

Une histoire des séismes en Haïti avant, pendant et après 2010

Eric Calais

Résumé : Il s'agit ici de décrire, de façon nécessairement partielle et partielle, la recherche en géosciences en Haïti avant, pendant, et après le tremblement de terre dévastateur du 12 janvier 2010, avec évidemment une attention particulière portée aux séismes. L'histoire montre que la menace sismique en Haïti était scientifiquement établie dès le début du 20^e siècle. Les Grandes Antilles furent même un des laboratoires naturels qui contribuèrent à l'émergence et à la concrétisation de la théorie de la tectonique des plaques – le moteur des séismes – dans les années 1970-1980. Cela fut accompagné d'une période de cartographie géologique intense, qui permit notamment de construire la carte géologique du pays à l'échelle du 1/250 000^e, finalisée en 1984. Conformément aux pratiques de l'époque, cet effort ne porta pas d'attention particulière à l'histoire géologique la plus récente, celle qui a sculpté les paysages actuels, déterminé le niveau des océans et conduit certaines failles tectoniques à accumuler l'énergie élastique qu'elles libèrent parfois sous la forme de séismes majeurs. Les géosciences haïtiennes en restent là, à peu de choses près, pendant les années 1986-2010 surtout marquées par des difficultés politiques et économiques chroniques. Le 12 janvier 2010 marque un changement de tempo dans la recherche en géosciences en Haïti, en sismologie bien sûr, mais aussi dans d'autres domaines des géosciences, car le pays gagne soudain en visibilité sur la carte mondiale des lieux de recherche pertinents dans ces domaines. La communauté universitaire haïtienne, qui avait prêté peu d'attention à la chose sismique avant 2010, a su rebondir pour s'approprier de nouvelles compétences et commencer à développer des actions de recherche nouvelles en sismologie et plus généralement en « sciences de la planète ». Beaucoup reste à faire, mais rien ne se fera sans une recherche et une formation de haut niveau, en Haïti, dans ces champs scientifiques essentiels au développement durable de nos sociétés.

Rezime : Atik sa a se yon deskripsyon, nan yon fason nesèsman pasyèl ak pasyal, rechèch nan jeosyans nan peyi Ayiti anvan, pandan, ak apre tranblemanntè 12 Janvyè 2010 lan, ak evidaman yon atansyon patikilye sou tranblemanntè a. Istwa montre, menas tranblemanntè nan peyi Ayiti te etabli syantifikman depi kòmansman 20yèm syèk la. Gwo Zantiy yo te menm youn nan laboratwa natirèl yo ki te kontribiye nan aparasyon ak reyalizasyon teyori plak tektonik - ki se motè tranblemanntè yo - nan ane 1970-1980 yo. Sa te akonpaye ak yon peryòd entans pou katografi jeyolojik, ki te rann posib konstriksyon kat jeyolojik peyi a nan yon echèl 1 :250,000, ki te fini nan 1984. Annakò ak pratik ki nan moman sa a, zefò sa a pa te mete yon atansyon patikilye sou istwa jeyolojik ki pi resan, sa ki desine peyizaj jodi yo, detèmine nivo oseyan yo epi ki pouse sèten defo tektonik akimile enèji elastik ki lage pafwa sou fòm gwo tranblemanntè. Jeosyans ayisyen an rete la, plis oswa mwens, pandan ane yo 1986-2010 espesyalman nan mitan difikilte politik ak ekonomik kwonik. Jounen 12 janvyè 2010 la make yon chanjman tenmpo nan rechèch jeosyans nan peyi Ayiti, nan sismoloji sèten, men tou, nan lòt domèn nan jeyansyans lan, paske peyi a toudenkou vin yon zòn rechèch enpòtan sou kat monn lan nan domèn sa a. Kominote inivèsité ayisyen an ki te pòte atansyon tou piti sou bagay sismik la anvan 2010, vin rebondi pou li pran nouvo konpetans epi kòmans devlope nouvo aksyon rechèch nan sismoloji, pi jeneralman nan "syans latè". Anpil bagay dwe fèt toujou, men pa gen anyen ki pral fèt san rechèch ak fòmasyon wo nivo nan peyi Ayiti nan domèn syantifik sa yo, ki esansyèl nan devlopman dirab sosyete nou yo.



1. INTRODUCTION

Si le séisme du 12 janvier 2010 en Haïti a révélé une faille géologique inconnue, il a aussi mis le doigt sur de nombreuses autres failles – pas géologiques celles-là et pour la plupart bien connues. Les failles de la construction, de l'occupation du territoire, de la planification, de la préparation à la réponse sont celles qui viennent d'abord à l'esprit, car elles sont les responsables directes de la catastrophe humaine et économique. Les failles du système politique, du système de santé, du système éducatif, de la dépendance à l'assistance internationale¹ sont évidemment de redoutables facteurs aggravants.

Il est une autre faille dont on parle moins et qui a pourtant aussi joué un rôle dans la catastrophe : c'est celle de la connaissance scientifique sur les séismes – et plus généralement en géosciences² – en

Haïti. Il s'agit ici de faire un résumé partiel – et partial – de l'histoire des géosciences en Haïti, surtout vues sous l'angle des séismes. L'ingénieur Claude Prépetit dans son ouvrage *La menace sismique en Haïti – Hier, aujourd'hui et demain*³ propose une remarquable compilation des informations historiques sur les tremblements de terre en Haïti. Il ne s'agit évidemment pas ici de dupliquer cet ouvrage de référence, mais plutôt d'apporter une analyse personnelle du sujet, sur la base de l'histoire et en regardant vers le futur. C'est une analyse externe, celle d'un étranger à qui beaucoup a sans doute échappé – et qui le reconnaît – mais qui ne vise pas l'exhaustivité.

2. L'ANCIENNE EPOQUE

On doit à l'historien Moreau de Saint-Méry (1750–1819) le premier recensement des catastrophes naturelles dans ce qui était alors appelé l'« île de Saint-Domingue », pendant les occupations française et espagnole⁴. Cet auteur rapporte dans son ouvrage

1. Seitenfus, R. L'échec de l'aide internationale à Haïti : Dilemmes et égarements. Editions de l'Université d'Etat d'Haïti, 2015.

2. Nous entendons ici le terme « géosciences » dans son sens restrictif francophone, qui a pour synonyme « sciences de la Terre solide » – bref, la géologie et la géophysique. Sa définition étymologique, plus intéressante et inclusive et qui se résume en français par « sciences de la planète », inclut océanographie, météorologie, biogéochimie, sciences du climat. Ces disciplines s'intersectent les unes les autres et, surtout, informent sur toutes les menaces naturelles dans leur ensemble, en Haïti comme ailleurs.

3. Prépetit, C. La menace sismique en Haïti – Hier, aujourd'hui et demain. Editions de l'Université d'Etat d'Haïti, 2013.

4. Moreau de Saint-Méry, L. Description topographique, physique, civile, politique et historique de la partie française de l'île Saint-Domingue. 1798.

18 séismes ressentis, dont celui de 1562 qui détruisit Santiago, première ville du Nouveau Monde, et ceux du 18 octobre 1751, du 21 novembre 1751 et du 3 juin 1770 dont les dégâts furent majeurs à Port-au-Prince. La cause des séismes était à cette époque énigmatique.

Il est en général admis que les premiers travaux géologiques «scientifiques» en Haïti furent l'oeuvre de L. Gentil Tippenhauer⁵. Ils furent publiés entre 1899 et 1909 sous forme de cartes et de notes dans le périodique scientifique allemand *Petermanns geographische Mitteilungen*. Tippenhauer produit ainsi neuf cartes géologiques aux échelles allant du 1/75 000^e au 1/250 000^e. Il n'est cependant pas question de séismes dans ses travaux, à notre connaissance.

Les premiers travaux scientifiques sur les séismes en Haïti furent ceux du père Scherer (1858–1926), directeur de l'Observatoire du Petit Séminaire du Collège Saint Martial de Port-au-Prince. Il avait équipé cet observatoire d'un sismomètre qui fonctionna de 1908 à 1966. Dans une publication majeure au *Bulletin de la Société sismologique américaine*⁶ il réanalysa les événements recensés par Moreau de Saint-Méry et quelques séismes subséquents, dont celui du 7 mai 1842 qui fut catastrophique pour le Grand Nord d'Haïti, celui du 6 octobre 1911 – de moindre intensité mais qui affecta le centre de l'île – et celui du 8 avril 1860, fortement ressenti dans la région d'Anse à Veau dans la presqu'île du Sud.

S'il n'offre pas de cause géologique claire à ces séismes – la notion de «rebond élastique» avait pourtant déjà vu le jour après le séisme de 1906 à San Francisco⁷ –, Scherer les associe aux trois «dépressions» du nord, intermédiaire et du sud (voir la figure 1). La première correspond à la trace maintenant bien établie de la Faille septentrionale⁸, depuis la baie de Samaná à l'est, la vallée du Cibao, puis la fosse topographique qui longe la côte nord d'Haïti. Il ne fait aucun doute qu'il s'agit d'une faille active majeure, comme le montrent les travaux de paléosismologie en République dominicaine^{9,10} et

la cartographie sous-marine au large du nord d'Haïti et dans le Passage du Vent^{11,12}.

La troisième correspond à la dépression Enriquillo – Cul-de-Sac, que Scherer poursuit vers l'ouest en mer au travers du golfe de la Gonave, alors que l'idée s'est plus récemment installée qu'elle correspond à une faille purement décrochante traversant d'est en ouest la presqu'île du Sud d'Haïti. Cette dernière fut d'abord dénommée «Linéament Tiburon–Pétionville¹³», puis «Faille Trans-Xajagua¹⁴», puis «Décrochement Sénestre Sud Haïtien¹⁵» et enfin faille «Enriquillo – Plantain Garden¹⁶».

La «dépression intermédiaire» de Scherer correspond à la vallée de San Juan en République dominicaine, qui se poursuit en Haïti par le Plateau Central. Elle n'est pas identifiée comme un système de failles actives dans la littérature géologique, même récente, pourtant elle est le lieu de séismes notoires comme celui de 1911 (voir la figure 1), ainsi que d'événements très récents comme celui du 2 septembre 2017, de magnitude 4,3¹⁷, qui secoua la région de Thomonde dans le Plateau Central. Cette structure morphologique identifiée par Scherer mériterait de nos jours des études approfondies pour déterminer sa nature géologique et sa capacité sismogénique.

Dans le cadre de la première cartographie complète d'Haïti, Woodring¹⁸ reprendra les résultats de Scherer en y ajoutant notamment, au chapitre «Séismes», les notions d'effet de site et de faille active. Il note en effet que, toutes choses égales par ailleurs, le mouvement du sol est plus fort sur des terrains alluviaux qu'au rocher. Il associe aussi le séisme du 7 mai 1842 «à un déplacement vertical du fond marin le long de la zone de failles de la bordure sud de la Fosse de Bartlett au large de la Presqu'île du Nord-Ouest¹⁹». Il interprète le séisme du 23 septembre 1887 de la même façon, décrivant au passage un tsunami associé, observé au Môle Saint Nicolas, à Port-de-Paix, ainsi qu'à Jérémie et Anse d'Hainault.

Dans la partie sud d'Haïti, Woodring et son équipe indiquent clairement que le front de la Chaîne des Matheux est inactif et attribuent la sismicité ressentie à Port-au-Prince et dans la plaine du Cul-de-Sac, avec circonspection, aux failles inverses qu'ils ont cartographiées et qui marquent la bordure sud de ce bassin. Ce résultat

5. On trouve sur le site Internet du Bureau des mines et de l'énergie [www.bme.gouv.ht/mines/] de nombreux documents intéressants, dont un historique de la recherche minière en Haïti compilé par l'ingénieur Claude Prépétit.

6. Scherer, J. Great earthquakes in the island of Haiti. *Bulletin of the Seismological Society of America* (1912), 161–180.

7. Reid, H. The Mechanics of the Earthquake, The California Earthquake of April 18, 1906. Report of the State Investigation Commission, Carnegie Institution of Washington, Washington, D.C. (1910).

8. Mann, P., Prentice, C. S., Burr, G., Peña, L. R., and Taylor, F. W. Tectonic geomorphology and paleoseismology of the Septentrional fault system, Dominican Republic. In Special Paper 326: Active Strike-Slip and Collisional Tectonics of the Northern Caribbean Plate Boundary Zone. Geological Society of America, 1998, p. 63–123.

9. Prentice, C. S. Slip rate and earthquake recurrence along the central Septentrional fault, North American–Caribbean plate boundary, Dominican Republic. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* 108, B3 (2003), 2149–17.

10. Tuttle, M. P., Prentice, C. S., Dyer-Williams, K., Peña, L. R., and Burr, G. Late Holocene Liquefaction Features in the Dominican Republic: A Powerful Tool for Earthquake Hazard Assessment in the Northeastern Caribbean. *Bulletin of the Seismological Society of America* 93, 1 (2003), 27–46

11. Calais, E., and de Lépinay, B. Strike-slip tectonic processes in the northern Caribbean between Cuba and Hispaniola (Windward Passage). *Marine Geophysical Researches* 17, 1 (1995), 63–95.

