



Rapport final d'évaluation technique des menaces naturelles de la commune de Croix-des-Bouquets (Haïti) - Guide méthodologique

Remerciements

Je présente mes sincères remerciements à tous ceux et à toutes celles qui ont contribué à la réalisation de cette étude, principalement :

à Oxfam GB qui m'a donné la possibilité de faire cette expérience de travail ; au responsable DRR de Oxfam GB, **Christelle Marguerite** et directeur pays **Damien Berrendorf**.

à mon collègue géologue et cher ami **Angelo Coletti** qui a travaillé à mes côtés pendant toute la période des études de terrain et qui a produit les cartes géologiques : merci Angelo pour ta bravoure technique, ta professionnalité et ta coopération envers les Haïtiens de notre équipe et envers les stagiaires.

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

Je remercie l' **Ing. Géol. Claude Prepetit** du BME (Bureau des Mines et Energies) pour son expertise, sa professionnalité, pour son appui technique et sa collaboration.

Je remercie l' **Ing. Géol. Samuel Genea** du ministère de l'environnement (Port-au-Prince) pour l'appui et collaboration au sein de l'élaboration de la méthodologie d'étude des inondations.

Je remercie l'équipe des experts géologues de l'entreprise ENGEO Praxis : le Dr. Géologue Gabriele Leoni, Dr. Giovanni De Caterini et Dr. Paolo Zaffiro pour leur appui technique, leur expertise, leur instrumentation géophysique et leur rédaction de cartes géophysiques, des inondations et glissements. Le **Dr. Luca Maria Puzzili** pour l'excellente expertise dans le domaine géophysique et l'élaboration des données de la campagne de prospection sismique.

Le **Dr. Geol. Marco Mulas**, Junior researcher, de l'*Institute for Applied Remote Sensing* », (European Academy, Bolzano, Italie) et le **Dr. géol. Valerio Salvitti** pour l'analyse de densité de végétation à travers la photo-interprétation.

Remerciements aussi à Mme **Ing. Ronaldine Gilles** du LNBTP, au **Dr. Dominique Boisson** de l'URGEO.

Je remercie grandement les stagiaires et enquêteurs de terrain :

Mimose Jusmond, JeanJunior Pierre, Duval Bruno, Paul Marc Barthélemy, Hernseau Chery, Johnny Mompont, Camesuze Bonheur, Miralda Myrtho Calixte.

Mesi anpil!!

Préface

Ce document présente un rapport portant sur le développement d'un système de recherche scientifique et pratique pour l'évaluation technique des menaces naturelles. Il fait une première évaluation de vulnérabilité et permet l'identification des aléas ciblant la commune de Croix - des - Bouquet en Haïti.

Ce travail, financé par OXFAM GB, aborde l'approche d'OXFAM appelé «séquence d'intervention» à travers laquelle nous récoltons des données fiables sur la gestion des risques.

Dans le cadre de ce travail, les menaces prises en considération sont : les séismes, les inondations, les mouvements de terre, la déforestation et les cyclones.

La méthode de récolte des données est une étude de terrain afin de collecter des informations géologiques, sismiques, des enquêtes auprès de la population et des visites de terrain avec les responsables des sections communales.

L'élaboration des données utilise l'approche numérique qui devient un outil de plus en plus important afin de faciliter l'identification des risques.

Les cartes produites sont des outils importants pour planifier des actions de mitigation et de prévention et, malgré certaines difficultés, des outils de planification pour les administrations locales et leurs activités d'urbanisation et de gestion du territoire.

Ces données sur les aléas à Croix des bouquets permettent d'élaborer un plaidoyer, d'influencer les acteurs, d'élaborer des projets basés sur une réalité scientifique.

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

Dans cette publication sont joints en annexe les documents explicatifs concernant les cartes réalisées, l'analyse technique des sous chapitres et les tableaux de résultats numériques.

Liste des Annexes

ANNEXE 1 Cartes:

- Table avec la liste de carte et utilisation;
- Carte géologique à l'échelle de 1:25.000 des sections 1^{ère} Varreux, 2^{ème} Varreux et 1^{ère} Petit Bois, 2^{ème} Petit Bois, 3^{ème} Petit Bois;
- Carte géologique à l'échelle de 1:10.000 des zones de Canaan, Jerusalem et Onanville;
- Carte de microzonage sismique à l'échelle de 1:25.000 des sections 1^{ère} Varreux, 2^{ème} Varreux et 1^{ère} Petit Bois, 2^{ème} Petit Bois, 3^{ème} Petit Bois;
- Carte des fréquences de résonance* à l'échelle de 1:50.000 des sections 1^{ère} Varreux, 2^{ème} Varreux et 1^{ère} Petit Bois, 2^{ème} Petit Bois, 3^{ème} Petit Bois;
- Carte de menaces hydrologiques de la Plaine Cul de Sac à Croix- des -Bouquets et de Canaan 1:25.000 avec la base topographique;
- Carte de menaces hydrologiques de la Plaine Cul de Sac à Croix- des -Bouquets et de Canaan 1:25.000 avec la base des photo-aériennes Google Earth © 2014;
- Carte des menaces de glissements à l'échelle de 1:100.000 dans toute la commune de Croix-des-Bouquets;
- Carte des menaces de glissements à l'échelle de 1:50.000 dans les zones de Canaan, Jerusalem et Onanville et des majeurs bassins versants de la Plaine Cul de Sac;
- Carte de densité de végétation à l'échelle de 1:100.000 dans toute la commune de Croix des Bouquet et des majeurs bassins versants de la Plaine Cul de Sac.

ANNEXE 2

- Liste des couches et explication;
- Couches SIG;

ANNEXE 3 Rapport technique de la géologie de Croix-des-Bouquets;

ANNEXE 4: Rapport technique de l'étude sismique de Croix-des-Bouquets

ANNEXE 5 Tableau des fréquences de résonance*;

ANNEXE 6 Tableau de recensement des glissements de terrain dans la commune de Cdb;

ANNEXE 7: Tableau des indices, poids et formules calcule menace de glissements de terrain;

ANNEXE 8 Tables de recensement des zones inondables, gabions et zones d'érosions de berges;

ANNEXE 9 Glossaire.

Rapport final d'évaluation technique des menaces naturelles de la commune de Croix-des-Bouquets (Haïti) - Guide méthodologique

Contacts

AZZURRA LENTINI

azzurralentini@gmail.com

CHRISTELLE MARGUERITE

CMarguerite@oxfam.org.uk

COLLABORATEURS

Dr. géol. Angelo Coletti

Dr. géol. Gabriele Leoni

Dr. géol. Giovanni De Caterini

Dr. géol. en géophysique Luca Maria Puzzilli

Dr. géomorphologue. Claudio Puglisi

Dr. géol. Paolo Zaffiro

Dr. géol. Marco Mulas

Dr. géol. Valerio Salvitti

Sommaire

Remerciements	2
Préface	3
Liste des Annexes	4
Liste des sigles et abréviations et symboles	8
CHAPITRE 1	10
Introduction	10
Contexte Haïtien et justification	10
Caractérisation de Croix-des-Bouquets	11
Zone prioritaires d'étude : Plaine Cul de Sac (centre de Ville de Croix des Bouquets)	13
Zone prioritaires d'étude: zone Nord de Canaan, Jerusalem et Onanville.	14
CHAPITRE 2	16
Méthodologies d'étude des menaces	16
Objectifs	16
Etude géologique et cartes géologiques produites	19
Méthodologie d'étude géologique	22
L'analyse des cartes géologiques	26
Utilisations pratiques des cartes géologiques	28
Etude des menaces sismiques et cartes produites	29
Méthodologie de l'étude géophysique pour obtenir les cartes	31
L'analyse des cartes de microzonage et des fréquences de résonance*	34
L'utilisation pratique des cartes de microzonage et des fréquences de résonance* pour les interventions futures	38
Etudes de menace des mouvements de terrain et cartes	39
Méthodologie d'étude de mouvements de terrain et cartes	41
L'analyse des cartes de menaces de mouvements de terrain	45
L'utilisation pratique des cartes de mouvements de terrain pour des interventions futures	49
Étude de déforestation dans les bassins versants	50
Méthodologie d'étude de végétation et cartes	51
Résultats de l'étude de déforestation dans les bassins versants	54
L'utilisation pratique de la carte de végétation pour les interventions futures	55
Étude de menaces hydrologiques et cartes	56
Méthodologie d'étude de menaces hydrologiques et élaboration des cartes	58

L'analyse de la carte hydrologique de dynamique des rivières et des ravines	64
L'utilisation pratique des cartes de menaces hydrologiques pour les interventions futures	70
CHAPITRE 3.....	72
<i>Conclusion et proposition d'action en mitigation des risques</i>	<i>72</i>
<i>Bibliographie et web sites.....</i>	<i>75</i>

Liste des sigles et abréviations et symboles

* : ce symbole indique chaque mot inclus dans le glossaire (**ANNEXE 9**).

ASTER GDEM: ADVANCED SPACEBORNE THERMAL EMISSION AND REFLECTION RADIOMETER (ASTER) - GLOBAL DIGITAL ELEVATION MODEL (GDEM)

ATL: Agence technique locale

BME: Bureau des mines et énergie d'Haïti

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

CIC: (Code International de Construction).

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*

DLR : Agence aérospatiale allemande

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 »;

ENGA: Ecole Nationale de Géologie Appliquée

EPGFZ: Enriquillo–Plantain Garden fault zone

H/V ou **HVSR**: Horizontal to Vertical Spectral Ratio;

IDP : *Internal displaced persons* - Déplacés internes

LNBT: Laboratoire National Bâtiments et Travaux Publics

MASW: Multichannel analysis surface waves;

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

NASA: *National Aeronautics & 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

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

URGEO: **Unité de recherche** en géotechnique (fait partie de la faculté de science de Haïti).

Vs30= vitesse des ondes S* dans les premières 30 mètres du sous-sol.

WRI : *World Risk Index*



WB : *World Bank, Banque Mondiale*

WHH: *Welt Hunger Hilfe*

CHAPITRE 1

Introduction

OXFAM GB 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 menaces naturelles, les guides méthodologiques et l'élaboration des cartes des menaces dans la commune de Croix des Bouquets, Haïti

L'étude technique de terrain dans la commune de Croix-des-Bouquets, a été conduite de Février 2014 à Avril 2014.

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

Contexte Haïtien et justification

Haïti est un pays exposé à plusieurs typologies des catastrophes naturelles, 96% de la population habite dans une zone menacée par la sécheresse, les cyclones, les tempêtes tropicales, qui activent des mouvements 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 en 2010, la tempête tropicale Isaac et le cyclone Sandy (2012), ont touché le pays et ont causé des vents violents, des inondations, des pertes de cultures, des glissements de terrain, des destructions de maisons, des maladies et des décès.

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.

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

Le séisme du 12 janvier 2010 Haïti de magnitude $M_w^*=7,0$ est un témoignage de la faiblesse du Pays. Les estimations évoquent plus de 300.000 personnes décédées, 100.000 blessées et plus de 1,3 millions de personnes ayant perdu leur maison et 300.000 déplacées. La perte économique a été estimée à 8 milliards de dollars US\$ (PDNA, 2010).

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.

Après le séisme beaucoup d'erreurs ont été commises par des décisions prématurées, le manque de communication et de collaboration entre les acteurs nationaux et internationaux. Une des erreurs les

plus évidentes a été l'ouverture d'un camp de IDP en périphérie éloignée de Port-au-Prince (dans la commune de Croix-des-Bouquets) qui a causé l'augmentation de l'expansion incontrôlée de Canaan, une vaste urbanisation, qui a été déclarée le «plus grand accaparement des terres de l'Amérique latine» (Valence 2013).

Une manifestation de la faiblesse institutionnelle, le cas de Canaan montrera si les acteurs haïtiens et internationaux, auront la possibilité de développer des quartiers habitables ou si le pays sera toujours orienté vers l'expansion urbaine sans contrôle.

En Haïti le niveau de déboisement est très élevé (2% seulement de couverture forestière dans tous le Pays) et jusqu'à maintenant aucune solution n'est envisagée et l'érosion massive des terres augmente progressivement.

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

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

Le manque de 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 et des réponses aux catastrophes naturelles, ce qui est une approche coûteuse 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.

Selon l'indice mondial de risque (World Risk Index, WRI) Haïti présenterait en 2011:

- L'un des indices de prédisposition (probabilité qu'une société ou qu'un écosystème donné soit endommagé en cas des catastrophe naturelle) les plus élevés au monde (parmi les 15 premières)
- L'un des indices de capacité 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 sécurité sociale et matérielle), qui est le plus bas au monde (parmi les 15 premiers).

Caractérisation de Croix-des-Bouquets

La commune de Croix-des-Bouquets est la 2^{ème} commune d'Haïti en termes de surface (environ 635 km²) et est formée par dix (10) sections communales (**FIG. 1**).

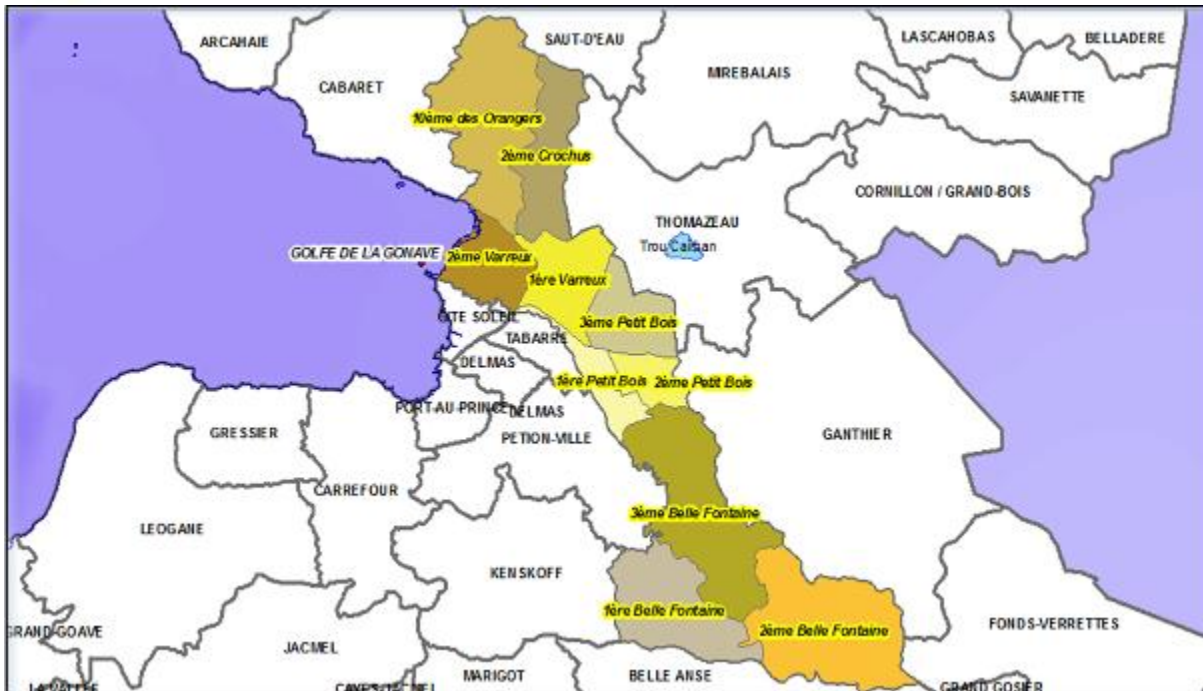


FIG. 1: Les dix (10) sections communales de Croix - des - Bouquets

La ville de Croix-des-Bouquets est un lieu stratégique reliant la capitale aux pays étrangers par voie terrestre (routes Nationales qui arrivent en République Dominicaine). C'est la ville d'extension de la capitale qui accueille depuis les troubles politiques de 2004 et le séisme du 12 Janvier une population nombreuse parmi laquelle les couches les plus vulnérables.

L'étude s'intéresse aussi bien à la commune de Croix-des-Bouquets qu'aux zones des bassins versants majeurs de la Plaine Cul de Sac. Les détails ont été faits dans des zones prioritaires, au niveau de l'urbanisation et des menaces naturelles, qui sont : le centre de ville de Croix-des-Bouquets, les zones de Canaan, Jerusalem et Onanville et les rivières, canaux et ravines principales (**FIG. 2**) et les bassins versants drainants à la Plaine Cul de Sac (**FIG. 3**).



FIG. 2: Les zones prioritaires d'étude dans la commune de Croix des Bouquets

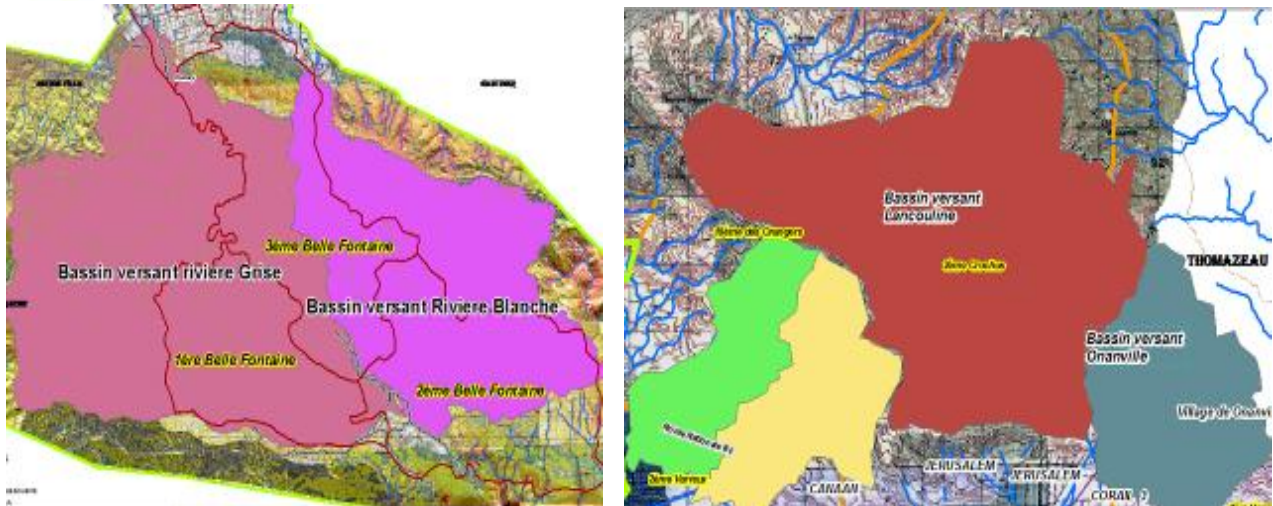


FIG. 3: Bassins versants majeurs drainant à la Plaine Cul de Sac.

La commune de Croix-des-Bouquets est formée par trois (3) aires agro écologiques :

- 1) Montagnes basses avec une pluviométrie annuelle entre 1000mm et 1400mm : zones de Canaan, Jérusalem et Onanville.
- 2) Plaines semi-arides à climat chaud et une pluviométrie annuelle entre 600mm à 1000mm : plaine Cul de Sac (centre de ville de Croix-des-Bouquets).
- 3) Montagnes très humides avec une pluviométrie annuelle de 2400 mm et une température de 18°C : les sections de Belle Fontaine.

Zone prioritaires d'étude : Plaine Cul de Sac (centre de Ville de Croix des Bouquets)

La ville de Croix-des-Bouquets est située dans la Plaine Cul de Sac, qui était un site à fort potentiel agricole :

Dans les années 1720 a été construit un réseau de canaux permettant l'irrigation des terres et vers 1780 cette zone représentait une immense plaine agricole. Pendant l'année 1982 l'urbanisation de la capitale se développe vers le nord mais la commune de la Croix des Bouquets demeure malgré tout une commune entièrement rurale.

Vers 1998 l'urbanisation commence à gagner la plaine agricole et l'urbanisation s'implante le long de la nationale 1. En 2011 l'urbanisation envahit la plaine agricole (**FIG. 4**) et la population devient à 50% urbaine.

Dans l'espace urbanisé, les canaux ont été remplacés par les routes et le drainage du sol est extrêmement réduit. La part de l'espace effectivement agricole s'est extrêmement réduite faute d'entretien des grands canaux d'irrigation (Bassin général, prise d'eau sur la rivière Blanche) et la montée du Trou Caïman et du lac Azuéï dégrade aussi la qualité des terres agricoles proches.

