à Petit Goâve, Haut Beatrice, couronne° angulaire.

ÉBOULEMENTS/RENVERSEMENTS (CHUTE DE PIERRES ET / OU BLOCS)*

Ils sont caractérisés par la chute libre de blocs de roche, des débris que proviennent des parois verticales (FIG. 139 et 140).

Les dépôts d'accumulation sont au bas du versant et ne parcourent pas des grandes distances.

Ces glissements souvent sont déclenchés surtout par les mouvements sismiques.

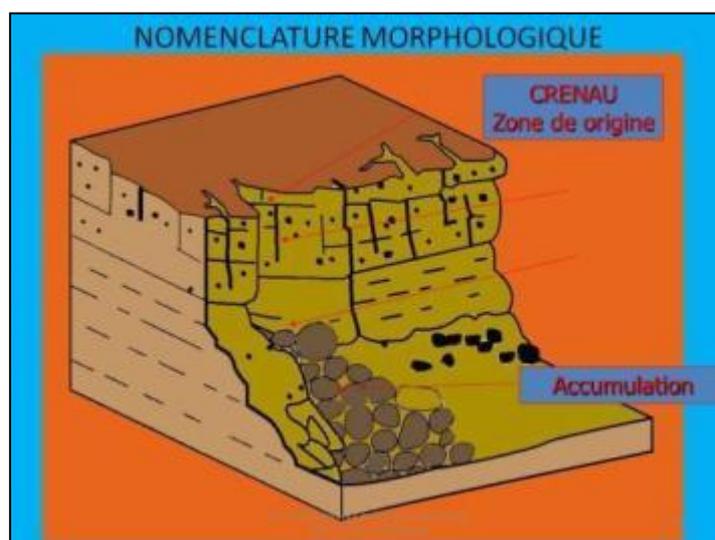


Fig. 45 Éléments géomorphologiques des éboulements

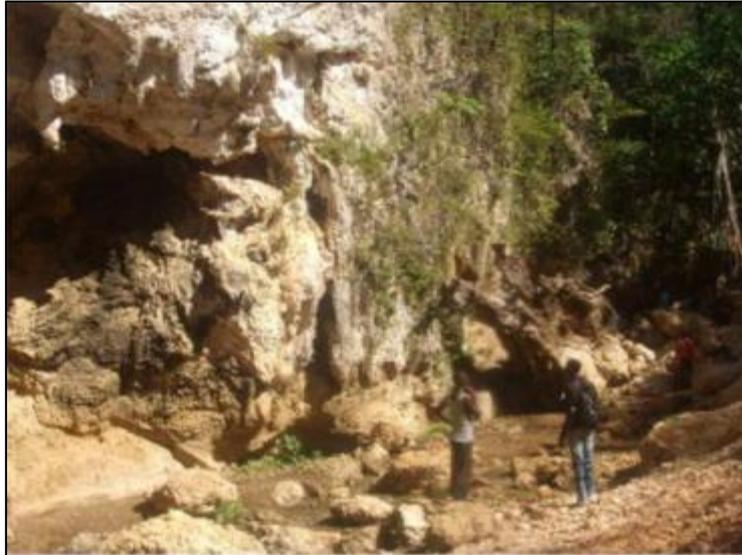


Fig. 46 Éboulement déclenché par le séisme du Janvier 2012 dans la 7eme section de Grand Goâve

Parmi les éboulements a été ajouté une classe séparée "éboulements carrière", qui représente les éboulements dans les carrières d'exploitation des matériaux (FIG. 141). Souvent il y a des éboulements car il n'y a pas l'utilisation des techniques correctes d'extraction de matériaux (pour exemple, la carrière devrais être à gradin pour empêcher l'instabilité des parois).



Fig. 141 Éboulement dans une carrière d'extraction matérielle à Petit Goâve (2eme section) et dans la photo en bas modèle de carrière à gradin.

ÉCOULEMENTS LENTS*

Ils sont caractérisés par un mouvement lent de la masse et une déformation plastique qui comporte une épaisseur extrêmement variable du sol. La surface de glissement, est difficile à définir et normalement provoque des glissements de grandes dimensions. La pente discriminatoire du versant de détachement est entre 5 - 30°. Les éléments morphologiques caractéristiques pour le reconnaître sont: oreillers* et canal d'écoulement*, la couronne* circulaire etc. Sont caractéristiques des roches plastiques (FIG 142 et 143).

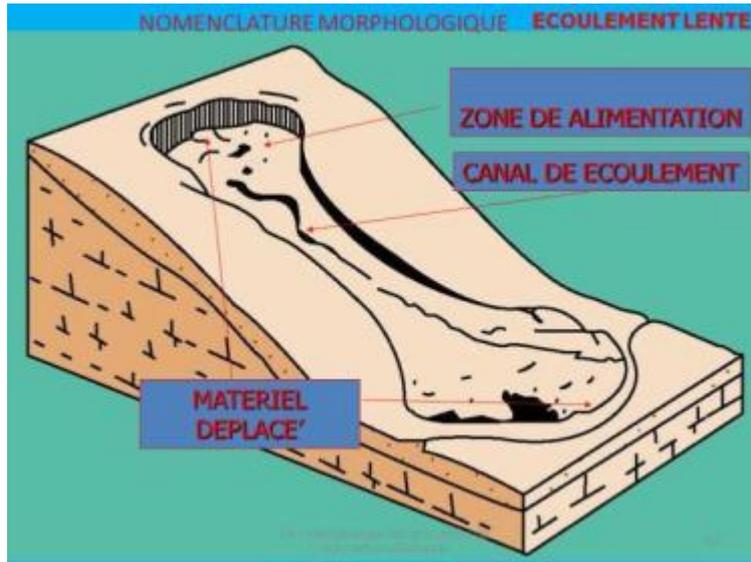


Fig. 47 Éléments géomorphologiques des écoulements lents



Fig. 48 Canal d'écoulement* d'un glissement profonde (en surface des niches de mouvement translationnel), localité La Value près de la limite administrative entre Petit Goâve et Grand Goâve.

COULÉE RAPIDE (DÉBRIS FLOW)*

Les débris flow (de FIG 144 à 145) sont caractérisés par un mélange de matériaux à faible cohésion et d'eau, dans une quantité variable, qui s'écoule long les versants ou lignes de drainage. Les caractéristiques géomorphologiques des débris flow (forme, concentration, vitesse, etc.) sont considérablement différents en fonction du matériau dominant de grande taille (coulées de débris pierreux) ou si la composante fine prédomine (coulées de boue).

Après l'activation du débris flow dans la zone de détachement, il reste la roche mère qui ne sera plus sujet aux glissements (FIG. 146).

Les débris flow contrairement aux éboulements peuvent parcourir plusieurs kilomètres à l'intérieur des ravines et rivières jusqu'à la fin du bassin versant, avec une énergie forte, qui cause morts et dégâts.

Les facteurs qui déclenchent les débris flow sont surtout les fortes pluies et cyclones et les opérations d'alerte de protection civile doivent tenir compte de cela.

L'activation des débris flows est liée à la rapidité de saturation du sol (s'il est argileux la saturation sera plus rapide) et au contact du sol avec la roche mère (si la séparation est linéaire la saturation sera plus rapide), de la profondeur du sol et le contexte géomorphologique.

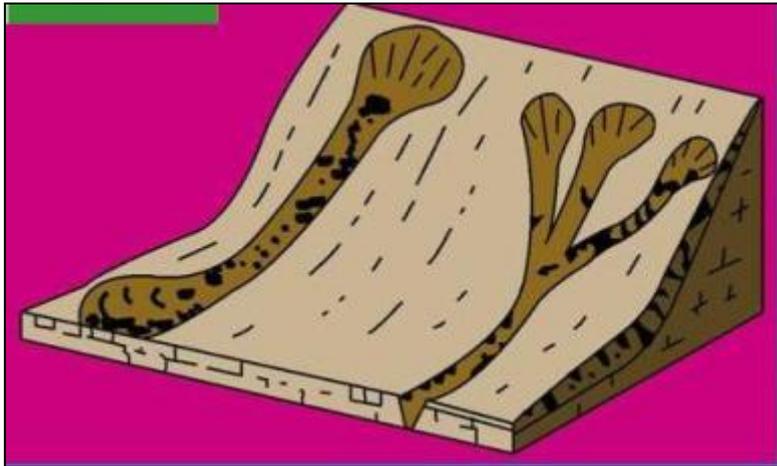


Fig. 494 Debris flow



Fig. 50 Débris flow à Jacmel (6eme Section Montagne La Voute).



Fig. 51 Affleurement de roche mère après le détachement du débris flow

Dans l'ANNEXE 9 le tableau en FIG 147 résumant les caractéristiques importantes pour la classification des glissements.

Résultats recensement des glissements de terrain

Pendant l'étude 1555 glissements de terre ont été recensés dans les trois communes (ANNEXE 2 liste des glissements). En ANNEXE 8a, les détails avec les nombres des glissements par communes et par sections, les photos et la représentation dans la carte.

Dans la FIG. 158 est évident que les débris flow sont les phénomènes plus présents sur les trois communes.

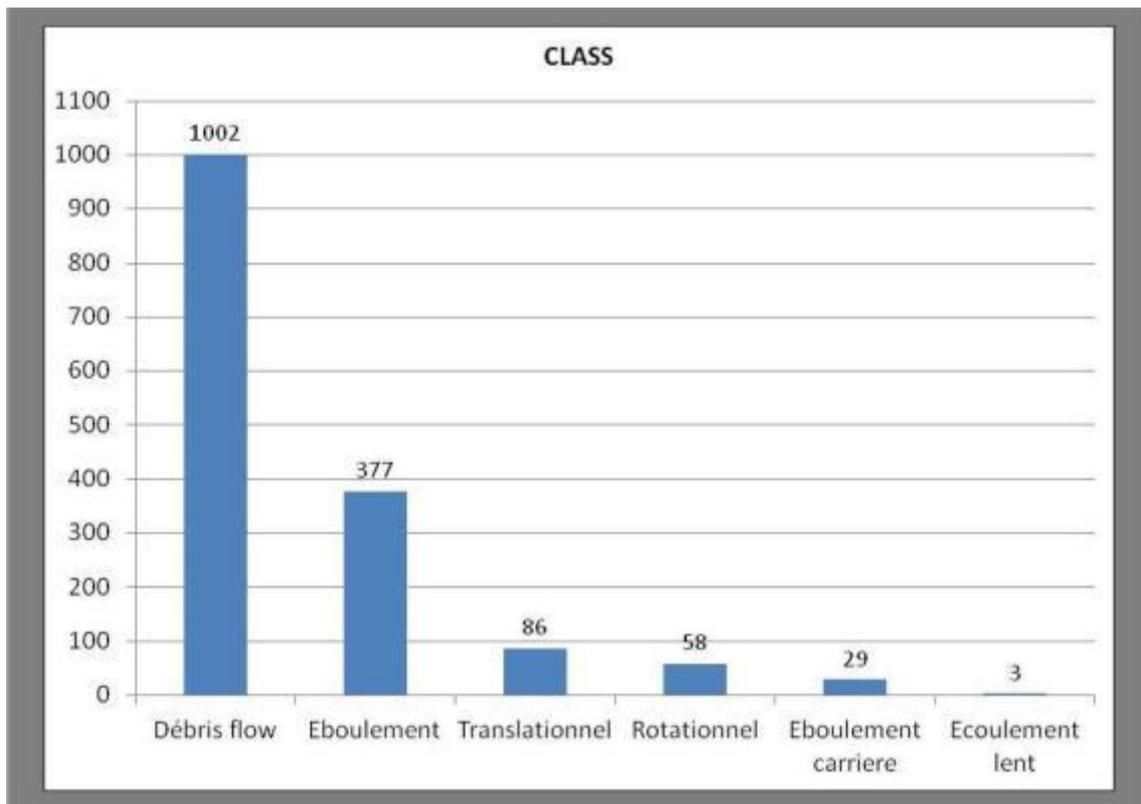


Fig. 52 En ordonnée le nombre des glissements et en abscisse la typologie. Les débris flow sont les plus fréquents.