12. Leroy, S. et collaborateurs. Segmentation and kinematics of the North America–Caribbean plate boundary offshore Hispaniola. *Terra Nova* 27, 6 (2015), 467–478.

13. Duplan, L. Carte Structurale de la République d'Haïti, Région Sud, 1975.

14. Maurrasse, F. Survey of the Geology of Haiti: Guide to the field excursions in Haiti. Tech. rep., Miami Geological Society, 1982.

15. Calmus, T. Contribution à l'étude géologique du massif de Macaya (sud-ouest d'Haïti, Grandes Antilles), sa place dans l'orogène nord caraïbe. PhD thesis, Université Pierre et Marie Curie, Paris, France, 1983.

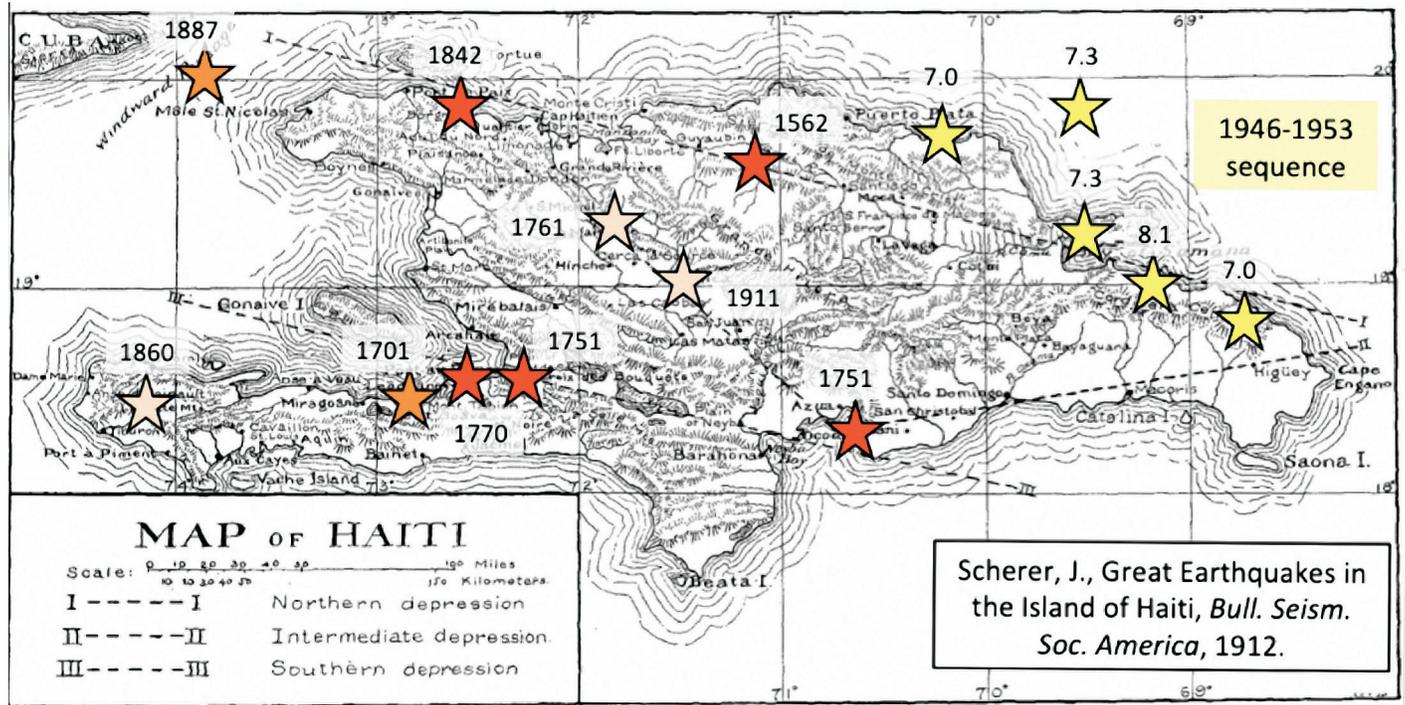
16. Mann, P., Taylor, F. W., Edwards, R. L., and Ku, T. L. Actively evolving microplate formation by oblique collision and sideways motion along strike-slip faults: An example from the northeastern Caribbean plate margin. *Tectonophysics* 246, 1–3 (1995), 1–69.

17. earthquake.usgs.gov

18. Woodring, W. P., Brown, J. S., and Burbank, W. S. Geology of the Republic of Haiti. Lord Baltimore Press, Port-au-Prince, Haiti, 1924.

19. *Ibid.*, Woodring 1924.

Figure 1 Carte topographique d'Haïti selon Scherer montrant les quatre « dépressions » qu'il avait identifiées comme le lieu privilégié des séismes sur l'île. Les étoiles de couleur qui y sont superposées donnent la localisation approximative des séismes historiques majeurs (rouge = dévastateur, orange = dégâts importants, bistre = quelques dégâts, avec l'année du séisme indiquée au-dessus de chaque événement). Les étoiles jaunes correspondent à la séquence sismique de 1946-1953, enregistrée celle-là par des stations sismologiques. Les magnitudes des événements sont données au-dessus de chaque épicycle.



Source: Scherer 1912.

extrêmement important pour l'aléa sismique à Port-au-Prince ne sera confirmé que près de 100 ans plus tard avec des observations géologiques^{20,21} maintenant corroborées par des résultats géodésiques GPS²².

Woodring et ses collaborateurs insistent aussi sur la sismicité de la région d'Anse à Veau, lieu du tremblement de terre destructeur du 8 avril 1860, accompagné d'un tsunami local. Ils l'associent à « la pente abrupte qui borde au sud la vallée de l'Azile [...] qui semble être un escarpement de faille²³ ». Ils décrivent donc pour la première fois la Faille de la Presqu'île du Sud, dont il sera question plus en détail ci-dessous. Ils notent cependant que leur interprétation diffère de celle de Taber²⁴ qui pense, lui, que cette sismicité est associée à une zone de faille sous-marine le long de la côte nord de la Presqu'île

du Sud, dans la continuité des failles de la bordure sud de la Plaine du Cul-de-Sac. Il est très intéressant d'observer que ce vieux débat est seulement en passe d'être résolu aujourd'hui, grâce à la combinaison de sismique marine haute résolution et de mesures de déformation par géodésie.

Enfin, Woodring fait grand cas du séisme du 6 octobre 1911 (voir ci-dessus et figure 1) dont l'épicentre semble être situé le long de la bordure sud du Massif du Nord, donc quasiment au milieu de l'île. Il note que cet événement fut fortement ressenti à Port-au-Prince, même s'il n'y provoqua pas de dégâts – cela doit nous rappeler que c'est bien l'ensemble du pays qui est sujet au mouvement sismique du sol! De plus, il décrit un escarpement important au sud de Cerca-la-Soure et pose la question de son activité sismogénique actuelle – une question non résolue jusqu'à présent.

Entre les travaux de Scherer et Woodring et le 12 janvier 2010, force est de constater un long vide scientifique sur la question des séismes en Haïti. Les travaux du professeur Jacques Butterlin (1916–2002) sur le séisme du 27 octobre 1952 – qui causa des dégâts matériels significatifs et au moins six morts dans la région d'Anse-à-Veau (Nippes) – y font exception, mais ils ne seront pas publiés. Ce séisme, d'intensité IX, de magnitude $M_s = 5,9$ et localisé à 24 km de profondeur, fut suivi d'une réplique importante le

20. Briggs, R., Prentice, C., Crone, A., Gold, R., Hudnut, K., and Narcisse, R. Late Quaternary blind thrust faults along the southern margin of the Cul-de-Sac Plain, Haiti: A newly recognized seismic source? In AGU Fall Meeting Abstracts (2012).

21. Saint Fleur, N., Feuillet, N., and Grandin, R. Seismotectonics of southern Haiti: A new faulting model for the 12 January 2010 M7 earthquake. Geophysical Research Letters 42 (2015).

22. Symithe, S., and Calais, E. Present-day shortening in Southern Haiti from GPS measurements and implications for seismic hazard. Tectonophysics 679 (2016), 117–124.

23. *Ibid.*, Woodring 1924.

24. Taber, S. The Great Fault Troughs of the Antilles. The Journal of Geology 30, 2 (1922), 89–114.

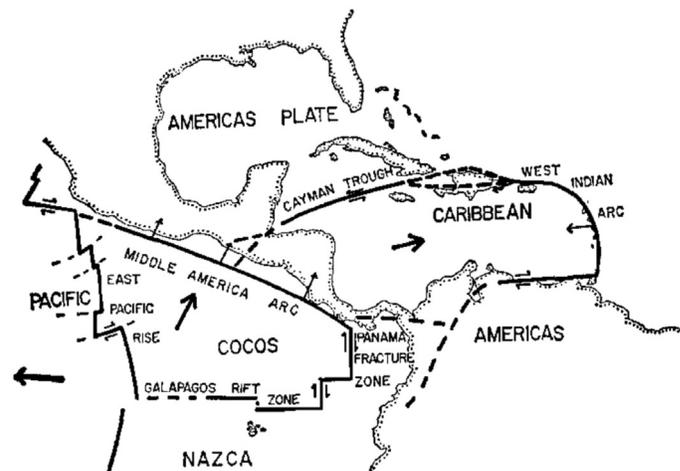
25 janvier 1953, de magnitude $M_s = 5,7^{25}$. Cette même région fut le lieu d'une petite crise sismique en septembre et octobre 2015²⁶, dans un contexte tectonique qui reste mal compris, car ces séismes ne semblent pas coïncider avec la fameuse faille de la Presqu'île du Sud.

3. L'ÉPOQUE MODERNE

Nous définissons l'époque moderne comme celle de la tectonique des plaques, théorie dont l'acceptation finale date des années 1966–1968, parachevée par le modèle cinématique global à six plaques de Le Pichon²⁷. Les séismes – leurs localisations et mécanismes au foyer – furent un élément fondamental de la démonstration de cette théorie, comme le résuma brillamment Isacks : « *The focal mechanisms of about a hundred widely distributed shocks give relative motions that agree remarkably well with Le Pichon's simplified model in which relative motions of six large, rigid blocks of lithosphere covering the entire earth were determined from magnetic and topographic data associated with the zones of divergence. In the zones of convergence the seismic data provide the only geophysical information on such movements*²⁸. »

Les Caraïbes furent même précurseurs en la matière grâce au travail de Sykes et Ewing²⁹, qui recensèrent 500 séismes de cette région et les associèrent aux failles principales alors connues. Ces failles marquent les contours de ce que l'on appelle aujourd'hui la « plaque tectonique caraïbe ». Ils identifièrent aussi des séismes jusqu'à 200 km de profondeur sous les Petites Antilles et Porto Rico, notant que ce dispositif est commun à de nombreux arcs insulaires péripacifiques : c'est un contexte géologique que la tectonique des plaques appellera plus tard « subduction ». Molnar et Sykes, en 1969³⁰, utiliseront eux aussi les séismes régionaux pour aller cette fois un peu plus loin et non seulement définir la plaque caraïbe, mais aussi, en utilisant les mécanismes au foyer de séismes, proposer pour la première fois que celle-ci se déplace vers l'est par rapport aux deux Amériques (voir la figure 2). Ils définissent de fait les frontières décrochantes nord et sud de cette plaque, ainsi que les subductions associées aux fosses océaniques d'Amérique centrale et des Antilles–Porto Rico. La frontière de plaque nord-caraïbe est décrite comme un long système décrochant senestre s'étendant de l'Amérique centrale à l'ouest, à Porto Rico à l'est, longeant le Fossé de Cayman et traversant l'archipel des Grandes Antilles (voir la figure 2).

Figure 2 Première carte tectonique de la région Caraïbe – Amérique Centrale dressée sur la base des mécanismes au foyers des séismes régionaux, indiquant le déplacement vers l'est de la plaque Caraïbe par rapport aux deux Amériques.



Source : Molnar 1969.

En Haïti, un effort important de cartographie géologique eut lieu dans les années 1970–1980, impulsé notamment par les travaux de Jacques Butterlin. Géologue français alors professeur à l'Institut français d'Haïti, il utilisa d'abord ses loisirs pour effectuer ses premières études géologiques sur le terrain. L'École nationale supérieure de géologie de Nancy (ENSG) intervint aussi à cette époque, avec notamment des travaux sur les porphyres cuprifères du Massif du Nord^{31,32}.

Jacques Butterlin est l'un des plus importants contributeurs aux géosciences en Haïti, par ses travaux de recherche d'une part^{33,34,35}, mais aussi par ses apports à la formation et à la structuration des géosciences en Haïti. Ces efforts permettront, à terme, d'aboutir à la carte géologique au 250 000^e d'Haïti³⁶, jalonnée de plusieurs

25. Sykes, L. R., and Ewing, M. The seismicity of the Caribbean region. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* 70, 20 (1965), 5065–5074.

26. www.bme.gouv.ht/uts/Anse-Veau.pdf

27. Le Pichon, X. Sea-floor spreading and continental drift. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* (1968).