L'expansion urbaine incontrôlée augmente le trafic sur les principaux axes routiers diminuant les flux d'échanges avec la Région Nord et la République Dominicaine.

L'urbanisation de la Plaine augmente le risque d'inondation des rivières Grise, Blanche et les canaux urbains parmi lesquels la Canal Broucanbrou (canal qui connecte le Lac Trou Cayman avec la mer).

Le risque inondation est très fort aussi à cause d'une manque de curage des canaux, de gestion des eaux usées, des déchets et d'aménagement des bassins versants.

Dans la ville est présent aussi un haut lieu artistique: « Le village de Nouailles » pour le recyclage/production d'œuvres d'art à partir du métal découpé qui est un attrait touristique.



FIG. 4: L'urbanisation dans la Plaine Cul de Sac (Croix-des-Bouquets)

Zone prioritaires d'étude: zone Nord de Canaan, Jerusalem et Onanville.

La zone de Canaan est située entre la fertile plaine Cul-de-Sac et les pieds de la déboisée Chaîne des Matheux.

La dégradation du sol, l'absence de végétation dans les bassins versants, l'exploitation des carrières ont diminué l'infiltration et le potentiel de rétention, ont augmenté les menaces hydrologiques et des mouvements de terrain et ont laissé les aquifères sèches.

Après le séisme l'ouverture du camp IDP de Corail (**FIG. 5**) a causé l'augmentation de l'expansion incontrôlé de Canaan surtout dans la zone des cônes de déjection*.



FIG. 5: Camp de Corail (zone de Canaan)

En Avril 2010, 10.000 personnes s’installent et en Décembre 2010 la population était estimée à plus de 100.000 personnes (IOM, 2010).

Dans la zone, les menaces hydrologiques sont liées surtout à la Ravine Lan Couline et aux ravines de Onanville, qui captent les eaux de ruissellement de vastes bassins versants des montagnes du nord. Les conséquences immédiates des tempêtes tropicales, des ouragans et cyclones, sont les précipitations de plusieurs centaines de millimètres en quelques heures ; la ravine provoque d’importantes inondations et un risque d’érosion pour Canaan, le Camp de Corail et les zones de Onanville.

La zone de Canaan est la plus vulnérable au niveau social et environnemental dans la commune de Croix-des-Bouquets, du fait de l’absence d’écoles, d’hôpitaux, d’activités de production et professionnelles, de ressources en eau insuffisantes, de la sécheresse etc.

Les activités productives existantes sont l’extraction de roches et des carrières, qui sont sans contrôle et sans normes de sécurité et qui augmentent à la fois l’érosion et la menace des mouvements de terrain **(FIG. 6)**.



FIG. 6: Zones d’extraction des roches.

CHAPITRE 2

Méthodologies d'étude des menaces

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'aménagement nécessite la définition des scénarios des menaces.

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

Les phases de travail ont été les suivantes :

1) Collecte des données bibliographiques existantes (articles de géologie, hydrogéologie, cartes existantes) : les articles bibliographiques analysés sont à la fin du rapport dans le chapitre « *Bibliographie* » ;

2) Analyse des photo-aériennes*, de DEM et les autres cartes et couches GIS existantes (à travers les CNIGS ont été obtenues des cartes en couple stéréoscopique* de 2002 et des ortho-photos* aériennes de 2010) : les couches vectorielles existantes en Haïti sont dans le site Web « *HAÏTI DATA : haitidata.org* » ;

3) Analyses des données existantes de climatologie (fournies par le ministère de l'environnement), de géophysique, géologie (fournies par l'URGEO et le LNBTP) ;

4) Etudes de terrain : étude et collecte des données de terrain afin de valider et/ou d'améliorer les données existantes, d'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.

Pendant les études ont été formés les stagiaires géologues du BME et de l'ENGA.

5) Digitalisation des données en SIG, élaboration et calcul des menaces : le plus grand avantage des S.I.G. est de constituer des vraies banques de données géographiques qui peuvent fournir beaucoup plus d'informations que le papier et permettent de superposer et combiner différentes données géographiques et de varier librement la manière dont on les représente, afin de mieux faire ressortir et de mieux pouvoir analyser les structures et phénomènes étudiés.

6) Analyses des résultats et conclusions (estimer de façon qualitative et quantitative la distribution spatio-temporelle de l'intensité des menaces en objet).

Objectifs

Les objectifs de cette étude dans la commune de Croix-des-Bouquets, sont les suivants :

- ✓ Collaboration et proposition d'actions avec les organismes nationaux : BME, CNIGS, LNBTP, URGEO pour :
 - Actualiser la base de données existante concernant les résultats des analyses multi menaces et la mettre à disposition du public, à travers la collaboration du CNIGS.
 - Appuyer les organismes nationaux avec des outils et instruments géophysiques et de photo-interprétation et avec des expertises académiques, scientifiques.
 - Transférer les connaissances, les outils et les expériences aux étudiants Haïtiens des facultés techniques de Géologie et d'Ingénierie Environnementale, aussi bien pour les levés géologiques que pour l'identification sur le terrain des menaces naturelles et pour l'élaboration en SIG de données.
 - Centraliser les données techniques pour les organismes nationaux Haïtiens.
 - Harmoniser les méthodes d'étude de terrain et d'élaboration des cartes.
- ✓ Amélioration des connaissances et diffusion des données et des résultats aux DPC, CLPC, CASEC, ASEC, ONGs et aux partenaires opérant dans les secteurs de la réhabilitation et de l'aménagement du territoire ;
- ✓ Identification quantitative et qualitative des menaces ;
- ✓ Proposition d'actions de réduction et de mitigation des risques ;

Les études effectuées sont:

- Elaborer les cartes géologiques à l'échelle de 1:25.000 des sections 1^{ère} et 2^{ème} Varreux, 1^{ère}, 2^{ème}, 3^{ème} Petit Bois et à l'échelle 1:10.000 pour la zone de Canaan, Onanville.
- Déterminer le microzonage sismique et la carte des fréquences de résonance* dans les sections 1^{ère} et 2^{ème} Varreux, 1^{ère}, 2^{ème}, 3^{ème} Petit Bois ;
- Effectuer une étude de terrain et photo-interprétation pour recenser les glissements ; calculer les menaces de glissements en débris dans toute la commune et dans les unités des bassins versants majeurs.
- Faire des études de terrain pour élaborer les cartes d'aléas d'inondations et des zones d'érosion des rivières et des ravines dans les sections 1^{ère} et 2^{ème} Varreux, 1^{ère}, 2^{ème}, 3^{ème} Petit Bois et la zone de Canaan, Onanville.
- Utiliser la photo-interprétation pour évaluer la densité de végétation dans toute la commune et dans les unités des bassins versants majeurs.

Les cartes produites sont à utiliser pour les plans de prévention des menaces naturelles, donc pour la planification du territoire. Elles sont des supports d'appui à la réglementation du territoire.

L'étude a été développée avec la participation et collaboration du CNIGS, BME, LNBTP et URGEO.

Le LNBTP, BME et URGEO ont collaboré pour la fourniture des données de géophysique (HVSr, MASW*), bibliographie et pour coordonner la méthodologie d'étude.

Le CNIGS pour la fourniture des cartes, des photos aériennes, des bases de données, 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 des institutions locales des DPC, CLPC, CASEC, ASEC, ATL (**FIG. 7**) afin d'obtenir :

- La sensibilisation des autorités locales à une planification soignée de l'espace urbain : aménagement territorial pour réduire le degré d'exposition.
- La sensibilisation des autorités locales au respect et à la conformité des normes et bonnes pratiques afin de réduire considérablement la vulnérabilité.



FIG. 7: Visites de terrain avec le Casec de 2^{ème} Varreux.

Etude géologique et cartes géologiques produites

L'étude géologique a été suivie par le Dr. géol. expert Angelo Coletti de l'Université de Rome (Italy) « La Sapienza » avec la collaboration du BME de Port-au-Prince, donc avec l'expertise de l'ing. géol. Claude Prepetip. Pendant l'étude, des stagiaires du BME et de la faculté Nationale de géologie de Haïti (ENGA) ont été formés et ont collaboré dans notre groupe : Hernseau Chery et Johnny Mompont de l'ENGA, Miralda Myrtho Calixte et Camesuze Bonheurs du BME.

L'étude a produit la carte géologique à 1:25.000 des sections communales de 1^{ère} et 2^{ème} Varreux, 1^{ère}, 2^{ème} et 3^{ème} Petit Bois et de la carte géologique à 1:10.000 de la zone Nord de Canaan, Jerusalem et Onanville.

Les détails techniques et résultats de l'étude, concernant la géologie de la zone, sont dans l'**ANNEXE 3** « *Rapport de la géologie de Croix-des-Bouquets* ».

Les cartes ont été nécessaires pour le travail de microzonage sismique, car la carte existante d'Haïti a une échelle de 1:250.000, donc avec une définition insuffisante pour une étude de micro zonage.

Dans les cartes géologiques sont représentés les différentes typologies des failles*, les plis* tectoniques*, les directions des couches et les lithologies.

La stratigraphie de la zone est variable et représente différents environnements de dépôt: d'origine marine (entre Eocène moyen- supérieur et Miocène moyen) et d'origine continentale (entre le Pliocène et l'Holocène).

La zone d'étude est caractérisée par 3 différentes unités géologiques : la **chaîne des Matheux** au Nord, la **Plaine Cul de Sac** au centre et le **Massif de la Selle** au Sud.

La **chaîne des Matheux** est caractérisée par des plis* compressifs liés à des failles* inverses de chevauchement qui intéressent l'Eocène moyen- supérieur et Miocène moyen **FIG. 8** et **FIG.9**.

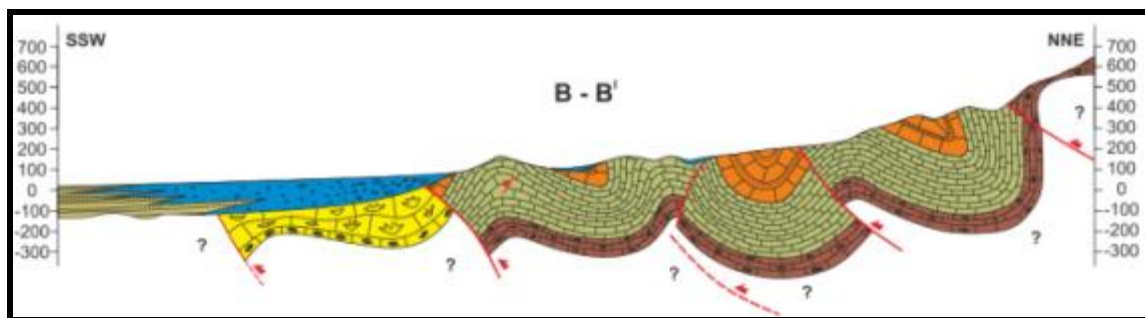


Figura 1 Profil géologique dans la zone de Canaan, Onanville qui montre les plis* tectoniques* de direction SSO.

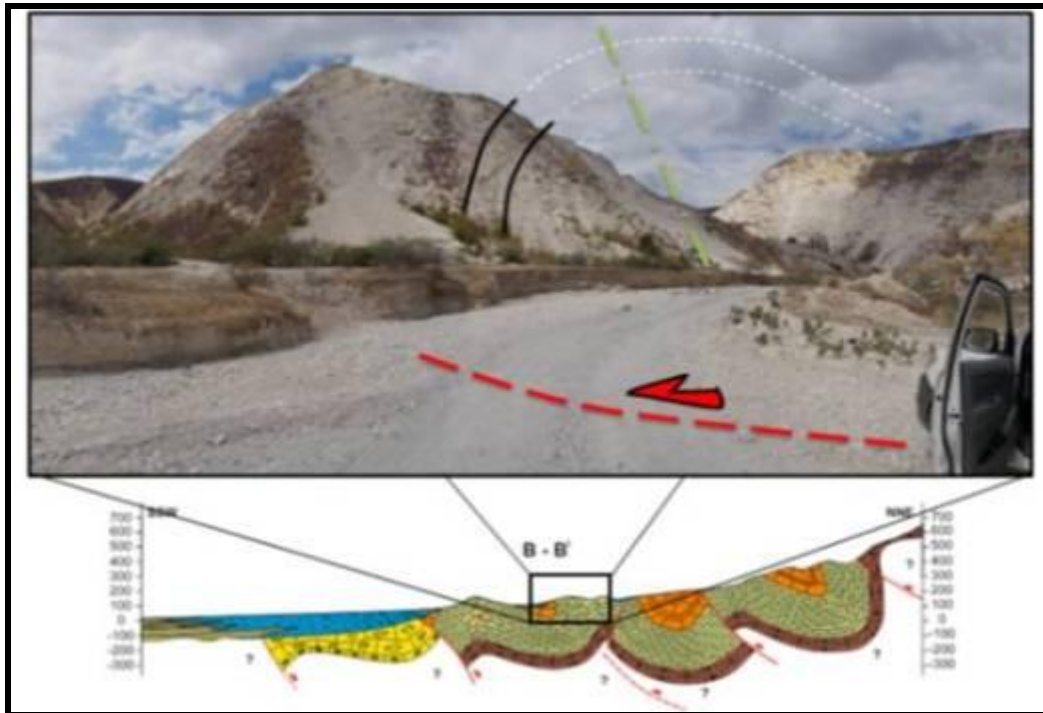


Figure 9 Affleurement du pli compressif de l'hanging wall* de la faille inverse de chevauchement de la ravine Lan Couline.

La chaîne de Matheux est une zone active au niveau sismique : les points GPS des études d' Eric Calais en 2010 montrent une vitesse de mouvement de 1mm par année (**FIG 10** de Calais et Hasse 2010.)

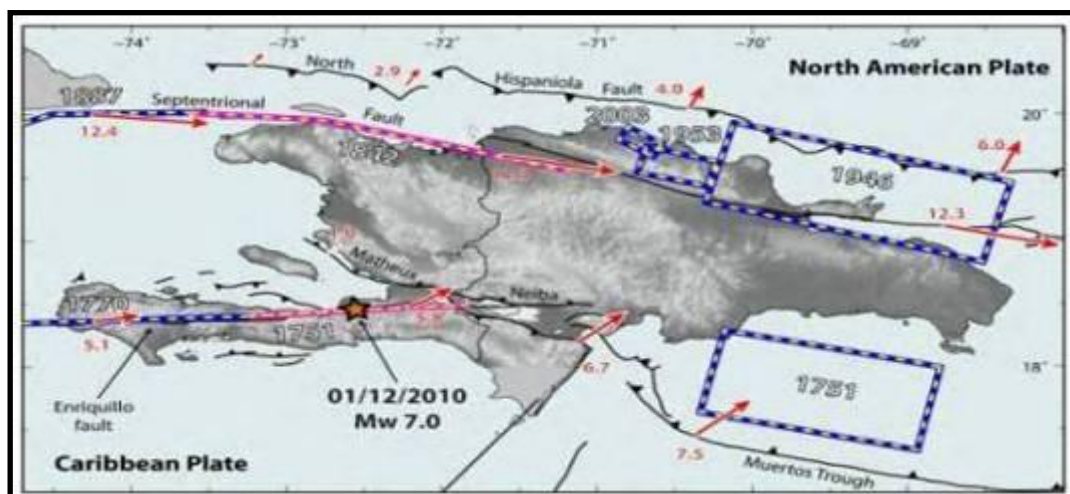


FIG.. 10 Les études de Calais et Hasse en 2010, avec la mise en place de points GPS mettent en évidence l'activité sismique de la Chaîne des Matheux avec une vitesse du mouvement de 1mm/a.

Autres évidences de l'activité sismique de la chaîne des Matheux sont observables dans les zones extérieures de la chaîne, dans la région de St. Marc et sur l'île de la Gonâve: dans ces zones ont été reconnues des terrasses marines soulevées à environ 40 a. m s.l. Dans la péninsule nord-ouest des terrasses de 125000 années sont observées à des altitudes supérieures à 100 m (Mann et al, 1995). Les taux de soulèvement des terrasses enregistrés suggèrent la croissance des structures de compression due à la tectonique active.

Les structures tectoniques* de la chaîne des Matheux se propagent sous la **Plaine Cul de Sac** qui est composée de dépôts alluviaux récents et qui recouvrent les plis* tectoniques* de la Chaîne de Matheux. A noter que l'île de la Gonâve fait partie du système de la chaîne des Matheux et donc les structures actives compressives sont probablement présentes aussi dans le Golfe de la Gonâve : la présence des failles* et plis* compressifs sous marins peut causer des séismes sous-marins (*tsunami*).

Au niveau des tsunamis, le Golfe de la Gonâve est étroit et protégé par l'île de la Gonâve mais notre étude conseille de faire des recherches plus détaillées par rapport à cette menace.

La zone Sud du **Massif de la Selle** est caractérisée par les structures tectoniques* d'importance régionale comme la *faille de Enriquillo (EPGFZ)*, qui est le système transforme* limite entre la plaque Caraïbienne et la Plaque Nord-Américaine, qui a été activée pendant le dernier séisme du 12 Janvier 2010 (**FIG. 11**).

De nombreuses évidences de tectonique active dans la zone Sud, ont été recensées sur le terrain (**FIG. 12**).

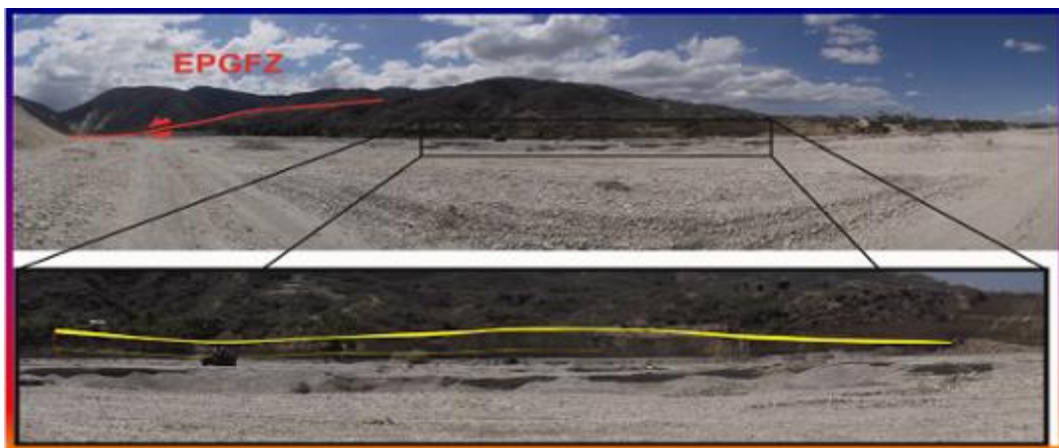


Fig. 11: Zone Sud "Système Massif de la Selle": faille Enriquillo à la rivière Grise (Dumay) dans les sédiments récents (preuves de sismique active).



Fig. 12: Evidences de tectonique active dans la rivière Grise (zone Dumay), l'inclinaison des sédiments récents de la rivière est en opposition à la direction de la rivière.

Méthodologie d'étude géologique

Les phases de travail dans l'élaboration de la carte géologique ont été les suivantes :

Phase 1 : Collecte des données existantes (géologie, sismique, tsunami) pour comprendre le contexte géologique et tectonique de la zone.

Pendant cette phase de travail la collaboration du BME, de l'URGEO et du CNIGS a été précieuse.

La bibliographie des articles étudiés pendant cette phase est dans le dernier paragraphe de ce document « *Bibliographie* ».

Phase 2 : Etudes de terrain et cartographie des failles*, plis* tectoniques* et typologie de roches et stratigraphie : pendant cette phase, la formation des stagiaires du BME et de l'ENGA a été effectuée (**FIG 13**). Une carte géologique est une représentation, sur une carte, des terrains géologiques affleurants et les éléments tectoniques* existants. Les terrains sont, en général, représentés par une couleur selon leur âge et les failles sont en rouge.



FIG. 13: Formation des stagiaires géologues du BME et de l'ENGA pendant l'étude de terrain (mesure de la géométrie et position spatiale des couches géologiques, des failles* et plis*).

Phase 3 : Elaboration en SIG des cartes géologiques.