Résultats analyse facteurs discriminants et prédisposant

L'identification des facteurs discriminant et prédisposant est réalisée à travers l'étude géomorphologique, géologiques, d'hydrologie et d'utilisation du sol.

Parmi les facteurs prédisposant, il semble opportun de distinguer deux sous-classes selon leur nature et de la variabilité temporelle (tableau en FIG 159):

- a Les facteurs physiques invariants dans le temps;
- b Les facteurs physiques et anthropiques qui varient au fil du temps. Ils sont interdépendants et sont divisées en deux autres sous-groupes:
 - b₁) Les facteurs physiques internes aux versants
 - b₂) Les facteurs humains / utilisation du sol que sont externes aux versants.

Les facteurs prédisposant, variables et invariables dans le temps, contribuent à définir la susceptibilité.

En particulier, le tableau de FIG. 159, montre comment les phénomènes qui affectent le substrat (phénomènes profonds) dépendent principalement des facteurs physiques invariables dans le temps, tandis que ceux qui sont superficiels (couverture) dépendent davantage des facteurs internes variables (physiques et humains).

Dans les trois communes nous avons rencontrés quasi uniquement des glissements superficiels. La quasi totalité des phénomènes a lieu à cause des mauvaises pratiques d'agriculture et au déboisement (activités humaines).

Dans le tableau suivant (FIG 159) les facteurs prédisposant (variables et invariables dans le temps).

	Paramètres prédisposant
FACTEURS PHYSIQUES INVARIABLES DANS LE TEMPE	Exposition des versants
	Pente
	Longueur
	Altitude de la zone de détachement
	Lithologie du substratum
	Lithologie de la couverture
	Linéaments tectoniques (failles)
	Fracturation et orientation des fractures (Fig. 161)
	Stratification et orientation des les couches (Fig. 160)
	Dégré d'altération
FACTEURS PHYSIQUES INVARIABLES DANS LE TEMPE	Caractéristiques géotechniques du substratum
	Perméabilité
	Existence des autres procès de gravité
	Variation niveau de bas du versant
	Érosion marges latérales des glissements
	Érosion de rivière à la base du versant
	Érosion marine à la base du versant
FACTEURS PHYSIQUES INVARIABLES DANS LE TEMPE	Thermoclastie*
	Épaisseur des couvertures du sol
	Circulation hydrique souterraine et superficielle
FACTEURS HUMAINES/ UTILISATION DU SOL (VARIABLES DANS LE TEMPE)	Déboisement/ incendies
	Variation des la végétation
	Pertes dans les systèmes d'eau
	Pratique d'agriculture
	Lacune dans la maintenance des drainages
	Obstruction artificielles des ravines / rivières
	Ouvrages d'excavation
	Construction des habitation/bâtiments
Carrières	

Fig. 53 Facteurs pré-disposantes variables et invariantes dans la tempe.



Fig. 54 La stratification et orientation sont facteurs prédisposant aux glissements invariables dans le temps.



Fig. 55 Fracturation causé par intenses mouvements sismiques.

En ANNEXE 8c les résultats de l'analyse de terrain et bibliographique des paramètres discriminants et prédisposant et la méthode d'attribution des indices pour le calcul de susceptibilité.

FORMULES CALCULE SUSCEPTIBILITÉ

Une fois obtenues les indices pour chaque élément discriminants et prédisposant, ont été effectués les calculs de susceptibilité pour chaque typologie de phénomène avec l'objectif d'obtenir une susceptibilité détaillée aux différents types de glissements.

Pour chaque type de glissement de terrain nous avons réalisé l'intersection entre les couches d'information (pente, géologie, routes, failles, utilisation du sol, ravines, rivières etc), pour obtenir (4) quatre cartes de susceptibilité, utilisant les formules en ANNEXE 3.

En ANNEXE 9 les images les cartes de susceptibilité aux quatre phénomènes sur les trois communes (de FIG 187 à 190).

Conclusions et analyse des criticités

A partir de l'analyse des 4 cartes de susceptibilité et les résultats du recensement de terrain ont été obtenues les suivantes indications:

1) Dans les trois communes la plupart des glissements de terrain sont superficiels, donc intéressent la couverture du sol et sont liés surtout aux activités anthropiques que causent érosion: déboisement, mauvaises pratiques agricoles, pâturage, découpages des routes, carrières (de FIG. 191 à 192).



Fig. 56 En haut les mauvaises pratiques d'agriculture dans des zones de pente élevées et pâturage (11eme et 10eme de Petit Goâve) dans le bassin versant de la rivière Massack).



Fig. 57 Éboulements dans les carrières à Jacmel.

2) Les phénomènes plus fréquents dans les zones en étude sont les débris flow (FIG. 193), qui sont des phénomènes rapides qui intéressent la couverture. Les débris flow sont déclenchés surtout par les pluies et sont moins liés aux mouvements sismiques. La protection civile doit faire des actions de prévention et alerte en fonction de cette donnée temporelle.

Les débris flow peuvent faire dégâts et morts dans plusieurs zones à cause des hautes énergies, de l'amplitude des distances de propagation: kilomètres long les rivières, lignes de drainages, ravines qui peuvent, dans la démographie haïtienne, facilement arriver aux centres habités



Fig. 58 Débris flow à la 4eme section de Grand Goâve (Moussambé).

4) Après le débris flow les phénomènes les plus fréquentes sont les éboulements (FIG. 194 et 195). Ces phénomènes intéressent surtout le substrat en roche mère mais aussi les colluvions* et sont déclenchés surtout par les actions sismiques, donc est difficile de faire des prévisions.

Les facteurs prédisposant les plus importants sont les découpages des routes, failles, fractures et érosion de la rivière. Plusieurs éboulements ont été relevés long la route nationale entre Petit Goâve et Grand Goâve dans la zone de Tapion par exemple.

Les éboulements sont des phénomènes rapides mais, à différence des débris flow, la distance de propagation des glissements n'est jamais très élevée: au bas des versants ou long les parois.



Fig. 59 Éboulements dans la couverture superficielle, en débris, dans le bassin versant de la Digue à Petit Goâve.



Fig. 60 A' gauche éboulement superficielle en débris (rivière La Digue à Petit Goâve), à droite éboulements en substrat dans la 7eme section de Grand Goâve dans la rivière Canot.

3) Dans la zone d'étude glissements, souvent les terrains évoluent en mauvaises terres (*badlands*), dans un paysage ruinforme des terrains marneux ou argileux, raviné par les eaux du ruissellement. Ces terres sont généralement impropres à l'agriculture et montrent un niveau d'érosion irréversible (FIG. 196).



Fig. 61 Glissement rotationnelle qui a évolué en "mauvaises terres" (*badlands*) donc ne sont plus utilisables pour l'agriculture (Jacmel, 7eme Grande Rivière).

3) Dans les trois communes les formes d'érosion que sont présentes dans les sols argileux ont une forme de "oreiller", et quand la pente augmente un débris flow s'active Fig 197.



Fig. 62 Morphologies à oreillers qui peuvent évoluer en débris flow à l'augmentation de la pente (Jacmel).

3) Les phénomènes lents (rotationnels et translationnels) intéressent normalement la couche superficielle du sol, avec l'augmentation d'érosion et des pentes, ces zones peuvent devenir propices au débris flow (de FIG. 198 à 200). Dans la ville de Petit Goâve, au niveau de la zone périurbaine, a été recensé un glissement translationnel profond (que arrive à la roche mère) (FIG. 201).



Fig. 63 Signes de mouvement translationnel.



Fig. 64 Glissement translationnelle qui en surface présente des formes géomorphologiques à oreillers causées par le mouvement lent du sol au dessus de la roche mère (Jacmel).



Fig. 65 Glissement transationnel : la couronne* est linéaire et il y a une grande tranchée-(Grand Goâve)



Fig. 66 Glissement translationnel en substrat bio-micrite pélagique.

Localité Benoit (11eme Petit Goâve, bassin versant La Digue).

5) Dans les carrières d'exploitation des matériaux nous avons recensé des éboulements liés aux mauvaises activités d'extraction.

6) Les facteurs déclenchant sont les fortes pluies (souvent associés aux cyclones), surtout au niveau des débris flow et l'activité sismique au niveau des éboulements. Plusieurs chutes de blocs/pierres ont été déclenchés avec le séisme du Janvier 2010, (de FIG. 202 à 205).

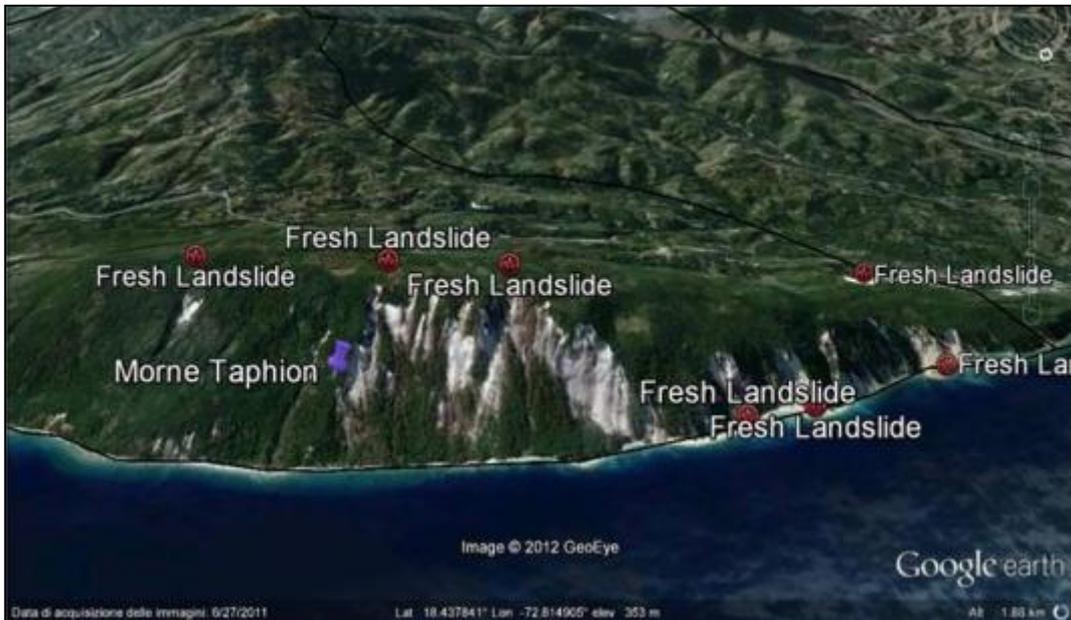


Fig. 67 Éboulements déclenchés par le séisme du 12 Janvier 2010,
dans le Morne Taphion (1ere Section de Grand Goâve, Tête à Bœuf) dans la partie à la cote.
En haut l'image Google Earth © de 2009 et en bas la même zone dans le 2010 après le séisme.