28. Isacks, B., Oliver, J., and Sykes, L. R. Seismology and the new global tectonics. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* 73, 18 (1968), 5855–5899.

29. *Ibid.*

30. Molnar, P., and Sykes, L. R. Tectonics of the Caribbean and Middle America Regions from Focal Mechanisms and Seismicity. *Geological Society of America Bulletin* 80, 9 (1969), 1639–1684.

31. Chelleitz, A. Etude géologique et métallogénique des indices à cuivre et molybdène de type porphyre cuprifère de la zone de Vert de Gris–Jean Rabel, Presqu'île du Nord-Ouest Haïti. PhD thesis, Université de Nancy I, 1976.

32. Nicolini, P. Les porphyres cuprifères et les complexes du Nord–Est d'Haïti. Essai de géologie. PhD thesis, Université Pierre et Marie Curie, 1977.

33. Butterlin, J. Géologie générale et régionale de la République d'Haïti. PhD thesis, Université de la Sorbonne, Paris, France, 1954.

34. Butterlin, J. Géologie générale et régionale de la République d'Haïti. Editions de l'HEAL, 1960.

35. Butterlin, J. L'Île d'Haïti : Summary of geological and tectonic history. *West Indies Island Arcs* (1977), 33–157.

36. Momplaisir, R., and Boisson, D. Carte Géologique de la République d'Haïti. BME, 1988. 4 feuillets et une notice.

thèses de doctorat d'étudiants haïtiens^{37,38,39,40} et français^{41,42,43,44,45} accompagnés de géologues français tels que Jean-Marie Vila et Bernard Mercier de Lépinay. Une collaboration avec le Bureau des recherches géologiques et minières en France permit aussi des avancées significatives, surtout en cartographie géologique⁴⁶. La motivation principale de l'ensemble de ces travaux était alors l'exploration minière – après tout, la plus grande mine d'or des Amériques est celle de Pueblo Viejo, en République dominicaine, dans des formations géologiques qui ont leur équivalent en Haïti.

Notons enfin les importants travaux de Florentin Maurrasse, qui définit dans la Presqu'île du Sud la formation Dumisseau et démontre qu'il s'agit de roches océaniques – la future *Caribbean Large Igneous Province*, ou CLIP⁴⁷. Il découvre aussi dans la formation géologique «Beloc⁴⁸», datée de la limite crétacé-tertiaire, les témoins de l'impact de la météorite très probablement à l'origine du cratère d'impact de Chicxulub dans la péninsule du Yucatan – et de l'extinction des dinosaures.

Les travaux des années 1970–1980 visaient la connaissance géologique générale du territoire haïtien, la description des formations rocheuses principales, leur datation, l'analyse de leurs déformations tectoniques, le tout pour les quelque 200 Ma de l'histoire géologique des Grandes Antilles. La sismicité, pellicule actuelle hyperfine de cette épaisse histoire, n'était pas vraiment considérée. Les failles s'entendaient surtout comme des contacts entre des unités géologiques d'âge et de nature différentes – des contacts «anormaux» – dont la mise en place était le plus souvent très ancienne. Le 1^{er} colloque sur la géologie d'Haïti, qui eut lieu en 1980 à la Faculté

des sciences, couvrait l'ensemble des disciplines géologiques (tectonique, pétrologie, stratigraphie, ressources) mais n'aborda ni les séismes, ni l'aléa associé. De la même manière, l'excellente compilation *Synthèse géologique de la République d'Haïti* de Bourgueil⁴⁹ se concentra sur la géologie générale et les substances métalliques, non métalliques et énergétiques. L'accent était alors mis sur l'environnement géologique comme producteur de ressources et non comme source de menace aux populations et infrastructures.

Il est d'ailleurs intéressant de constater que la faille de la Presqu'île du Sud, maintenant interprétée comme une des deux failles actives majeures de la frontière de plaques Caraïbe – Amérique du Nord en Haïti, n'apparaît pas comme une structure géologique significative dans la carte géologique 250 000^e d'Haïti⁵⁰, bien qu'elle fût identifiée dès 1975, sur la base de l'interprétation de photographies aériennes comme le «Linéament Tiburon–Pétionville⁵¹», puis le «Décrochement Sénestre Sud Haïtien⁵²». Cette omission étonnante est en partie le résultat d'une erreur d'analyse, mais résulte aussi du fait qu'à cette époque les concepts étaient ceux de la géologie historique – de la géologie alpine, peut-on même dire. Les deux millions d'années du quaternaire étaient considérées comme un bloc de temps quasi instantané au regard de l'histoire géologique – donc sans histoire propre. Le quaternaire et ses roches – limons, sables, graviers, coraux, etc. – ne faisaient que draper, voire dissimuler, la géologie «véritable», celle des grandes collisions de continents ou d'arcs volcaniques, avec leurs nappes de charriage, bassins d'avant-pays, chaînes plissées, et autres structures spectaculaires. Rares étaient les géologues qui utilisaient le quaternaire et son histoire géologique et tectonique pour comprendre le fonctionnement récent – voire actuel – des failles, et donc la sismogenèse. Pourtant, il est clair que si la croûte terrestre est lardée de failles, certaines seulement ont la capacité de rompre lors de séismes futurs proches : ce sont les failles dites «actives». Les identifier dans la morphologie et les paysages, déterminer leur calendrier sismique récent et quantifier les déplacements qu'elles permettent relève d'un métier géologique spécifique qui ne s'est développé qu'à partir de la fin des années 1980. Il faudra attendre le séisme de 2010 pour que de véritables travaux de géomorphologie tectonique et de paléosismologie aient lieu en Haïti.

Les années 1980 puis 1990 furent aussi celles pendant lesquelles l'exploration pétrolière, à terre comme en mer, se développa dans la Caraïbe, avec notamment les travaux de l'Institut français du pétrole⁵³, dont certains furent publiés dans les très riches actes du symposium «Géodynamique des Caraïbes⁵⁴». La géologie caraïbe des années 1990 progressa beaucoup grâce aux recherches océanographiques permises par des navires qui virent le jour dans la foulée de la découverte de la tectonique des plaques, théorie beaucoup nourrie de données marines. Ces recherches étaient

37. Momplaisir, R. 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. PhD thesis, Université Pierre et Marie Curie, Paris, 1986.
38. Boisson, D. Étude géologique du massif du nord d'Haïti (Hispaniola–Grandes Antilles). PhD thesis, Université Pierre et Marie Curie, Paris, 1987.
39. Cenatus-Amilcar, H. Etude des terrasses marines plio-quaternaires et de leur substratum éocène dans la Presqu'île du Nord-Ouest et l'île de la Tortue, Haïti, Grandes Antilles. PhD thesis, Université Paris Sud, Orsay, 1997.
40. Amilcar, H. Étude géologique de l'ouest du Massif de La Hotte (Haïti, Grandes Antilles) dans son cadre terrestre et marin. Implications géodynamiques. PhD thesis, Université de Toulouse, Toulouse, France, 1997.
41. Dubreuilh, P. Contribution à l'étude du bassin néogène du Plateau Central d'Haïti. PhD thesis, Université de Bordeaux, Bordeaux, 1982.
42. VanDenBerghe, B. Evolution sédimentaire et structurale depuis le Paléocène du secteur «Massif de la Selle» (Haïti) – Baoruco (République Dominicaine) au nord de la ride de Béata, dans l'orogène nord-caraïbe (Hispaniola – Grandes Antilles). PhD thesis, Université Pierre et Marie Curie, Paris, 1983.
43. Desreumaux, C. Contribution à l'étude de l'histoire géologique des régions centrale et méridionale d'Haïti (Grandes Antilles) du Crétacé à l'actuel. PhD thesis, Université Pierre et Marie Curie, Paris, 1987.
44. Mercier de Lépinay, B. L'évolution géologique de la bordure nord-caraïbe : l'exemple de la transversale de l'île d'Hispaniola (Grandes Antilles). PhD thesis, Université Pierre et Marie Curie, 1987.
45. Pubellier, M., Vila, J. M., and Boisson, D. North Caribbean neotectonic events: The Trans-Haitian fault system. Tertiary record of an oblique transcurent shear zone uplifted in Hispaniola. *Tectonophysics* 194, 3 (1991), 217–236.
46. Bourgueil, B., Andreieff, P., Lasnier, J., Gonnard, R., Le Metour, J., and Rancon, J.-P. Synthèse Géologique de la République d'Haïti. Tech. rep., Bureau des Mines et de l'Énergie, Port-au-Prince, Haïti, 1988.
47. Maurrasse, F., Husler, J., Georges, G., Schmitt, R., and Damond, P. Upraised Caribbean sea floor below acoustic reflector B at the southern peninsula of Haiti. *Geologie en Mijnbouw* 58 (1979), 71–83.
48. Maurrasse, F. J.-M. R., and Sen, G. Impacts, Tsunamis, and the Haitian Cretaceous–Tertiary Boundary Layer. *Science* 252, 5013 (1991), 1690–1693.

49. *Ibid.*, Bourgueil 1988.

50. *Ibid.*, Momplaisir 1988.

51. *Ibid.*, Duplan 1976.

52. *Ibid.*, Calmus 1983.

53. Biju-Duval, B., Bizon, G., Mascle, A., and Muller, C. Active margin processes: Field observations in Southern Hispaniola. *Bulletin of the American Association of Petroleum Geologists* 34 (1982).

54. Mascle, A., Ed. Symposium «Géodynamique des Caraïbes» (Paris, France, 1985), Editions Technip.

surtout motivées par des questions sur la capacité des contextes géologiques anciens à générer et à piéger des hydrocarbures. L'étude des failles actives, sismogènes, n'était donc que rarement au premier plan. Pourtant, les observations océanographiques de base – bathymétrie pour le fond marin et sismique réflexion pour visualiser les couches sédimentaires sous-jacentes – sont parfaitement adaptées à l'étude de ces failles. En effet, on observe le long de celles-ci des traits topographiques (sous-marins) très spécifiques et, dans la mesure où les sédiments les plus récents sont plissés ou faillés, on peut déterminer si les mouvements qui s'y expriment sont récents, et donc si la faille responsable est active.

Parmi les nombreuses campagnes océanographiques de cette période, à vocation essentiellement académiques celles-ci, SEACARIB-I et SEACARIB-II, concernaient directement Haïti, en se penchant particulièrement sur la cartographie des failles qui marquaient la frontière entre les plaques tectoniques Caraïbe au sud et Amérique du Nord au nord. Elles furent importantes pour comprendre le contexte sismotectonique d'Haïti – et d'un segment plus large de la frontière de plaque nord-caraïbe. Ces campagnes permirent d'établir la géométrie des principales failles actives de la frontière de plaques, notamment des bordures nord et sud de la partie orientale du fossé de Cayman. Finalement, l'ensemble des campagnes océanographiques des années 1990 permit, entre autres choses, de cartographier les principales failles actives de la frontière de plaque nord-caraïbe^{55,56,57,58,59,60,61,62}. À la fin des années 1990, cette question était réglée – en mer – et les quelques campagnes océanographiques plus récentes n'ont pas modifié ce premier ordre.

La question de la continuité des failles actives cartographiées en mer avec leurs *alter ego* à terre est apparue au même moment. En 1995, Paul Mann et ses collaborateurs⁶³ posent les premiers jalons de la tectonique active « terrestre » en Hispaniola, avec pourtant peu d'observations directes à l'époque. Les travaux de

Carol Prentice⁶⁴ apporteront des éléments quantitatifs sur la faille Septentrionale, mettant en évidence un séisme daté entre 1040 A.D. et 1230 A.D. avec un minimum de 5 m de glissement. Ces mêmes travaux montreront que la vitesse de glissement moyenne de la faille Septentrionale pendant l'holocène est de 6 à 12 mm/an. Si on fait l'hypothèse que le mouvement relatif des plaques Caraïbe et Amérique du Nord est de 20 mm/an et qu'il est accommodé par deux failles principales – Septentrionale et Enriquillo –, on en déduit que cette dernière doit avoir un glissement moyen de 8 à 14 mm/an. En 1998, trois points de mesure géodésiques par GPS permettront à Tim Dixon et ses collaborateurs de préciser ce résultat en déterminant des vitesses de 4 ± 3 , 8 ± 3 et 8 ± 4 mm/an, respectivement, pour les failles Nord Hispaniola, Septentrionale et Enriquillo⁶⁵.