La **phase 3** a été effectuée pendant deux (2) mois dans une zone de environ 270 km².

La rédaction de la carte géologique est un travail compliqué et très technique, qui demande beaucoup d'expérience par le géologue.

La carte géologique est un document de synthèse hautement interprétatif : elle est construite à partir de levés de terrains et elle est obtenue par la mise en relation de points et par l'extrapolation raisonnée du non-vu. Le passage de la minute de terrain (portion de carte topographique sur laquelle des points numérotés indiquent les affleurements étudiés) à la carte géologique est une reconstruction à partir d'informations incomplètes.

Les **compétences** du géologue pour la rédaction de la carte devront être de :

- Savoir lire la carte topographique, situer un point sur la carte et savoir le trouver sur le terrain.
- Reconnaître les lithologies, les fossiles, les typologies, les activités et les rejets des failles*
- Savoir déterminer la position spatiale d'un affleurement, donc mesurer son pendage, sa direction, représenter l'observation dans un référentiel plus abstrait, prolonger le vu par le non vu, inférer le non observable à partir de l'observable. Cette démarche d'extrapolation exprime ses limites et est de nature à faire prendre conscience de la part d'interprétation qui conditionne le discours géologique.

Cet exercice doit faciliter, en plus de la lecture d'une carte, la compréhension des indications de pendage et la reconstruction de la troisième dimension afin de comprendre la typologie des lithologies et des éléments tectoniques* en profondeur (élaboration des profils géologiques).

Méthodologies de recensement :

- a. **Méthodologie du recensement des couches lithologiques**, pendant cette étude les points suivants ont été définis:
- la lithologie (calcaire ou marnes* ou argiles etc), - le milieu de formation (marin profond, marin de plateforme, volcanique etc) **FIG. 14**, tandis que la présence de fossiles a permis de déterminer l'âge et donc la formation géologique* **FIG. 15**.
 - Enfin la géométrie des couches a été définie dans l'espace pour la dessiner en carte.
 - La géométrie dans l'espace des couches est l'orientation des roches par rapport au Nord et à la direction du pendage des couches lithologiques.

Par exemple la formation des roches marines est horizontale (précipitation chimique du carbonate de calcium CaCO₃ et sédimentation des coquilles) mais sur le terrain, à cause des forces sismiques qui causent la formation des montagnes, les couches sont inclinées.

Pour reconstruire la géométrie des roches en profondeur et comprendre l'existence des éléments sismiques, leur typologie et leur nature, il est important de mesurer la géométrie d'orientation des plans des couches **FIG. 16**.



FIG. 14 : Affleurement des roches formées dans différents milieux, la photo en haut à gauche est un affleurement volcanique, à droite c'est un affleurement sédimentaire marin profond et la photo en bas sont des sédiments formés dans un milieu continental (dépôts de rivières).



FIG. 15 : Fossiles dans les roches. En haut à gauche les Bryozoa*, à droite les coraux. En bas les traces de bioturbation. (Les photos proviennent de la zone Nord : Jerusalem, Onanville).

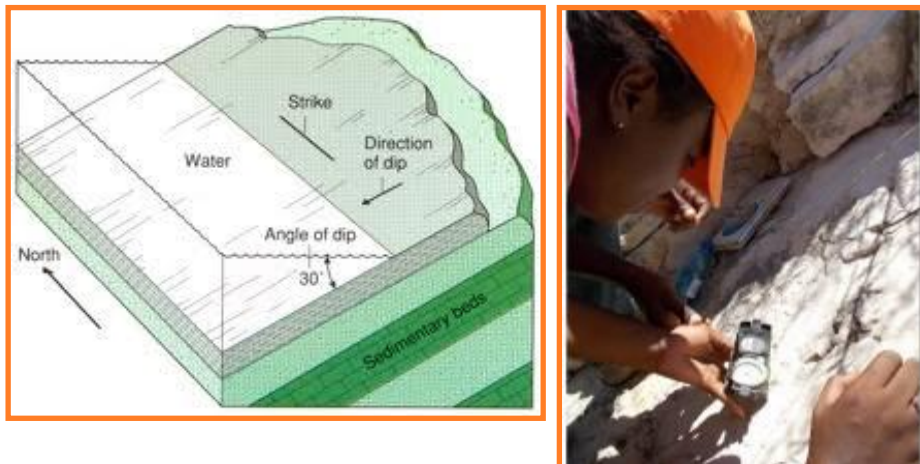


FIG. 16 Mesure des plans des couches de roches pour reconstruire la position spatiale.

b. Méthodologie du recensement des éléments tectoniques*:

Les éléments tectoniques* recensés et mesurés sont les failles* et les plis*. **FIG. 17.**



FIG. 17 : à droite une faille et à gauche un pli tectonique compressif. Route de Saut d'Eau, près Des Orangers.

Ce recensement est important pour définir la sismicité de la zone et les possibles failles actives.

Les éléments pour reconnaître une faille sont les :

- 1) Roches fracturées et déformées ;
- 2) Discontinuités structurales ;
- 3) Discontinuités lithologiques ;
- 4) Déformations en surface si les failles sont récentes ;
- 5) Dépôts de sédiments influencés par des failles.
- 6) Eléments qui montrent le mouvement : stries et gradins de glissements de failles, minéralisations de calcite etc. **FIG. 18.**

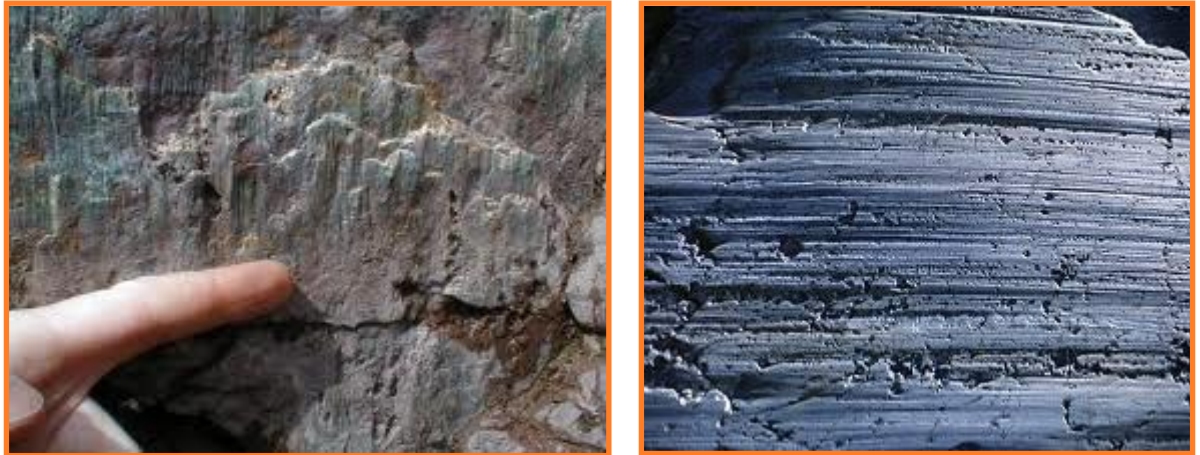


FIG. 18 : Éléments qui peuvent être présentés dans les plans de failles et qui montrent le mouvement de faille.

Les failles et plis doivent être mesurés pour reconnaître la géométrie dans l'espace et l'orientation, les éléments nécessaires pour la cartographie et l'interprétation du comportement des failles en profondeur **FIG. 19**.



FIG.19: Mesure des plans de faille. Pendage, direction et inclination.

L'analyse des cartes géologiques

La zone d'étude est formée de différentes unités géologiques.

La zone Sud, près de la rivière Grise est caractérisée par dépôts alluviaux d'origine fluviale : alternances de sables, silt et conglomérats. Les dépôts présentent une faible continuité latérale d'âge Pléistocène - Holocène. Cette typologie de sédiments incohérents dans le cas d'un séisme peut causer une amplification lithologique*.

A côté de la rivière Grise, dans la zone de Dumay, une alternance d'argiles et de calcaires marneux (*flysch*) est présente, causée par des courants turbiditiques (c'est le seul affleurement de ce type dans la zone d'étude).

Les zones côtières et la zone au pied de la chaîne des Matheux sont formées par des argiles, silt et sables fins fluvio-lacustres et des zones de marécages d'âge Pléistocène - Holocène. Ces sédiments sont imperméables et, étant donnée la présence d'un aquifère en profondeur, permettent l'existence d'une

nappe en pression. La qualité des sédiments est très mauvaise et peut générer, dans le cas d'un séisme, de la liquéfaction*.

La zone Nord est formée par les cônes de déjection* de Jerusalem, Onanville généralement caractérisés par des sédiments meubles. Cette lithologie peut causer une amplification lithologique*.

Au nord des cônes de déjection les formations géologiques sont calcarénites et calcaires massifs caractérisés par la présence d'une riche variété de fossiles de faciès néritiques, l'alternance de marnes calcaireuses et de calcaires marneux détritiques.

Les détails de la géologie sont dans l'**Annexe 3**.

Utilisations pratiques des cartes géologiques

Les cartes géologiques sont un document d'information indispensable pour les professionnels, enseignants, étudiants de géologie ; elles sont un instrument de base adressé aux techniciens experts (ingénieurs, architectes, pédologues, forestiers et autres).

Les cartes géologiques constituent une aide à la décision pour l'aménagement du territoire, la mise en valeur du territoire, la prospection des ressources minérales, l'exploration et la protection des eaux souterraines, la lutte contre les pollutions, la prévention des risques naturels et la caractérisation des territoires, les études de sismicité, d'érosion et des mouvements de terrain.

La géologie étudie également le milieu naturel d'où sont exploitées les ressources en eau, en énergie, en matériaux de construction et en minerais, et dans lequel sont rejetés nos déchets et sont construites les maisons.

Le géologue a un rôle important dans la gestion des ressources et la protection de l'environnement.

Si autrefois les études géologiques et le levé de cartes géologiques avaient pour but principal d'évaluer la richesse nationale en ressources, elles ont de nos jours une fonction beaucoup plus large, qui consiste à assurer une gestion raisonnable et, le cas échéant, une protection efficace de ces ressources.

La carte géologique est un de ces objets-outils permettant l'acquisition aussi bien de connaissances spécialisées, que de savoir-faire plus généraux.

Etude des menaces sismiques et cartes produites

L'étude sismique a été effectuée par une équipe formée par le géophysicien Dr. Luca Maria Puzzilli de l'organisme de recherche nationale de l'Italie: ISPRA (institution supérieure pour la protection et la recherche de l'environnement), le Dr. géologue Giovanni De Caterini, le Dr. géologue Gabriele Leoni et le Dr. géologue Paolo Zaffiro de l'entreprise d'ingénierie et géotechnique « ENGEOPRAXIS » de Rome (Italie).

L'étude a été en collaboration avec l'Ing. Géol. Claude Prepetit du BME pour l'harmonisation des méthodes de recherche et étude.

Les géologues stagiaires de l'ENGA et BME ont collaboré dans l'exécution des mesures géophysiques de fréquence de résonance*.

Pendant le recensement des maisons détruites et/ou effondrées essentielle a été la collaboration avec les acteurs institutionnels locaux (CLPC, DPC, CASEC, ASEC).

Le travail a produit la carte de microzonage sismique à l'échelle de 1:25.000 et la carte des fréquences de résonance* à l'échelle de 1:50.000, des sections 1^{ère} Varreux, 2^{ème} Varreux et 1^{ère} Petit Bois, 2^{ème} Petit Bois, 3^{ème} Petit Bois.

Les cartes ont été produites grâce à l'utilisation de cartes géologiques élaborées dans cette étude, une campagne des mesures géophysiques de bruit de fond* et les données géophysiques (MASW*) et géotechniques du BME, du LNBTP et URCEO.

Les détails techniques sont dans l'**Annexe 4** et **Annexe 5**: " Rapport technique de l'étude sismique de Croix-des-Bouquets" et "Tableau des fréquences de résonance*".

La carte de microzonage sismique est un document technique d'appui à la réglementation du territoire, qui présente des informations cartographiques des effets d'un séisme, accompagné par les recommandations pour son utilisation.

La carte de fréquences de résonance* fournit les paramètres nécessaires aux ingénieurs civils pour la construction des bâtiments: la fréquence propre du bâtiment ne devrait pas être égale ou même se rapprocher de celle du sol: si les fréquences de résonance* du sol et du bâtiment sont identiques, cela pourra engendrer une oscillation* de résonance* couplée (amplification sismique), qui augmenterait considérablement le stress et les dégâts possibles.

De plus, l'élaboration des données de résonance* indique aux ingénieurs et géologues la localisation et la typologie des analyses à faire pour finaliser la caractérisation sismique du site (analyses géotechniques en profondeur, MASW* et/ou cross-hole* etc.).

La classification des aléas sismiques est basée sur le code de construction du bâtiment public en Haïti qui reprend le code international de construction (IBC).

En cas de planification du territoire et/ou de construction, les techniciens en charge devront utiliser ces cartes pour développer une politique de prévention et de réduction du risque sismique.

Les caractéristiques physiques du territoire (typologie des sols, morphologie, présence des failles etc.) peuvent amplifier les effets du séisme en surface. L'augmentation des effets du séisme (amplification) à cause des conditions locales et de l'instabilité des sols pendant un séisme, est définie comme des « effets de site » ou « effets locaux »: l'effet de site est le terme utilisé pour décrire la modification de la secousse sismique induite par la géologie locale et la morphologie.

Les accélérations et la durée des secousses sismiques seront mineures aussi bien dans les roches dures que dans les alluvions (sol mou). Lorsque les propriétés du sol sont particulièrement défavorables (milieu sableux et saturé en eau), le sol peut perdre sa cohésion (phénomène de liquéfaction*). Les bâtiments construits sur ce sol ne sont plus soutenus et peuvent basculer.

Les aléas sismiques présents dans la carte de microzonage **FIG. 20** sont :

-  Zones stables;
-  Zones à amplification lithologique;
-  Zones à amplification topographique;
-  Zones instables



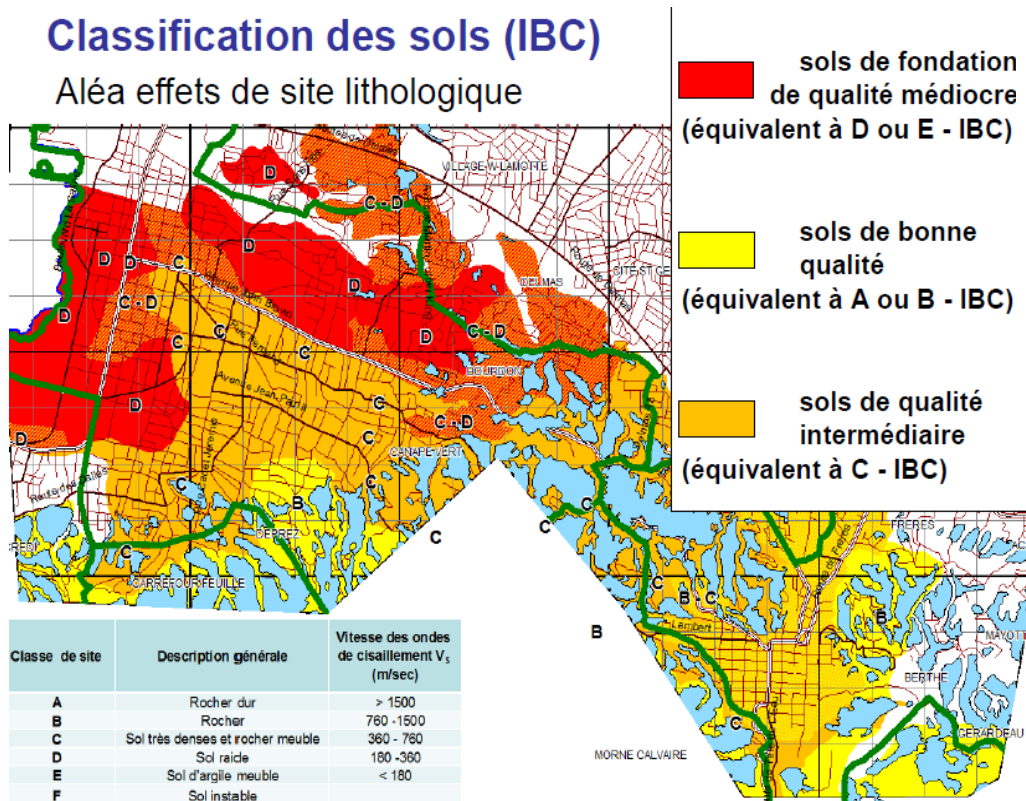
FIG. 20: Carte de microzonage sismique.

Classes de microzonage sismique

-  Zones stables ($V_s > 760$ m/s, cat. A,B du code IBC)
-  Zones à amplification lithologique ($V_s < 760$ m/s, cat. C,D,E,F du code IBC)
-  Zones à amplification topographique (pentes $> 15\%$, crêtes)
-  Zones instables (failles, liquéfaction et/ou glissements de terrain)

La méthodologie utilisée est celle du projet de microzonage de Port-au-Prince du LNBTP, BME et BRGM, à l'exception que la carte produite dans notre étude donne une évaluation plus qualitative que quantitative des aléas par rapport à l'amplification lithologique et qu'il n'existe pas la définition des différentes classes de sols C, D, E, F, (**FIG. 20**), tandis que celle du projet BRGM, LNBTP et du BME de

Port au Prince donne aussi des détails au niveau de classification des sols et fait une distinction entre les classes C, D, E, F selon le code IBC (**FIG. 21**).



La carte de fréquence de résonance* a été élaborée à travers la mise en place de 85 mesures H/V avec le TROMINO, parmi lesquelles 10 mesures étaient de longue durée (environ 12 heures): les résultats des mesures sont en **Annexe 4 et Annexe 5**.

Le mesure de longue durée avec le TROMINO ont été effectuées dans les zones à double pic de résonance et dans les zones avec une fréquence de base très faible (0,3 Hz). L'objectif était de vérifier et confirmer les résultats.

Méthodologie de l'étude géophysique pour obtenir les cartes

Dans la carte de microzonage sismique sont représentés les aspects géologiques et géomorphologiques qui peuvent causer les effets de site.

Les aléas sismiques présents dans la carte (**FIG. 20**) sont :

- ✚ Zones stables : zones qui présentent la vitesse des ondes S^* : $V_s > 760$ m/s, donc les catégories de sol A, B du code IBC, qui sont les roches dures et les rochers (**FIG. 21**). Zones à amplification lithologique: géologies qui présentent la vitesse $V_s < 760$ m/s, donc les catégories du sol C, D, E, F du

code IBC, (sols très denses avec des roches meubles, les sols raides, les sols d'argile meuble et les sols instables, **FIG.21**).

Dans l'étude des BRGM, BME et LNBTP effectuée pour Port-au-Prince apparaît aussi la distinction des classes C, D, E, F (**FIG. 21**). Dans notre étude cette division devrait être faite lors d'un deuxième niveau d'analyse

- ✚ Zones à amplification topographique (pentes>15%, crêtes): ce sont les zones qui présentent des éléments morphologiques qui causent l'amplification et les effets de site. Ces éléments peuvent être les crêtes, les pentes majeures de 15° à des altitudes majeures de 30 m.
- ✚ Zones instables (failles*, liquéfaction et/ou glissements de terrain): ce sont les zones d'amplification et d'effondrement à cause des sédiments qui peuvent être sujets à liquéfaction et/ou zones de failles* et/ou zones de mouvements de terrain actives (dans l'étude des BRGM, BME et LNBTP effectuée pour Port-au-Prince il apparaît aussi la distinction de ces phénomènes, **FIG. 21** ; dans notre étude cette division devrait être faite lors d'un deuxième niveau d'analyse).

Dans la carte des fréquences de résonance*, les fréquences de résonance* f_0 et f_1 sont représentées ainsi que les amplitudes relatives a_0 et a_1 (**FIG. 22**).