Fig. 68 Éboulements déclenchés par le séisme du 12 Janvier 2010.
(7eme section de Grand Goâve, rivière Ti Frère).



Fig. 69 Éboulements formées pendant le séisme du 12 Janvier 2010.
(Rivière Ti Frère à la 7eme Section de Grand Goâve, à Gérard).

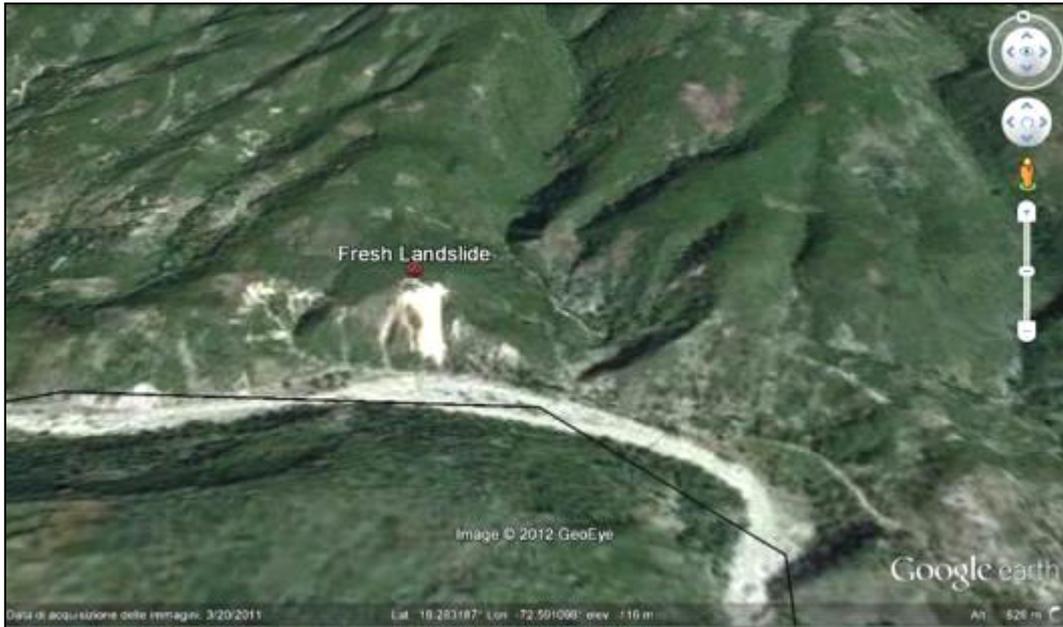


Fig. 70 Éboulement déclenché par le séisme du 12 Janvier à Jacmel à la 9eme section Haut Coq Chante.

MENACE DE IMPACT DE CYCLONE

Introduction

Haïti se trouve sur la route des cyclones et des tempêtes tropicales, dont la saison se situe entre Juin et Novembre. La plus part des trajectoires cycloniques traversent l'île d'Hispaniola d'Est en Ouest, Nord Ouest.

Le cyclone est la menace la plus fréquente en Haïti et pourtant il n'y a pas beaucoup de données par rapport aux hauteurs des vagues, à la vitesse des vents, à la pluviométrie. Haïti n'a pas beaucoup d'instrumentations pour le contrôle et la prise de mesure. Les seules données disponibles sont à l'échelle régionale.

La situation géographique d'Haïti, avec le voisinage de la Jamaïque et Cuba, respectivement au Sud-Ouest et à l'Ouest, fait que sur la partie Sud de l'île, les vents arrivent avec une vitesse majeure et que celle ci présente des caractéristiques bathymétriques* qui semblent amplifier la menace (FIG 282). Les faibles profondeurs existent uniquement en proximité des côtes, si bien qu'il suffit que le vent soit homogène pour que les vagues y arrivent peu dissipées par les fonds. La simulation d'une perturbation en provenance du Sud montre des hauteurs de houle de l'ordre de 8-10m. Exposée à des violents vents cycloniques, la côte caribéenne de l'île pourrait subir des dégâts particulièrement importants par des houles longues et fortes.

Les cartes en (FIG. 182 et FIG. 183) montrent les données régionales de:

- Vitesses du vent (a)
- Les hauteurs des vagues (b)
- Raz-de marée (c)
- Les courbes de niveau des pics de vitesse du vent (mph) à l'hauteur de 10 m in zones plaines et pour différents périodes de retour.

Des trois communes Jacmel est la ville la plus menacé par les cyclones. Les éléments de menaces sont la vitesse des vents, la hauteur des vagues et les raz de marée.

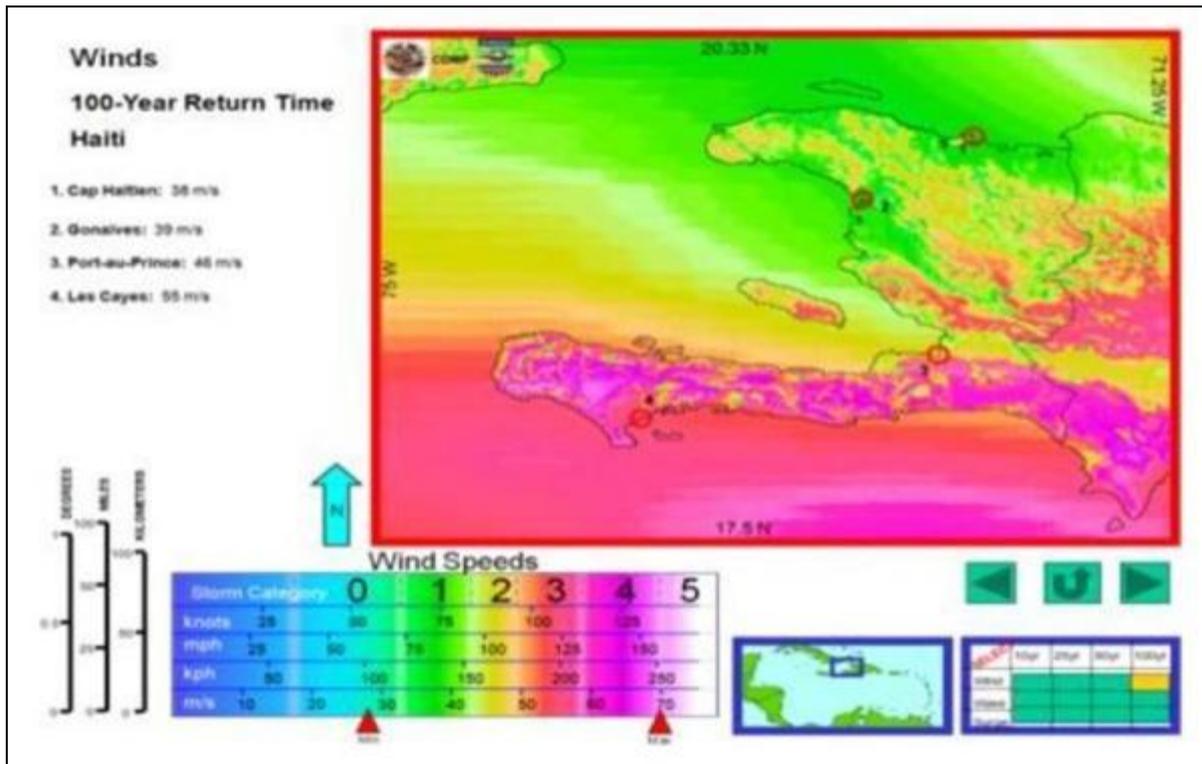


Fig. 71a Les données régionales de vitesse du vent (a)
(Source: Atlas of Probable Storm Effects in the Caribbean Sea)

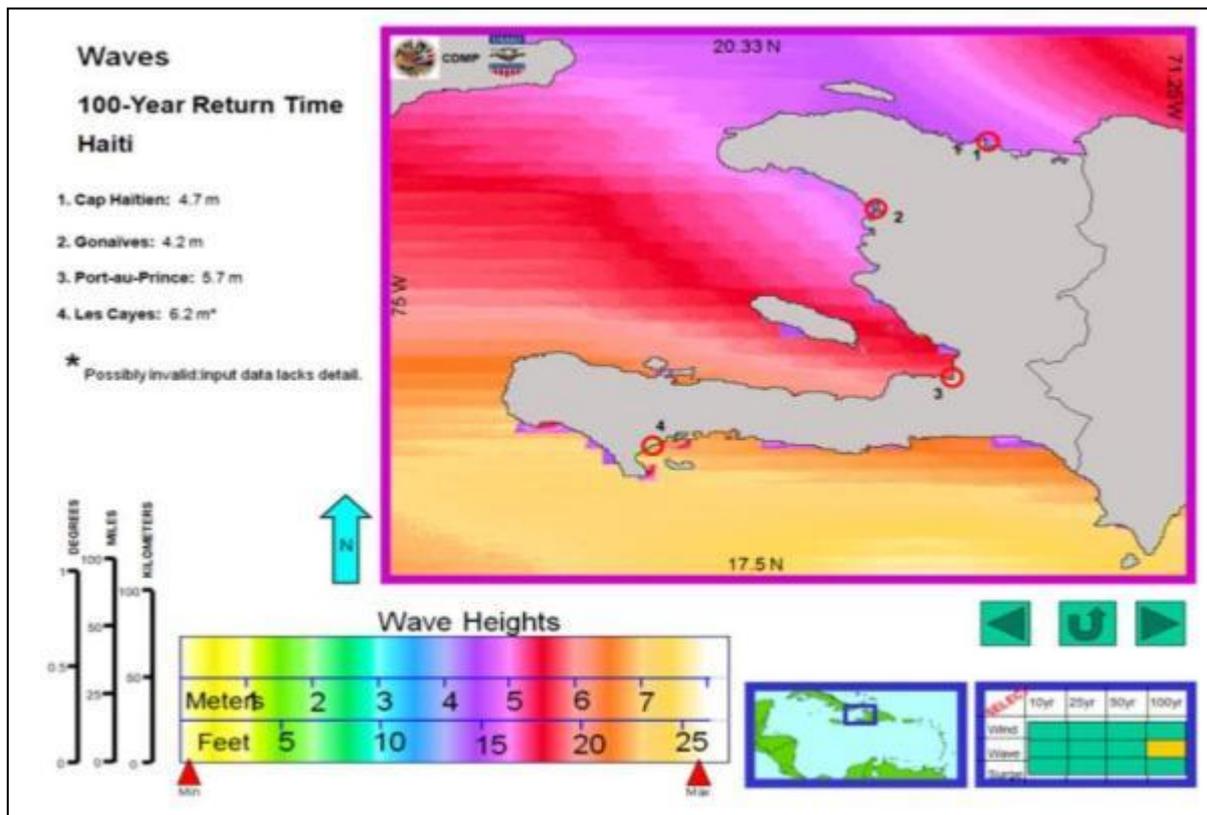


Fig. 72b Les données régionales des hauteurs des vagues (b)

