

APPORT DES IMAGES PLEIADES AU MICROZONAGE SISMIQUE DE PORT-AU-PRINCE (HAÏTI) : APPLICATION A L'ETUDE GEOLOGIQUE

Monique Terrier¹, Anne Bialkowski², Claude Prepetit³, Yves-Fritz Joseph⁴, Didier Bertil⁵, Marcello de Michele⁵

1: BRGM, Direction Risques et Prévention, Orléans, France, m.terrier@brgm.fr

2: BRGM, Direction des Géoressources, Orléans, France

3 : BME, Port-au-Prince, Haïti

4 : LNBTP, Port-au-Prince, Haïti

5 : BRGM, Direction Risques et Prévention, Orléans, France

Résumé

Le 12 janvier 2010, la capitale d'Haïti, Port-au-Prince, a été détruite par un très violent séisme. En 2011, afin de mieux prendre en compte le risque sismique dans la reconstruction et le développement de la capitale, une étude de microzonage sismique sur Port-au-Prince a été programmée entre le PNUD, l'Etat Haïtien (LNBTP et BME) et le BRGM. Les connaissances géologiques et topographiques locales constituent des préalables essentiels dans le processus de réalisation d'un microzonage. Les images Pléiades et le MNT, obtenus dans le cadre du projet KalHaïti, ont été utilisés. L'étude géologique montre un substratum miocène à pliocène principalement composé de carbonates fortement remobilisés (turbidites, coulées de débris) résultant de l'érosion de la montagne de La Selle située au Sud et à la mise en place d'un bassin d'avant-pays se propageant dans la plaine du Cul-de-Sac au Nord. Ces formations dépendent d'un contexte tectonique particulièrement actif dû à la collision entre la plaque nord-Amérique et celle des Caraïbes, induisant dans la région de Port-au-Prince l'activité de la zone de failles d'Enriquillo-Plantain-Garden, de direction N80°E, et de failles de direction N110°E. Ces nouvelles données ont constitué des éléments essentiels pour la prise en compte dans des failles actives et l'évaluation des effets de site dans le microzonage sismique de Port-au-Prince.

Mots-clés : géologie, faille active, MNT, Pléiades, microzonage sismique, Port-au-Prince, Haïti

Abstract

On January 12, 2010, Port-au-Prince, the capital of Haiti, has suffered one of the most violent earthquakes it has experienced during recent centuries. In 2011, in order to better take into account the seismic risk in the reconstruction and development of the capital, a study of seismic microzonation on Port-au-Prince was programmed between UNDP, the Haitian State (LNBTP and BME) and BRGM. The local geological knowledge and topographic data are essential prerequisites in the process of realization of a seismic microzonation. In this framework, the Pleiades images and the MNT (derived from these images PLEIADES and calculated by SERTIT it / CNES project KalHaiti) were used to bring new insights on the geological and the morphological analysis of the region of Port-au-Prince.

Several dozens of outcrops at the level of the agglomeration and periphery have been observed. Their analysis has been supplemented by the study of geotechnical drilling, aerial photographs, SPOT images and the digital terrain model. The Miocene to Pliocene substratum is mainly composed of strongly remobilized carbonates (turbidites, debris flow) resulting from the erosion of the La Selle range located to the South and the establishment of the foreland basin located in the plain of Cul-de-Sac to the North. These formations are dependent on a particularly active tectonic context with the collision between the North American plate and the Caribbean plate, inducing the activity of N80°E Enriquillo-Plantain-Garden fault zone and N110°E fault system.

Beyond the difficulties inherent in field observations in urban areas, in a context of active erosion and of particularly accented reliefs, the different sediment facies observed have been repositioned in a chronostratigraphic framework. The tectonic and morphological studies indicate quaternary activity and senestro-reverse movement of several N110 faults mapped in the area of the capital. The map of active faults has been directly integrated to the seismic microzonation map. The geological map is an essential data for the assessment of the effects of seismic site (area of amplification of the vibration due to the nature and the thickness of surficial deposits). In addition, on the basis of these new geological and topographic data, the hazard map of ground movements has been realized. This publication concerns only the description of the geological results of the seismic microzonation. With appropriate recommendations on land use and constructive practices, the seismic microzonation fits into the component land use planning of the actions for the prevention of natural risks.