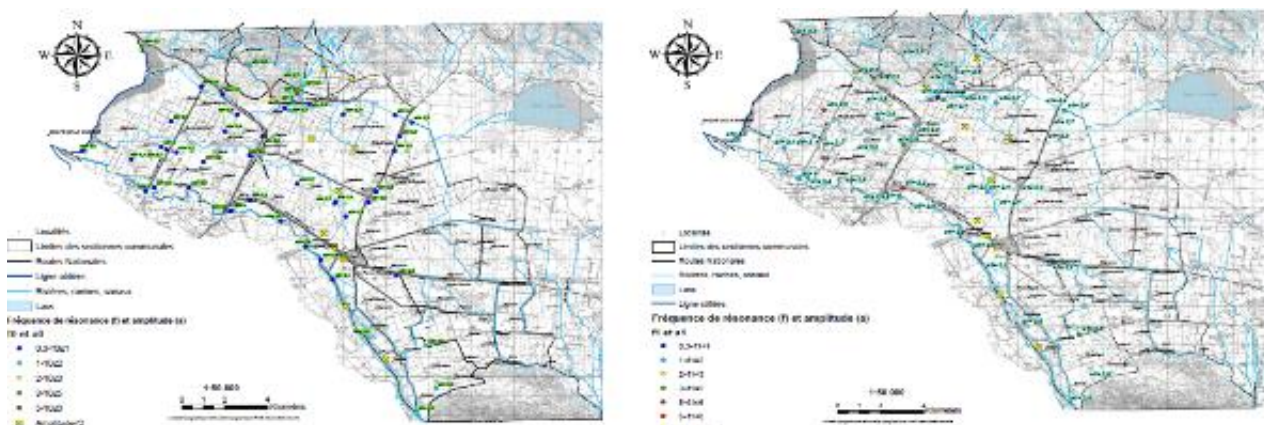


FIG. 22: Carte de fréquences de resonances. A gauche les fréquences f_0 et a_0 et à droite les f_1 et a_1 .

La carte des fréquences de résonance* est importante, elle est un support aux planifications antisismiques :

- ✓ La fréquence fondamentale de vibration du sol est la fréquence à lequel le sol peut osciller en cas de séisme et n'est pas liée à la magnitude.
- ✓ Si les fréquences de résonance* du sol et du bâtiment sont identiques, cela pourra engendrer une oscillation* de résonance* couplée (amplification sismique), qui augmenterait considérablement le stress et les dégâts possibles.

- ✓ Pour calculer la fréquence fondamentale de vibration du sol, il est nécessaire de mesurer la vitesse des ondes S* (ondes de cisaillement*) dans les premiers 30 mètres du sous-sol (V_{s30}) et savoir l'épaisseur des sédiments au dessus du *bedrock* sismique*.
- ✓ La profondeur du bassin (donc du *bedrock** sismique) et la vitesse des ondes S n'étaient pas déterminées mais en général, étant donné que les valeurs de fréquence de résonance sont plus basses si les épaisseurs des dépôts sont grandes, au centre de la plaine, la profondeur du bassin pourra être de plus de 200 m.

Chaque point de mesure est caractérisé en terme de fréquence de résonance f_0 et f_1 (si existante), **FIG. 23.**

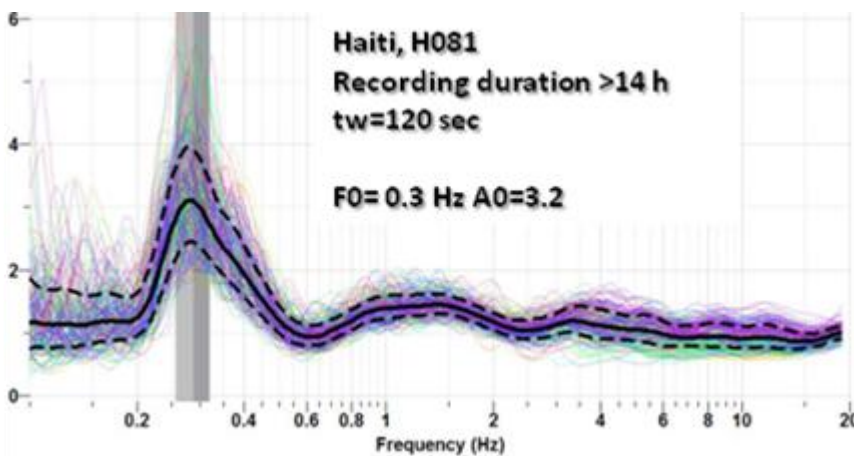


FIG. 23 : Exemple de courbe HV d'un test à longue durée (14 heures). Le point de mesure, comme pour la majorité de la plaine étudiée, est caractérisé par de possibles phénomènes de résonance à fréquences plus basses que 0.5 Hz.

Les phases de travail pour élaborer les cartes ont été les suivantes:

- ❖ Collecte des données bibliographiques existantes (géologie, sismique) avec la collaboration du CNIGS et BME et URGeo.
- ❖ Analyse et utilisation de la carte géologique produite par cette étude pour différencier les zones à amplification lithologique et les zones de liquéfaction et/ou failles etc.;
- ❖ Recensement des maisons détruites par le séisme et/ou par liquéfaction (**FIG. 24**).



FIG. 24 Maison effondrée pendant le séisme du 12 Janvier 2010 à cause de liquéfaction.

- ❖ Campagne des prospections géophysiques sur les sections de 1^{ère} Varreux, 2^{ème} Varreux et 3^{ème} Petit Bois (**FIG. 25**): 85 stations de mesure de bruits de fond avec le TROMINO (en **ANNEXE 5**).
La durée des mesures était de 30 minutes chacune dans les 85 points et de longue durée environ 12 heures) dans 4 points des zones où ont été enregistrés des doubles pics de résonance* ou des résonances très faibles (0,3 Hz).



FIG. 25 A gauche la distribution des 85 points de mesure dans la campagne de mesures du bruit de fond (H/V) avec le TROMINO (à droite).

- ❖ Elaboration en SIG de la carte de microzonage sismique et de la carte des fréquences de résonance*.

L'analyse des cartes de microzonage et des fréquences de résonance*

L'analyse de la carte de microzonage indique que dans la plaine de Croix-des-Bouquets les zones côtières et les zones au pied de la chaîne des Matheux, en aval de Jérusalem près du canal Broucanbrou, sont des zones instables à cause de la possible liquéfaction en cas de séisme.

Dans les zones de liquéfaction sont en construction le stade de football de Canaan et une partie des maisons d'un complexe de logements construite par l'Etat pour les IDP du séisme du 12 Janvier 2010 (**FIG. 26**).

Les failles délimitées par la carte géologique (failles de la Chaînes des Matheux au Nord et la faille d'Enriquillo au Sud), correspondent aux lieux où sont disposées les zones instables du fait des éléments sismiques.



FIG. 26: En haut le stade de football de Canaan (en construction) et en bas les maison construites pour les IDP du séisme de 2010, les deux se trouvent dans les zones de liquéfaction.

Dans le reste de la plaine les sédiments alluviaux forment des zones à amplification lithologique, qui représentent la classe d'aléas sismiques la plus diffuse dans la zone.

Une partie des camps IDP de Corail se trouve dans les zones instables à cause des failles et l'autre dans les zones à amplification lithologique.

Dans la zone la plus au Nord les aléas sont topographiques, dus à la morphologie des crêtes et aux pentes de la Chaîne des Matheux.

Les zones stables sont surtout situées au Nord - Ouest de la zone d'étude.

Au niveau de fréquence de résonance pour résumer, les résultats de la caractérisation sismique préliminaire effectuée sont:

- ✚ Tous les points d'analyse à part quelques rares exceptions, sont sujets à des phénomènes de résonance, donc à une amplification sismique en cas de séisme.
- ✚ Les courbes H/V indiquent généralement 1 ou plusieurs pics de fréquence avec des amplitudes entre 2.5 et 4.0: il est possible que dans le sous-sol soit présent 1 ou plus de contrastes d'impédance sismique* (probablement pas trop forts) a différents profondeurs.

- ✚ La distribution des fréquences de résonance* est cohérente avec le modèle géologique, qui prévoit des profondeurs du bassin plus grandes au centre de la plaine et dans les zones de côte (fréquences de pics < à 0.5 Hz).
- ✚ Les pics de fréquence à Nord du cône de déjection de Jérusalem sont plus grandes à cause de la présence de contrastes d'impédance sismique* à faible profondeur, due probablement aux couches lithologiques plus durs du cône de déjection.
- ✚ Les sites étudiés à travers des registrations sismiques passives présentent des courbes H/V, caractérisées par deux pics de fréquence (exemple en **FIG. 27**) avec amplitudes similaires. Dans ces cas, il n'était pas possible de distinguer sans doutes et ambiguïtés la fréquence de pic caractéristique. Cela pose des problèmes évidents en termes de planification de constructions antisismiques, en soulignant la nécessité de poursuivre des études sismiques ultérieures, en commençant par les zones à double pic.

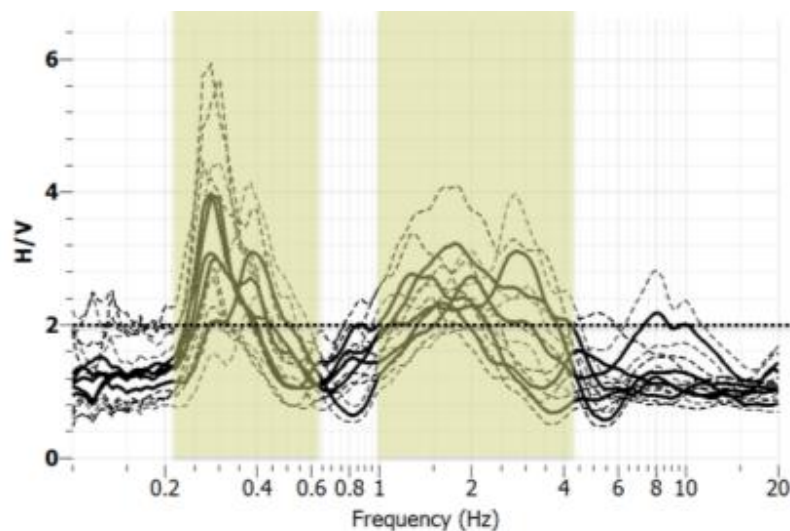


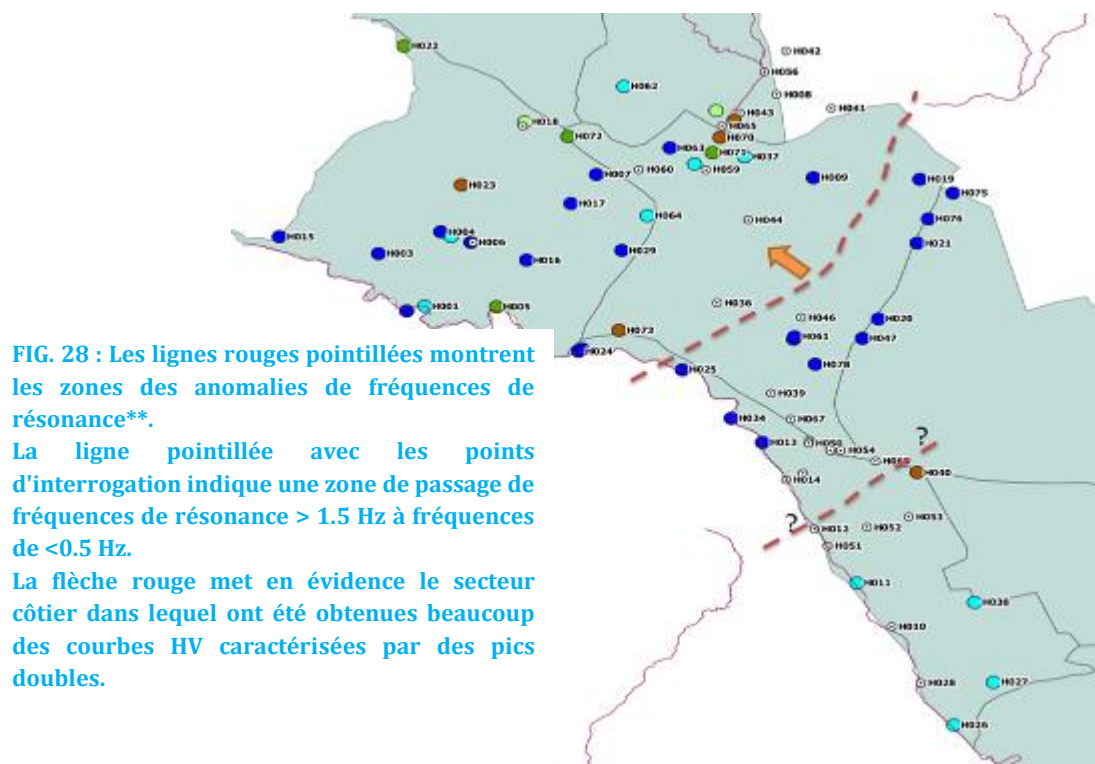
FIG. 27 Groupe de courbes HV de la zone d'étude. Beaucoup de courbes sont caractérisées par un double pic de fréquence dans le rang entre 0.3-0.6 Hz et 1-4 Hz, avec amplitude du pic très similaire.

- ✚ La distribution des fréquences de pic met en évidence deux secteurs "anormaux" sur lesquels il faudrait orienter de futures analyses et des approfondissements :
 - au centre de la plaine la plupart des fréquences sont très faibles (0,3-0,5 Hz), mais il y a aussi des fréquences entre 1 et 2 Hz, probablement liées à des niveaux plus durs (compétentes*), interposés entre le *bedrock* * sismique et la surface topographique.
 - Dans le secteur Sud-Est de la zone d'étude apparait une zone "anormale" près de la rivière Grise: il y a le passage des fréquences de résonance de 1.5 – 2Hz à values de 0.5 Hz, sur une petite distance (lignes rouges pointillées en **FIG. 28**).

Les causes sont probablement structurales et stratigraphiques et il y a aussi l'augmentation de la profondeur du *bedrock** vers le Nord- Ouest, probablement du fait de la tectonique active.

Dans la **FIG. 28** est mis en évidence, avec la flèche orange, le secteur côtier dans lequel ont été obtenues beaucoup des courbes HV caractérisées par des pics doubles ($F_0 < 0,5$ Hz et $F_1 > 1,5$ Hz), tandis que les courbes HV à l'Est de cette ligne pointillée sont caractérisées par un seul pic $F_0 < 0,5$ Hz.

L'absence des données des sondages et donc de stratigraphie en profondeur ne permet pas de faire des hypothèses. D'autres analyses devront clarifier la géologie et la structure compatible avec cette distribution de fréquences.



- ✚ En général, dans toute la zone, les mesures de fréquences de pic sont situées entre deux rangs différents: entre 0,3 et 0,6 Hz et entre 1 et 4 Hz. Mais est nécessaire de faire des analyses avec des instruments de meilleure résolution, qui sont adéquats aux camps de fréquences < 0.5 Hz.
 - ✚ Au niveau de l'étude de microzonage il est important de savoir que malgré l'épaisseur des dépôts de remplissage du bassin qui arrive à plus de 150 mètres au centre du bassin, le "*bedrock* sismique" (V_s moyen environ de 780 m/sec ou majeur), pourra aussi être représenté par des dépôts à une profondeur inférieure.
- Il est donc essentiel de réaliser une campagne d'analyses sismiques avec un sondage comme *down-hole* et *cross-hole* pour obtenir le profil de vitesse des premiers 60-70 mètres.

D'autres analyses qui permettent de donner le profil de vitesse sont les enregistrements avec sismique passive* en réseau (*array**), configurés avec une instrumentation sismologique à haute résolution et adéquate pour explorer les fréquences < 0,5 Hz.

L'utilisation pratique des cartes de microzonage et des fréquences de résonance* pour les interventions futures

Les cartes sismiques sont indispensables pour une planification correcte du territoire et pour les calculs de projets de construction des ingénieurs (maisons, bâtiments publics, stades etc).

Au niveau de la carte de microzonage sismique, au sein de chaque aléa sismique il est tout de même possible de construire mais avec une augmentation progressive des études, des analyses et des méthodes de constructions rigoureuses.

Les aléas instables sont des zones où il faudra faire des analyses géotechniques très détaillées afin d'évaluer la possibilité de construire et les solutions techniques.

Les aléas à amplification lithologique indiquent qu'en cas de construction, des mesures géotechniques devront être effectuées pour évaluer la typologie des sols et donc dimensionner les fondations et les structures des constructions.

Dans les zones à amplification topographique l'ingénieur devrait calculer et utiliser le coefficient topographique.

La carte des fréquences de résonance est un support essentiel pour la planification antisismique des bâtiments.

Pour les bâtiments déjà existants et endommagés par le séisme de 2010, la carte de fréquence fournit un support pour la définition de vulnérabilité de la structure (l'endommagement ou l'altération de la structure produit un changement des vibrations de la structure, donc une diminution de la fréquence de résonance et une diminution du coefficient d'amortissement).

Pour les bâtiments à construire la carte de fréquence de résonance doit être utilisée pour les calculs de fréquence du bâtiment: la fréquences de résonance* du sol et du bâtiment ne doivent pas correspondre.

Les pics de fréquence de résonance très faibles (0,3 Hz) causent la nécessité de calculer la fréquence de résonance aussi des bâtiments à une seule étage.

Dans les zones de pics à double résonance pourrons se générer des amplifications à causes des séismes avec épicentres soit proches soit loin.

Afin d'évaluer la zone plus en détail au niveau sismique et dont de comprendre les structures sismiques actives, des tranchées dans les sédiments récents devront être effectuées pour définir la typologie et l'activité des failles.

Etudes de menace des mouvements de terrain et cartes

L'étude a été effectuée par l'équipe formée par le Dr. géologue Gabriele Leoni de l'Université de Rome (Italie) « Roma Tre » et le Prof. 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 »).

Cette méthodologie n'était pas encore totalement transférée aux experts haïtiens et la prochaine étape sera de la expliquer et la utiliser au niveau national.

Dans le projet ont collaboré les acteurs institutionnels locaux (CLPC, DPC, CASEC, ASEC) et les institutions nationales BME et le CNIGS.

Pendant l'analyse ont été recensés, par photo-interprétation et études de terrain, les glissements de terrain: *débris flow** (coulée rapides en débris), qui sont les glissements les plus diffuses dans la zone.

L'évaluation a produite: une carte des menaces par rapport aux zones susceptibles* aux détachements de *débris flow* * dans les majeurs bassins versants, à l'échelle de 1:100.000, sur toute la commune de Croix-des-Bouquets et à l'échelle de 1:50.000 dans les zones de Canaan, Jérusalem et Onanville et des majeurs bassins versants de la Plaine Cul de Sac;

Les *débris flow** (**FIG. 29**) 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).



FIG, 29 Débris flow* en amont de Onanville.

Les *débris flow** contrairement aux éboulements (chute de blocs) 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 , donc les opérations d'alerte de protection civile doivent tenir compte de cela.

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

La menace des glissements est liée aux différents facteurs déclenchant* (cyclones, pluies, séismes) et aux facteurs discriminants* (la géologie, la pente) et prédisposant* (géologie, pente, distance de failles et rivières, utilisation du sol, la géométrie des couches, les tranchées *(coupes) pour l'excavation des routes etc.).

La méthodologie technique utilisée dans l'analyse est « *ENEA-Roma3 methodology for landslide susceptibility* , *ENEA Roma3, méthodologie d'étude de la susceptibilité aux glissements* (Leoni et al., 2009) », qui peut être définie comme une méthode heuristique* statistique.

Cette méthodologie utilise les facteurs prédisposant* et discriminants* comme indicateurs.

Les indicateurs mentionnés se combinent avec des poids spécifiques, ce qui définit leur degré d'influence à la menace d'activation de glissements de terrain.

Les poids sont obtenus à travers un calcul statistique de nombre des événements recensés (zones de détachements de glissement de terrain) associés aux indicateurs (érosion des rivières, failles*, etc.).

Les résultats obtenus dépendront de la qualité des indicateurs.

L'évaluation a permis de réaliser:

- 1) Un recensement complet des glissements « coulée rapides en débris » dans les dix sectionnes communales de Croix-des-Bouquets, (**Annexe 6**).
- 2) Des cartes qui représentent les aléas des zones possibles de détachements des coulée rapides en débris afin d'appréhender la menace à l'échelle géographique locale des habitations *.

Cette étude explique pourquoi des zones sont susceptibles aux mouvements de terrain et autres non (**FIG. 30**).