La performance de l'outil GPS motivera, dans les années 2000, de nombreuses études des frontières de plaques pour y mesurer les vitesses de glissement de leurs failles actives. Le programme de recherche international CANAPE (Caribbean North America Plate Experiment) permit d'entreprendre des mesures GPS en République dominicaine et à Porto Rico, rapidement suivies par des mesures équivalentes en Haïti. Il existe, en 2019, environ 230 points de mesures GPS en Hispaniola, dont 140 en Haïti où les mesures ont été réalisées depuis 2003 par le Bureau des mines et de l'énergie (BME). Ces mesures ont notamment permis d'observer et de quantifier le partitionnement de la convergence oblique Caraïbe–Amérique du Nord⁶⁶, l'extension entre la microplaque Porto Rico – Îles Vierges et Hispaniola⁶⁷, la collision oblique de la plate-forme des Bahamas avec Hispaniola et son rôle dans la tectonique actuelle du Nord caraïbe⁶⁸. En 2008 premier modèle cinématique complet de la frontière de plaque nord caraïbe fut établi⁶⁹ à l'aide de l'ensemble des données GPS disponibles alors. On trouve dans cette publication cette phrase prémonitrice : « *La faille d'Enriquillo en Haïti est actuellement capable d'un séisme de magnitude 7,2 si la totalité de l'énergie élastique qui s'y est accumulée depuis le dernier séisme majeur était relâchée par un séisme unique aujourd'hui.* »

Les années 1970–1980 avaient donc été fertiles pour la géologie haïtienne. Elles permirent, outre la description de l'architecture tectonique et de l'évolution géologique d'Haïti et de sa région telles que nous les connaissons aujourd'hui, la formation d'une génération

55. Goreau, P. The Tectonic Evolution of the North Central Caribbean Plate Margin. Master's thesis, Massachusetts Institute of Technology and Wood Hole Oceanographic Institution, Boston, USA, Jan. 1981.

56. Jany, I., Scanlon, K. M., and Mauffret, A. Geological interpretation of combined Seabeam, Gloria and seismic data from Anegada Passage (Virgin Islands, north Caribbean). *Marine Geophysical Researches* 12, 3 (1990), 173–196.

57. Calais, E., and de Lépinay, B. From transtension to transpression along the northern Caribbean plate boundary off Cuba: implications for the Recent motion of the Caribbean plate. *Tectonophysics* 186, 3–4 (1991), 329–350.

58. Rosencrantz, E., and Mann, P. SeaMARC II mapping of transform faults in the Cayman Trough, Caribbean Sea. *Geology* 19, 7 (1991), 690–693.

59. Dillon, W. P., Austin, J. A., Scanlon, K. M., and Edgar, N. T. Accretionary margin of north-western Hispaniola: morphology, structure and development of part of the northern Caribbean plate boundary. *Marine and Petroleum Geology* 9, 1 (1992), 70–88.

60. Calais, E., and de Lépinay, B. Strike-slip tectonic processes in the northern Caribbean between Cuba and Hispaniola (Windward Passage). *Marine Geophysical Researches* 17, 1 (1995), 63–95.

61. Leroy, S., and Mauffret, A. Intraplate deformation in the Caribbean region. *Journal of Geodynamics* 21, 1 (1996), 113–122.

62. Dolan, J. F., Mullins, H. T., and Wald, D. J. Active tectonics of the north-central Caribbean: Oblique collision, strain partitioning, and opposing subducted slabs. In *Special Paper 326: Active Strike-Slip and Collisional Tectonics of the Northern Caribbean Plate Boundary Zone*. Geological Society of America, 1998, p. 1–61.

63. *Ibid.*, Mann 1995.

64. Prentice, C. S. Slip rate and earthquake recurrence along the central Septentrional fault, North American–Caribbean plate boundary, Dominican Republic. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* 108, B3 (2003), 2149–17.

65. Dixon, T. H., Farina, F., DeMets, C., Jansma, P., Mann, P., and Calais, E. Relative motion between the Caribbean and North American plates and related boundary zone deformation from a decade of GPS observations. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* (1978–2012) 103, (1998), 15157–15182.

66. Calais, E., Mazabraud, Y., Mercier de Lépinay, B., Mann, P., Mattioli, G. S., and Jansma, P. Strain partitioning and fault slip rates in the northeastern Caribbean from GPS measurements. *Geophysical Research Letters* 29, 18 (2002), 1856.

67. Jansma, P., Mattioli, G., Lopez, A., DeMets, C., Dixon, T., Mann, P., and Calais, E. Microplate tectonics in the northeastern Caribbean as constrained by Global Positioning (GPS) geodesy. *Tectonics* 19, 6 (2000), 1021–1037.

68. Mann, P., Calais, E., Ruegg, J.-C., DeMets, C., Jansma, P. E., and Mattioli, G. S. Oblique collision in the northeastern Caribbean from GPS measurements and geological observations. *Tectonics* 21, 6 (2002), 7–1–7–26.

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

de géologues qui pour beaucoup restèrent en Haïti. Elles furent suivies de quelques travaux de recherche en sismotectonique dans les années 1990–2000 – dont les débuts de la géodésie GPS – mais de bien moindre ampleur que la cartographie géologique et surtout cette fois-ci sans que de jeunes Haïtiens soient formés. L'intérêt des universités haïtiennes pour la sismologie, l'étude des failles actives – sujets qui étaient pourtant à leur apogée dans la communauté internationale des géosciences – était alors faible. En 2010, il n'existait aucune station sismologique universitaire en Haïti ni aucun travail cartographique des failles actives depuis la publication de P. Mann en 1995⁷⁰. Il n'y avait en Haïti aucun sismologue et les géologues compétents présents dans le pays étaient dispersés dans le secteur privé de l'exploration minière ou du génie civil. Claude Prépetit, ingénieur géologue au BME, était le seul à se faire l'avocat du risque sismique, sans grand renfort du secteur universitaire, il faut bien l'admettre.

Le séisme du 12 janvier 2010 arrive dans ce contexte. Nous ne reviendrons pas sur les dégâts causés ou sur les causes de la catastrophe, largement traités par ailleurs^{71,72}, mais allons nous concentrer sur les changements qu'a provoqués cet événement dans les géosciences en Haïti.

4. L'ÉPOQUE POST-SÉISME

4.1 LES AVANCÉES DES GÉOSCIENCES

La réponse scientifique au séisme impliqua de nombreuses équipes internationales. Une des premières interventions, qui débuta le 25 janvier 2010 sur le terrain, fut celle d'une équipe américaine qui organisa une campagne de mesures GPS et d'observations géologiques, ainsi que la collecte et l'analyse de données satellitaires radar (Purdue University, University of Dallas, University of Arkansas, University of Miami). Elle fut rapidement suivie d'un déploiement de stations sismologiques sous-marines de part et d'autre de la zone épiscopale, coordonné par le laboratoire Géoazur de l'Université de Nice (France) et l'IFREMER, puis par le déploiement de stations sismologiques à terre par le U.S. Geological Survey⁷³ (USGS) et par l'Université des Antilles. Le Bureau géologique canadien (NRCan) installa trois stations sismologiques large bande à Port-au-Prince, Jacmel et Léogâne, qu'ils intégrèrent à leur réseau sismologique national⁷⁴. Plusieurs équipes de géologues de l'USGS, de l'Université du Texas à Austin, et de l'Université du Colorado, vinrent sur le terrain pour investiguer les effets du séisme en surface. Deux équipes organisèrent rapidement

des campagnes océanographiques pour déterminer la bathymétrie précise de la zone épiscopale (laboratoire Géoazur de l'Université de Nice, sous la direction de Bernard Mercier de Lépinay) et pour y étudier les sédiments récents (Université de Columbia et Université du Missouri, sous la direction de Cecilia McHugh et de Milène Cormier, respectivement). Au même moment, comme après chaque séisme important, plusieurs équipes internationales travaillaient sur le séisme à l'aide des données des stations sismologiques du réseau mondial, notamment au California Institute of Technology (États-Unis), à l'Université Columbia (États-Unis), au laboratoire Géoazur de l'Université de Nice (France) ou au U.S. Geological Survey de Menlo Park (États-Unis).

De fait, la moisson de résultats scientifiques post-séisme fut essentiellement le travail d'équipes étrangères. Elles avaient alors comme point de contact et partenaire haïtien le BME. Cet organisme, dont le rôle fut important, avait fort à faire pour faire face aux demandes et besoins des équipes internationales. Il faut le féliciter pour avoir été capable de tenir le cap.

Quasiment dans le même temps, en février–mars 2010, les Nations Unies commandèrent une synthèse des données disponibles sur les aléas naturels en Haïti pour alimenter scientifiquement les projets de reconstruction à venir. Cette étude, le «*Rapid Natural Multi-Hazard Assessment for Haiti*⁷⁵» (NATHAT), permit notamment la réalisation de la première carte d'aléa sismique pour Haïti, travail qui fut ensuite repris et amélioré par l'USGS⁷⁶ (voir la figure 4). L'étude utilisait les quelques données de sismicité disponibles, mais aussi la géométrie et la segmentation des principales failles actives – telles que supposées alors – et leurs vitesses de glissement mesurées par GPS. La version finale incorpora un modèle de réponse du sol VS30 déduit de l'analyse des pentes topographiques⁷⁷. Cette carte fut inscrite officiellement au Code national du bâtiment haïtien en 2013⁷⁸ comme référence pour le mouvement du sol au rocher pour les calculs parasismiques. Ce fut la première insertion effective de la science sismologique dans la reconstruction post-séisme – même si l'on doit bien sûr déplorer qu'aucune mesure ne soit prévue pour imposer l'utilisation de ce code.

La première moisson de résultats scientifiques sur le séisme fut publiée dans un numéro spécial de la revue *Nature Geoscience* en octobre 2010, sous l'impulsion de Carol Prentice de l'USGS. Calais et ses collaborateurs y proposent le premier modèle de rupture cosismique finie à partir de données GPS et InSAR⁷⁹ (voir la figure 3).

70. *Ibid.*

71. Hurbon, L. Catastrophes et environnement: Haïti, séisme du 12 janvier 2010. Éditions de l'École des Hautes Études en Sciences Sociales, 2014.

72. Calais, E. Science et conscience dans la post-urgence du séisme d'Haïti. L'Harmattan, 2017.

73. Altidor, J., Dieuseul, A., Ellsworth, W. L., Given, D. D., Hough, S. E., Janvier, M. G., Maharrey, J. Z., Meremonte, M. E., Mildor, B. S., Prepetit, C., and Yong, A. Seismic Monitoring and Post-Seismic Investigations following the 12 January 2010 Mw 7.0 Haiti Earthquake. In American Geophysical Union Fall Meeting (San Francisco, 2010). Abstract U11A-07.

74. Bent, A. L., Cassidy, J., Prépetit, C., Lamontagne, M., and Ulysse, S. Real-Time Seismic Monitoring in Haiti and Some Applications. *Seismological Research Letters* 89, 2A (2018), 407–415.

75. Mora, S., Roumagnac, A., Calais, E., Haase, J., Saborio, J., Marcello, M., Milce, J.-E., and Zahibo, N. Analysis of Multiple Natural Hazards in Haiti (NATHAT). Report prepared by the Government of Haiti, with support from the World Bank, the Inter-American Development Bank, and the United Nations System, Government of la République d'Haïti, 2010. On-line, accessed 1 September 2019.

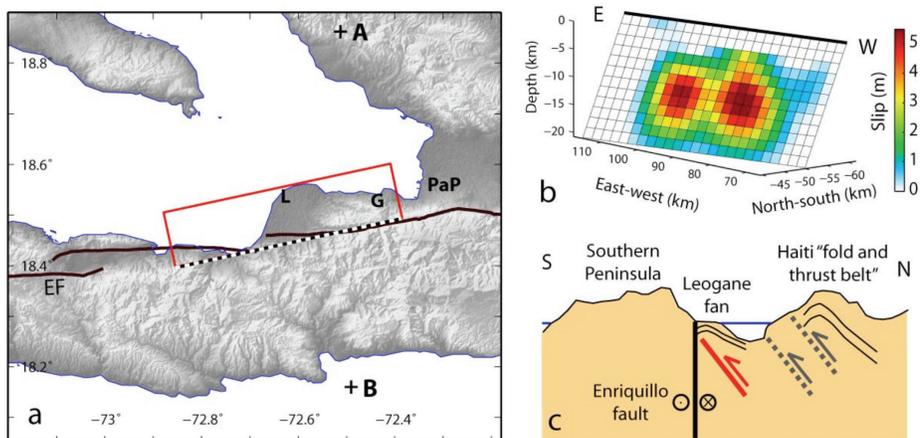
76. Frankel, A., Harmsen, S., Mueller, C., Calais, E., and Haase, J. Seismic Hazard Maps for Haiti. *Earthquake Spectra* 27, S1 (2011), S23–S41.

77. Allen, T. I., and Wald, D. J. On the use of high-resolution topographic data as a proxy for seismic site conditions (VS30). *Bulletin of the Seismological Society of America* 99, 2A (2009), 935–943.

78. Code National du Bâtiment d'Haïti (CNBH 2012). Tech. rep., Ministère des Travaux Publics et des Télécommunications, 2013. Online, accessed 1 September 2019.