Keywords: geology, active fault, DTM, Pleiades, seismic microzonation, Port-au-Prince, Haiti

1. Introduction

Les territoires d'Haïti et de la République Dominicaine forment l'île d'Hispaniola. Située sur la limite des plaques Antillaise et nord-Américaine, cette île est exposée à une très forte sismicité. Le 12 janvier 2010, Haïti a subi un des plus violents séismes qu'elle ait connu au cours de ces derniers siècles (fig.1). La

capitale d'Haïti, Port-au-Prince, et son agglomération ont subi de très lourdes pertes. D'après les autorités haïtiennes, le séisme est à l'origine de 230 000 personnes décédées, 300 000 blessés et plus d'un million de sans-abris. Outre le séisme du 12 janvier 2010, d'autres séismes historiques majeurs relativement anciens (1701, 1751, 1770, 1860) sont localisés le long de cette structure. Selon Bakun *et al.*

(2012), le séisme de 1751 aurait atteint au moins une magnitude de 7,4 et concernant le séisme de 1770, la magnitude est estimée à 7,5. Afin de mieux intégrer le risque sismique dans la reconstruction et l'aménagement de la capitale, une étude de microzonage sismique sur Port-au-Prince a été programmée entre le PNUD, l'Etat haïtien (LNBT - Laboratoire National des Bâtiments et Travaux Publics et BME - Bureau des Mines et de l'Energie) et le BRGM. Cette étude répond à une des premières actions proposées pour réduire le risque sismique en Haïti (Prépetit, 2010).

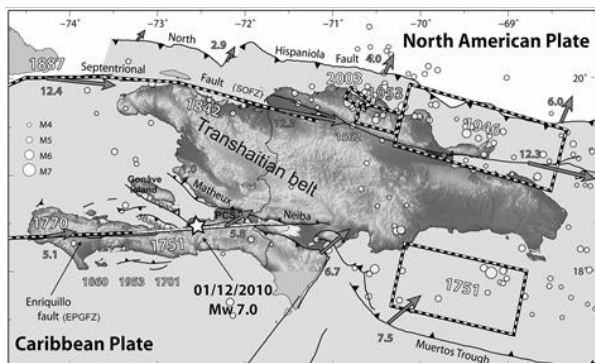


Figure 1 : Ile d'Hispaniola : localisation des zones de ruptures historiques et indications (flèches) des vitesses (en mm/an) de glissement des failles actives déduites des mesures géodésiques (d'après Calais et al., 2010) ; PCS : Plaine du Cul-de-Sac

De façon générale, le séisme est un risque majeur contre lequel l'homme ne peut se protéger que de manière passive. On ne peut empêcher un séisme d'avoir lieu, mais on peut en revanche prendre des dispositions pour tenter de minimiser ses conséquences. Il s'agit de la prévention du risque sismique, dont le développement s'articule autour de quatre axes majeurs : l'information et l'éducation de la population, l'aménagement du territoire, la construction et la réduction de la vulnérabilité, l'organisation des secours. Le microzonage sismique s'inscrit dans le volet aménagement du territoire. Destiné aux décideurs, aux aménageurs, aux ingénieurs en structure de bâtiments, aux architectes mais aussi à un plus large public, le microzonage sismique a un caractère opérationnel très appliqué, utile aussi bien pour la reconstruction des zones détruites du territoire haïtien que de manière préventive dans une politique d'aménagement du territoire prenant en compte les risques naturels.

Le microzonage tient compte du mouvement sismique au rocher (aléa régional) et des modifications de ce mouvement en fonction des conditions locales topographiques et géologiques (localisation et caractérisation des effets de site et des effets induits). A cette fin, une analyse lithologique du territoire est menée. Elle est complétée par une analyse des failles potentiellement actives. Les techniques mises en œuvre pour ces analyses géologiques sont basées sur les connaissances disponibles, enrichies d'investigations in situ complémentaires (géologie, géophysique, géotechniques) menées. Dans ce cadre, outre les observations sur le terrain permettant de vérifier, étayer et calibrer les hypothèses préliminaires d'interprétation cartographique, quel que soit la zone à

étudier, l'étude géologique doit pouvoir s'appuyer sur des images satellites et un modèle numérique de terrain les plus précis possibles. A cette fin, le microzonage sismique de Port-au-Prince a bénéficié de données issues du projet de recherche KalHaïti. L'échelle du microzonage retenue est 1/25 000 sur l'ensemble du territoire communal et 1/10 000 pour certains secteurs.

La présente publication concerne les résultats géologiques obtenus dans le cadre de la réalisation du microzonage sismique de Port-au-Prince (Terrier et Bialkowski, 2013). Il est possible de se référer au site internet <http://www.lnbt.gov.ht/microzonage.html> pour la synthèse des résultats du microzonage sismique (Bertil et al., 2013).