Cette méthode est un premier zonage de cette menace, elle pourra être complétée par la suite d'une étude plus détaillée au niveau de géologie, géotechnique, utilisation du sol afin de avoir plus des détails au niveau des distances de propagation des mouvements et énergies et intensités des phénomènes.



FIG. 30 La susceptibilité* aux glissements en débris.

Méthodologie d'étude de mouvements de terrain et cartes

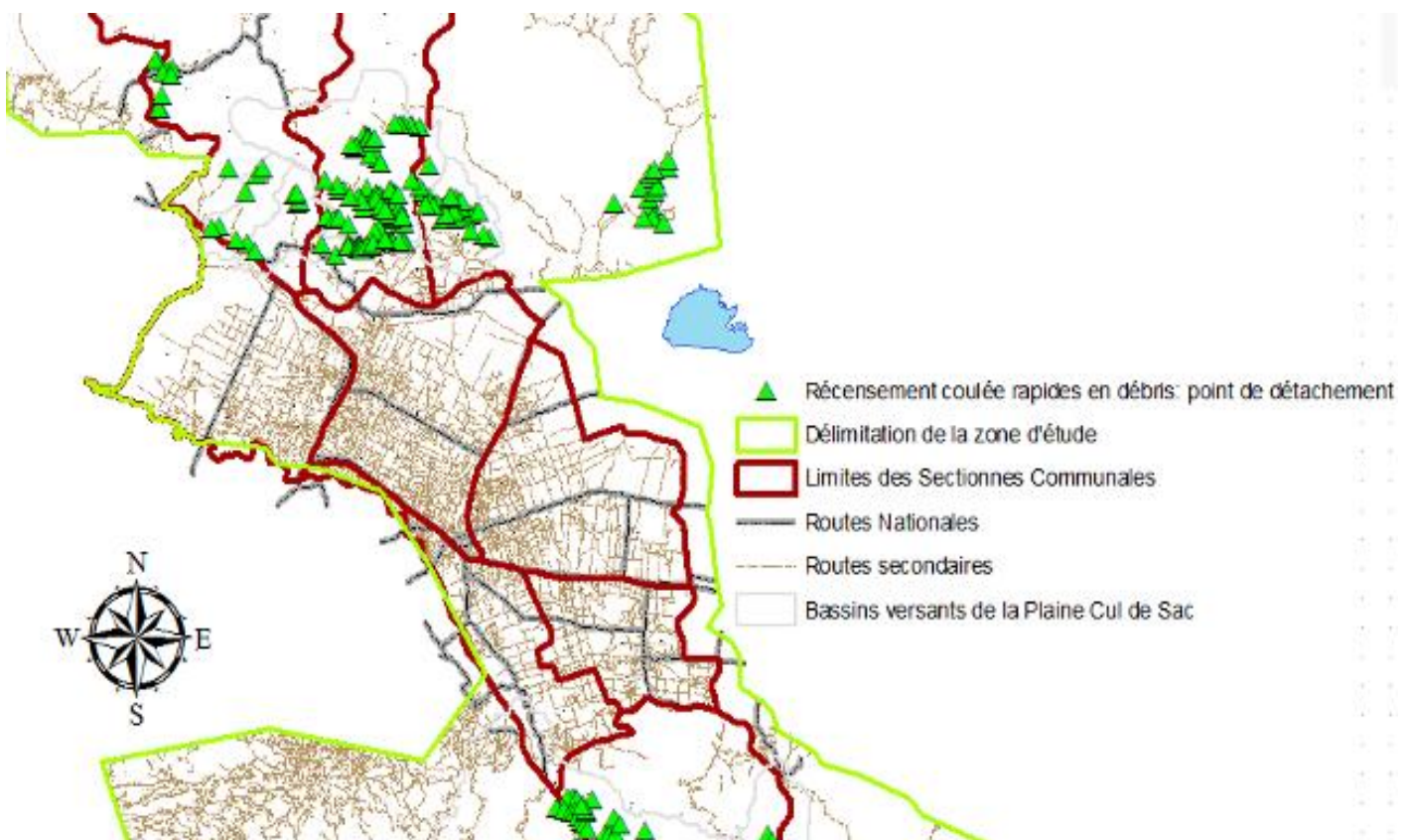
Pour la réalisation de cette étude les phases de travail ont été les suivantes :

- 1) Recherche et collecte des données géologiques, administratives, hydrologiques, sismiques, pentes, routes, utilisation du sol avec la collaboration du CNIGS, BME.
- 2) Recensement et classification des mouvements de terrain (**Annexe 6**) à travers des études de terrain et par photo-interprétation des photos aériennes 2010 et Google Earth ®.
- 3) Individuation et caractérisation des facteurs prédisposant* et discriminants* aux glissements de terrain.
- 4) Élaboration en SIG des cartes de menace de détachement de coulées rapides en débris, d'après le calcul utilisant les poids des facteurs discriminants et prédisposant.

Concernant le point 2) les débris flow* recensés dans la zone sont au nombre de 243 dont la plupart (172) situés dans la zone de Canaan, Jérusalem et Onanville **FIG. 31**.

Pendant le recensement de terrain, la collaboration des CASEC/ASEC/CLPC a été essentielle.

Le recensement des glissements a contribué à la mise à jour du recensement national de glissements de terrain.



FIG, 31 Recensement des glissements en débris dans les dix sectionnes de Croix des Bouquets.

A propos du point 3) les facteurs discriminants* dans cette étude sont: la pente et les lithologies. Par exemple dans une zone de plaine il n'y aura pas l'activation d'un glissement donc le facteur discriminant sera nul « 0 ».

Les facteurs prédisposant* pris en considération dans cette étude sont :

- L'utilisation du sol : les facteurs humains influent grandement sur la menace de mouvement de terrain (déboisement, mauvaises pratiques agricoles etc.).
- La distance des failles : les failles sont des zones d'instabilité, fractures et mouvements.
- La distance des rivières (les rivières sont des éléments prédisposant aux glissements à cause de la forte érosion qu'elles entraînent au pied du versant).
- La distance des tranchées pour la construction des routes ;
- La pente (pour les pentes avec le facteur discriminant de valeur « 1 »);
- Les lithologies (pour les géologies avec le facteur discriminant de valeur « 1 »);

Les facteurs discriminants* et prédisposant* sont importants pour évaluer et calculer la probabilité de l'activation des glissements.

Sur la base des observations de terrain : du nombre de glissements activés dans un rang de pente, dans une typologie de lithologie ou dans une certaine distance de faille ; à chaque facteur sera donné un poids spécifique.

Les poids sont obtenus à travers un calcul statistique du nombre des événements recensés (zones de détachements de glissement de terrain) associés aux facteurs prédisposant* mentionnés ci-dessus.

Etant donné la similarité de la géologie et du territoire de Croix des Bouquet avec Petit Goâve, Grand Goâve et Jacmel et afin d'avoir une analyse statistique complète, ont été utilisés aussi les résultats des autres recensements effectués dans ces communes.

En fait, aux 243 glissements de Croix des Bouquet ont été ajoutés les 1001 coulées rapides en débris des autres communes.

Pour calculer la menace on a évalué combien de coulées rapides en débris se sont détachées à cause de chaque classe de facteur.

Au niveau de fréquence absolue de glissement par lithologie, il a été observé que la plupart des glissements sont en correspondance de la lithologie de calcaires durs du Crétacé supérieur, après dans les calcaires pélagiques* « *Ems* » Eocène moyen supérieur, après dans le « *Cb* » Complexe tholéitique sédimentaire », après dans les calcaires et craies marneux de l'Holocène « *o* » et après dans le flysch grés pélitique* du Miocène inférieur « *Mi* » etc. **FIG. 32.**

Pour évaluer les lithologies qui sont plus sujettes au débris flow, la surface d'extension des lithologies a aussi été prise en considération : par exemple le calcaire pélagique* « *Ems* » donne beaucoup de glissements mais c'est le plus répandu dans les zones du recensement, avec une surface de diffusion de 969 km².

CODE LITHOLOGIE	Nombre de débris flow
Cs	346
Ems	270
Cb	186
o	160
Mi	105
Mm	60
Ep	59
Qa	20
P	18
Ca	11
Es	10
Pi	7
Qa-c	2
Ms	1
Qc	1

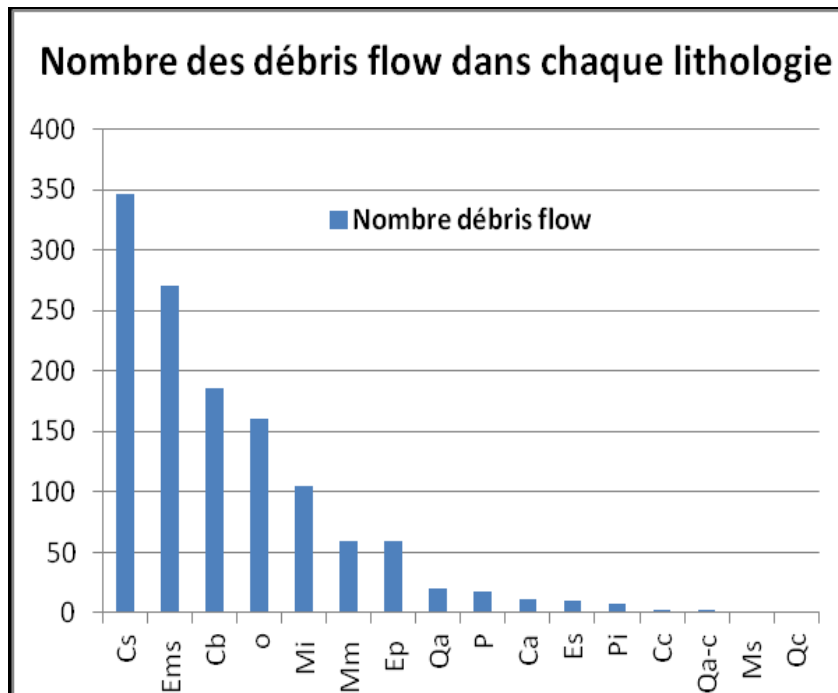


FIG. 32: Fréquence absolue des coulées rapides recensées dans chaque lithologie.

Afin d'évaluer la fréquence relative des débris flow* par chaque lithologie, les nombres des débris flow ont été divisés par la surface relative (FIG.33).

CODE LITHOLOGIE	Fréquence relative
Ems	0,278626
Cb	0,452555
O	1,045957
Mi	1,204128
Mm	0,691085
Ep	0,368589
Qa	0,058267
P	0,46729
Es	0,344471
Qa-c	0,046512
Ms	0,065445

Fréquence relative de coulées rapides par lithologie

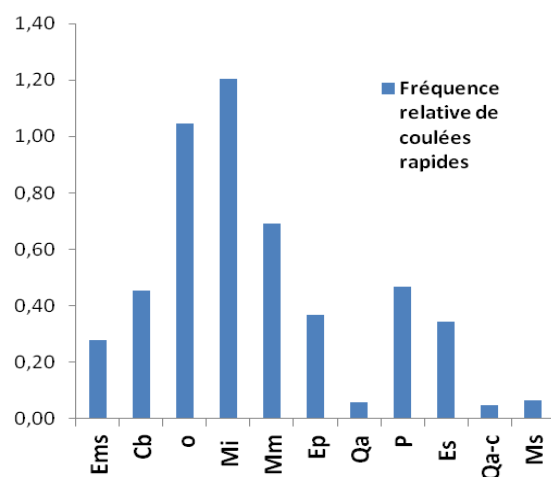


FIG. 33: Fréquence relative des coulées rapides recensées dans chaque lithologie.

Les calcaires durs Cs du Crétacé Supérieur ne sont pas pris en considération dans ce calcul car ils ne sont pas présents à Croix des Bouquets.

Considérant la fréquence relative, les lithologies qui causent le plus de débris flow* sont le flysch grés pélitique* du Miocène inférieur « Mi » et après les calcaires et craies marneux de l'Holocène « o ».

La dernière étape était de donner un poids aux lithologies en fonction de la fréquence relative (**FIG. 34**) : le *flysch* grés pélitique* du Miocène inférieur « Mi » aura le poids le plus élevé.

CODE LITHOLOGIE	Fréquence relative	Poids prédisposant
Ems	0,278626	4
Cb	0,452555	6
o	1,045957	8
Mi	1,204128	9
Mm	0,691085	7
Ep	0,368589	5
Qa	0,058267	2
P	0,46729	6
Es	0,344471	5
Qa-c	0,046512	2
Ms	0,065445	2

FIG. 34 : Fréquence relative des coulées rapides recensées dans chaque lithologie et les poids d'influence aux glissements qui se verront utilisés pour le calcul de susceptibilité.

Ces poids feront partie du calcul de susceptibilité, de même que les poids des classes de pentes, les distances des failles, des rivières etc.

Pour les failles, les rivières et les tranchées *d'excavation de routes ont été observés le nombre des débris et la distance d'influence des facteurs sur l'activation des glissements :

Dans le graphique en **FIG 35** : en abscisse la distance en mètre entre les coulées rapides en débris et les failles ; et en ordonnée le nombre des événements (glissements) à cette distance. Ce graphique a été utilisé pour aider la détermination du poids des failles, ce qui définit leur degré d'influence

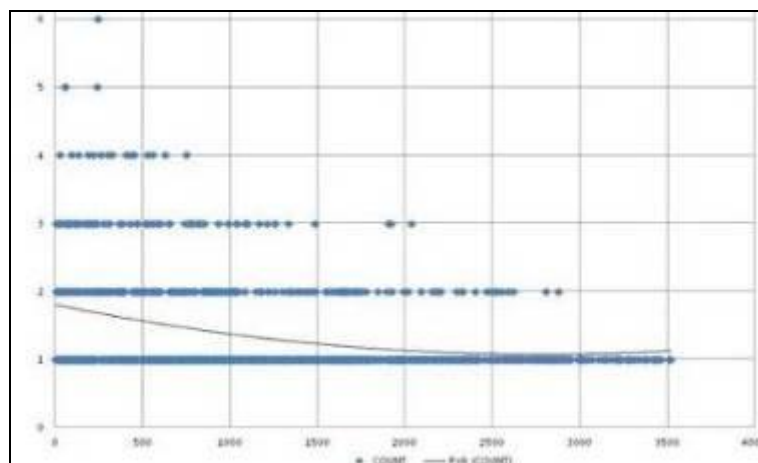


Fig. 35: Graphique pour la détermination d'indice d'influence des failles aux glissements et les distances.

Dans le tableau **FIG. 36** la distance moyenne et maximale, en mètres, entre les débris flow* et les failles.

FAILLES	Distance moyenne	1021 m
	Distance max	3521 m

Fig. 36 Distance en mètres entre débris et failles.

La même procédure a été suivie pour les autres facteurs prédisposant* et les détails (tableaux, graphiques) qui sont en **Annexe 7**.

Concernant le point 4 d'élaboration en SIG des cartes de menace de détachement de coulées rapides en débris, la procédure est longue et complexe et suit les étapes suivantes :

- ✚ Insérer dans le projet les recensements de débris flow* (**Annexe 6**);
- ✚ Faire le rapprochement entre les recensements et les facteurs discriminants (géologie et failles) et donc évaluer les zones de géologie et les pentes qui activent les débris flow.
- ✚ *Buffer** des failles, routes et rivières selon les distances maximales des influences sur l'activation des débris flow*.
- ✚ Faire le rapprochement entre les recensements et les facteurs prédisposant (utilisation du sol, *buffer* de distance de failles, des rivières et des tranchées pour la construction des routes, des pentes avec le facteur discriminant de valeur « 1 », des lithologies avec le facteur discriminant de valeur « 1 »);
- ✚ Calculer les fréquences relatives des débris flow* avec chaque facteur prédisposant pour obtenir des poids d'influence de chaque indicateur.
- ✚ Appliquer la formule de susceptibilité au détachement de débris flow *(détails en **Annexe 7**).

L'analyse des cartes de menaces de mouvements de terrain

La lecture de la carte doit être effectuée en tenant compte du bassin versant comme unité d'analyse.

Les résultats de la carte sont que les zones à aléas forts sont plus diffuses au Nord de la Plaine Cul de Sac (**FIG. 37**) : dans les bassins versants de la Ravine Lancouline (**FIG. 38**) et des ravines de Onanville et dans la chaîne des Matheux (sections 2ème Crochus).

Dans la Plaine Cul de Sac le facteur discriminant* de pente est nul donc il n'existe pas la menace de détachement de débris flow.

Dans les zones Sud de la commune les aléas forts sont moins diffus.

Ces zones sont caractérisées par les bassins versants de la rivière Blanche et de la rivière Grise ; dans le bassin hydrographique de la rivière Blanche, les aléas forts et moyens par rapport au bassin de la rivière Grise sont plus diffus et cela pourrait expliquer que le débris est plus grossier en aval de la rivière Blanche par rapport à la rivière Grise (**FIG. 39**).

En conséquence, la rivière Blanche a davantage d'énergie d'érosion que la rivière Grise.

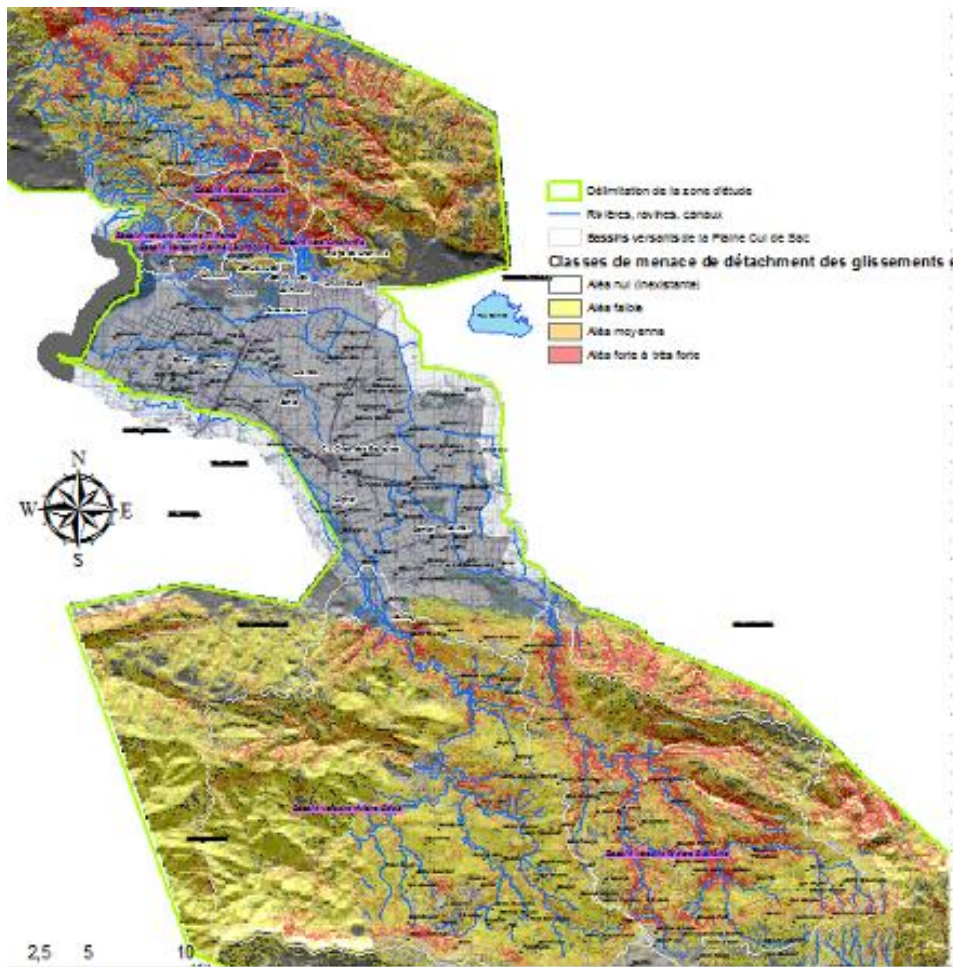


FIG. 37: Carte de susceptibilité* aux détachements des débris flow

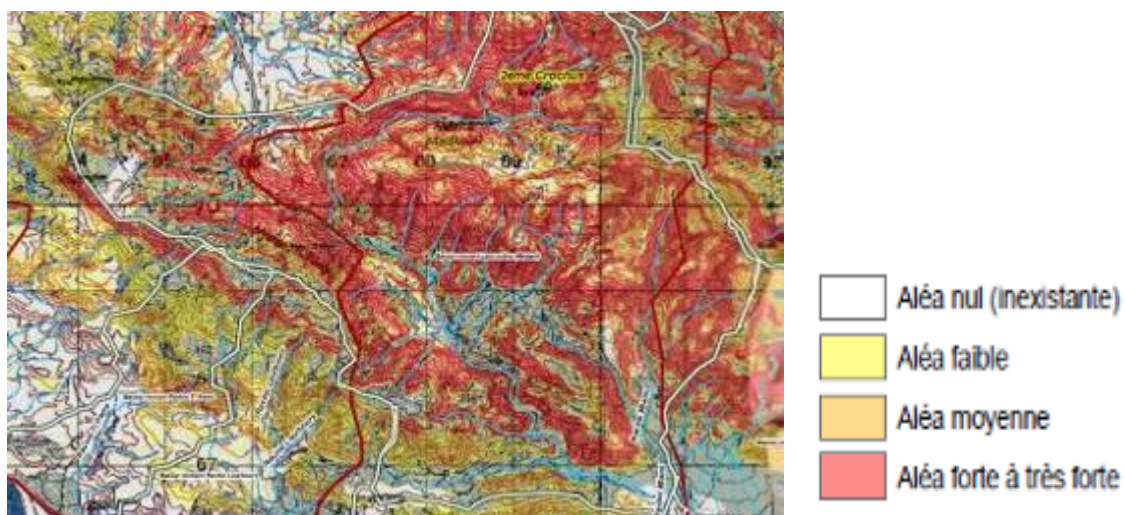


FIG. 38: Aléas de menace de détachement des glissements en débris dans le bassin versant de la ravine Lancoulaine.