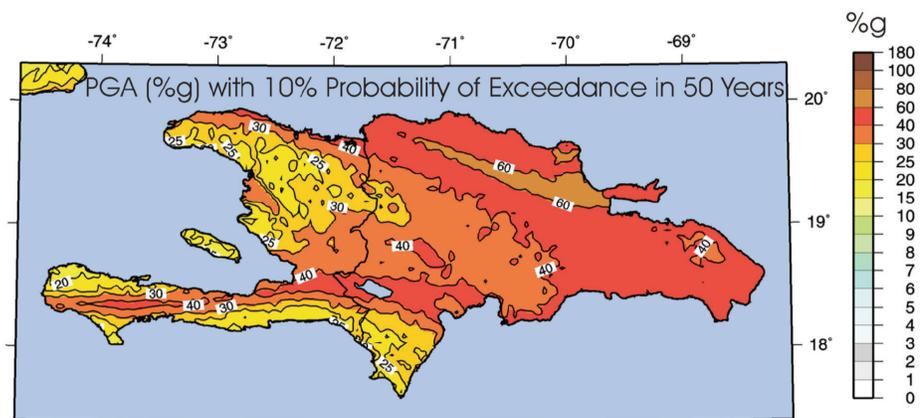
79. Calais, E., Freed, A., Mattioli, G., Amelung, F., Jonsson, S., Jansma, P., Hong, S.-H., Dixon, T., Prépetit, C., and Momplaisir, R. Transpressional rupture of an

Figure 3 La faille de Léogâne, responsable du séisme du 12 janvier 2010. (a) Carte topographique avec la trace de la faille de la Presqu'île du Sud en noir. Le rectangle rouge indique la projection en surface de la rupture cosismique. Le tireté blanc-noir est la projection en surface de cette rupture. L = Léogâne, G = Greissier, PaP = Port-au-Prince. (b) Vue tridimensionnelle du plan de rupture, les couleurs indiquant la quantité de glissement en mètres. On voit (1) deux zones de glissement principales, avec jusqu'à 5 m de déplacement cosismique, et (2) que la rupture n'a pas atteint la surface mais s'est concentrée entre 5 et 15 km de profondeur. (c) Coupe géologique très simplifiée entre les points A (nord) et B (sud) indiqués sur le panneau (a). Dans cette interprétation, la faille de Léogâne (trait rouge) fait partie d'un système de failles qui s'accommodent notamment du raccourcissement nord-sud. La faille de la Presqu'île du Sud, dénommée « Enriquillo fault » ici, n'est pas activée lors du séisme.



Source : Scherer 1912.

Figure 4 Carte de l'aléa sismique régional, décrit ici en termes de *Peak Ground Acceleration* (PGA). Les couleurs représentent l'accélération du sol qu'il est probable d'excéder sur une période de 50 ans, avec une probabilité de 10 %. L'accélération du sol lors du séisme de janvier 2010 à Port-au-Prince est estimée avoir atteint 0,1 à 0,3 g.



Source : Calais 2010.

Ils montrent que le séisme a eu lieu sur une faille jusqu'alors inconnue à pendage nord, la faille de Léogâne, subparallèle à – mais distincte de – la faille principale d'Enriquillo. Ils montrent aussi que le séisme combinait 2/3 de mouvement en décrochement et 1/3 en faille inverse. Ce dernier n'était pas attendu dans un contexte que l'on supposait purement décrochant. Hayes et ses collaborateurs proposent un modèle de rupture plus complexe à plusieurs segments⁸⁰, avec un glissement maximal qui correspond à la faille de Léogâne. Ils confirment que la faille principale (Enriquillo) n'a pas rompu et que le mécanisme du séisme impliquait une combinaison de décrochement et faille inverse. Hornbach et ses collaborateurs montrent que le séisme, pourtant majoritairement décrochant, a généré plusieurs tsunamis locaux dans la région épicertrale et de l'autre côté de la Baie de la Gonave sur la Côte des Arcadins⁸¹. Ils les expliquent par une combinaison de (1) mouvement du sol cosismique pour les derniers, (2) glissements de terrains sous-marins pour les premiers, glissements qui pour certains s'enracinent en fait à terre dans des zones deltaïques où l'on a observé des plages littéralement « glisser » dans la mer. Prentice et collaborateurs utilisent de l'imagerie satellitaire, des photographies aériennes, du LIDAR et des observations de terrain, notamment dans la zone épicertrale du séisme⁸². Ils montrent que ce dernier n'a pas produit de rupture en surface, notamment le long de la faille d'Enriquillo. Ils décrivent

unmapped fault during the 2010 Haiti earthquake. *Nature Geoscience* 3, 11 (2010), 1–6.

- 80. Hayes, G. P., Briggs, R. W., Sladen, A., Fielding, E. J., Prentice, C., Hudnut, K., Mann, P., Taylor, F. W., Crone, A. J., Gold, R., Ito, T., and Simons, M. Complex rupture during the 12 January 2010 Haiti earthquake. *Nature Geoscience* 3, 11 (2010), 800–805.
- 81. Hornbach, M. J., Brady, N., Briggs, R. W., Cormier, M.-H., Davis, M. B., Diebold, J. B., Dieudonne, N., Douilly, R., Frohlich, C., Gulick, S. P. S., Johnson III, H. E., Mann, P., McHugh, C., Ryan-Mishkin, K., Prentice, C. S., Seeber, L., Sorlien, C. C., Steckler, M. S., Symithe, S. J., Taylor, F. W., and Templeton, J. High tsunami frequency as a result of combined strike-slip faulting and coastal landslides. *Nature Geoscience* 3, 11 (2010), 783–788.
- 82. Prentice, C. S., Mann, P., Crone, A. J., Gold, R. D., Hudnut, K. W., Briggs, R. W., Koehler, R. D., and Jean, P. Seismic hazard of the Enriquillo–Plantain Garden fault in Haiti inferred from palaeoseismology. *Nature Geoscience* 3, 11 (2010), 1–5.

cependant des décalages cosismiques sur cette faille, plus anciens ceux-là, dont l'un pourrait correspondre à l'un des séismes historiques du 18^e siècle mentionnés plus haut. Hough et ses collaborateurs utilisent des enregistrements accélérométriques des répliques du séisme pour calculer le mouvement du sol à quatre sites situés dans des conditions de sous-sol et de topographie différentes⁸³. Ils montrent notamment une amplification des ondes sismiques aux stations situées sur des crêtes, comme celle de Bourdon où se trouve l'hôtel Montana, très affecté par le tremblement de terre. Ils recommandent fortement l'établissement de cartes de microzonage sismique de Port-au-Prince de manière à mieux connaître la variabilité géographique de l'amplification du mouvement sismique. Ces cartes furent établies deux ans plus tard, comme décrit plus loin.

Plusieurs autres publications importantes succéderont à ce premier « tir groupé ». De Lépinay et ses collaborateurs proposeront une relocalisation précise des premières répliques du séisme⁸⁴. Cette étude fut poursuivie et augmentée à partir de l'ensemble des stations sismologiques sous-marines et terrestres déployées à la suite de cet événement⁸⁵. On observe notamment de nombreuses répliques en faille inverse à l'ouest de la terminaison ouest de la rupture cosismique, qui remobilise la faille sous-marine des Trois Baies, cartographiée dès 1896 par R. Momplaisir⁸⁶ comme une faille inverse. Cette observation sera ensuite expliquée en termes de variations de contraintes de Coulomb causées par la rupture cosismique⁸⁷. Une nouvelle analyse des données InSAR confirmera le résultat de précédentes publications que la rupture du 12 janvier 2010 n'a pas affecté la faille d'Enriquillo, mais une faille aveugle subparallèle et à pendage nord⁸⁸. La technique sismologique dite de la rétro-projection (« *backprojection* ») de l'énergie sismique reçue à des stations situées à des distances télésismiques permettra de reconstituer un mécanisme source⁸⁹, compatible avec un glissement sur une faille à pendage nord distincte de la faille d'Enriquillo, la faille de Léogâne. Une étude ultérieure proposera cependant une

explication alternative peu probable⁹⁰. L'USGS recalculera les épicentres et magnitudes des séismes historiques dans le sud d'Haïti selon une méthodologie bien plus quantitative que ce qui avait été fait jusqu'alors⁹¹. Enfin, des carottages sous-marins dans le Canal du Sud permettront d'identifier les coulées sédimentaires sous-marines – dites « turbidites » – déclenchées par le séisme⁹², ainsi que des turbidites plus anciennes, mais non datées, très probablement le résultat de séismes passés. Reprendre et systématiser cette étude permettrait d'affiner le calendrier paléosismologique, mal connu, du sud d'Haïti.

Au chapitre des tsunamis, des témoignages collectés après le séisme le long des côtes haïtiennes permirent de mieux comprendre les submersions observées, qui firent quelques morts⁹³. Ces informations montrent que les tsunamis locaux observés dans la zone épicertrale furent causés par des glissements gravitaires sous-marins déclenchés par le mouvement du sol. La côte sud de la Presqu'île du Sud fut affectée par des vagues allant jusqu'à 3 m de hauteur, loin du séisme et sur le versant de la Presqu'île du Sud qui lui était opposé. Cette observation n'a pour le moment pas reçu d'explication satisfaisante.

Les conclusions majeures des recherches sismologiques, géologiques et géodésiques immédiatement après le séisme sont donc que (1) la rupture cosismique a eu lieu sur une faille à pendage nord jusqu'alors inconnue, la faille de Léogâne, (2) la rupture n'a pas atteint la surface et a combiné 2/3 de décrochement pour 1/3 de mouvement inverse, (3) le système de failles du Grand Sud d'Haïti continue d'accumuler de l'énergie élastique sismogène, (4) la faille d'Enriquillo, qui n'a pas rompu, reste donc une menace régionale majeure, (5) les risques de tsunamis locaux, même dans ce contexte décrochant, sont significatifs.

4.2 LES AVANCÉES DU GÉNIE CIVIL ET DE LA GÉOTECHNIQUE

Dans le même temps, la communauté du génie civil et de la géotechnique travaillait aussi sur le séisme – surtout sur ses conséquences – sous l'angle du bâti et du sous-sol sur lequel il est construit. Plusieurs équipes internationales effectuèrent des missions en Haïti, notamment une équipe du U.S. Geological Survey et de l'Earthquake Engineering Research Institute (EERI), puis du Geotechnical Extreme Events Reconnaissance (GEER), organisation

83. Hough, S. E., Altidor, J. R., Anglade, D., Given, D., Janvier, M. G., Maharrey, J. Z., Meremonte, M., Mildor, B. S.-L., Prépétit, C., and Yong, A. Localized damage caused by topographic amplification during the 2010 M7.0 Haiti earthquake. *Nature Geoscience* 3, 11 (2010), 778–782.
84. Mercier de Lépinay, B., Deschamps, A., Klingelhoefer, F., Mazabraud, Y., Delouis, B., Clouard, V., Hello, Y., Crozon, J., Marcaillou, B., Graindorge, D., Vallée, M., Perrot, J., Bouin, M.-P., Saurel, J.-M., Charvis, P., and St-Louis, M. The 2010 Haiti earthquake: A complex fault pattern constrained by seismologic and tectonic observations. *Geophysical Research Letters* 38 (2011), L22305.
85. Douilly, R., Haase, J. S., Ellsworth, W. L., Bouin, M. P., Calais, E., Symithe, S. J., Armbruster, J. G., de Lépinay, B. M., Deschamps, A., Mildor, S. L., Meremonte, M. E., and Hough, S. E. Crustal Structure and Fault Geometry of the 2010 Haiti Earthquake from Temporary Seismometer Deployments. *Bulletin of the Seismological Society of America* 103, 4 (2013), 2305–2325.
86. *Ibid.*, Momplaisir 1986.
87. Symithe, S. J., Calais, E., Haase, J. S., Freed, A. M., and Douilly, R. Coseismic Slip Distribution of the 2010 M7.0 Haiti Earthquake and Resulting Stress Changes on Regional Faults. *Bulletin of the Seismological Society of America* 103, 4 (2013), 2326–2343.
88. Hashimoto, M., Fukushima, Y., and Fukahata, Y. Fan-delta uplift and mountain subsidence during the Haiti 2010 earthquake. *Nature Geoscience* 4, 4 (2011), 1–5.
89. Meng, L., Ampuero, J. P., Sladen, A., and Rendon, H. High-resolution backprojection at regional distance: Application to the Haiti M7.0 earthquake and comparisons with finite source studies. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* 117, B4 (2012), B04313–16.

90. Saint Fleur, N. Sismotectonique du système de failles d'Enriquillo et du séisme du 12 janvier 2010 (Mw 7.0) en Haïti. PhD thesis, Institut de Physique du Globe de Paris, Nov. 2014.
91. Bakun, W. H., Flores, C. H., and ten Brink, U. S. Significant Earthquakes on the Enriquillo Fault System, Hispaniola, 1500–2010: Implications for Seismic Hazard. *Bulletin of the Seismological Society of America* 102, 1 (2012), 18–30.
92. McHugh, C. M., Seeber, L., Braudy, N., Cormier, M. H., Davis, M. B., Diebold, J. B., Dieudonne, N., Douilly, R., Gulick, S. P. S., Hornbach, M. J., Johnson, H. E., Mishkin, K. R., Sorlien, C. C., Steckler, M. S., Symithe, S. J., and Topleton, J. Offshore sedimentary effects of the 12 January 2010 Haiti earthquake. *Geology* 39, 8 (2011), 723–726.
93. Fritz, H. M., Hillaire, J. V., Molière, E., Wei, Y., and Mohammed, F. Twin Tsunamis Triggered by the 12 January 2010 Haiti Earthquake. *Pure and Applied Geophysics* 170, 9–10 (2012), 1463–1474.

financée par la National Science Foundation américaine, puis de l'Association française du génie parasismique.