2. Contexte géodynamique et séisme de 2010

L'île d'Hispaniola est formée par Haïti, à l'ouest, et la République Dominicaine, à l'est. Les îles de la Jamaïque, de Porto-Rico et d'Hispaniola correspondent à l'archipel des Grandes Antilles. Elles marquent la frontière entre la plaque Nord-américaine et le nord de la Plaque Caraïbe. Le mouvement principal entre les deux plaques atteint une vitesse relative de 2 cm/an en moyenne, avec une direction convergente des plaques nord Amérique et Caraïbe N70°E, oblique par rapport à la limite de plaques E-W (Mann et al., 2002). Au niveau d'Hispaniola, deux grands systèmes de failles forment la limite entre les deux plaques : au Nord, le système de failles nord-septentrionales d'Hispaniola (SOFZ), et au Sud, le système de failles d'Enriquillo-Plantain-Garden (EPGFZ), figure 1.

Le séisme du 12 janvier 2010 a atteint la magnitude Mw 7,1. La profondeur focale est de 13 km. L'épicentre est situé entre l'île de Gonave et la péninsule sud orientale d'Haïti. Le calcul du mécanisme au foyer de la secousse majeure et de ses répliques, les mesures d'interférométrie radar, ainsi que celles mesurées par GPS indiquent le mouvement d'une faille de direction ENE-WSW (N71°E), de pendage nord et un mouvement inverse (Calais et al., 2010). Cette faille est donc légèrement oblique par rapport à la direction de l'EPGFZ (N80°E) et est située au nord du système. Nommée « faille de Léogâne » (Calais et al., 2010), elle est interprétée comme un chevauchement aveugle. D'après l'analyse des répliques du séisme du 12 janvier 2010, la rupture principale de la faille de Léogâne aurait induit : 1) le jeu inverse d'une faille N120 (la faille des Trois Baies) et, 2) le rejeu en profondeur décrochant senestre du plan de faille principal de l'EPGFZ (Hayes et al., 2011; Douilly et al., 2013).

3. Données Pléiades et produits dérivés

Extrait de <http://kal-haiti.kalimsat.fr/spip.php?article19> (Gasc et al., 2014) : « Le projet KalHaïti vise à construire et faire vivre une base de données de télédétection et de données complémentaires relatives au séisme de janvier 2010 et à animer une communauté d'utilisateurs associés. Cette véritable infrastructure de référence servira de support à des recherches pour développer des méthodes d'analyse utiles aux équipes concernées par la gestion d'une catastrophe depuis la prévision jusqu'au retour à une

situation normale, mais aussi aux opérations de reconstruction engagées sur Haïti. »

Les nouvelles données topographiques haute résolution, telles que celles issues des images LiDAR ont d'ores et déjà démontrées tout leur intérêt pour l'analyse des marqueurs morphologiques en réponse à des sollicitations tectoniques (Crosby *et al.*, 2004; Meigs, 2014). L'analyse des images à haute résolution spatiale et leurs dérivés consiste à rechercher les traces de faille et estimer le déplacement des terrains de part et d'autre du trait de faille à travers le décalage d'éléments morphologiques tels que les thalwegs, les cônes de déjection quaternaires ou les terrasses d'érosion ou d'accumulation.

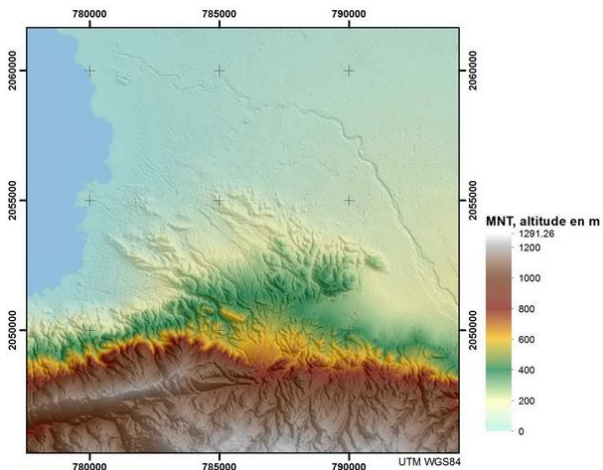


Figure 2 : MNT au pas de 1 m calculé à partir du triplet d'images Pléiades datées de juillet 2012

Ainsi dans le cadre du projet KalHaïti, un Triplet d'images Pléiades (PAN +MS) acquises le 19 juillet 2012 ont été transmises au SERTIT pour le calcul des MNS et MNT à un pas de 1m (fig. 2 et 3). En l'absence de fond topographique précis, les images Pléiades ont constitué le fond de carte de référence pour l'étude in situ et la restitution des résultats. En outre, grâce au MNT à la résolution de 1 m, une étude morphostructurale précise a pu être menée.