(Source: Atlas of Probable Storm Effects in the Caribbean Sea)

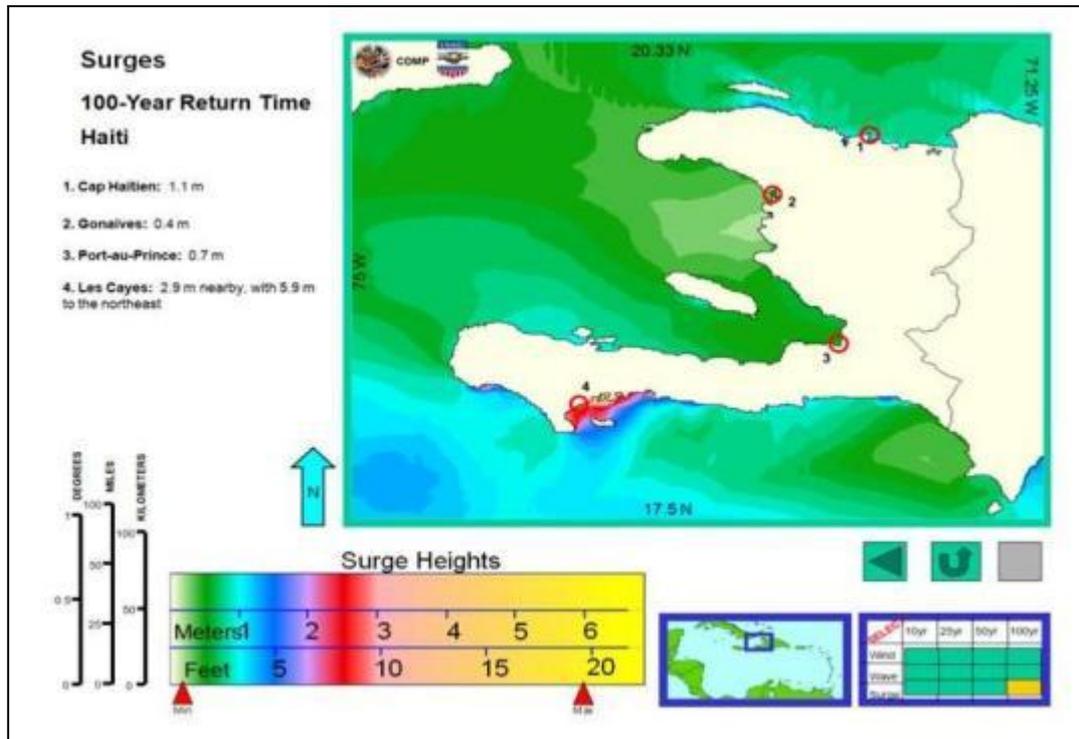


Fig. 73c Les données régionales des raz-de marée (c)

(Source: Atlas of Probable Storm Effects in the Caribbean Sea)

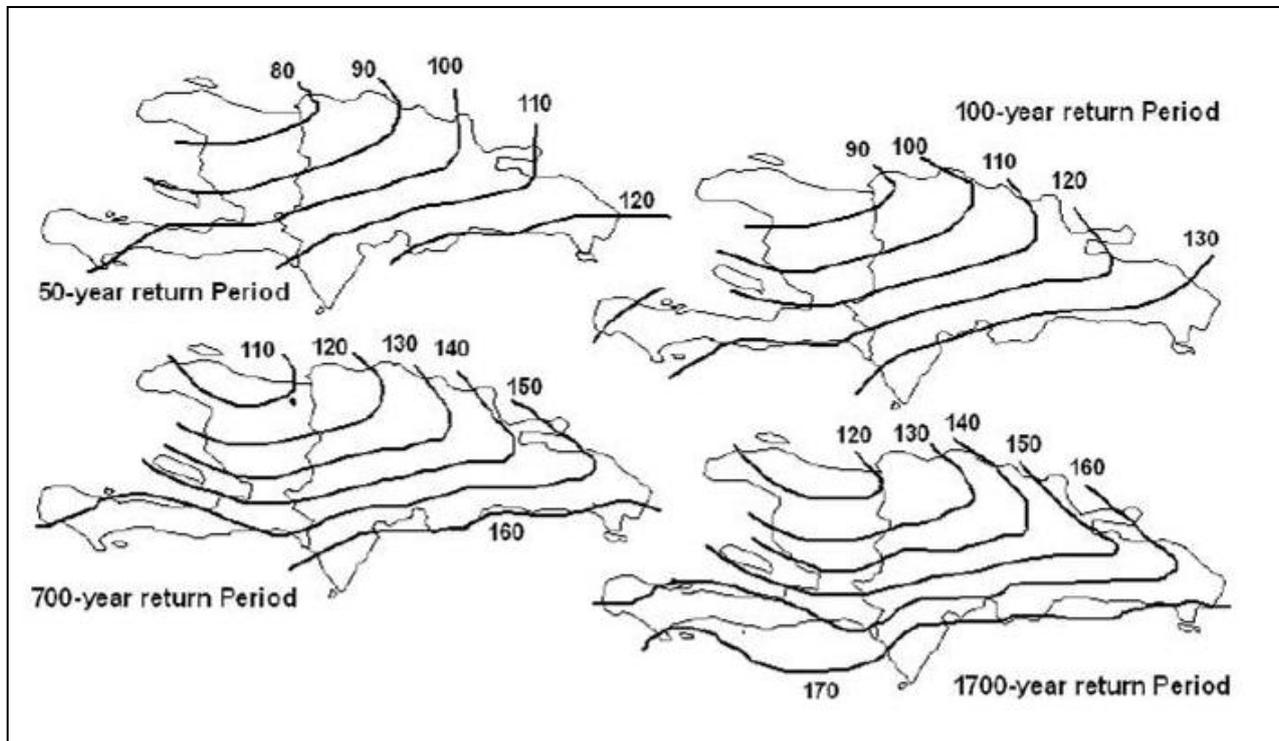


Fig. 74 Courbes de niveau des pics de vitesse du vent (mph),

à l'hauteur de 10 m in zones plaines et pour différents périodes de retour.

(Source: P.J.Vickery et al. Pan American Health Organization).

Objectifs et méthodologie d'étude d'impact cyclone

L'analyse d'impact cyclones doit être fondée sur les valeurs de topographie, de climatologie, morphologie et orientation des bassins versants, occupation des sols, la vitesse des vents et les hauteurs d'eau.

Les données existantes en Haïti ne permettent pas de faire une évaluation à grande échelle de la menace cyclonique.

Sur la base de ces motivations, dans l'étude, nous avons fait une évaluation de vulnérabilité du bassin en fonction de la végétation, de la morphologie (plain ou à entonnoir) du bassin, en supposant que la menace est presque la même dans tous les bassins.

La végétation a la fonction de réduction de vitesse au sol du vent, à travers l'effet de traînée (*Drag Effect*) (terme technique en agronomie). Cet effet est identifié par un « *Cd* », coefficient qui est fonction de la vitesse du vent, la densité optique de la végétation et la section d'impact transversal du vent, ainsi qu'un certain nombre d'autres coefficients déterminés de manière empirique (physionomie végétale, élévation, physiologie structurelle de la végétation).

Dans le cadre de la végétation avec laquelle nous avons à faire en Haïti:

- La végétation a un coefficient de valeur intermédiaire optique, basé sur une écotype végétale assimilable à une couverture tropical avec une valeur de diradaction très élevé.
- La hauteur de la végétation doit normalement réduire la vitesse du vent de 80% en l'espace derrière les arbres pour une longueur égale à 10 fois la hauteur des arbres.

La méthodologie donc est basée sur:

A. L'identification géographique de la densité végétation;

B. Supposition que le facteur de réduction de la vitesse du vent au sol en raison de la vitesse est de 40%.

Étude de vulnérabilité des bassins versants par rapport aux cyclones

À travers l'étude de photo-interprétation réalisée par l'équipe de "Institute for Applied Remote Sensing" dell'European Academy de Bolzano (Italie) nous avons réalisé la carte de densité de végétation (FIG. 284).

L'étude a été exécutée en utilisant une grille de 500m*500m.

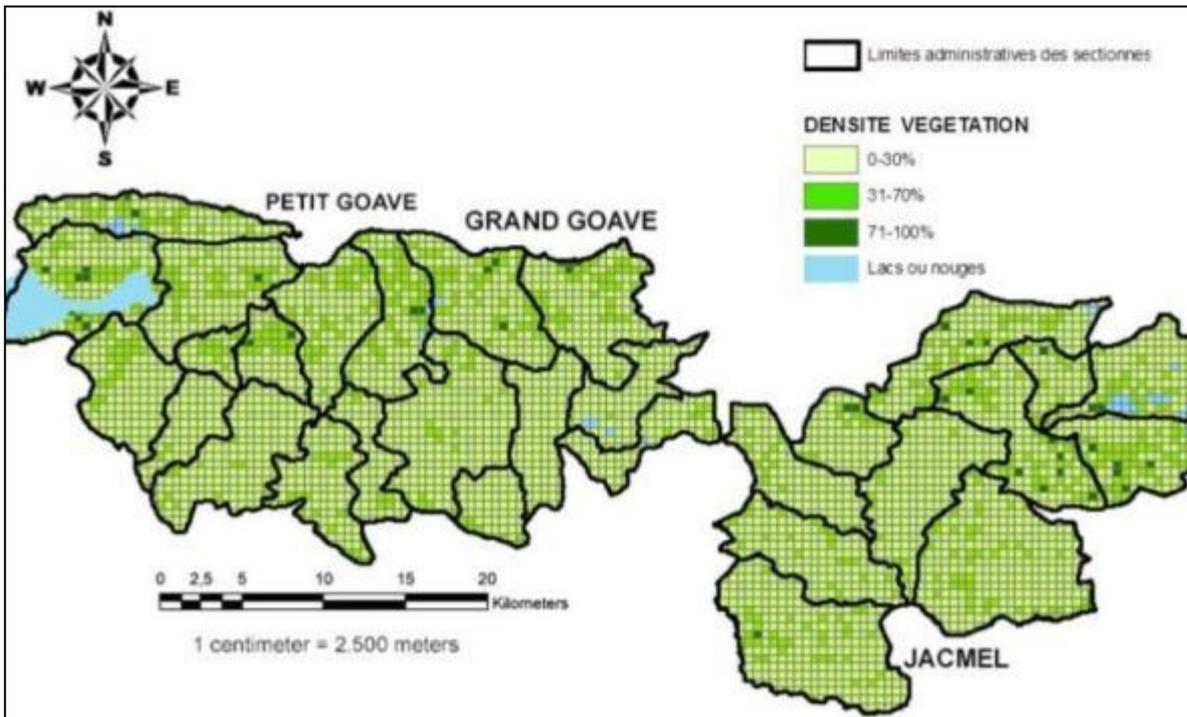


Fig. 75 Carte de densité végétation obtenue par photo-interprétation des ortho photo de 2010 avec une grille de 500*500 m
(Source A. Lentini, WHH et équipe université de Bolzano).