Une grande partie de ces résultats fut publiée dans un numéro spécial de la revue *Earthquake Spectra*⁹⁴. Les articles de ce numéro spécial – trop nombreux pour tous les référencer ici – analysent notamment les conditions géologiques et géotechniques qui conduisirent, dans certains cas, à des amplifications significatives du mouvement du sol^{95,96}. Ces travaux fourniront la base d'une carte de «macrozonage sismique» de Port-au-Prince⁹⁷, prémisses du microzonage à venir⁹⁸. Il fut notamment établi que les zones d'alluvions avaient amplifié le mouvement du sol d'un facteur 2 par rapport à la roche dure non altérée⁹⁹. Les dégâts causés par liquéfaction et *lateral spreading* furent décrits, notamment dans les remblais artificiels de la zone portuaire de Port-au-Prince et le long de la route Léogâne – Carrefour Dufort construite en surélévation artificielle par rapport aux champs de canne à sucre qu'elle traverse¹⁰⁰.

Plusieurs études s'attachèrent au bâti dont 78 %, en zone urbaine, est constitué de maisons d'un étage construites en briques remplissant une armature de poteaux de béton, le tout couvert d'une dalle de béton. Ces constructions sont dans tous les cas l'oeuvre de «boss maçons», qui n'ont pas reçu de formation formelle à la construction mais se transmettent un savoir-faire local, parfois approximatif. Ces «boss maçons» furent, après le séisme, la cible de quelques formations sur la construction en maçonnerie chaînée, solution très efficace pour éviter l'effondrement de ce type de maisons en changeant *a minima* les matériaux et pratiques déjà ancrées culturellement.

Plusieurs inventaires des bâtiments détruits furent réalisés. Selon certaines estimations, de 40 à 50 % des bâtiments furent détruits entre Carrefour et Gressier et de 80 à 90 % à Léogâne¹⁰¹. Au-delà de ces chiffres – qui semblent un peu élevés –, ce qui frappait dans la région épiscopale après le séisme était surtout la variabilité spatiale de la destruction : des bâtiments effondrés jouxtaient des édifices non affectés, des quartiers entiers étaient épargnés alors que d'autres étaient entièrement détruits¹⁰². La qualité du

sous-sol explique sans doute cette dernière observation, comme mentionné plus haut, mais il est clair aussi que la conception de la construction a joué un rôle majeur dans les destructions. L'exemple type en est l'hôpital de Turgeau, bâtiment de 4 étages construit en 2008 sans préconisation parasismique – il s'effondra instantanément – et la tour Digiciel, bâtiment de 12 étages situé à moins de 100 m et affecté de manière mineure – mais conçu selon les normes parasismiques ASCE-07 et ACI¹⁰³. Les exemples documentés de construction inadéquate abondent – colonnes courtes, manque de contreventement, bâtiments dissymétriques, étages en surplomb, ferrailage lisse voire corrodé, béton de mauvaise qualité, utilisation de sable calcaire, toits («hourdis») en dalle de béton trop lourde, etc.

Une étape intéressante, à fois scientifiquement et en termes de partenariat et d'apprentissage, fut celle du microzonage sismique des grandes villes du pays, commençant par Port-au-Prince (voir la figure 5). Les bailleurs de cet effort, le ministère des Finances haïtien et le Fonds pour la reconstruction d'Haïti, furent très intrigués par la carte, pourtant fruste alors, du «macrozonage sismique» de Port-au-Prince. Elle montrait en effet une variabilité spatiale qui avait de fortes corrélations avec l'ampleur des dégâts observés. Le corollaire était donc qu'en cartographiant la qualité des sols, on pouvait connaître leur propension à amplifier les ondes sismiques – il existait de fait un moyen très concret, sur des bases scientifiques, de minimiser les dégâts de séismes à venir. Ce projet fut réalisé par des agences gouvernementales haïtiennes – le BME, le Laboratoire national du bâtiment et des travaux publics (LNBTP) et le Centre national de l'information géospatiale (CNIGS) – avec le soutien technique et scientifique du Bureau de recherches géologiques et minières (BRGM) français. Ses bénéfices dépasseront largement les cartes produites, car ce projet permettra un renforcement de technicité, la rétention de jeunes ingénieurs haïtiens et, surtout, une appropriation des produits réalisés par ces agences nationales. De fait, la carte de microzonage sismique de Port-au-Prince fut par exemple utilisée dans le dimensionnement des bâtiments de la zone administrative reconstruite à Port-au-Prince, qui héberge maintenant certains des principaux ministères dévastés par le séisme de 2010.

Les observations de génie civil post-séisme se résument donc par deux facteurs déterminants dans l'ampleur de la catastrophe : (1) le fait que certains sous-sols amplifièrent le mouvement du sol, et (2) les constructions inadéquates soit par défaut de qualité des matériaux, soit par défaut de conception et/ou de construction. Ces observations se répètent lors de chaque séisme majeur, partout dans le monde, mais avec un effet exacerbé dans les pays en développement. De fait, le coût humain d'un séisme dans ces pays est beaucoup plus important que la moyenne mondiale. Les pays développés payent aussi le coût des séismes, mais surtout en pertes économiques. En effet, les bâtiments ont beau y être parasismiques, les réseaux urbains complexes d'électricité, d'eau, de gaz y restent vulnérables et nombre d'entreprises ne sont pas préparées à assurer la continuité de leurs services en cas de catastrophe majeure. R. Bilham résumera ce constat de manière lapidaire en écrivant que lors d'un séisme majeur, «*les riches payent et les*

94. DesRoches, R., Comerio, M., Eberhard, M., Mooney, W., and Rix, G. J. Overview of the 2010 Haiti Earthquake. *Earthquake Spectra* 27, S1 (2011), S1–S21.

95. Cox, B. R., Bachhuber, J., Rathje, E., Wood, C. M., Dulberg, R., Kottke, A., Green, R. A., and Olson, S. M. Shear Wave Velocity- and Geology-Based Seismic Microzonation of Port-au-Prince, Haiti. *Earthquake Spectra* 27, S1 (2011), S67–S92.

96. Rathje, E. M., Bachhuber, J., Dulberg, R., Cox, B. R., Kottke, A., Wood, C., Green, R. A., Olson, S., Wells, D., and Rix, G. Damage Patterns in Port-au-Prince during the 2010 Haiti Earthquake. *Earthquake Spectra* 27, S1 (2011), S117–S136.

97. www.lnbtp.gouv.ht/macrozonage.html

98. www.lnbtp.gouv.ht/microzonage.html

99. Hough, S. E., Yong, A., Altidor, J. R., Anglade, D., Given, D., and Mildor, S.-L. Site Characterization and Site Response in Port-au-Prince, Haiti. *Earthquake Spectra* 27, S1 (2011), S137–S155.

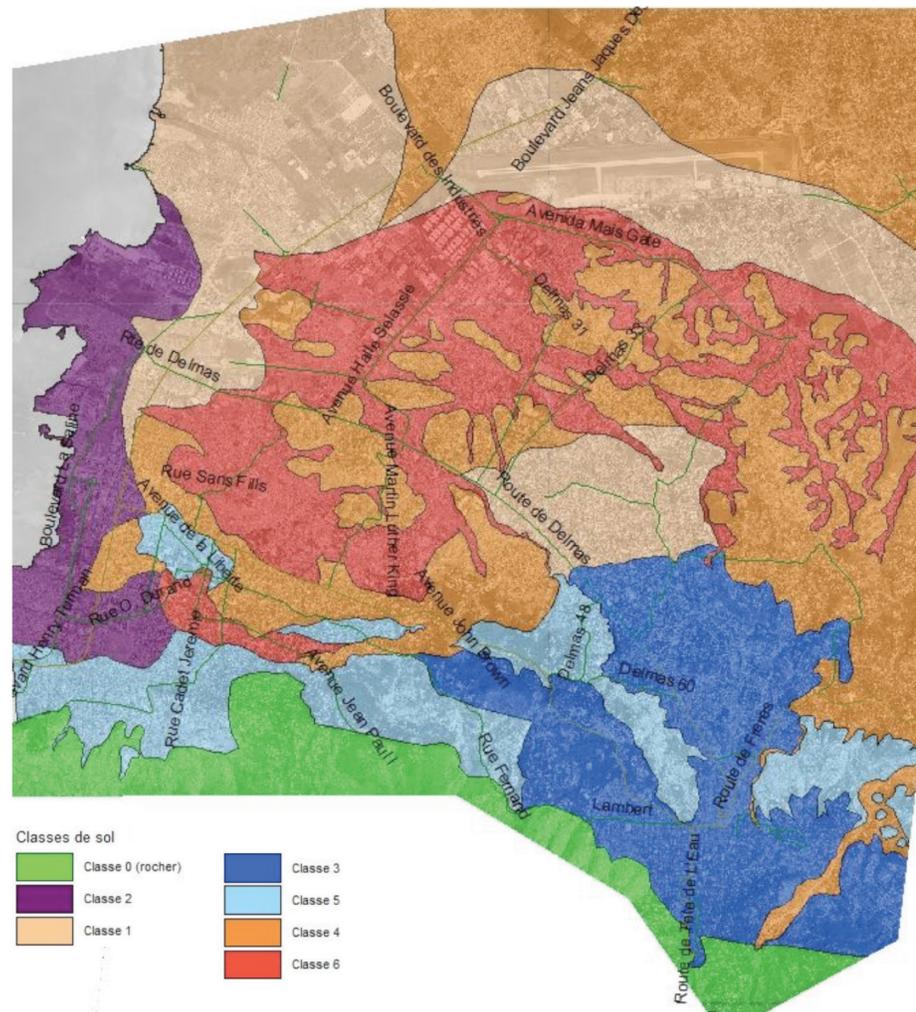
100. Green, R. A., Olson, S. M., Cox, B. R., Rix, G. J., Rathje, E., Bachhuber, J., French, J., Lasley, S., and Martin, N. Geotechnical Aspects of Failures at Port-au-Prince Seaport during the 12 January 2010 Haiti Earthquake. *Earthquake Spectra* 27, S1 (2011), S43–S65.

101. USAID. Map of Earthquake-Affected Areas and Population Movement in Haiti, 2010. Online, accessed 1 September 2019.

102. Eberhard, M. O., Baldrige, S., Marshall, J., Mooney, W., and Rix, G. J. The MW 7.0 Haiti earthquake of January 12, 2010: USGS-EERI Advance Reconnaissance Team Report. USGS Open File Report 2010-1048 (2010), 58.

103. Paultre, P., Calais, E., and Proulx, J. Damage to engineered structures during the 12 January 2010, Haiti (Léogâne) earthquake. *Canadian Journal of Civil Engineering* 40 (2013), 1–14.

Figure 5 Carte du microzonage sismique de la région de Port-au-Prince [www.mtptc.gov.ht/media/upload/doc/publications/MicroSynthese.pdf]. Les couleurs indiquent les classes de sol, déterminées en fonction de leur comportement sismique, c'est-à-dire leur capacité à amplifier le mouvement du sol par rapport à des roches dures non altérées (le « rocher », indiqué ici en vert comme la « classe 0 »). Les classes 1, 2 et 6 sont les plus défavorables, car elles induisent des amplifications importantes.



Source : Frankel 2011.

*pauvres meurent*¹⁰⁴ ». De fait, penser que la question de la vulnérabilité sismique peut se déconnecter de la vulnérabilité économique n'est pas réaliste.

5. QUELQUES ÉCUEILS

Le manque d'informations scientifiques sur l'aléa sismique en Haïti, l'absence de connaissances sur la qualité du sous-sol, et le manque général – à quelques

exceptions notables près – de préconisation parasismique dans la construction ne sont finalement que la partie émergée d'un iceberg dont la partie immergée, bien plus massive, combine les conditions socioéconomiques précaires d'une majorité de la population, la gouvernance étatique peu efficace associée à des pratiques de corruption – efficaces, elles ! – orthogonales au bien public et au progrès¹⁰⁵, et les capacités techniques et financières faibles des institutions nationales.

Comment l'institution nationale en charge de l'aléa sismique, le Bureau des mines et de l'énergie, pourrait-elle travailler à l'augmentation de la connaissance sur les séismes ou les ressources minérales quand son rôle premier, pour sa tutelle gouvernementale, est de faire rentrer de l'argent dans les caisses de l'État en collectant les taxes des carrières du pays ? On saisit bien la logique : ce n'est pas à l'État de financer cet organisme – surtout sur une question aussi difficile que celle du risque sismique – mais plutôt à ce dernier de financer l'État ! Dès lors, on comprend l'absence de financement récurrent pour la surveillance sismique et sa situation très précaire. Cette activité doit sa survie essentiellement aux partenariats internationaux avec des organismes académiques non financièrement intéressés, qui souhaitent comprendre les séismes en Haïti et former des professionnels haïtiens au meilleur niveau.