4. Résultats

4.1 Carte géologique

Les principales données cartographiques existantes au démarrage du microzonage étaient la carte géologique d'Haïti à 1/250 000 de Momplaisir et Boisson (1987) et la récente esquisse géomorphologique de Bachhuber *et al.* (2010). L'échelle 1/250 000 permet une appréciation régionale de la géologie mais elle n'est pas du tout adaptée à celle d'un microzonage. Concernant la carte de Bachhuber *et al.* (2010), celle-ci est de l'ordre du 1/50 000. Elle a été réalisée dans les mois suivants le séisme de 2010, dans un contexte d'urgence. Les dépôts miocènes, pliocènes et pléistocènes y sont interprétés comme des paléo-éventails complexes et des dépôts de plaine ou de cônes alluviaux. Quelques linéaments orientés WNW-ESE sont également indiqués. Selon ces auteurs, ils pourraient représenter la trace de failles potentiellement actives. Elles sont interprétées comme des failles secondaires et rattachées en profondeur à la faille principale EPGFZ.



Figure 3 : Vue 3D vers l'Est de Port-au-Prince, calculée à partir du MNT (figure 2) et d'une image Pléiades de 2012

Pour réaliser le microzonage sismique, il était donc nécessaire de vérifier, et si possible de préciser, la carte de Bachhuber *et al.* (2010) ainsi que confirmer l'existence et le caractère actif des failles pressenties. L'étude géologique a consisté en l'observation de plusieurs dizaines d'affleurements, complétée par l'analyse des forages géotechniques déjà existants, des photographies aériennes de 2002, du modèle numérique de terrain au pixel de 1m de côté et calculé à partir des images Pléiades (KalHaïti, SERTIT/CNES), de l'ortho-photo SPOT 2010 et d'images satellites multi-dates accessibles en vision 3D avec Google Earth.

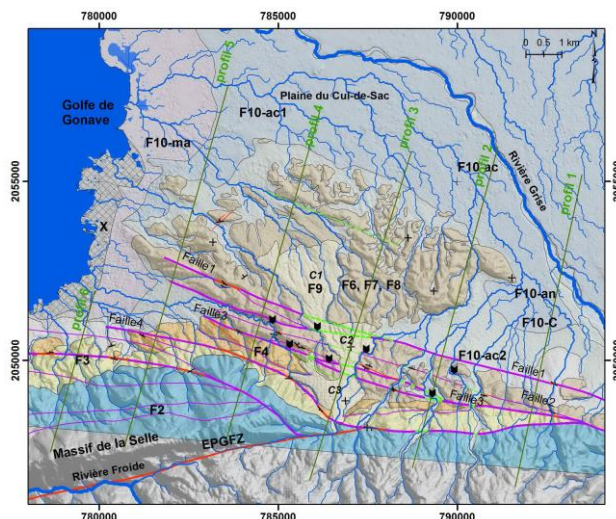


Figure 4 : Carte géologique de Port-au-Prince et localisation des profils topographiques (fig. 7).

L'agglomération de Port-au-Prince se trouve au niveau de la plaine alluviale du Cul-de-Sac. L'étude a permis de préciser le contexte environnemental des dépôts néogènes qui constituent son substratum. Les terrains miocènes à pliocènes montrent des dépôts marins profonds à sub-littoraux (fig. 4, formations F4 à F8, marnocalcaires, mudstones, grès fins, silts)

caractéristiques de milieux de faible énergie. Localement des formations détritiques apparentées à des séquences de turbidites grésos-conglomératiques à silteuses viennent s'intercaler dans les formations marines. Ces intercalations sont de plus en plus fréquentes à la fin du Miocène - début du Pliocène. Les formations détritiques sont le produit de démantèlement des massifs situés au Sud dont le relief est entretenu durant le Mio-Pliocène par une activité tectonique continue des failles bordières qui le limitent et par la structuration continue du bassin d'avant-pays au front du Massif de La Selle. L'épaisseur des formations miocènes et pliocènes atteint très vraisemblablement plusieurs centaines de mètres voire plus de mille mètres si l'on se réfère aux profils sismiques marins situés dans le golfe de Gonave (Mann *et al.*, 1995) ainsi qu'au forage effectué dans la Plaine du Cul-de-Sac par la ATLANTIC REFINING en 1947 (Mompalaisir, 1986).

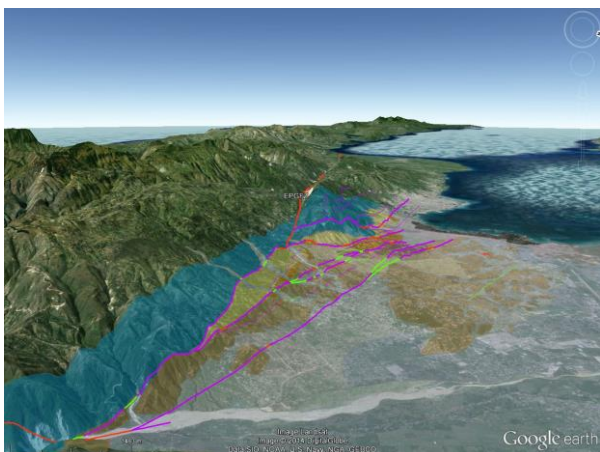


Figure 5 : Vue 3D vers l'OSO de l'agglomération de Port-au-Prince (Haïti), superposition des contours lithostratigraphiques et des failles (voir légende fig. 4).