À partir de ces données une carte de végétation pour les différentes sections communales (FIG. 285) a été réalisée.

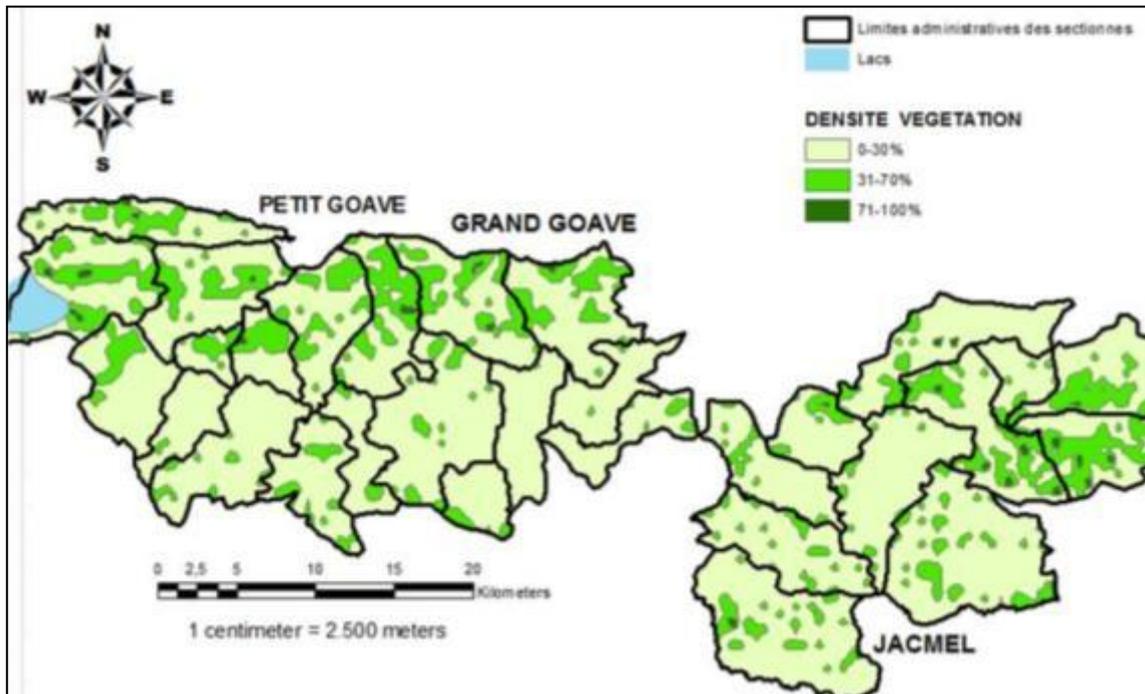


Fig. 76 Carte de densité végétation (Source A. Lentini, WHH et équipe université de Bolzano).

Dans l'analyse des résultats il faut noter l'important degré de déforestation des trois communes, presque la quasi-totalité des bassins versants se trouvent dans la première classe, entre 0 - 30 % de végétation (FIG. 287).

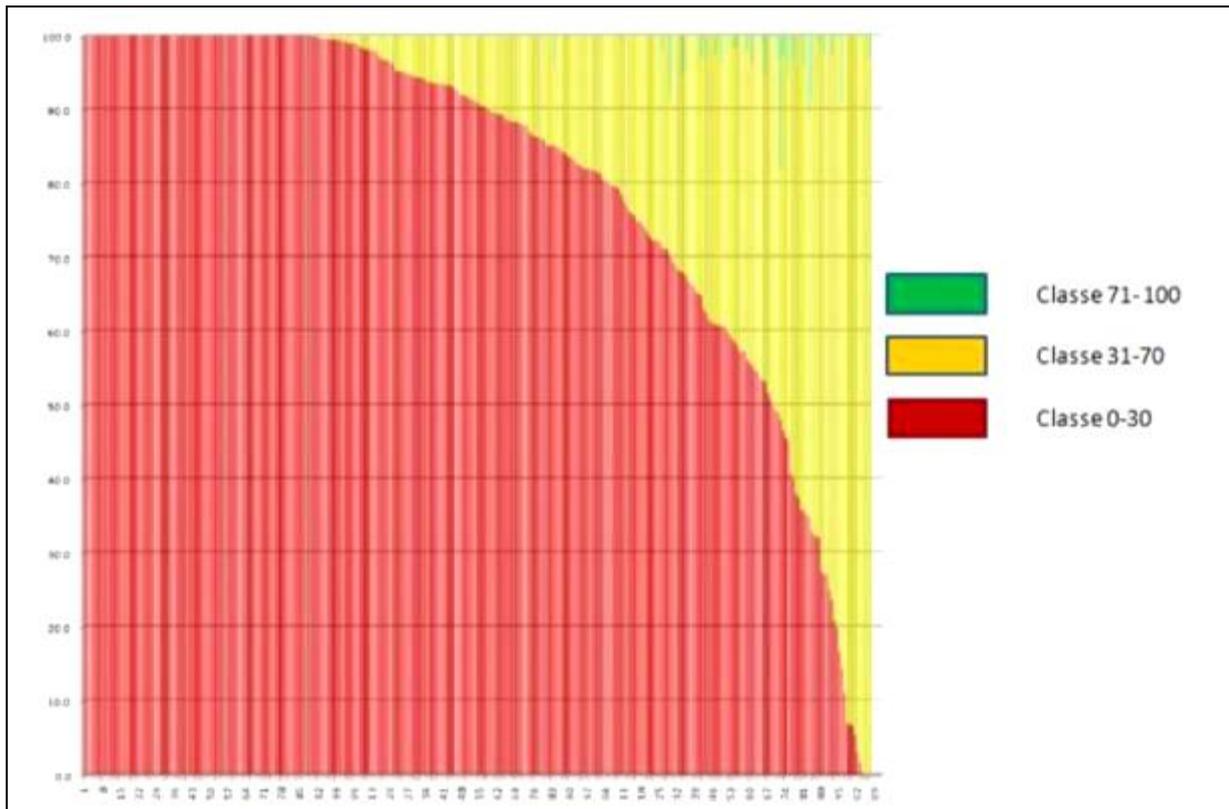


Fig. 77 Représentation de la distribution des différentes classes de % de couverture vegetal.

Dans l'analyse du pourcentage de végétation dans chaque bassin versant nous avons élaboré la carte de vulnérabilité aux cyclones en rapport à le taux de couverture vegetal.

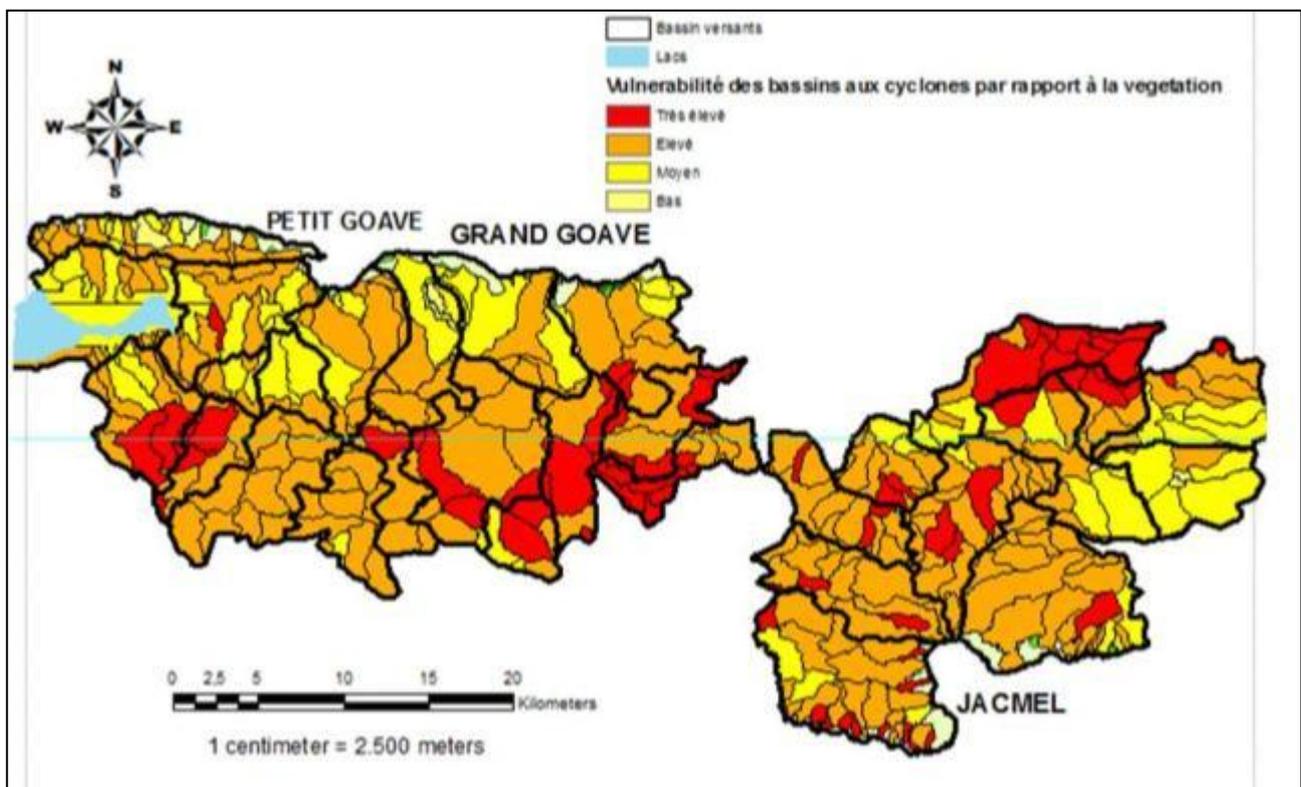


Fig. 78 Carte de vulnérabilité aux cyclones par rapport à la densité de végétation. (Source Lentini Azzurra, WHH).