FIG. 39 : Aléas des détachements des *débris flows** dans les bassins versants de la rivière Grise (à gauche) et de la rivière Blanche (à droite) ; dans le bassin versant de la rivière Blanche les aléas forts et très forts sont plus diffus.

Dans les FIG.. 39a et 39b les débris flow de Jérusalem et Onanville.



FIG. 39 Les *débris flows** de Jérusalem (en haut) et à mont de Jérusalem (en bas).



FIG. 39: Les *débris flow** de Jérusalem et en bas de Onanville.

En FIG. 40 les glissements dans la zone Sud, à la 3ème section "Belle Fontaine".



FIG. 40 Débris flow* à la troisième section « Belle Fontaine ».

Probablement dans la zone Nord la menace forte et très forte est plus diffuse soit à cause de l'exploitation de la zone avec des activités d'extraction de roches (carrières), qui se sont installées dans les zones des failles et près des routes Nationales, soit à cause de l'érosion superficielle des ravines. Au nord les lignes de drainage sont moins organisées et donc causent une érosion superficielle plus surfacique, par rapport aux rivières au Sud qui sont plus organisées.

L'utilisation pratique des cartes de mouvements de terrain pour des interventions futures

Le débris flow* sont les glissements activés par les pluies et les cyclones, donc les plans d'alerte de la DPC doivent prendre en considération ce facteur. Par conséquent, cette carte pourra être utilisée aussi pour faire des plans d'interventions d'urgence.

Dans la carte sont indiquées les zones de détachement des débris flow. La DPC, pour faire les plans d'alerte, doit évaluer le chemin possible des glissements en débris en cas d'activation (le long des ravines en aval du détachement etc.).

Dans les zones à aléa fort et très fort il est urgent de réaliser des plans de reforestation et/ou de stabilisation des versants pour réduire la pente, l'érosion et/ou la fracturation, l'instabilité des débris/roches.

Dans les zones des aléas forts, il faudra aussi contrôler les lignes de drainage qui causent une érosion superficielle.

Cette typologie des interventions pourra réduire la menace de débris flow et la menace d'inondation en aval dans la Plaine Cul de Sac.

Notre étude recommande d'utiliser cette carte avec la carte de végétation (qui sera expliquée dans les prochains paragraphes) pour faire un premier calage des zones prioritaires à stabiliser pour l'aménagement des bassins versants.

Étude de déforestation dans les bassins versants

Un des facteurs aggravants, ayant les conséquences les plus graves en termes d'inondation, est la déforestation généralisée que connaît Haïti. Selon la dernière Évaluation des Ressources Forestières Mondiales de la FAO (2005), la couverture forestière stable (naturelle ou de plantation) représente moins de 4% du territoire national, contre 30% en République Dominicaine (**FIG. 41**), 22% à Cuba et 32% en Jamaïque.



FIG. 41. Différence de couverture végétale entre Haïti à gauche et République Dominicaine à droite. Source: <http://svs.gsfc.nasa.gov> (NASA, Scientific Visualisation Studio)

À travers l'étude de photo-interprétation réalisée par le géologue Valerio Salvitti, consultant de l'«*Institute for Applied Remote Sensing*» dell' *European Academy* de Bolzano (Italie) du groupe du géol. Marco Mulas, a été réalisée la carte de densité de végétation à l'échelle de 1:100.000 sur les bassins versants majeurs de la commune de Croix-des-Bouquet.

L'étude a été exécutée en utilisant une grille de 500m*500m pour faire l'analyse de photos aériennes fournies par le CNIGS (**FIG. 42**): la pluparts des zones sont gravement déboisés.

La déforestation des bassins versants renforce la vulnérabilité du territoire Haïtien à cause des inondations :

- Accélération du ruissellement lors des pluies intenses. Les versants nus des mornes et des montagnes ne présentent pas ou peu d'interception, d'évapotranspiration et de stockage par la végétation de l'eau précipitée. Cela se traduit par des coefficients de ruissellement élevés (parfois supérieurs à 40%) et des débits spécifiques très importants (par km²) et donc les temps de concentration, entre pic des pluies et pic de crue, sont raccourcis.
- Augmentation du transport solide des rivières en crue. La déforestation, en accélérant les mécanismes d'érosion des sols, augmente la charge solide (rochers, sable, particules en

suspension) transportée par les ravines et les rivières lors de crues, ce qui représente 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.

- Augmentation de l'ampleur des zones inondables. Les dépôts sédimentaires dans les plaines et les littoraux ont pour conséquence l'élévation des chenaux d'écoulement de 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 anthropogène de la capacité hydraulique des cours d'eau.

Méthodologie d'étude de végétation et cartes

Pour la réalisation de cette étude les phases de travail ont été les suivantes:

- 1) Photo-interprétation des photo aériennes 2010 et de Google Earth ® 2014 effectuée avec une grille 500*500m (**FIG. 42**).



FIG42: Grille de 500 m * 500 m pour l'étude de photo-interprétation (à gauche) et détails de la grille de 500 m * 500 m (à droite).

- 2) À chaque maille de la grille a été attribuée une classe de végétation en fonction du pourcentage de végétation (**FIG. 43**).

1ère classe de 0 à 30%;

2ème classe de 31 à 70% ;

3ème classe de 71 à 100%

4ème classe dans les zones des lacs ou présence de nuages (dans cette étude la 4ème classe n'était pas présente).

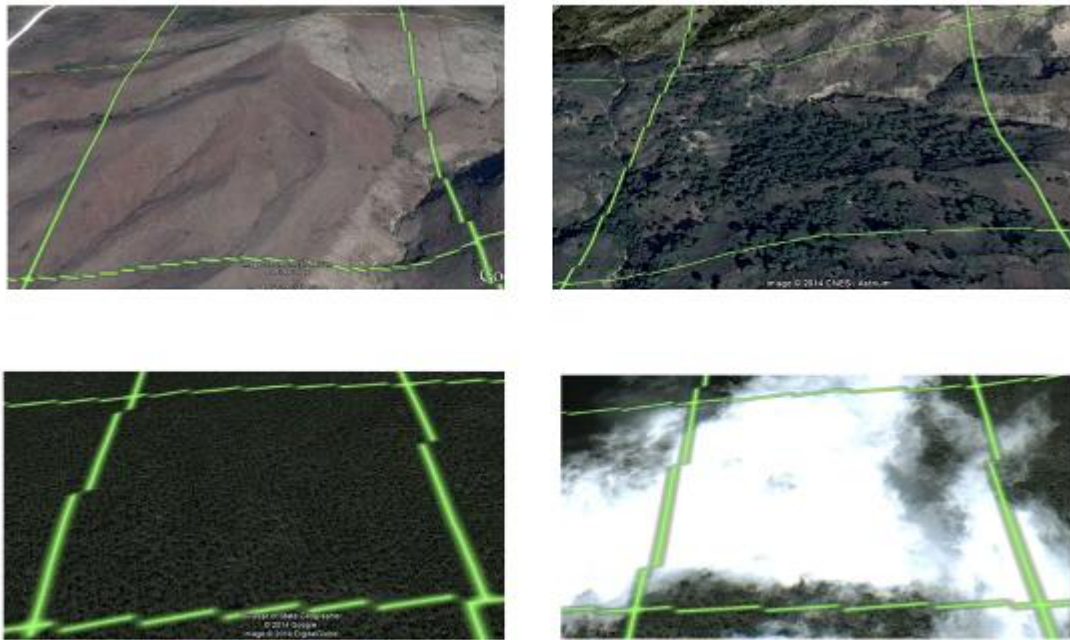


FIG43: A partir du haut à gauche la 1ère, 2ème 3ème et 4ème classe.

3) Pour faciliter la photo-interprétation de la densité de végétation pour chaque maille, des mailles de référence ont été considérées (FIG. 44).

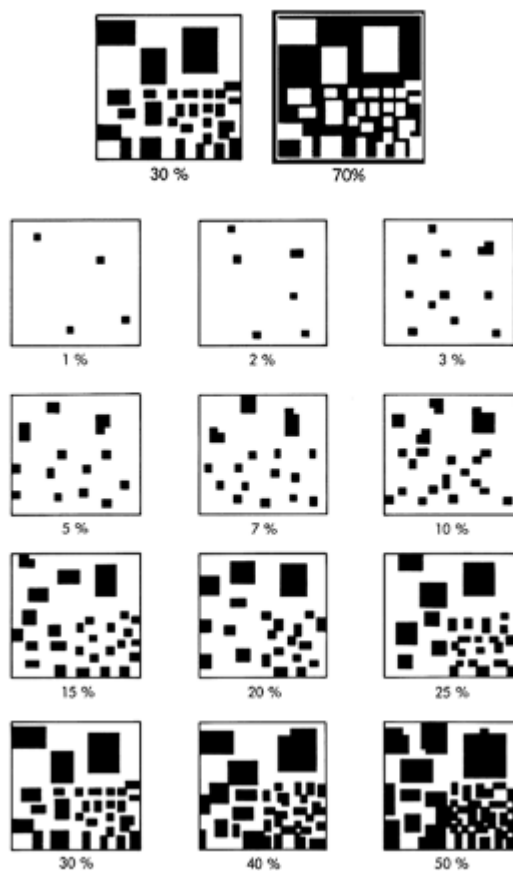


FIG44: Grilles de référence utilisées pour optimiser la photo-interprétation, donc pour avoir une référence et définir les classes de densité de végétation de chaque maille.

2) Élaboration en SIG des données des végétation en grille et transformation en données continues. (FIG. 45) et classification.

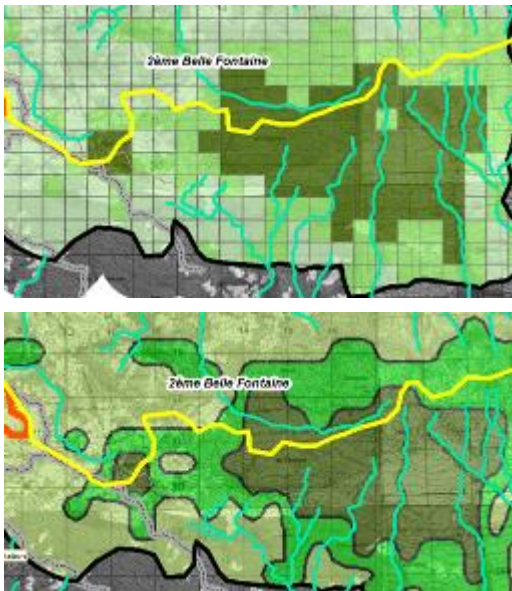
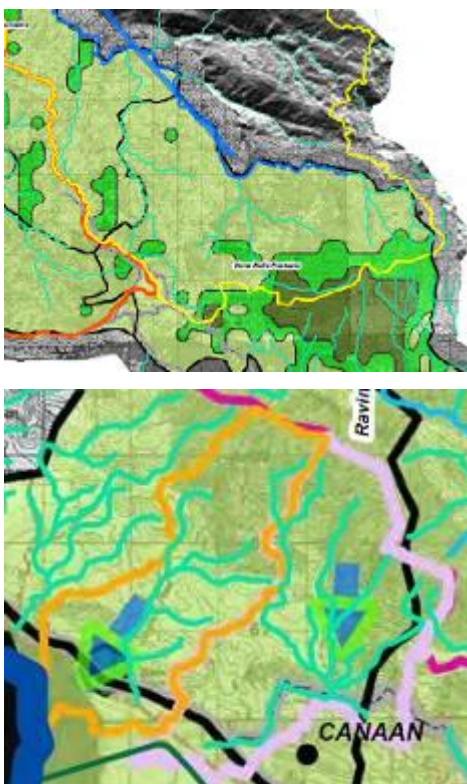


FIG. 45 : Élaboration de la carte de densité de végétation à travers les résultats de la photo-interprétation de la grille (en haut) et donc transformation en données continues (en bas).

Dans la carte sont représentées les classes de densité de végétation, la délimitations des bassins versants avec les directions de drainage superficiel d'eau dans les bassins (FIG. 46).



Classes de densité de Végétation



FIG. 46: Carte de végétation avec les classes de végétation (en haut) et la délimitation des bassins versants et l'indication des directions de drainage superficielle des eaux du bassin (en bas).

Résultats de l'étude de déforestation dans les bassins versants

Dans l'analyse de la carte est évidente 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. 47): donc le niveau de déboisement est très grave.

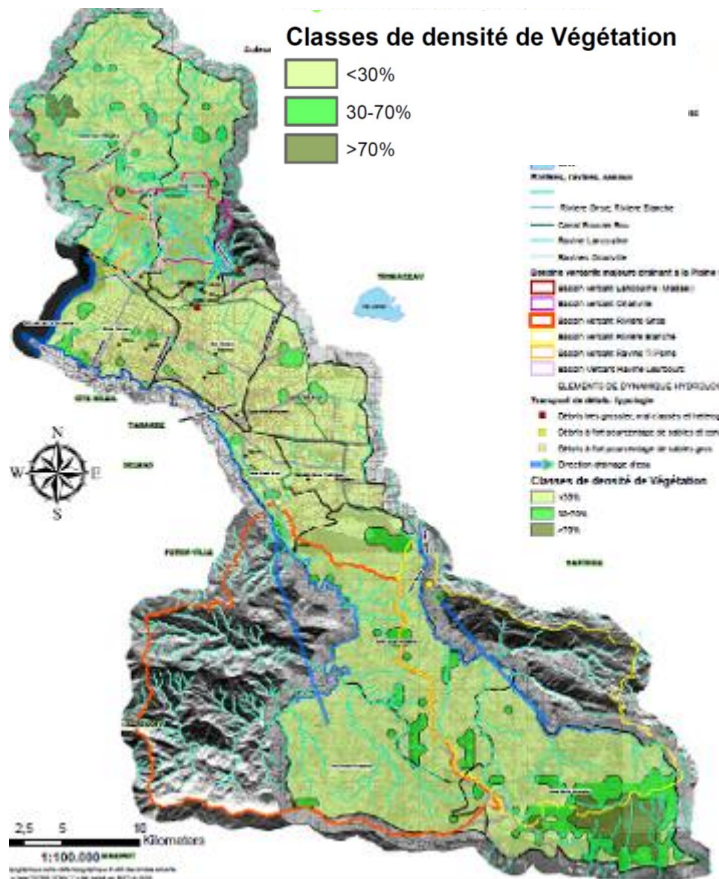


FIG. 47: Carte de végétation avec la délimitation des bassins versants et l'indication des directions de drainage superficiel des eaux du bassin.

Dans la FIG. 48 le graphique de représentation de la distribution de chaque classe de végétation dans la zone en étude : la 1ère classe (entre 0 et 30 %) est la plus diffuse, et il n'existe presque pas la 3ème classe qui représente la densité optimale de végétation (entre 71 et 100%).

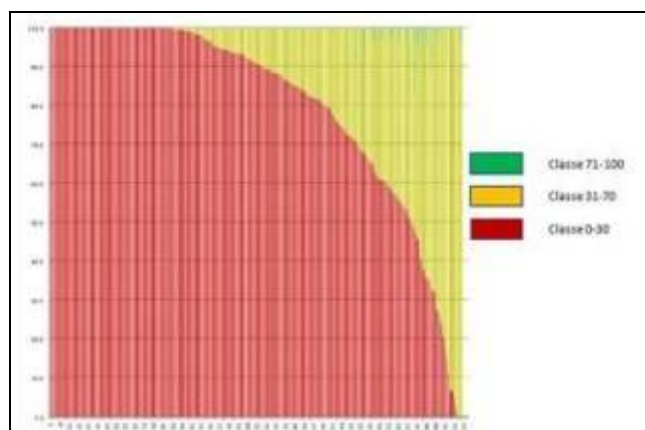


Fig. 48 : Représentation de la distribution des différentes classes de % de couverture végétale : dans le graphique, il résulte que dans les bassins versants il n'y a presque pas la présence de la troisième classe et que presque la totalité des bassins versants sont dans la classe rouge (déboisement très grave).

L'utilisation pratique de la carte de végétation pour les interventions futures

Les zones étudiées ont un degré élevé de déforestation qui amplifie les inondations, les glissements de terrain, l'impact du vent des cyclones et les phénomènes de liquéfaction en cas de séisme (surtout dans les zones d'embouchure des rivières).

La carte est une base pour les projets de reforestation des bassins versants : les interventions doivent commencer à côté des zones de la troisième classe et en correspondance des zones à aléas fort et très forts de susceptibilité* aux détachements des *débris flow*.

Les interventions de reforestation et de stabilisation des versants (sur la base de la carte de menaces de glissement et la carte de densité de végétation) sont urgentes et sont nécessaires pour réduire les inondations, les impacts des vents des cyclones et les glissements de terrain.

Étude de menaces hydrologiques et cartes

Haïti, située dans la Caraïbe, connaît un climat tropical. La saison des pluies s'étend d'avril à juin, puis d'octobre à novembre où s'intercale la saison cyclonique qui s'étend de juin jusqu'à la fin de novembre. Au cours de cette période, mais aussi pendant la saison des fronts polaires (novembre-mars), l'activité atmosphérique peut provoquer des inondations dévastatrices.

La configuration topographique et hydrographique du territoire augmente l'exposition aux menaces hydrométéorologiques. Cette île avec 1.700km de côtes, est essentiellement montagneuse (80% de montagnes supérieures à 100m d'altitude). Les sommets les plus hauts s'élèvent à plus de 2.500 m (massif de la Selle entre Jacmel et Port-au-Prince). Ayiti-quisqueya signifie, en langue indigène Taïno, haute terre, pays montagneux.

Les plaines représentent donc moins de 20% du territoire ; celles du littoral sont étroites et s'élèvent brusquement avec des pentes très marquées.

La méthodologie de cette étude a été idéalisée avec la collaboration du géologue Samuel Génea du ministère de l'environnement d'Haïti et le professeur de l'ENGA.

Des visites de terrain ont été effectuées avec les acteurs institutionnels locaux (CLPC, DPC, CASEC, ASEC).

Pendant l'étude une équipe avec 4 enquêteurs de terrain a été formée afin d'évaluer les hauteurs d'eau des différentes zones et l'érosion.

L'étude a permis la production de deux cartes de menaces hydrologiques de la Plaine Cul de Sac à Croix-des-Bouquets et de Canaan à l'échelle de 1:25.000 (soit avec la base topographique, soit avec la base des photo aériennes Google Earth © 2014).