On entend parfois que le financement de la surveillance sismique est un luxe dans un pays comme Haïti. C'est risible, quand on sait par exemple qu'un kilomètre de route y coûte un million de dollars américains – soit le coût de 10 stations sismologiques et leur maintenance pendant cinq ans ! Et les kilomètres de route, les ponts et autres infrastructures dont la maintenance n'est jamais budgétisée continuent pourtant de fleurir. La surveillance sismologique est malheureusement l'affaire de spécialistes et permet moins de « redistribution de richesse » que la construction d'infrastructures qui implique force sous-traitants, consultants, maîtres d'œuvre et d'ouvrage, donneurs d'ordres, conseillers en tous genres. Comprenne qui pourra.

Mais faisons-nous un instant l'avocat du diable. Les connaissances scientifiques sur l'aléa sismique en Haïti étaient déjà suffisantes, à la veille du 12 janvier 2010, pour établir sans équivoque le degré de dangerosité des failles majeures de l'île. La preuve en est que, dès mars 2010 et sans données nouvelles, la première carte d'aléa sismique d'Haïti fut établie dans le cadre du projet NATHAT. Aujourd'hui, 10 ans après, notre connaissance a fait un bond en avant. Pourtant, il est très probable que le même séisme que celui du 12 janvier 2010, s'il se reproduisait en 2020, provoquerait les mêmes pertes humaines et économiques.

104. Bilham, R. Societal and observational problems in earthquake risk assessments and their delivery to those most at risk. *Tectonophysics* (2012), 1–8.

105. Ambraseys, N., and Bilham, R. Corruption kills. *Nature* 469, 7329 (2011), 153–155.

Alors, pourquoi donc continuer d'accumuler de la connaissance si on n'en fait rien?

On peut évidemment rétorquer qu'il existe maintenant un code du bâtiment avec des préconisations parasismiques – mais qui les vérifie? Ou que des activités de communication ont lieu régulièrement – mais savent-elles prêcher au-delà des convaincus? Ou que des «cartes multirisques» établies par une agence des Nations Unies qui s'érige en bureau d'étude technique sont maintenant disponibles – mais quelle collectivité locale, quelle communauté de simples citoyens sait les valoriser?

Mon contre-argument est différent. Le tragique de la situation en 2010 n'était pas que des informations scientifiques existaient qui n'ont pas été utilisées, mais plutôt qu'aucune structure nationale n'était en place pour collecter et «digérer» cette information, ni pour former des géoscientifiques haïtiens capables de comprendre la question sismique. Or, on ne peut pas combler 20 ans d'abandon des géosciences en Haïti par quelques semaines ou quelques mois de travail post-séisme. Seul un temps long peut éventuellement le permettre, un temps dont l'unité est celle d'une formation d'un master, d'un doctorat, voire d'un post-doctorat.

Parlons un peu des partenaires sans lesquels si peu se fait en Haïti, que nous appellerons «l'international». C'est un conglomérat d'agences des Nations Unies, de grandes banques de développement (Banque mondiale, Banque interaméricaine de développement, etc.), de coopérations bilatérales privilégiées (États-Unis, France, Canada notamment), de grandes ONG internationales (Croix-Rouge, CARE, Oxfam, etc.), de conseillers du gouvernement haïtien offerts par leurs partenaires internationaux. Et bien d'autres encore. L'international, donc, au service du développement d'Haïti, fut très actif après le séisme, sur tous les fronts. Au plan du risque sismique, on peut lui accorder un certain nombre de réussites, par exemple l'étude NATHAT mentionnée plus haut, traduite récemment en un *Atlas des menaces naturelles en Haïti*¹⁰⁶. Nous avons mentionné plus haut le microzonage de quatre grandes villes d'Haïti réalisé dans le cadre d'un consortium haïtiano-français particulièrement efficace. La naissance du réseau sismologique national, actuellement hébergé au Bureau des mines et de l'énergie, fut soutenue dès 2011 par le PNUD, l'USGS et l'observatoire de volcanologie et de sismologie de Martinique. Il y eut aussi – et cela continue – un certain nombre de simulacres de soutien au développement. Le cas du «Plan Séisme Nord» en est un exemple¹⁰⁷. Les «plans de prévention des risques» plus récents, financés par des bailleurs qui y voient peut-être le sésame de la sécurité environnementale, continuent d'occuper les tiroirs des administrations locales.

Les quelques années post-sismiques furent une sorte de marché éphémère dont il fallait profiter, une scène internationale où il fallait se trouver. Les Haïtiens en étaient souvent absents, notamment sur les questions scientifiques concernant la menace et la vulnérabilité

106. BRGM. Atlas des menaces naturelles en Haïti: un document synthétique de référence pour l'information préventive. Rapport préparé pour le comité interministériel d'aménagement du territoire, sous financement de la banque mondiale, Comité Interministériel d'Aménagement du Territoire (CIAT), 2017. On-line, accessed 1 September 2019.

107. *Ibid.*, Calais 2017.

sismiques. De fait, l'appropriation des données et résultats scientifiques immédiatement après le séisme fut faible au sein de la – petite – communauté géoscientifique haïtienne. Le domaine du génie civil, en tous cas de la dynamique des structures, profita cependant de formations offertes par des experts étrangers très compétents comme André Filiatraut ou Patrick Paultre. Ce dernier s'engagea fortement après le séisme de 2010, enseignant pendant quatre ans la dynamique des structures à la Faculté des sciences de l'Université d'État d'Haïti et accueillant chaque année un à deux étudiants dans son laboratoire de l'Université de Sherbrooke (Canada) pour un master en génie parasismique. Deux de ses étudiants, Steeve Amboise et Christopher Calixte, poursuivirent jusqu'au doctorat. Le ministère des Travaux publics et des télécommunications (MTPTC) lança plusieurs initiatives importantes, notamment la finalisation d'un code national du bâtiment incorporant des provisions parasismiques et des formations de «boss maçons» à la construction en maçonnerie chaînée (évoquées plus haut), mais aussi la publication de guides de construction informelle et de réparation des bâtiments endommagés, avec l'aide efficace de la coopération suisse¹⁰⁸.

Le domaine des géosciences – géologie, géophysique, sismologie, etc. – haïtiennes, toutes universités confondues, resta au départ absent de cette scène, comme il l'avait d'ailleurs été avant le séisme. Le BME, lui, faisait surtout office de point de contact national pour des activités internationales dont il avait du mal à retirer de l'expertise remobilisable pour ses propres objectifs. Face à ces constats, quelques professeurs de la Faculté des sciences (FDS) de l'Université d'État d'Haïti (UEH) commencèrent à se réunir dans les semaines qui suivirent le séisme pour réfléchir à la manière d'enseigner les géosciences et de mettre en place une recherche en géosciences en Haïti, notamment sous l'impulsion du professeur Jannin Jadotte. Il était alors clair que la présence de géoscientifiques d'universités étrangères à la suite du séisme offrait des opportunités pour renforcer – ou reformer – l'enseignement et la recherche en géosciences en Haïti. Ces opportunités nouvelles, ainsi que le traumatisme du séisme, décidèrent d'ailleurs quelques jeunes Haïtiens à tenter l'aventure d'une formation de master ou de doctorat à l'étranger. Même si l'on peut déplorer que quelques thèses post-séisme ne trouvèrent pas de candidats haïtiens et furent réalisées par des doctorants étrangers, un contingent significatif de doctorants haïtiens se lança dans l'aventure. Les deux premiers furent Roby Douilly et Steeve Symithe, qui partirent à l'Université de Purdue aux États-Unis, puis Newdeskarl Saint Fleur à l'Institut de physique du globe de Paris et Sadrac St Fleur à l'Université de Nice.

La FDS hébergeait alors l'Unité de recherche en géotechnique (URGéo), laboratoire académique modeste mis sur pied dans le cadre d'une coopération avec la Belgique, coopération qui permit les doctorats de Kelly Guerrier et Jean Berthoumieux, puis de Sophia Ulysse et de Karl Henry Victor. L'implication grandissante en Haïti du laboratoire Géoazur de l'Université de Nice, la volonté de part et d'autre de pérenniser cette collaboration – plus un coup de pouce de départ du PNUD en 2011 – donnèrent l'impulsion qui manquait.

108. www.mtptc.gouv.ht/accueil/publications/code-construction.html

Après deux ans de travail de part et d'autre, la FDS, avec le soutien fort du laboratoire Géoazur et de son directeur, le professeur Emmanuel Tric, parvint à monter un master sur le thème des géosciences et géorisques (voir la figure 6). L'Unité de recherche en géotechnique se rebaptisa alors «Unité de recherche en géosciences», ouvrant ses objectifs scientifiques aux études tous azimuts des aléas géologiques. Cette structure a plusieurs atouts nouveaux dans le paysage des géosciences en Haïti. D'abord, elle s'organise autour de jeunes docteurs haïtiens, récemment formés en France, en Belgique, aux États-Unis ou au Canada. Ensuite, elle fait preuve d'un esprit entrepreneurial et partenarial qui lui permet de collaborer avec certaines des meilleures équipes internationales et de trouver les fonds nécessaires pour alimenter son fonctionnement. C'est une réussite, qui s'est matérialisée pas à pas, façonnée localement par les universitaires haïtiens dirigeant la structure, les professeurs Dominique Boisson et Roberte Momplaisir.

Figure 6 La première promotion du master Géosciences – Géorisques de la Faculté des sciences de l'Université d'État d'Haïti sur le terrain avec l'auteur. La dépression humide en arrière-plan correspond au passage d'une des branches de la faille de la Presqu'île du Sud au voisinage de Carrefour Dufort.



Source : Douilly 2017

6. L'ÉPOQUE CONTEMPORAINE

Les années 2014-2016 seront riches en résultats scientifiques importants en Haïti, beaucoup obtenus dans le cadre des thèses de doctorat de jeunes Haïtiens. Steve Symithe utilisera les données GPS et de radar satellite (technique dite de l'InSAR) pour calculer le glissement cosismique fini sur la faille de Léogâne, responsable du séisme du 12 janvier 2010, et identifiera deux zones de concentration de glissement¹⁰⁹. Il analysera ensuite des données GPS régionales et locales pour proposer le premier modèle cinématique de la région caraïbe¹¹⁰ et, à une échelle plus locale, mettre en évidence un raccourcissement nord-sud jusqu'alors ignoré pris en compte par la faille d'Enriquillo, qui – au moins le long de la dépression d'Enriquillo – est donc surtout une faille inverse¹¹¹. Ce résultat sera ensuite confirmé par deux études de

sismicité indépendantes^{112,113}. Les conséquences de cette découverte sont importantes car, dans ce nouveau schéma, l'aléa sismique à Port-au-Prince est près de deux fois supérieur à ce qui fut – rapidement – calculé et publié juste après le séisme¹¹⁴ et faisait l'hypothèse, faute de meilleures informations, que cette faille était purement verticale et décrochante.

Roby Douilly relocalisera les répliques du séisme du 12 janvier 2010¹¹⁵ et déterminera grâce à elles la géométrie de la faille responsable. Il modélisera ensuite la dynamique de la rupture de 2010 pour tenter de comprendre pourquoi deux segments de faille ont rompu¹¹⁶. Enfin, il proposera

des simulations réalistes du mouvement du sol à Port-au-Prince¹¹⁷ dans l'hypothèse de futurs séismes de magnitude équivalente à celui du 12 janvier 2010. Sadrac St Fleur étudiera l'amplification des ondes sismiques dans la région de Port-au-Prince à partir des enregistrements des répliques du séisme de 2010¹¹⁸. Newdeskarl Saint Fleur utilisera des données satellitaires et quelques observations de terrain pour caractériser le tracé de la faille d'Enriquillo le long de la Presqu'île du Sud et montrer la présence de nombreuses structures compressives le long de la bordure sud de la plaine du Cul-de-Sac¹¹⁹. Enfin, des études

109. *Ibid.*, Symithe 2013.

110. Symithe, S., Calais, E., Chabalier, J. B., Robertson, R., and Higgins, M. Current block motions and strain accumulation on active faults in the Caribbean. *Journal of Geophysical Research (Solid Earth)* 120 (2015).

111. *Ibid.*, Symithe 2016.

112. Rodriguez, J., Havskov, J., Sørensen, M. B., and Santos, L. F. Seismotectonics of south-west Dominican Republic using recent data. *Journal of Seismology* 22, 4 (2018), 883–896.

113. Possee, D., Keir, D., Harmon, N., Rychert, C., Rolandone, F., Leroy, S., Corbeau, J., Stuart, G., Calais, E., Illsley Kemp, F., Boisson, D., Momplaisir, R., and Prépetit, C. The Tectonics and Active Faulting of Haiti from Seismicity and Tomography. *Tectonics* 43, 1 (2019), 237–18.

114. *Ibid.*, Frankel 2011.

115. *Ibid.*, Douilly 2013.

116. Douilly, R., Aochi, H., Calais, E., and Freed, A. M. Three-dimensional dynamic rupture simulations

across interacting faults: The Mw7.0, 2010, Haiti earthquake. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* 120, 2 (2015), 1108–1128.