Des études dans le futur peuvent être faites concernant la mise en place des instruments de mesure de vitesses et directions des vents, hauteurs des vagues, pluies, pour évaluer:

- La menace de cyclones par rapport aux vents;
- La menace de cyclones par rapport à la submersion marine.
- La vulnérabilité du territoire par rapport à l'exposition des bassins versants: les faces opposées parallèles à les directions des vents cycloniques sont les plus sensibles, puisque la force de cisaillement* exercée par le vent fort, surtout en raison de l'effet de canalisation à l'intérieur des rainures des bassins.

Inventaire des enjeux publiques exposées

Cette phase a pour objectif d'identifier une première évaluation des éléments publics exposés aux menaces dans les trois communes, afin de caractériser et cartographier les différents établissements publics (écoles, marchés, églises, hôpitaux et camps IDP), ainsi que les routes nationales et secondaires (FIG. 289 et 290).

Dans l'ANNEXE 10 le tableau avec les coordonnées des bâtiments et typologie de matériel de construction de mur et toiture.

Parmi les éléments exposés il y a aussi les points des sources d'eau (fig 291) pour les communes de Petit Goave et Grand Goave (la cartographie a été fait par les ONG qui ont travaillées dans la reconstruction d'urgence sur les deux communes et qui ont formé le group de "CCMP Participative Mapping V3") et en ANNEXE 12 les files Google Earth©.

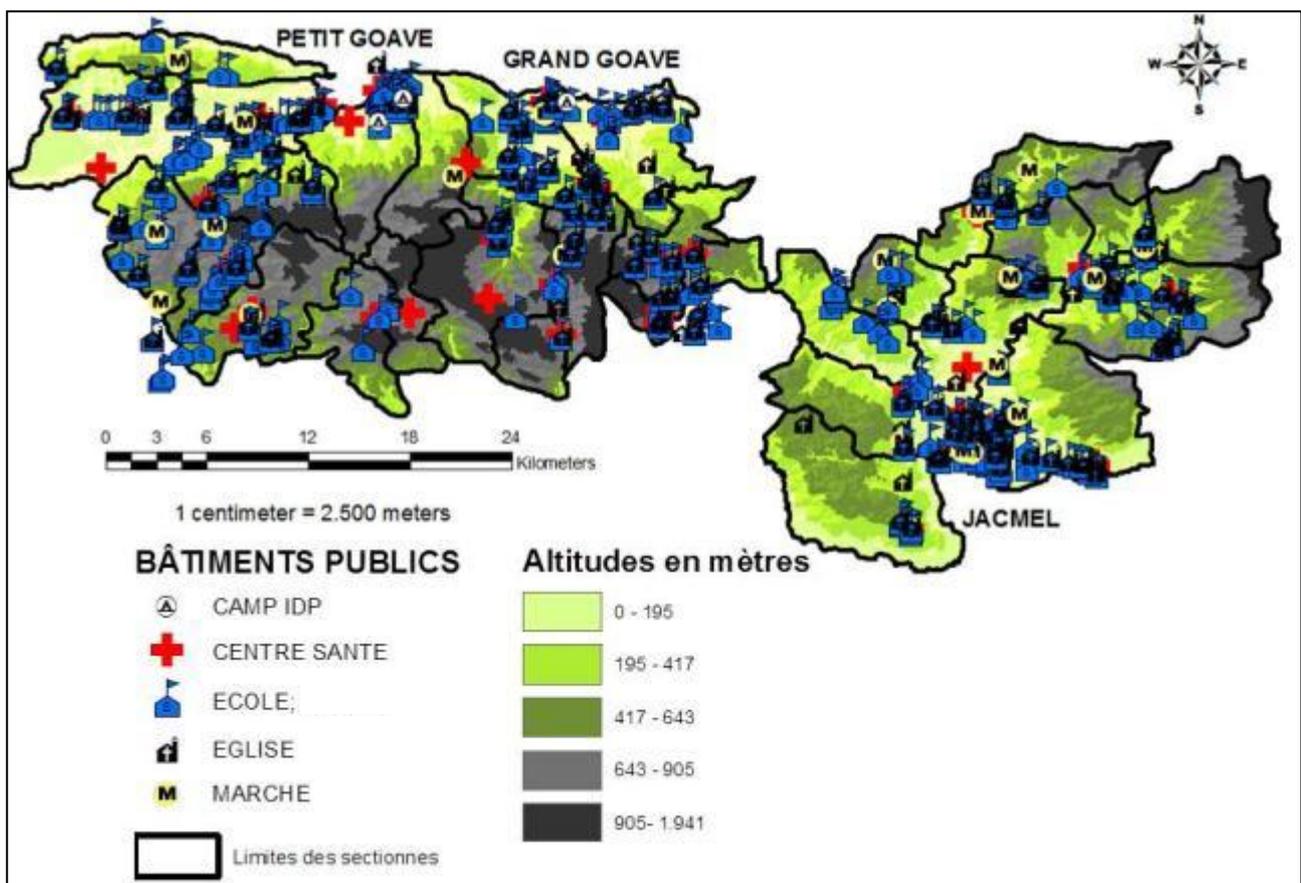


Fig. 79 Carte des bâtiments publics (Source A. Lentini, WHH)

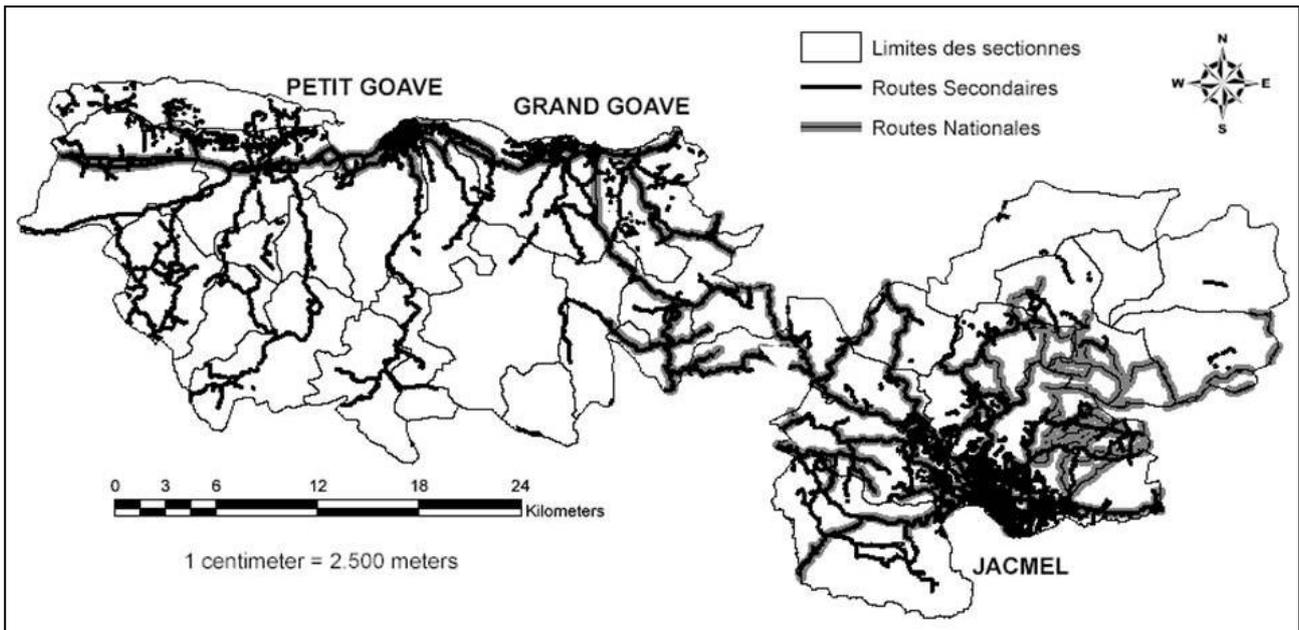


Fig. 80 Carte de Routes Secondaire et Nationales (Source CNIGS et mise à jour par A. Lentini, WHH).

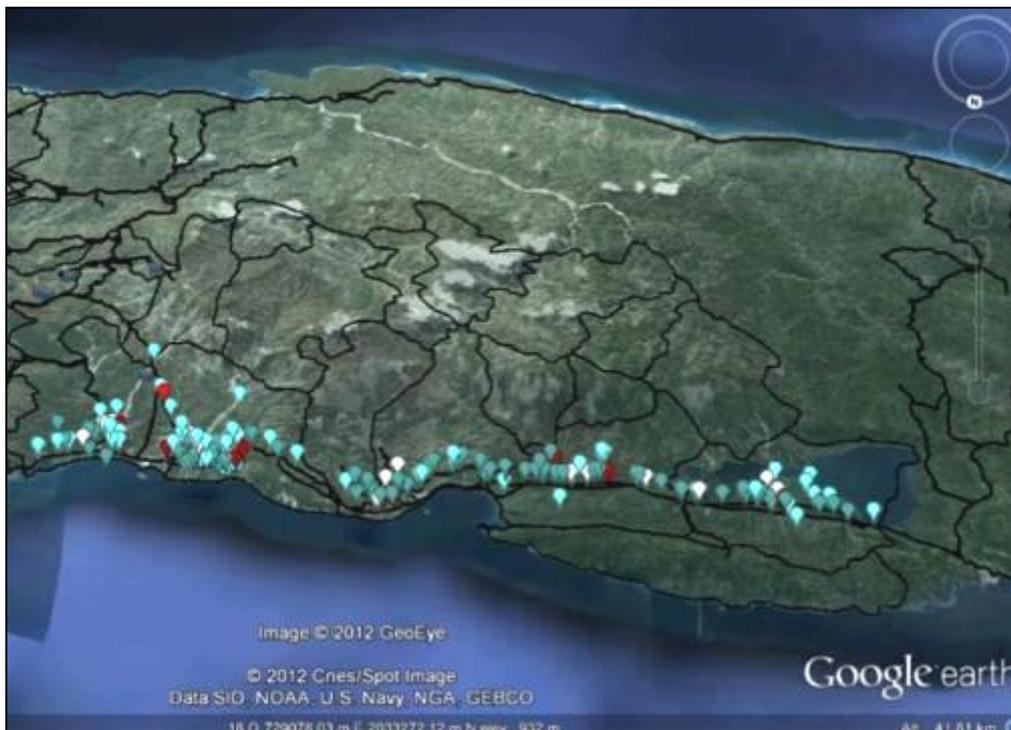


Fig. 81 Carte de sources d'eau à Petit Goave et Grand Goave, (Source CCMP Participative Mapping V3, 2011).

Dans les FIG. 292 - 297 des bâtiments publics exposés aux fortes menaces.