Les méthodes d'étude des menaces hydrologiques ont été différentes pour les rivières, les canaux dans la plaine Cul de Sac et pour les ravines dans la zone Nord de Jérusalem et Onanville.

Dans la carte les deux menaces ont des symboles différents.

1) Pour le zonage de menace d'inondation dans ces rivières, l'orientation a été de travailler avec une *approche géomorphologique** et de faire des enquêtes auprès des habitants pour comprendre les hauteurs d'eau historiques.

Le choix de cette approche était lié à la raison suivante :

Les bassins versants de la rivière Grise et Blanche sont énormes, la climatologie des zones des montagnes est très différente de celle des plaines. Dans les montagnes il n'existe presque pas de pluviomètres*, tandis que dans la plaine il y a la station de mesure de Damien avec des données sur une longue période mais qui n'est pas significative pour les zones de montagnes des bassins.

Par conséquent, la qualité et la 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.

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 dans les bassins versants des rivières de la zone.

2) L'évaluation des menaces hydrologiques liées à la dynamique des ravines des zones Onanville et Jérusalem, a été effectuée par une évaluation de terrain hydro-géomorphologique, par des enquêtes auprès des habitants et des ouvriers des carrières et a pris en considération les résultats d'une enquête concernant le risque d'inondation à Onanville, effectuée par le groupe de recherche "Stratégies Urbaines pour Onanville" de l'Université Technique de Munich (Allemagne).

Le groupe de recherche allemand a utilisé des données de la station pluviométrique de Damien (dans la Plaine Cul de Sac) combinées avec des modèles numériques de terrain de "DroneAdventures" avec Humanitarian OpenStreetMap et du DLR, pour modéliser les périodes statistiques de récurrence d'inondation, causée par la Ravine Madan-Èl (Ravine Lan Couline).¹

Concernant les rivières et les canaux, les éléments représentés dans les cartes sont :

- ✚ Aléas des inondations des rivières et des canaux de la plaine Cul de Sac (rivières Grise et Blanche, canal Broucanbrou et canaux des zones urbaines), **(FIG. 49)**.
- ✚ Zones d'érosions causées par les rivières (érosion des berges et zones d'érosion liées à la dynamique fluviale) ;
- ✚ Zones de propagation latérale des dépôts ;
- ✚ Zones de dégâts par ruissellement urbain.

Concernant les ravines, les éléments représentés dans les cartes sont :

- ✚ Aléas des inondations et apport des débris des ravines (ravines Lancouline et ravines Onanville dans la zone de Jérusalem, Canaan et Onanville), **FIG. 49**.
- ✚ Zones d'accumulation des débris causées par les ravines.

¹ Détails sur l'étude d'inondation sont accessibles sur l'internet

(http://openarchitecturenetwork.org/sites/default/files/active/50/Valentin%20Heimhuber_Flood%20Risk%20Analysis_Poster.pdf) ainsi qu'une vue d'ensemble des autres activités académiques et communautaires de ce groupe (http://openarchitecturenetwork.org/projects/urban_strategies_ona et http://openarchitecturenetwork.org/sites/default/files/active/50/TUM%20Research%20Group%20Onanville_Presentation%20March%202014.pdf).

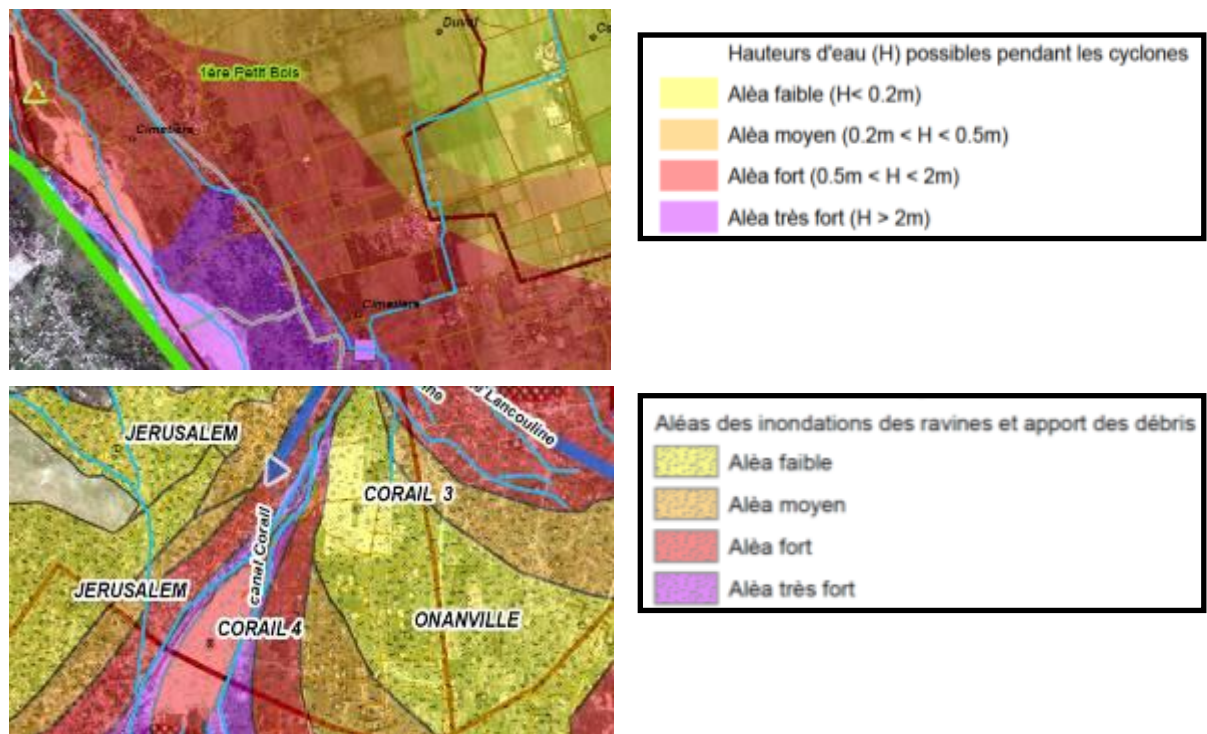


FIG. 49 : Symbololes des aléas hydrologiques: en haut les aléas de la Plaine Cul de Sac (eaux des inondations des rivières Grise, Blanche, canal Broucanbrou et canaux urbains); en bas les aléas des ravines de Onanville, Jérusalem et Cnaan (eaux et débris des ravines).

Méthodologie d'étude de menaces hydrologiques et élaboration des cartes

Dans l'étude des menaces hydrologiques les phases de travail ont été les suivantes :

1. Collecte des données bibliographiques existantes (hydrologie, climatologie, géomorphologie, géologie et pente) ;
2. Analyse des photo aériennes* (à travers le CNIGS des cartes en couple stéréoscopique* de 2002 et des ortho-photos* aériennes de 2010 ont été obtenues) et Google Earth © 2014 ;
3. Etudes de terrain avec l'approche hydro-géomorphologique : reconnaissance des talus, des ruptures de pente, les traces d'inondation : laisses de crues, les zones d'érosions, les dépôts de sédiments dans le lit majeur. Positionnement, hauteur et longueur des gabions. (**Annexe 8**).
4. Visites de terrain avec les CASEC/ASEC.
5. Recensement de terrain à travers des enquêtes auprès de personnes âgées pour définir les hauteurs d'eau historiques (**Annexe 8**).
6. Cette étude a uniquement été réalisée dans la zone de la Plaine Cul de Sac, car à Jérusalem et Onanville, les habitants sont dans la zone seulement depuis le séisme du 12 Janvier 2010.
7. Digitalisation des données en SIG, élaboration et calcul de menaces avec la méthode d'interpolation*.

Concernant le point 3 « Étude de terrain avec l'approche hydro-géomorphologique » : pour le zonage de menace d'inondation, l'idée était de travailler avec une *approche hydro-géomorphologique*, qui semblait la plus pertinente.

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 été créées lors 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).

Pendant l'étude les lits topographiques des cours d'eau sont déterminés :

- Le **lit mineur*** correspond au chenal principal du cours d'eau constitué par un chenal d'étiage* et d'atterrissements*.
- Le **lit moyen***, situé en proximité du lit mineur et inondé par les crues les plus fréquentes.
- Le **lit majeur***, inondé par les grandes crues.

Les autres unités géomorphologiques analysées sont :

Les **plaines alluviales***, l'**encaissant**, les **terrasses (FIG. 50)** et les **colluvions***.



FIG. 50: Terrasse de la rivière Grise.

L'équipe a recensé et cartographié tous les gabions dans les rivières, leurs parties endommagées et tous les points d'érosion des berges qui peuvent devenir des points de sortie préférentielle d'eau.

Au sujet du point 4 « Visites de terrain avec Casec/Asec/ATL/DPC » : les visites de terrain ont été effectuées sur l'ensemble de ces secteurs, pour faire une première analyse de la problématique et un premier calage de la méthodologie à appliquer.

Les zones étudiées ont été d'abord choisies sur la base d'une priorisation des structures à risque et des zones en danger mises en évidences par les autorisées locales.

Concernant le point 5 « Recensement de terrain des hauteurs d'eau historiques à travers des enquêtes auprès des personnes âgées » (**FIG. 51**), **413** familles dans toute la zone de Plaine Cul de Sac près de rivières Grise et Blanche et près du canal Broucanbrou ont été rencontrées. Les enquêtes avaient pour objectif de comprendre les hauteurs d'inondation d'eau possible pendant les grands cyclones.



FIG. 51 Enquêtes auprès des personnes âgées de la Plaine Cul de Sac.

Au niveau du point 6 « Digitalisation des données en SIG, élaboration et calcul de menace avec la méthode d'interpolation* « *spline with barriers* »: la méthode d'interpolation a pris en considération comme points de référence les hauteurs d'eau obtenues par les enquêtes et comme « *barrier* » la plaine alluviale (zone inondable).

Description des éléments représentés dans les cartes:

Les éléments représentés dans la carte sont :

- 1) Aléas des inondations des rivières et canaux des la plaine Cul de Sac (rivières Grise et Blanche, canal Broucanbrou et les canaux des zones urbaines).

Il faut préciser qu'une inondation est un débordement d'un cours d'eau (du lit mineur), le plus souvent en crue, qui submerge les terrains voisins. Dans notre étude n'était pas possible, sans des appareils de mesure d'hauteur d'eau dans les rivières (hydromètres), de faire une distinction précise entre l'eaux des rivières, canaux et les eaux urbaines.

Chaque aléa est représentée par différentes couleurs et pour chaque classe est estimée la hauteur d'eau possible pendant les grands cyclones, **FIG. 52**.

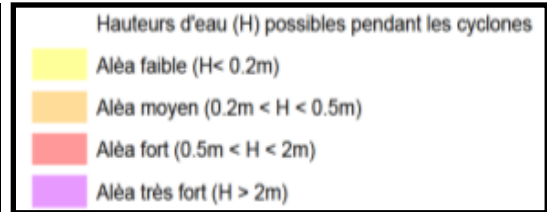
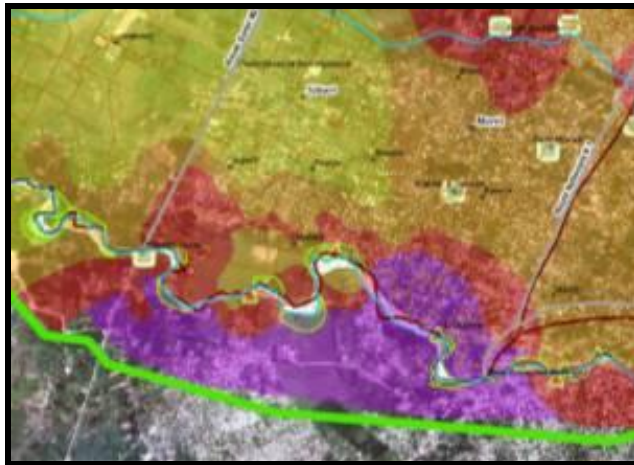


Fig. 52: Aléas de la Plaine Cul de Sac (eaux des inondations des rivières Grise, Blanche, canal Broucanbrou et canaux urbains)

- 2) Zones d'érosions causées par la dynamique des rivières (points d'érosion des berges et zones d'érosion liées à la dynamique fluviale **(FIG 53 et FIG. 55)**;
- 3) Zones de propagation latérale des dépôts, **(FIG 53 et FIG. 55)**;



Fig. 53 : Zone de propagation latérale des dépôts (point A) et zones d'érosion causées par la dynamique des rivières (point B).

- 4) Gabions **(FIG. 53 et FIG. 55)**.



FIG. 54 Gabion dans la rivière Grise.



-  Zones d'érosion des berges
-  Gabions
-  Zones d'érosion causées par la dynamique fluviale
-  Propagation latérale des dépôts

FIG. 55 Symboles pour les éléments recensés sur le terrain.

5) Zones de ruissellement urbain (**FIG. 56, 57, 58**): le ruissellement urbain est la submersion de zones urbaines, 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. Pendant l'étude de terrain des visites ont été faites avec les CASEC/ASEC/ATL/DPC pour recenser ces zones (**FIG. 57**).

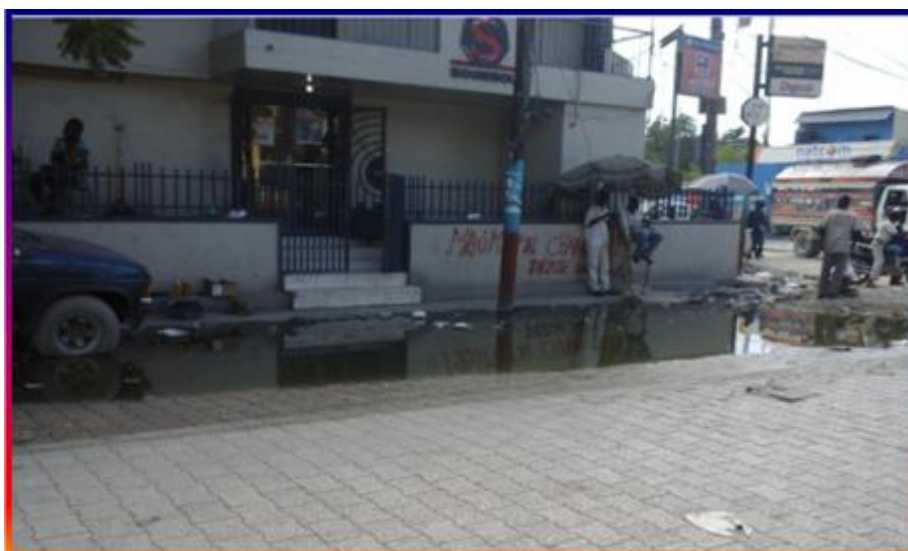


FIG. 56: Zones de ruissellement urbain (2^{ème} Varreux).



FIG. 57: Recensement des zones de ruissellement urbain avec le Casec de la section 1^{ère} Varreux.



FIG. 58 : Symbole des phénomènes de ruissellements urbaine.

- 6) Concernant les ravines, les éléments représentés sur les cartes sont les aléas des inondations et l'apport des débris des ravines (ravines Lancouline et Onanville), **FIG. 59**.

Les **ravines torrentielles : elles** sont formées par un torrent (quelque 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.

La méthode pour reconstruire les aléas a été l'étude géomorphologique des ravines (pour l'évaluation du lit des ravines) et l'utilisation de l'étude du groupe Allemand « TU Munich Research Group »: « *Urbain stratégies for Onanville* »

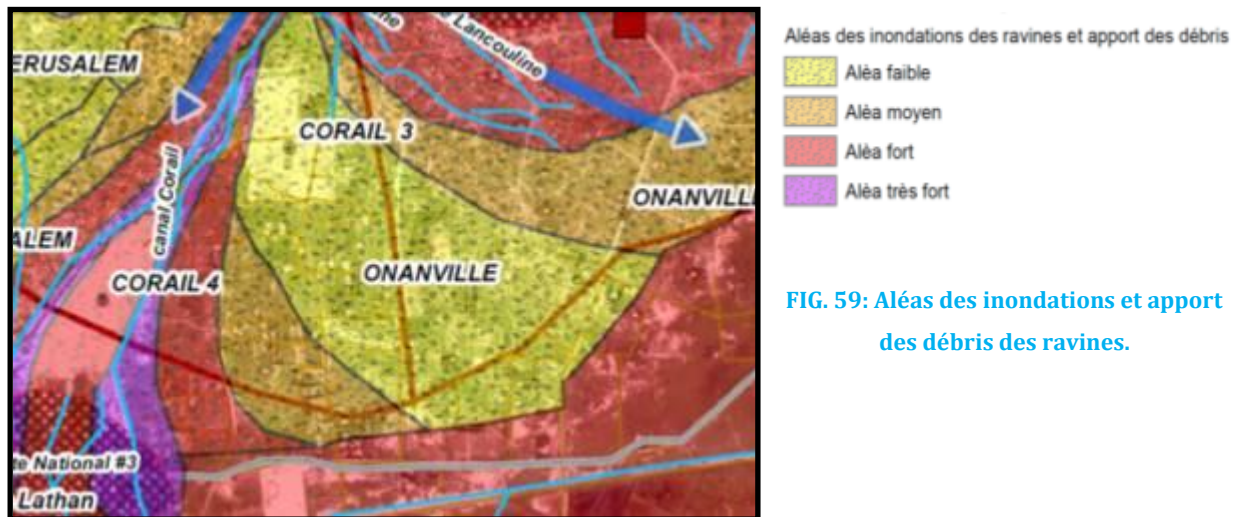


FIG. 59: Aléas des inondations et apport des débris des ravines.

- ❖ **Zones d'accumulation des débris (FIG. 60)** causées par les ravines: ce sont les zones en aval des zones d'érosion causées par les ravines. Souvent ces zones sont exploitées par l'activité productive de récolte des roches.

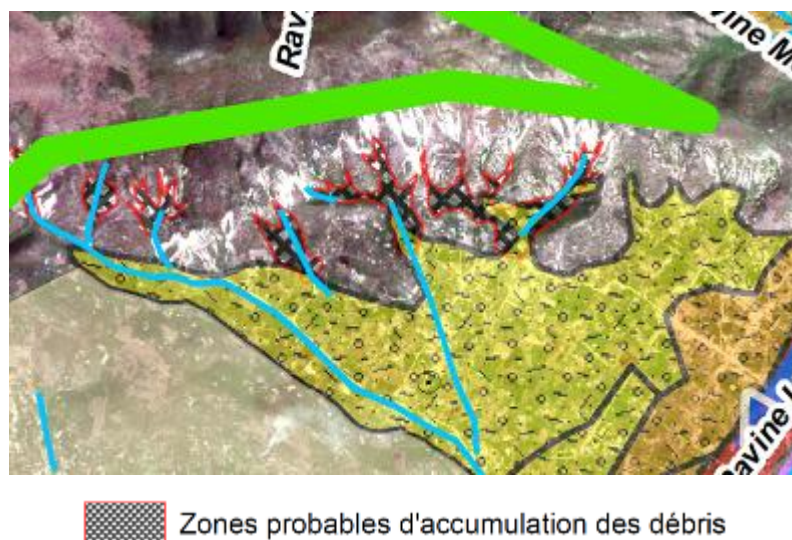


FIG. 60: Symbole des zones d'accumulation des débris.

L'analyse de la carte hydrologique de dynamique des rivières et des ravines

Dans ces zones la menace est liée à l'urbanisation des ravines, de la plaine alluviale et à la non gestion des canaux urbains, des eaux usées et des bassins versants.

La forte densité d'urbanisation dans certains secteurs rend très urgent les projets d'aménagement.

Après le séisme du 12 Janvier beaucoup d'habitations se sont installées directement dans le lit mineur des rivières (FIG. 61).

Les maisons ne respectent pas la distance des rivières et pendant les derniers cyclones beaucoup des maisons ont été détruites par l'érosion de l'eau (**FIG. 62 et 63**)



FIG, 61 Maisons construites dans le lit mineur de la rivière Grise.



FIG, 62 Maisons construites à 10 m de la rivière Grise et détruites pendant le cyclone Sandy en 2012.



FIG, 63 Maisons près de la rivière Blanche détruites pendant le cyclone Sandy en 2012.