4.2. Analyse morphostructurale

La topographie actuelle résulte en grande partie de l'orogénèse pliocène et du jeu des failles délimitant des compartiments à laquelle se superpose l'érosion quaternaire et récente. L'axe orographique principal est situé au Sud (fig. 5). Il correspond au massif de la Selle dont la direction N80°E est étroitement liée à la direction structurale de l'EPGFZ. Entre la plaine alluviale du Cul-de-Sac et le versant nord du massif de la Selle, de petits chaînons de direction moyenne N110°E marquent la topographie. Ces petits reliefs sont nettement visibles sur le MNT et la carte des pentes (fig. 2). A cet endroit, les formations marneuses et marno-calcaires mio-pliocènes montrent en plusieurs endroits une surface stratigraphique avec un fort pendage (supérieur à 45°) et de direction ONO-ESE (fig. 4). Cette direction se retrouve aussi au niveau du contact entre les dépôts récents (F10) et les formations mio-pliocènes (F5 à F8) et plio-quaternaire (F9). Ces reliefs sont limités, à l'Est et au Nord, par les formations alluviales de la rivière Grise, et à l'ouest, par des alluvions marines. Au Sud, ce sont des colluvions de pente ou des cônes de déjections qui recouvrent localement ces mornes. Les colluvions en place sont globalement peu épaisses, en général de 0,1 à 0,5 m d'épaisseur sur les reliefs les plus marqués et 0,5 à 1 m d'épaisseur en moyenne sur les reliefs les plus doux. Ces dépôts superficiels remobilisés peuvent atteindre

plusieurs mètres d'épaisseur dans le fond des vallées étroites.

Au centre de l'agglomération, une formation conglomératique, constituée d'éléments calcaires polymétriques, granoclassés, non cimentés, dans une matrice marno-sableuse, recouvre les formations marno-calcaires et silts miocènes à pliocènes. Cette formation correspond à un cône alluvial de piémont mis en place probablement entre la fin du Pliocène et le Quaternaire ancien. Le système hydrographique à l'origine de ce dépôt doit être recherché dans les reliefs calcaires situés au Sud. Le cône d'épandage présente trois ensembles distincts qui sont interprétés comme des épandages successifs du bassin versant (fig. 4 et 6, indexes C1, C2, C3). Le plus ancien (C1) est situé le plus au nord. Le plus récent (C3), au Sud, est toujours alimenté par la ravine actuelle. En considérant l'axe central des 2 parties nord et centre du cône, l'hypothèse d'un décalage latéral de 1 000 m n'est pas exclue. Ce qui indiquerait une vitesse de mouvement horizontal de 0,6 ($\pm 0,2$) mm/an pour les systèmes de failles N110°E cartés à cet endroit. Cette estimation est compatible avec les valeurs indiquées par les mesures GPS au niveau des déformations compressives de la chaîne transhaïtienne (Calais *et al.*, 2010). Par ailleurs, le réseau hydrographique a été calculé à partir du MNT (fig. 6). Il présente plusieurs inflexions selon une direction ONO-ESE. Ces inflexions peuvent atteindre localement jusqu'à 300 m. Cette valeur moyenne est cohérente avec l'hypothèse d'une vitesse de mouvement horizontal indiquée plus haut, sachant que dans ce cas il s'agit de marqueurs plus récents (Quaternaire moyen à supérieur).

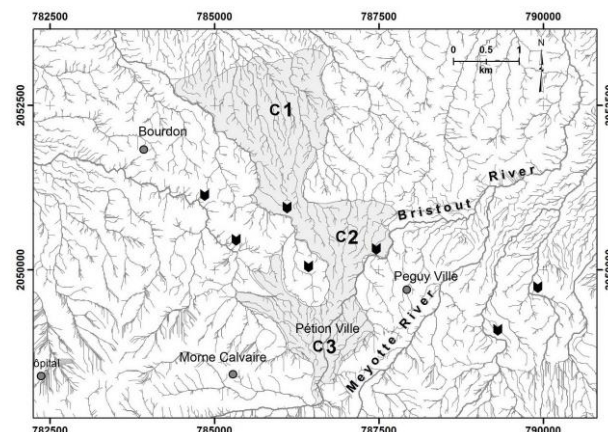


Figure 6 : Réseau hydrographique calculé à partir du MNT, localisation des trois cônes de déjection successifs (C1, C2, C3) et des zones d'inflexion (flèches noires épaissies) du réseau hydrographique reliés au passage d'une faille.