Fig. 82 Village de Marbial situé dans le lit de la rivière, délimitation en rouge. 5eme Section de Jacmel.



Fig. 83 Centre de Ville de Marbial (5eme section de Jacmel).



Fig. 84 Centre de Santé de Marbial (5eme section de Jacmel).



Fig. 85 Camp IDP à Petit Goâve (près de la rivière la Digue).

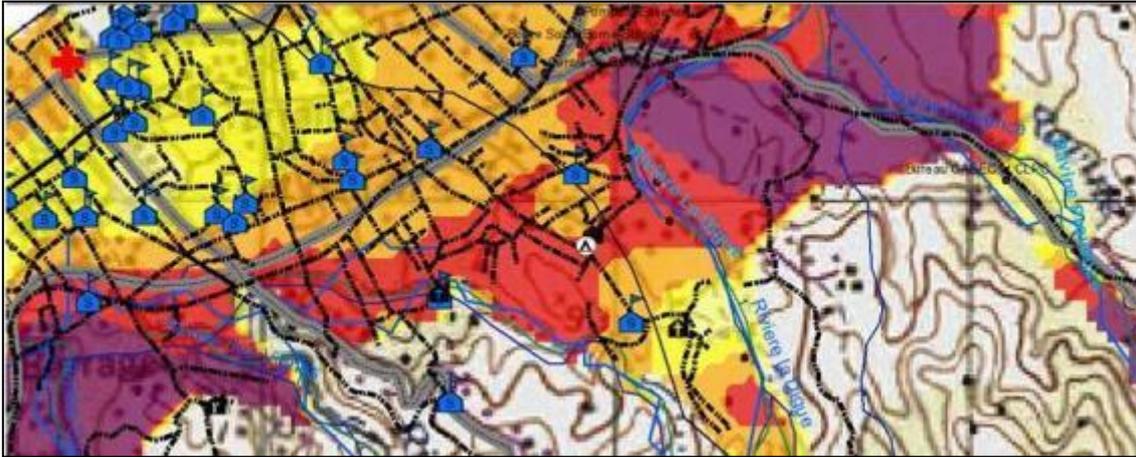


Fig. 86 Carte de menace d'inondation: le camp de la photo est dans l'aléa fort d'inondation (en rouge).

(Source A. Lentini, WHH).



Fig. 297 École dans la zone inondable de Nan Regal (Petit Goâve).

A cause des pentes la possibilité de déclencher de glissements de terrain représente une menace pour les routes, des activités comme le découpage des routes n'augmentent la probabilité, en FIG. 298 le cas de la route Nationale entre Grand Goâve et Petit Goâve, à Tapion.



Fig. 298 A gauche la Route National entre Grand Goâve Petit Goâve (Taphion) et à coté l'éboulement qui menace la route.

Proposition d'action en mitigation des risques inondation, glissements et cyclones

1) Déplacement des édifices vulnérables situés dans les zones à forte et très forte menace

La première orientation concerne la nécessité de déplacer des édifices situés dans les zones à fortes et très fortes susceptibilités aux différents glissements et inondations. Cette démarche est difficile à réaliser en totalité à très court terme.

Il est souhaitable d'engager au plus tôt une politique de mitigation pour éviter des complications ultérieures par multiplication des facteurs aggravants. La formation sur la connaissance du risque initiée dans cette expertise sera essentielle dans cette démarche. La reconstruction devra intégrer ces paramètres pour éviter l'augmentation de la vulnérabilité dans ces zones et pour cette raison la méthodologie est adressé à tous les partenaires opérant dans l'aménagement du territoire, gestion des risques et reconstruction (entreprises, ONG etc).

2) Aménagement bassin versants: reboisement, réduction érosion, reconstitution de la couche organique, modification de la morphologie du territoire.

C'est urgent et prioritaire pour réduire la dégradation du sol et augmenter l'infiltration d'eau:

- Trouver une alternative à l'utilisation du charbon pour empêcher le déboisement.
- Le reboisement et aménagement du bassin versant FIG. 299 et 300.
- Instruire les habitants afin qu'ils adoptent des pratiques d'agriculture adéquates.
- Aménagement bassin hydrographique: il faut que les ravines principales fassent l'objet d'une surveillance et d'études particulières, notamment en termes d'évaluation de débits, puis d'identification et de caractérisation des ouvrages. Il faut nettoyer le fond des ravines et utiliser des techniques de contrôle torrentiel. La structuration d'intervention apte à la modification de la morphologie du territoire pour augmenté le taux d'infiltration d'eau, réduire le taux de ruissèlement et favoriser le procès de reforestation sont activités complémentaires et nécessaires pour une correcte opération de réduction des risques.
- Systèmes d'alerte: une solution intermédiaire à moyen terme devra être recherchée pour les points les plus sensibles avec des réseaux de surveillance et d'alerte permettant au moins d'éviter les pertes humaines.
- La conservation des zones naturelles telles que les terres humides, les dunes et les forêts peuvent aider à réduire l'impact de ces événements.



Fig. 87: A droite cultivassions Vétiver pour renforcer le sol; à gauche intervention de WHH pour réduire l'érosion dans le bassin versant de La Digue à Petit Goâve.



Fig. 88 Rivière La Digue érosion intense et glissements de terrain causent aux quantités des débris dans la rivière.

- **3)Ouvrages de protection dans les rivières et d'érosion des versants:** en parallèle aux opérations précédentes, sont conseillés des:
 - Travaux de protection contre les crues;
 - Construire au-dessus de la ligne de crue;
 - L'optimisation et l'entretien des ouvrages (nettoyage des canaux, des ponts, entretien de gabion);
 - Amélioration des moyens d'évacuation;
 - Identifier et prévoir au niveau de la planification urbanistique, des zones d'expansion des crues pour les inondations
 - Construire des bassins de rétention dans des endroits appropriés;
 - Utiliser des solutions durables pour la collecte et le traitement des eaux usées;
 - Appliquer des méthodes de construction résistantes aux inondations:
 - o Élever les bâtiments au-dessus du niveau de l'inondation;

- Utiliser des matériaux résistants à l'eau (blocs de sol stabilisés par un additif de ciment ou de chaux).
- Éviter la détérioration des murs de boue.
- Protéger les murs.
- Construire les fondations et les sous-sols sur une couche de gravier pour empêcher le ravinement causé par l'inondation.

De FIG. 301 à 304 les structures décrites.



Fig. 89 Centre Ville PETIT GOÂVE: les canaux de drainage sont remplis de déchets, ordures et eaux usées que causent ruissellement urbaine, maladies.



Fig. 90 Exemple d'un gabionnage.



Fig. 91 Nettoyage du pont dans la rivière Cayman à Petit Goâve (projet de WHH).

4) Renforcement/mise en place de pluviomètres afin d'améliorer la connaissance des paramètres influençant les inondations, glissements de terrain et les temps de retour, il est conseillé de placer des instruments qui permettront l'enregistrement temporel des paramètres hydrologiques, cela permettra une étude statistique des inondations probables et la mise en place d'un système de vigilance (Système d'Alerte Précoce).

5) Élaboration d'une instruction technique pour la protection contre les inondations, glissements de terre et cyclones.

6) Élaboration d'une réglementation pour l'urbanisation, sur le risque d'inondation, cyclones, glissements de terre et sur l'étude d'impact environnemental de chaque ouvrage;

7) Intervention dans les zones des glissements

- **Zones à fortes et très fortes susceptibilité aux débris flow:**
 - Privilégier les interventions non structurales dans les zones de détachement des débris flow: végétation basses, terrassements, canaux de drainages superficielles (FIG. 299).
 - Éviter de construire dans les zones de pente, observer une distance de construction des ravines et rivières.
- **Zones à fortes et très fortes susceptibilité aux détachements des éboulements:**
 - Interventions structurales: gabionnages et structures de renforcements parois (FIG. 304).
 - Éviter les constructions à la base des versants et dans les zones de pentes élevées.



- Fig. 92 Structures de renforcement des parois des versants.

Structures pour réduire vulnérabilité aux cyclones

- Éviter les toits en pentes faibles, plats et légers
- Garantir la stabilité des murs et des toits;
- Fermer l'espace sous le bâtiment pour empêcher le soulèvement produit par la force du vent sous la structure;
- Relier fortement les toits aux murs de fondations;
- Éviter zones exposées aux forts vents.



Fig. 305 Maison construite dans un endroit protégé par le vent.

MÉTHODOLOGIE SIG

La rédaction des cartes et l'analyse de la base des données ont été faites avec le programme open-source GvSIG (<http://www.gvsig.org/web/>) qui utilise SEXTANTE pour l'analyse spatial.

GvSIG est une application Système d'information géographique open source développée par le gouvernement local de la Communauté valencienne (Generalidad Valenciana) en Espagne, pour la gestion des données géographiques.

Ce logiciel permet d'exploiter des données vecteurs et reste disponibles sous différents formats standard. GvSIG se connecte également aux bases de données spatiales de type PostGis et Oracle. Il dispose en outre de module de géo-traitements poussés. GvSIG est développée en Java1, son interface d'utilisation s'inspire du logiciel ArcView 3.x2.

L'association gvSIG a comme objectif la durabilité et le développement de la géomatique Open Source.

L'association gvSIG recherche le développement d'un nouveau modèle économique, basé sur la coopération et le partage des connaissances.

Le Système d'analyse territoriale SEXTANTE est une bibliothèque d'algorithmes, pour l'analyse spatiale de logiciels open source disponible pour différents systèmes d'information géographique.

Son objectif principal est de créer une plate-forme qui facilite l'utilisation et la mise en œuvre de ces algorithmes.

Conclusion

Les zones étudiées ont un degré élevé de déforestation qui amplifie les inondations, glissements de terrain, l'impact du vent des cyclones et les phénomènes de liquéfaction, donc mini - tsunami dans les zones côtières, surtout à l'embouchure de la rivière.

Il n'a pas encore des réponses à des questions qui préoccupent le plus en Haïti, concernant le calendrier et la magnitude des séismes dans l'avenir.

Les autorités Locales et Nationales ont suivi notre étude avec l'objectif d'une appropriation active de la méthodologie et des instruments, afin d'exécuter une politique de prévention aux désastres.

À travers l'étude nous avons fait une analyse des menaces d'inondation (fréquente, rare et exceptionnelle), l'élaboration des cartes des menaces avec les aléas, en fonction des hauteurs d'eau et les points d'érosion des berges* et les brèches* dans les gabionnages.

Plusieurs points d'érosion des berges en formation montrent dans la carte que les aléas pourront augmenter.

L'approche utilisée a été exclusivement hydro-géomorphologique car il manque des données climatologiques et hydrométriques mais à l'avenir, des instrumentations de mesures devraient être placés pour analyser quantitativement la menace inondation et les temps de retours.