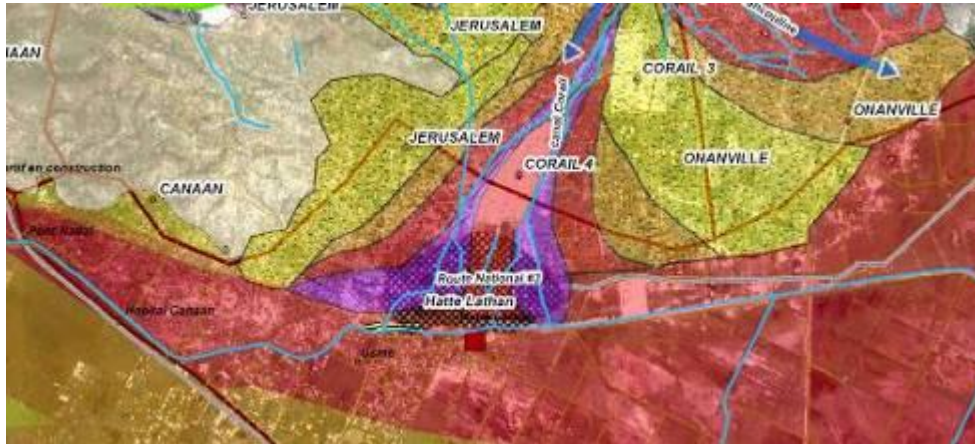
Les zones dans la rivière Grise à aléas plus forts sont Ti Guinée et la zone du Pont Croix de Mission (en aval) et en amont Ti Galette entre la rivière et un canal d'irrigation (**FIG. 64**).

Dans ces zones pendant les grands cyclones l'eau pourra arriver à une hauteur de 2m et en général ces zones sont plus inondées pendant les saisons pluvieuses.



FIG, 64: Zones à aléas plus forts dans la rivière Grise. (FIG. en haut) Ti Guinée, Croix des Mission; (FIG, en bas) les zones en amont: Ti Galette entre la rivière et un canal d'irrigation.

Une zone à forts aléas à cause de la ravine Lancouline et des eaux de la Plaine de Cul de Sac c'est celle en aval de Corail 4 dans la Hatte Lathan (**FIG. 65**).



FIG, 65 : Zones à aléas plus forts causés par la ravine Lancouline.

Les zones de ruissellement urbain du fait des eaux usées, des déchets etc. surtout dans le centre de ville de Croix des Bouquets (**FIG. 66, 67 et 68**) et à Marin près de la rivière Metarde.



FIG, 66: Zones de ruissellement urbain et symboles dans la carte.



FIG, 67 Zones de ruissellement urbain (section 2ème Varreux de Croix des Bouquets).

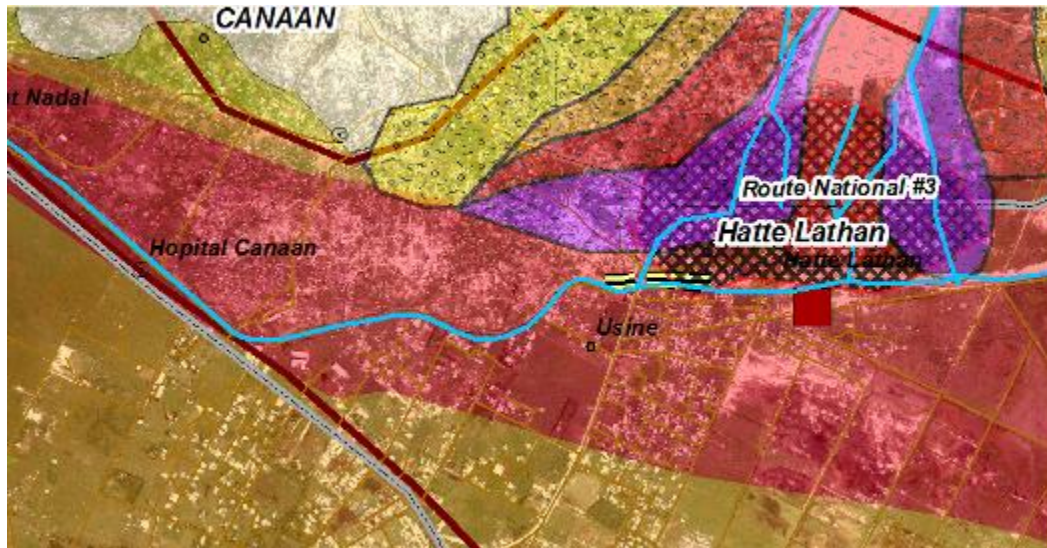


FIG, 68 Zones de ruissellement urbain près du centre de ville de Croix des Bouquets.

D'autres zones critiques sont celles à coté du canal Broucambrou, surtout dans les zones de l'Hôpital de Canaan et dans la zone de l'Usine (**FIG. 69 et 70**).

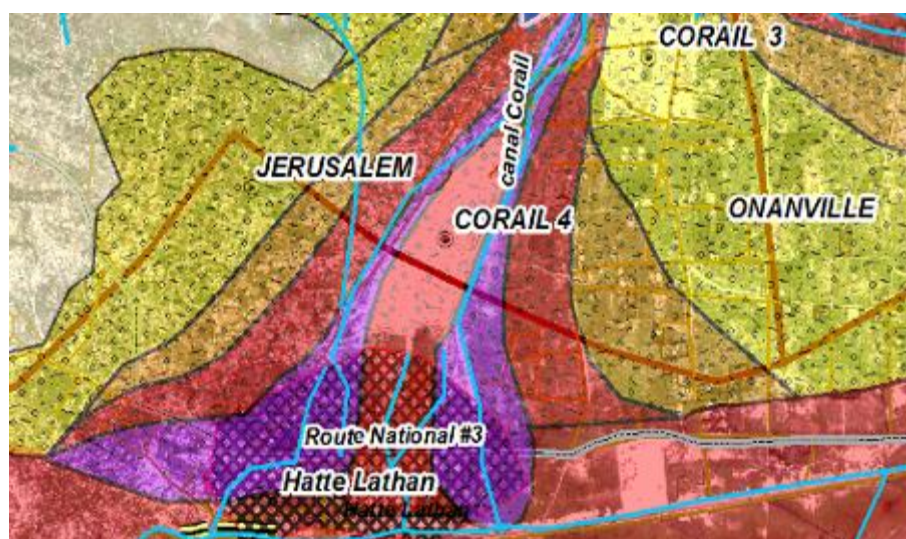


FIG, 69 Des maisons construites à coté du Canal Broucambrou dans l'habitation de l'Usine.



FIG, 70 La carte de menace hydrologique qui montre les habitations de l'Usine et de l'hôpital de Canaan dans la zone des aléas forts.

Concernant les ravines, les zones à forte menace sont situées dans le camp de Corail 4 et les habitations construites à coté de la ravine Lancouline (**FIG. 71**).



FIG, 71 En haut maisons construites à coté de la ravine Lancouline, dans la partie plus au Nord près du Camp Corail 3. En bas les aléas forts et très forts dans la zone du Camp Corail 4.

L'utilisation pratique des cartes de menaces hydrologiques pour les interventions futures

La carte de menaces hydrologiques est un instrument utile aux ingénieurs pour planifier des interventions pour réduire les risques dans la zone.

Les ingénieurs doivent considérer que la construction d'ouvrages dans les rivières et/ou ravines changera la dynamique d'érosion et/ou déposition en amont et en aval de l'ouvrage.

La carte des menaces hydrologiques donne les indications des zones à aléas majeurs mais chaque ouvrage et/ou intervention à faire doit être accompagné par des études plus détaillées.

Pour la zone de Jérusalem, Onanville et Canaan c'est une base de données pour évaluer les interventions suivantes :

- ✓ Seuils en amont des zones indiquées dans la carte comme « **zones d'accumulation des débris** » pour réduire les apports de débris : l'étude doit considérer les effets hydrauliques en amont et en aval, d'autant plus que la zone est un point de production et de travail important pour de nombreuses personnes qui ramassent les roches (**FIG. 72**).
- ✓ Canaux cimentés à la base des ravines pour favoriser l'évacuation d'eau. Par exemple le canal à coté du camp de Corail (**FIG. 73**). .



FIG, 72 Activités d'extraction de roches dans les zones d'accumulation des débris des ravines.

- ✓ Interventions de nettoyage des canaux et réparations.



FIG, 73: Canal excavé à côté du camp de Corail.

La carte de menaces d'inondation dans la plaine sera utile pour planifier des interventions à :

✚ COURT TERME :

- Plans d'alerte et d'urgence en cas de cyclone (mise en place de sites d'hébergement selon les routes existantes, les aléas des inondations etc.).

✚ MOYEN TERME :

- Construire des ouvrages de protection (par exemple gabions) correspondant aux zones indiquées sur la carte comme étant des **berges** et des **zones d'érosion liées à la dynamique fluviale**
- Canalisation et/ou interventions de nettoyage des canaux, réparations dans les zones indiquées sur la carte comme étant un **ruissellement urbain**.

✚ LONG TERME :

- Les interventions les plus urgentes et les plus efficaces en termes de durabilité et d'impact sont au niveau des aménagements des bassins versants (**FIG. 74**) pour réduire les inondations, l'impact des vents des cyclones, l'érosion etc.

La planification de ces interventions devrait prendre en considération comme unité des interventions le bassin versant de chaque rivière et les résultats de la carte de densité de végétation et de la carte des menaces de mouvements de terrain, pour faire le calage des zones prioritaires et la typologie des interventions.

- Au niveau urbain il est très urgent de mettre en place des systèmes de recyclage des déchets et des eaux usées ainsi que des politiques de prévention de production des déchets.
- Évaluer et respecter des distances entre les rivières et les constructions.
- Évaluer des modalités de construction dans les zones inondables selon les hauteurs des inondations.



FIG, 74: Aménagement des bassins versants dans la zones de Petit Goâve (Rivière La Digue). Projet effectué par WHH.

CHAPITRE 3

Conclusion et proposition d'action en mitigation des risques

Le territoire Haïtien est composé principalement par des montagnes et la plupart des terrains se trouvent sur des pentes. La dégradation du sol est facilitée, l'érosion est un phénomène journalier et amplifié surtout par la déforestation qui est très importante.

L'érosion accélérée en Haïti est un des plus graves problèmes à résoudre car elle entraîne d'autres phénomènes: elle amplifie les inondations, les glissements de terrain, les phénomènes de liquéfaction en cas de séisme, elle cause de faibles rendements agricoles, de l'insécurité alimentaire etc.

Les interventions devront avoir pour objectif principal la réduction de l'érosion du sol et de la déforestation.

Les recommandations sont d'exercer de toute urgence des interventions d'aménagement des bassins versants :

1. Evaluation des pentes, études diagnostiques au niveau de dégradation du bassin versant et l'érosion hydrique ;
2. Mise en place de techniques de conservation du sol (pratique de la jachère *, techniques culturelles conservatives, mesures hydrauliques)
3. Agroforesterie*.
4. Reforestation.

La plaine Cul de Sac est une zone alluviale, par conséquent le problème le plus fréquent c'est les inondations pendant les saisons des pluies et les cyclones.

L'approche utilisée pour l'étude d'inondation a été exclusivement hydro-géomorphologique avec des enquêtes auprès des personnes âgées pour estimer les hauteurs d'eau historiques , car il manque des données climatologiques et hydrométriques, mais à l'avenir des instruments de mesures devraient être mis en place pour analyser quantitativement la menace inondation et calculer les temps probables de retour des inondations de différents intensités.

Les interventions à faire devront avoir pour objectif de réduire l'apport de débris et des eaux dans la plaine et de diminuer l'urbanisation de la zone pour favoriser le développement agricole.

Au niveau pratique, il faudra à court terme faire des plans d'urgence en fonction des cartes des inondations et de menaces de glissements; à moyen terme des gabions qui sont des ouvrages très coûteux mais qui peuvent aider en attendant des projets de reboisement qui seront plus durables.

Le reboisement est très urgent et pourra réduire l'érosion et faciliter l'infiltration d'eau.

La gestion des déchets est aussi un problème très urgent à résoudre, qui amplifie aussi les problème de ruissellement urbain: le conseil étant de réduire l'utilisation du plastique et d'utiliser les déchets organiques pour les jardins et les champs à cultiver. .

Les glissements les plus fréquents dans la commune sont les *débris flow**, qui sont déclenchés surtout par les pluies et les cyclones et qui peuvent faire dégâts et morts dans plusieurs zones, car les distances de propagation sont de kilomètres le long les rivières, des lignes de drainages, des ravines et avec des énergies élevées.

L'alerte de protection civile doit tenir compte de ces informations pour faire des plans d'urgence.

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

- Ce sont les zones où concentrer les opérations de stabilisation des versants et/ou reforestation.

Dans ces zones doivent être mises en place surtout des interventions semi structurelles (reboisement, agriculture par terrassement, plantation du vétiver, canalisation des eaux etc.).

Etant donné la durée de cette étude, il n'était pas possible de transférer à l'équipe d'experts Haïtiens la méthodologie d'étude de menace de glissements, donc nous recommandons de réaliser des projets de formation en ce sens.

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, aux pluviométries. Haïti n'a pas beaucoup d'instrumentations pour le contrôle et la prise de mesures. Les seules données disponibles sont à l'échelle régionale.

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

Les cartes de densité de végétation, de menaces des glissements en débris, et la carte des pentes, seront utiles pour planifier des interventions :

1. Ces cartes pourront indiquer les zones à prioriser pour l'aménagement. Dans les zones à aléa fort jusqu'à très fort des glissements, il est urgent de réaliser des plans de reforestation et/ou de stabilisation des versants pour réduire la pente, l'érosion et/ou la fracturation, l'instabilité des débris/roches.
2. La reforestation doit commencer par les zones à densité majeure de la végétation.
3. La mitigation des glissements à travers des ouvrages de protection des berges, aux pieds des zones à forte menace de détachement des glissements en débris est essentielle.

L'étude géologique montre que les structures sismiques de la Chaîne des Matheux sont actives et continuent aussi dans le Golfe de la Gonâve et un séisme pourrait causer des *tsunamis* qui peuvent affecter la Plaine Cul de Sac.

Au niveau des tsunamis, le Golfe de la Gonâve est étroit et protégé par l'île de la Gonâve mais notre étude conseille de faire des recherches plus détaillées par rapport à cette menace.

Des études plus détaillées des failles de la chaîne des Matheux surtout dans les zones de Jérusalem, Canaan et Onanville sont nécessaires, et pourront être effectuées à travers des tranchées dans les ravines.

Les mesures de fréquences de résonance montrent que la Plaine Cul de Sac présente des zones d'amplification sismique.

Les ingénieurs dans les calculs de construction de bâtiments doivent prendre en considération la carte de fréquence de résonance, le coefficient topographique dans les zones à amplification topographique et l'amplification lithologique.

Dans la construction dans les zones instables doivent être faites nombreux analyses pour évaluer la possibilité de construction et la typologie des bâtiments.

Bibliographie et web sites

- Ali Tabrez Syed, Freed M. Andrew, Calais Eric, Manaker M. David , McCann William R. (2008)** – Coulomb stress evolution in Northeastern Caribbean over the past 250 years due to coseismic, postseismic and interseismic deformation, *International Journal of Geophysics*, Vol. 174, pp 904-918.
- Andreiff Patrick & Lasnier Jaques (1989)** - Synthèse Géologique de la République d'Haïti – Stratigraphie. <http://www.bme.gouv.ht/ouvrage/synth%C3%A8se/index.html>.
- Bigi Alberto (2012)** – Guide de référence sur les pratiques de prévention et de lutte contre l'érosion dans le département Sud d'Haïti.
http://www.cesvi.org/UserFiles/File/guide_haiti_sud.pdf
- Bolli H.M., Beckmann J.P., Saunders J.B (1994)** – Benthic foraminiferal biostratigraphy of the south Caribbean region. *Cambridge University Press*.
- Calais E., Béthoux N., de Lépinay B.M. (1992)** – From transcurrent faulting to frontal subduction: A seismotectonic study of the Northern Caribbean plate boundary from Cuba to Puerto Rico, *Tectonics*, Vol. 11, No. 1, pp 114-123
- Calais E., Mazabraud Y., de Lépinay B.M., Mann P., Mattioli G., Jansma P. (2002)** – Strain Partitioning and fault slip rates in the northeastern Caribbean from GPS measurements, *Geophysical Research Letters*, Vol. 29, No. 18, pp 3,1-3,4.
- 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 Hasse, 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.
- 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.
- Falconi L., Lentini A., Leoni G., Puglisi C. & Ramirez C.** Geomorphological approach to assess debris flow risk in the catchment of Alcamayo creek (Aguas Calientes, Cusco, Perú)"
- Lentini A., De Cecco M.** -Évaluation technique des menaces naturelles des communes de Jacmel, Petit Goâve, Grand Goâve (Haïti)- Preventioweb:
<http://www.preventionweb.net/english/professional/publications/v.php?id=27296>
- 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.

Mann P. & Burke K. (1984) – Neotectonics of the Caribbean, *Reviews of Geophysics and Space Physics*, Vol. 22, No. 4, pp 309-362.

Mann P., Calais E., Huerfano V. (2004) – Earthquake Shakes “Big Bend” Region of North America-Caribbean Boundary Zone, *Eos*, Vol. 85, No. 8, pp 77-88.

Mann P., Hernaiz P.P., Ramirez W. (2008) – Stratigraphy, tectonics and subsurface petroleum geology of the Ocoa, Azua and Enriquillo basins, Dominican Republic, *18th Caribbean Geological Conference, Santo Domingo, Dominican Republic, March 23-24 2008*.

Mann P., Taylor F.W., Lawrence Edwards R., Ku The-Lung (1995) – Actively evolving microplate formation by oblique collision and sideways motion along strike slip faults: An example from the Northeastern Caribbean plate Margin, *Tectonophysics*, Vol. 246, pp 1-69.

Oldrich Hungr I Serge Leroueil I Luciano Picarelli - The Varnes classification of landslide types, an update. Landslides DOI 10.1007/s10346-013-0436-y. © Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2013

Pentice C.S., Mann P., Crone A.J., Gold R.D., Hadnut K.W., Briggs R.W., Koehler R.D., Jean P. (2010) – Seismic hazard of the Enriquillo-Plantain Garden fault in Haiti inferred from palaeoseismology, *Nature Geoscience*, Vol. 3, pp 789-793.

Pubellier Manuel, Mauffret Alain, Leroy Sylvie, Vila Marie Jean, Amilcar Heliott (2000) – Plate boundary readjustment in oblique convergence: Example of the Neogene of Hispaniola, Greater Antilles, *Tectonics*, Vol. 19, No. 4, pp 630-648.

Puglisi C., Falconi L., Grauso S., Screpanti A., Verrubbi V., Zini A., Crovato C., Campolo D., Leoni G., Lumaca S., Malerba S., Brustia E., Commerci V., Lucarini M., Napoli R., Torre A., Pino P.(2013) - Valutazione della pericolosità da frana nel territorio del Comune di Messina. /ENEA-RT-2013-18, Roma, 161 p. <http://hdl.handle.net/10840/4771>

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

Sykes R. Lynn, McCann R. William, Kafka L. Alan (1982) – Motion of the Caribbean plate during the last 7 Million years and implication for earlier Cenozoic movements, *Journal of Geophysical research*, Vol. 87 No. B13 pp. 10,656-10,676.

Ten Brink Uri S., Bakun H. William, Flores H. Claudia (2013) - Seismic hazard from the Hispaniola subduction zone: Correction to “Historical perspective on seismic hazard to Hispaniola and the northeast Caribbean region”, *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, Vol. 118, pp 5597-5600.

TU Munich Research Group « Urban Strategies for Onaville » (TUM-USO).

[http://openarchitecturenetwork.org/projects/urban_strategies_ona_\(Overview\)_or_on_that_poster](http://openarchitecturenetwork.org/projects/urban_strategies_ona_(Overview)_or_on_that_poster): https://www.dropbox.com/s/0j8v02y1bq1pqhy/TUM%20IAS_final_Onaville.pdf

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.

Woodring P. Wendell, Brown S. John, Burbank S. Wilbur (1924) - La Géologie de la République d'Haïti. <http://www.bme.gouv.ht/mines/woodring/index.htm>.
<http://www.journalofmaps.com/crossrefMap.php?mid=1041>