Les coupes topographiques réalisées à partir du MNT depuis les hauts du Massif de la Selle jusqu'à la plaine alluviale du Cul-de-Sac montrent une décroissance rapide du relief du Sud vers le Nord (fig. 4 et 7). Des variations du gradient de pente sont notées à l'aplomb des failles, indiquant par endroit des ruptures de pente possibles jusqu'à une cinquantaine de mètres de dénivelé (fig. 7).

Plusieurs failles à pendage sub-vertical ont été mesurées soit au sein des dépôts miocènes à pliocènes soit au contact entre les terrains mio-pliocènes et quaternaires (fig. 4). Ces observations confirment la

présence de failles N110°E dans le bâti structural de l'agglomération de Port-au-Prince. Les données morphostructurales et les observations de terrain indiquent un mouvement horizontal décrochant senestre avec une composante secondaire verticale, probablement inverse, des failles N110°E. La carte géologique (fig. 4) distingue trois tracés différents : 1) observés sur le terrain, 2) interprétés sur la base des données topographiques, 3) possibles mais masqués par les formations récentes et sans signature topographique. Sur la base des données morphologiques, des contrastes lithologiques et des mesures structurales, certaines failles apparaissent plus importantes que d'autres ; il s'agit en particulier des failles numérotées 1, 3 et 4 de la figure 4. Concernant la faille 4, celle-ci se connecte à l'EPGFZ.

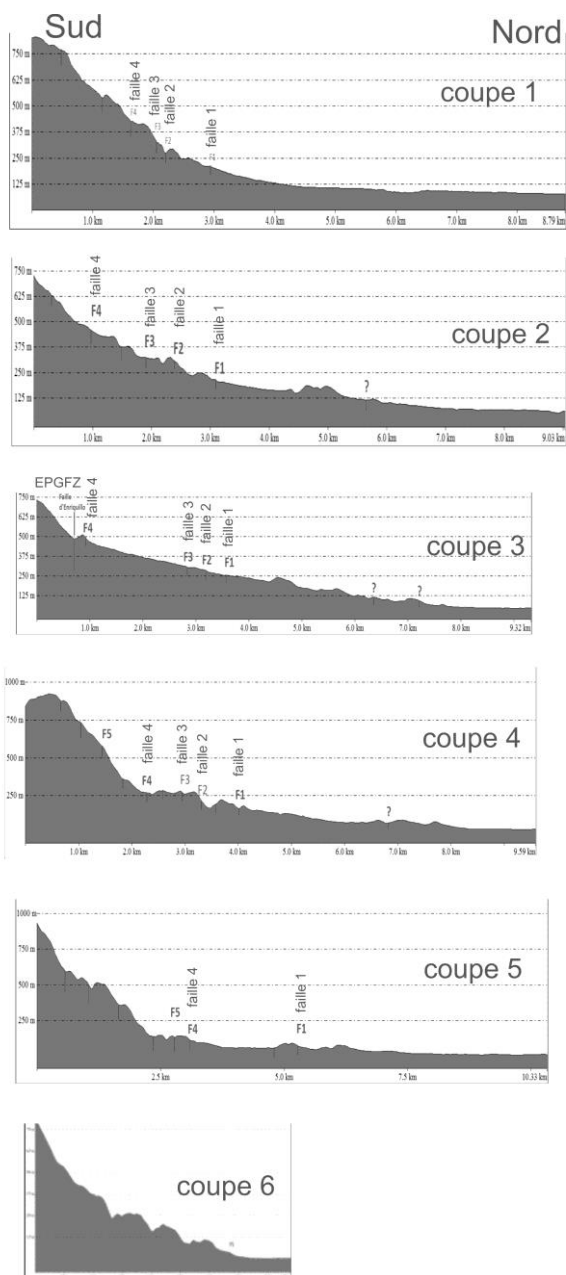


Figure 7 : Coupes topographiques réalisées à partir du MNT (Pléiades, KalHaïti) depuis le versant nord du massif de la Selle jusqu'à la Plaine du Cul-de-Sac (localisation sur la figure 4).

Les failles N110°E cartées au niveau de l'agglomération de Port-au-Prince constituent un système de failles d'une quinzaine de kilomètres de longueur connue à terre. Toutefois les données géophysiques marines laissent supposer leur prolongement vers l'Ouest dans le golfe de Gonâve (Mann *et al.*, 1995). Par contre à l'Est, elles sont limitées par l'EPGFZ.