Les trois villes sont directement construites dans zones inondables et le niveau d'inondation pourra augmenter à cause de l'accroissement de l'érosion des bassins versant. Les aléas sont compris entre quelques centimètres jusqu'à 3,5m.

Les zones à très forts aléas de Petit Goâve sont: les zones de la Digue à Fon Fabre et Rue Benoir et les zones de la Rivière Cayman à Nan Regal et Petit Guinée. Les habitants connaissent la menace mais continuent à construire des maisons sans prendre en considération les aléas.

À Grand Goâve les aléas forts sont à Petit Paradis et Fauchés et il y a encore des camps IDP.

À Jacmel les aléas très forts sont dans le centre de ville (au marché Geffrard), directement positionné à côté du lit mineur de la rivière Orangers et dans des zones de lit majeur avec aléas jusqu'à 3,5m.

Plusieurs villages sont dans le lit de la rivière, comme le cas de Marbial (5eme section de Jacmel) avec plusieurs bâtiments publics (écoles, marchés, églises) et 100 maisons, et à Prien (4eme section de Grand Goâve).

Il est urgent et prioritaire faire des interventions à long termes (aménagement des bassins versants) au lieu des interventions à court, moyen termes (gabionnages, mur protections):

- Aménagement des bassins versants (terrassements, reboisements etc) diminue le niveau d'érosion, l'apport des alluvions et de débris cela permettra de faciliter l'infiltration de l'eau, au lieu de continuer à construire seulement des gabionnages qui sont des ouvrages très coûteux et qui ne sont pas durables à long terme.

Plusieurs glissements ont été recensés, classifiés et pour chaque typologie nous avons reconstruit la carte de susceptibilité aux détachements des glissements.

Les glissements les plus fréquents dans les zones en étude sont les débris flow*, qui intéressent la couverture. Les débris flow* sont déclenchés surtout par les pluies, cyclones et sont moins liés aux mouvements sismiques, peuvent faire dégâts et morts dans plusieurs zones car les distances de propagation sont de kilomètres long les rivières, lignes de drainages, ravines et avec élevées d'énergies. L'alerte de protection civile doit tenir en compte de ces informations. Dans les zones susceptibles aux détachements des débris flow doivent être mis en place surtout des interventions semi-structurelles (reboisement, terrassement etc).

Après les débris flow les phénomènes les plus fréquentes sont les éboulements. Ces phénomènes intéressent surtout le substrat en roche mère mais aussi les colluvions* et sont déclenchés surtout par les actions sismiques, donc difficile faire des prévisions. Plusieurs éboulements ont été déclenchés avec le séisme du Janvier 2010. Les éboulements sont des phénomènes qui parcourent seulement les versants de détachement jusqu'en bas. Pour les éboulements doivent être privilégiées des interventions structurelles (gabionnages, renforcement des parois etc).

Les phénomènes lents (rotationnelles et translationnelles) dans les zones d'études intéressent surtout la couverture et avec l'augmentation d'érosion et les pentes peuvent devenir prédisposant au débris flow.

Dans la zone d'étude sont fréquentes glissements de terrain qui évoluent en mauvaises terres (*badlands*) qui désignent un paysage ruiniforme des terrains marneux ou argileux, raviné par les eaux du ruissellement. Ces terres sont en général impropres à l'agriculture et montrent un niveau d'érosion irréversible.

Dans les trois communes sont fréquentes des formes d'érosion dans le sol argileux avec une forme de "oreiller" et quand la pente augment s'active des débris flow.

Les facteurs prédisposant les plus importants sont les découpages des routes, failles, fractures et érosion de la rivière, mauvaises pratiques d'agriculture, déboisement, pâturage. Nombreux sont les éboulements dans les routes nationales causé par le découpage des routes mises en place sans respecter des règles et calculs de stabilité. Dans les carrières d'exploitation des matériaux nous avons recensé des éboulements qui sont liés aux mauvaises activités d'extraction.

Le choix de cartographier les zones de susceptibilités aux détachements des glissements est basé sur la motivation suivante:

- Sont les zones où concentrer les opérations de stabilisation des versants.

Pour le future nous conseillons des études de terrain pour calculer les distances de propagation des glissements et les énergies.

Les cartes de susceptibilité aux détachements produites sont indépendantes des facteurs déclencheurs comme les séismes et les cyclones et sont construites surtout en fonction des facteurs invariables dans le

temps: géologie et pente. La validité dans le temps de cette étude dépend des facteurs humains: incendie, déboisement, occupation sol, découpage des nouvelles routes.

Le cyclone est la menace la plus fréquente en Haïti et pourtant il n'y a pas beaucoup de données par rapport aux hauteurs des vagues, vitesse des vents, pluviométries. Haïti n'a pas beaucoup d'instrumentations pour le contrôle et la prise des mesures. Les seules données disponibles sont à l'échelle régionale.

Des trois communes Jacmel est la ville la plus menacé par les cyclones. Les éléments de menaces sont la vitesse des vents, les hauteurs des vagues et raz de marée.

Pour l'évaluation de vulnérabilité des bassins versant par rapport aux vents des cyclones a été reconstruit et considéré la densité végétation. Dans le futur il est conseillé d'évaluer la direction des vents locaux pendant les cyclones, l'orientation des bassins versants et la morphologie.

Dans l'analyse des résultats, le grave degré de déforestation des trois communes, presque la quasi-totalité des bassins versants se trouvent dans la première classe, entre 0 - 30 % de végétation. Moins de 1% des zones ont densité de végétation entre 70 et 100%.

Bibliographie et web sites

- Calais, E., Freed, A., Mattioli, G., Amelung, F., Jonsson, S., JACMELnsma, P., Hong, S.H., Dixon, T., Prepetit, C. and Momplaisir, R., 2010. Transpressional rupture of an unmapped fault during the 2010 Haïti earthquake. *Nature Geoscience*, 3(11): 794-799.
- Calais, E. and Haase, J.S., 2010. Earthquake, Liquefaction, and Tsunami Hazards (in French). In: Mora, Sergio (Editor), Determination of the current level of multiple natural hazards in Haïti: Report prepared for the United Nations, February-March 2010, pp. 9.
- Cox, B.R., Bachhuber, J., Rathje, E.M., Wood, C.M., Dulberg, R., Kottke, A., Green, R.A. and Olson, S.M., 2011. Shear wave velocity and geology-based seismic microzonation of Port-au-Prince, Haiti. earthquake spectra, submitted.
- DeMets, C., P. E. Jansma, Mattioli, G.S., Dixon, T.H., Farina, F., Bilham, R., Calais, E. and Mann, P., 2000. GPS geodetic constraints on Caribbean-North America plate motion. *Geophysical Research Letters*, 27(3): 437-440.
- Dixon, T.H., Farina, F., DeMets, C., JACMELnsma, P., Mann, P. and Calais, E., 1998. Relative motion between the Caribbean and North American plates and related boundary zone deformation from a decade of GPS observations. *Journal of Geophysical Research-Solid Earth*, 103(B7): 15157-15182.
- Electricité d'Haïti, ED'H. Nov. 2010. Problématique de l'hydrocarbure sur le littoral, rapport de mission interne.
- Frankel, A., Harmsen, S., Mueller, C., Calais, E. and Haase, J., 2010. Documentation for Initial Seismic Hazard Maps for Haiti. United States Geological Survey Open-File Report 2010-1067.
- Geo Haiti, 2010.- Ministère de l' Environnement, PNUE.- Etat et perspectives de l' environnement, 198P.
- Gerard Holly,1999.- Les problèmes environnementaux de la Région Métropolitaine de Port-au-Prince,174p.

Hayes, G.P., Briggs, R.W., Sladen, A., Fielding, E.J., Prentice, C., Hudnut, K., Mann, P., Taylor, F.W., Crone, A.J., Gold, R., Ito, T. and Simons, M., 2010. Complex rupture during the 12 January 2010 Haiti earthquake. *Nature Geoscience*, 3(11): 800-805.

LEONI G., BARCHIESI F., CATALLO F., DRAMIS F., FUBELLI G., LUCIFORA S., MATTEI M., PEZZO G. & PUGLISI C. (2009) – GIS Methodology to Assess Landslide Susceptibility: Application to a River Catchment of Central Italy. *Journal of Maps*, v2009, 87-93. 10.4113/jom.2009.1041. URL: <http://www.journalofmaps.com/crossrefMap.php?mid=1041>

Lambert, M., Gaudin, J. and Cohen, R., 1987. Geologic map of Haiti: South-east region: Port-au-Prince. Centre d'Etudes et de Realisations Cartographiques Geographiques, Centre Nationale de Recherche Scientifique, Paris, France.

Manaker, D.M., Calais, E., Freed, A.M., Ali, S.T., Przybylski, P., Mattioli, G., JACMELnsma, P., Prepetit, C. and de Chabalier, J.B., 2008. Interseismic Plate coupling and strain partitioning in the Northeastern Caribbean. *Geophysical Journal International*, 174(3): 889-903.

Mann, P., Calais, E., Ruegg, J.C., DeMets, C., Jansma, P.E. and Mattioli, G.S., 2002. Oblique collision in the northeastern Caribbean from GPS measurements and geological observations. *Tectonics*, 21(6).

NASA, METI ASTER, ERS DACE, CALTECH, USGS "ASTER GDEM 2 README" advanced spaceborne thermal emission and reflection radiometer (ASTER), GLOBAL DIGITAL ELEVATION MODEL (GDEM) VERSION 2, October 2011

PDNA du Tremblement de Terre. Évaluation des dommages, des pertes et des besoins généraux et sectoriels. Préparé par le Gouvernement de la République d'Haïti avec l'appui de la Communauté Internationale. Mars 2010

P.J. Vickery and D. Wadhera. Wind Speed Maps for the Carribean for Application with the Wind Load Provision of ASCE 7.

Ratje et al. 2010. GEOTECHNICAL ENGINEERING RECONNAISSANCE OF THE 2010 HAITI EARTHQUAKE. http://www.geerassociation.org/GEER_Post%20EQ%20Reports/Haiti_2010/Haiti10_index.html

Roger Bilham "Invisible faults under shaky ground: the Haiti earthquake ruptured one or more buried faults, generated tsunamis and caused extensive structural damage in Port-au-Prince. Investigations in the epicentral region quantify seismic hazards but offer no clear view of Haiti's seismic future."

Nature geoscience | VOL 3 | NOVEMBER 2010 | www.nature.com/naturegeoscience

Varnes, D. J. 1978. Slope movement types and processes. In: *Special Report 176: Landslides: Analysis and Control* (Eds: Schuster, R. L. & Krizek, R. J.). Transportation and Road Research Board, National Academy of Science, Washington D. C., 11-33.

Web sites

Pour télécharger files shapes de Haïti:

<http://magic.csr.utexas.edu/Event/10Haiti/Elevation.cfm>

<http://Haïtidata.org>

Pour télécharger DEM

<http://www.cgiar-csi.org/data/elevation/item/45-srtm-90m-digital-elevation-database-v41>