4.3. Intégration des résultats au microzonage sismique

Le microzonage sismique de Port-au-Prince est aujourd'hui achevé (Bertil *et al.*, 2013; <http://www.lnbt.gov.ht/microzonage.html>). La carte des failles actives (notamment les failles 1, 3 et 4) accompagnée de recommandations y est directement intégrée. Les résultats géologiques (carte des contours, description de la nature lithologique des matériaux et de leur environnement de dépôt) ainsi que les données topographiques ont constitué des informations essentielles pour l'évaluation des effets de site directs lithologiques ou topographiques (Belvaux *et al.*, 2013 ; fig. 8). Il s'agit de zones où il peut y avoir des amplifications du mouvement sismique en raison des caractéristiques géomécaniques du sol et sous-sol et/ou des conditions topographiques locales.

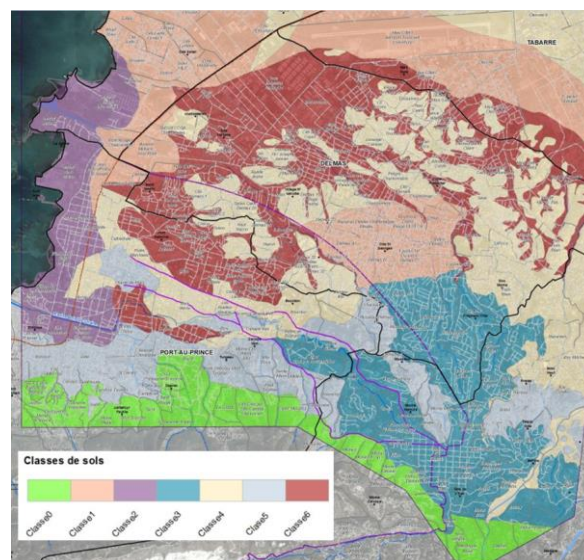


Figure 8 : Carte des effets de site lithologiques, extrait du microzonage de Port-au-Prince, Haïti (Belvaux *et al.*, 2013).

Les mouvements de terrain sont considérés comme des effets induits possibles en cas de sollicitation sismique, leur évaluation fait donc partie intégrante du microzonage. En plus d'un inventaire des instabilités de versants et de l'usage de l'imagerie satellitaire, les données sur la nature lithologique du sol et du sous-sol et le MNT ont été utilisés pour la cartographie de l'aléa mouvements de terrain (Terrier et Nachbaur, 2013; Terrier *et al.*, 2014). Pour cela, une matrice couplant nature lithologique et pente topographique critique a été constituée sur la base de la typologie des mouvements de terrain construite grâce à l'inventaire des instabilités de versants. Sous SIG, une première carte indicative de l'aléa mouvements de terrain a été constituée. Une vérification sur le terrain des niveaux d'aléa pressentis a constitué un préalable à sa finalisation.

5. Conclusion

Les images Pléiades et le MNT acquis dans le cadre du projet KalHaiti constituent un support et un complément au levé géologique très précieux, en particulier s'il s'agit de contexte urbain dense que celui de Port-au-Prince. La carte géologique a ainsi pu être réalisée à partir d'une étude morphostructurale préliminaire sur la base des photographies aériennes complétées par l'imagerie satellitaire et le MNT, suivie d'une analyse sur le terrain des affleurements géologiques, complétée par une interprétation des données de forages et géophysiques, et enfin finalisée à nouveau à l'aide des données satellitaires et altimétriques.

L'étude géologique a permis de préciser le contexte environnemental du dépôt des formations miocènes et pliocènes. Ces formations d'origine marine sont entrecoupées de dépôts détritiques d'origine tectonique liée au jeu des failles bordières sud de la plaine de Port-au-Prince et à la structuration du bassin d'avant-pays. L'étude confirme la présence et l'activité de plusieurs failles au niveau de Port-au-Prince. Il s'agit non seulement du système de failles d'Enriquillo-Plantain-Garden (EPGFZ) situé en limite sud de l'agglomération de Port-au-Prince mais aussi de failles de direction N110°E visibles au sein même de l'agglomération.

Sur la connaissance de la géologie de Port-au-Prince, il serait souhaitable de poursuivre cette recherche par des investigations complémentaires (géophysiques et tranchées de paléosismicité) afin de réduire les incertitudes sur le tracé des failles et sur l'estimation de leur potentiel sismogénique. De même qu'il conviendrait de faire des datations chronostratigraphiques d'échantillons de terrain relatifs aux différentes unités lithologiques identifiées pour mieux caractériser les variations latérales des unités géologiques afin d'améliorer la compréhension de la géométrie de l'organisation des terrains dans l'espace. En dépit des incertitudes géologiques, les résultats ont néanmoins constitué des données de base précieuses pour la réalisation du microzonage sismique de Port-au-Prince.

Références

Bachhuber, J. L., Rathje, E. M., Cox, B. R., Dulberg, R. A., Kottke, A., GEER Team, 2010: Port-au-Prince geological map.

Bakun, W., Flores, C., Ten Brink U., 2012: *Significant earthquakes on the Enriquillo fault system, Hispaniola, 1500-2010: Implications for seismic hazard*, Bull. Seism. Soc. Am. 102, pp. 18–30.

Belvaux M., Noury G., Auclair S., Vanoudheusden E., Bertil D., 2013 : *Microzonage sismique de Port-au-Prince (Haïti) : Effets de site et Liquéfaction. Rapport final*. BRGMRC-63102-FR, 142 p., 73 fig., 22 tab., 6 ann.

Bertil D., C. Prépetit, M. Belvaux, G. Noury et l'équipe microzonage, 2013 : *Microzonage sismique de Port-au-Prince (Haïti) : rapport de synthèse*. Rapport BRGMRC-63100-FR, 69 p., 31 fig., 8 tab., 6 pl. h.t. ; En open source <http://www.lnbtgouv.ht/microzonage.html>

Calais, E., Freed, A. Mattioli, G., Amelung, F., Jónsson, S., Jansma, P., Hong, S. H., Dixon, T., Prépetit, C. & Momplaisir, R., 2010.: *Rupture d'une faille jusqu'ici*

inconnue pendant le séisme de 2010 à Haïti, nature geoscience | Vol. 3 | November 2010 | www.nature.com/naturegeoscience.

Crosby C.J., Arrowsmith J.R., Oldow J., Prentice C.S., 2004: *Exploiting LiDAR for regional morphologic correlation and dating of wave-cut and fault-controlled landforms*, AGU Poster, G13B-0810.

Douilly R., Haase J.S., Ellsworth W.L., Bouin M.P., Calais E., Symithe S.J., Armbruster J.G., Mercier de Lépinay B., Deschamps A., Mildor S.L., Meremonte M.E., Hough S.E., 2013: *Crustal Structure and Fault Geometry of the 2010 Haiti Earthquake from Temporary Seismometer Deployments*, Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 103, No. 4, pp. 2305-2325.

Gasc M., Fontannaz D., Allenbach B., de Michelle M., 2014.: *KAL-HAÏTI : Une base de données recherche pour la gestion des risques et la reconstruction durable en Haïti*, Engineer Geotechnique and Geology National Days, JNGG2014 – Beauvais, France.

KalHaiti, SERTIT, CNES, 2014: *Production d'un Modèle Numérique de Surface - Acquisition Pléiades tristéoscopique*- Port-au-Prince, Haïti.

Mann, P., Calais, E., Ruegg, J. C., DeMets, C., Jansma, P. E., Mattioli, G. S., 2002: *Oblique collision in the northeastern Caribbean from GPS measurements and geological observations*, Tectonics 21, No. 6, 1057.

Mann, P., Taylor, F., Edwards, R., Ku, T., 1995.: *Actively evolving microplate formation by oblique collision and sideways motion along strike-slip faults: An example from the northeastern Caribbean plate margin*, Tectonophysics 246, 1–69.

Meigs A., 2013 : *Active tectonics and the Lidar revolution*, Geol. Soc. of Am., Lithosphere, v5, n2, p226-229

Momplaisir, B. M., 1986 : *Contribution à l'étude géologique de la partie orientale du massif de la Hotte (presqu'île du Sud d'Haïti). Synthèse structurale des marges de la presqu'île à partir des données sismiques*. Univ. Pierre et Marie Curie Thesis, Paris 6,

Momplaisir, B. M., Boisson, D., 1987: *South-East sheet (Port-au-Prince) – Carte géologique à 1/250000 de la République d'Haïti (en 4 feuilles)*, B.M.E. (1982-1988).

Prépetit Claude, 2010 : *Aléa et risque sismique en Haïti*, publication BME, 070101, http://caribsat.teledetection.fr/index.php?option=com_d ocman&task=doc_details&gid=30.

Terrier M., Bialkowski A., 2013 : *Microzonage sismique de Port-au-Prince (Haïti) : étude géologique*. BRGMRC-61243-FR Report, p.91, fig.49, ann.1.

Terrier M., Bialkowski A., Nachbaur A., Prépetit C., Joseph Y.F., 2014 : *Revision of the geological context of the Port-au-Prince metropolitan area, Haiti: implications for slope failures and seismic hazard assessment*, Nat. Hazards Earth Syst. Sci., 14, 2577–2587.

Terrier M., Nachbaur A., 2013 : *Microzonage sismique de Port-au-Prince (Haïti) : Carte de l'aléa mouvements de terrain*. Rapport BRGMRC-62440-FR, 91 p., 32 fig., 1 ann.