117. Douilly, R., Mavroeidis, G. P., and Calais, E. Simulation of broad-band strong ground motion for a hypothetical Mw7.1 earthquake on the Enriquillo Fault in Haiti. *Geo-physical Journal International* 211, 1 (2017), 1–18.

118. St Fleur, S., Bertrand, E., Courboux, F., Mercier de Lépinay, B., Des-champs, A., Hough, S., Cultrera, G., Boisson, D., and Prépetit, C. Site Effects in Port-au-Prince (Haiti) from the Analysis of Spectral Ratio and Numerical Simulations. *Bulletin of the Seismological Society of America* 106, 3 (2016), 1–18.

119. *Ibid.*, Saint Fleur 2015.

géotechniques permettront de préciser le rôle de l'effet de site local dans la région de l'hôtel Montana à Port-au-Prince^{120,121}.

De nombreux travaux furent aussi menés par des géoscientifiques étrangers impliquant de jeunes Haïtiens à des degrés divers, parfois significativement, parfois pas du tout. Le BRGM de France, dans le cadre d'une étude du microzonage sismique de quatre grandes villes du pays commandée par le gouvernement haïtien et menée avec le BME, réalisera une cartographie géologique de détail de Port-au-Prince et montrera notamment une activité quaternaire de plusieurs failles traversant l'agglomération^{122,123}. L'Institut français du pétrole énergies nouvelles (IFPEN, France) reprendra une partie de la géologie du sud d'Haïti avec un intérêt particulier pour les fluides le long des zones de failles¹²⁴. La campagne océanographique HaitiSis¹²⁵ cartographiera la bathymétrie des abords d'Haïti pour y identifier les principales failles actives, déjà connues mais pas encore étudiées avec ce niveau de détail¹²⁶. Un déploiement temporaire de stations sismologiques sur un profil nord-sud au travers d'Haïti permettra de déterminer l'épaisseur crustale et ses variations, distinguant un bloc continental de 23 km au nord, un bloc océanique de type *Large Igneous Province* de 22 km au sud et un bloc central probablement de type arc volcanique de 41 km¹²⁷. La relation entre ces épaisseurs crustales et le relief de l'île reste cependant énigmatique.

Ces mêmes données sismologiques, complétées par celles de réseaux sismologiques nationaux, permettront de réaliser une tomographie sismique et une relocalisation de la sismicité régionale¹²⁸. Ces travaux montrent notamment une structure à pendage sud sous le Massif de la Selle accompagnée d'un essaim de sismicité atteignant 25 km de profondeur. Il est probable que cette sismicité marque le chevauchement oblique du Massif de la Selle – Baoruco sur la plaine du Cul-de-Sac – Enriquillo identifié par géodésie GPS¹²⁹ et par la cartographie des structures géologiques

actives¹³⁰. Des travaux en cours de l'équipe de Milène Cormier, qui étudie les sédiments récents du lac Azuei par sismique réflexion haute résolution, montrent clairement des plis actifs, en cohérence avec la déformation compressive actuelle observée par géodésie et sismologie dans cette région¹³¹ – sans cependant y trouver la trace de « Faille d'Enriquillo ». Ce résultat met à mal l'interprétation classique d'une tectonique dominée par une grande faille décrochante qui continue cependant d'être proposée par certains auteurs^{132,133}.

En exploitant les données sismologiques des stations temporaires installées juste après le séisme du 12 janvier 2010, on montrera que les ondes de surface du séisme de Maule (Chili, Mw8,8, 11 février 2010) déclenchèrent des tremors tectoniques au sud de la trace en surface de la faille de la Presqu'île du Sud, localisés entre 20 et 30 km de profondeur¹³⁴. Ils pourraient marquer le prolongement de cette faille en profondeur – dans ce cas cela impliquerait une faille à fort pendage sud, en accord avec les observations géologiques de surface¹³⁵ dans la zone épiscopale du séisme du 12 janvier 2010.

Enfin, une campagne de sismique de subsurface et de gravité dans la partie ouest de l'éventail alluvial de Léogâne au travers de la projection en surface de la rupture cosismique du 12 janvier 2010 permet d'imager les 300 premiers mètres¹³⁶. Ces travaux ne montrent pas de déformation cassante en subsurface, mais un léger plissement des réflecteurs qui pourrait marquer la présence, en profondeur, d'une faille inverse aveugle correspondant à la faille de Léogâne.

Il ne faudrait pas oublier, dans cette longue liste d'efforts pour la connaissance de l'information sur les séismes en Haïti, ceux du domaine éducatif ou des associations. À tout seigneur, tout honneur : le collège Catts Pressoir, à Port-au-Prince, est un précurseur en matière d'éducation sur les séismes. Dès 2005, ce collège chercha à s'équiper d'une station sismologique pour enregistrer les séismes locaux et les utiliser pour conscientiser ses élèves sur la réalité de la menace sismique en Haïti. Il réussit finalement, en mai 2010, à réunir les fonds pour acheter un sismomètre qui fonctionne de manière ininterrompue depuis. Le collège Catts Pressoir participe depuis 2012 au réseau « Sismos à l'école¹³⁷ ». En Haïti, il porte le flambeau d'un projet d'installation de sismomètres éducatifs dans d'autres écoles et de formation de leurs professeurs, avec

120. Ulysse, S., Boisson, D., Prépétit, C., and Havenith, H.-B. Site Effect Assessment of the Gros-Morne Hill Area in Port-au-Prince, Haiti, Part A: Geophysical-Seismological Survey Results. *Geosciences* 142, 8 (2018).

121. Ulysse, S., Boisson, D., Prépétit, C., and Havenith, H.-B. Site Effect Assessment of the Gros-Morne Hill Area in Port-au-Prince, Haiti, Part B: Mapping and modeling Results. *Geosciences* 233, 8 (2018).

122. Terrier, M. Apport des images Pléiades au microzonage sismique de Port-au-Prince (Haïti) : application à l'étude géologique. *Revue Française de Photogrammétrie et de Télédétection* (2015), 1–6.

123. Terrier, M., Bialkowski, A., Nachbaur, A., Prépétit, C., and Joseph, Y. F. Re-vision of the geological context of the Port-au-Prince metropolitan area, Haiti: implications for slope failures and seismic hazard assessment. *Natural Hazards and Earth System Science* 14, 9 (2014), 2577–2587.

124. Wessels, R. J. F., Ellouz-Zimmermann, N., Bellahsen, N., Hamon, Y., Rosenberg, C., Deschamps, R., Momplaisir, R., Boisson, D., and Leroy, S. Polyphase tectonic history of the Southern Peninsula, Haiti, from folding-and-thrusting to transpressive strike-slip. *Tectonophysics* 751 (2019), 125–149.

125. *Ibid.*, Leroy 2015.

126. Corbeau, J., Rolandone, F., Leroy, S., and Meyer, B. How transpressive is the northern Caribbean plate boundary? *Tectonics* 35 (2016), 1032–1046.

127. Corbeau, J., Rolandone, F., Leroy, S., Guerrier, K., Keir, D., Stuart, G., Clouard, V., Gallacher, R., Ulysse, S., Boisson, D., Momplaisir, R., Saint Preux, F., Prépétit, C., Saurel, J. M., Mercier de Lépinay, B., and Meyer, B. Crustal structure of western Hispaniola (Haiti) from a teleseismic receiver function study. *Tectonophysics* 709, C (July 2017), 9–19.

128. *Ibid.*, Possee 2019.

129. *Ibid.*, Symithe 2016.

130. *Ibid.*, Briggs 2012, Saint Fleur 2014.

131. Murray, A. N., Cormier, M. H., Sloan, H., King, J. W., Boisson, D., Guerrier, K., Hearn, C. K., Heil, C. W., Kelly, R. P., Momplaisir, R., Sorlien, C. C., Symithe, S. J., Ulysse, S. M. J., and Wattus, N. J. Late Quaternary Fault-Related Folding, Uplifted Paleoshoreline, and Liquefaction Structures: Clues About Transpressional Activity Along the North America-Caribbean Plate Boundary From a Comprehensive Seismic Reflection Survey of Lake Azuei, Haiti. In *American Geophysical Union Fall Meeting* (San Francisco, 2018), p. Abstract EP51D-1850.

132. *Ibid.*, Mann 1995.

133. Wang, J., Mann, P., and Stewart, R. R. Late Holocene Structural Style and Seismicity of Highly Transpressional Faults in Southern Haiti. *Tectonics* 102, 1 (2018), 18–20.

134. Aiken, C., Chao, K., Gonzalez-Huizar, H., Douilly, R., Peng, Z., Deschamps, A., Calais, E., and Haase, J. S. Exploration of remote triggering: A survey of multiple fault structures in Haiti. *Earth and Planetary Science Letters* 455, C (2016), 14–24.

135. *Ibid.*, Prentice 2010.

136. Kocel, E., Stewart, R. R., Mann, P., and Chang, L. Near-surface geophysical investigation of the 2010 Haiti earthquake epicentral area: Léogâne, Haiti. *Interpretation* 4, 1 (2016), T49–T61.

137. www.edusismo.org

le soutien du réseau EDUSEIS¹³⁸ et du ministère de l'Éducation nationale haïtien.

Parmi les autres projets visant l'éducation de base, citons celui de la fondation La Main à la Pâte¹³⁹ en Haïti. Ce projet à long terme, nommé « Pour la transformation de l'enseignement en Haïti¹⁴⁰ » (TEH), a pour objectif de formation des enseignants des écoles publiques haïtiennes dans les divers domaines du curriculum scolaire, notamment celui des risques naturels. Ce projet a notamment produit des contenus de qualité sur les séismes et le risque sismique, diffusés auprès des enseignants du cursus fondamental haïtien au travers des EFACAP (École fondamentale d'application – Centre d'appui Pédagogique) et déjà en place en Haïti sous l'égide du ministère de l'Éducation nationale haïtien.

La liste – évidemment bien plus longue que ce que nous citons ici – continue de croître.

7. LE FUTUR ?

Le séisme du 12 janvier 2010 aura eu l'effet positif de stimuler les recherches en géosciences en Haïti et de mener à la formation d'une nouvelle génération de chercheurs en sismologie, géologie et géodésie notamment. Mais ce progrès est fragile car, comme avant le séisme, les ressources nationales dédiées à l'étude des séismes, dans un pays qui y est pourtant directement exposé, sont ridicules par rapport à l'importance de la menace¹⁴¹.

Par exemple, si le BME a obtenu des fonds internationaux pour acheter sept stations sismologiques large bande, il peine à les maintenir opérationnelles. Il n'était notamment pas en capacité, jusqu'en 2016, de payer un abonnement Internet suffisant pour recevoir et donc utiliser les données de ses stations sismologiques ni de celles des stations canadiennes installées dans le pays. Aujourd'hui, une seule de ces stations sismologiques fonctionne (PHAP, du réseau canadien).

Une solution complémentaire pour l'observation sismologique en Haïti pourrait être l'utilisation de sismomètres très bon marché, très faciles d'installation et qui ne requièrent quasiment pas de maintenance, par exemple de type *Raspberry Shake*¹⁴². Une expérience en cours en Haïti montre que ces sismomètres permettent, pour seulement 500 \$ US l'unité, d'enregistrer les séismes locaux jusqu'à des magnitudes de l'ordre de 2, ainsi que les séismes régionaux et mondiaux¹⁴³. Le faible coût de ces instruments permet d'envisager d'en installer un grand nombre et d'utiliser cette redondance pour pallier les problèmes de maintenance. De plus, ce type d'instru-

ment peut être installé en partenariat avec des particuliers et/ou des entreprises qui fournissent les (faibles) consommations électrique et Internet nécessaires à leur fonctionnement. De fait, ce type d'opération peut aussi être l'occasion d'engager un dialogue sur les séismes avec la société civile et, peut-être, d'y développer une culture de la prévention. Le chemin à parcourir reste long, mais il faut innover !

Les salaires insuffisants de la fonction publique n'ont pas permis de retenir dans le milieu de la recherche certains des doctorants formés à l'étranger en génie parasismique, sismologie et paléosismologie. Certains ont préféré céder aux sirènes d'organismes internationaux présents en Haïti, qui leur proposaient des salaires confortables. Ce type de décision est compréhensible – de nombreux doctorants en géosciences dans d'autres pays, dont la France, font le choix du privé plutôt que du domaine académique. Mais cela reflète néanmoins la faible attractivité de la recherche académique en Haïti, donc l'importance d'imaginer des modèles économiques adaptés au contexte, c'est-à-dire qui permettent aux laboratoires de recherche d'être un réceptacle pour les jeunes chercheurs malgré l'indigence des ressources publiques. L'URGéo, citée plus haut, en est un exemple pertinent, en particulier pour son modèle économique qui repose sur des projets de formation, des projets de recherche et de l'expertise, le tout essentiellement financé par des bailleurs externes, c'est-à-dire hors des tutelles académiques de ce laboratoire. Être chercheur en Haïti – comme d'ailleurs dans beaucoup de pays, les États-Unis en tête – demande aussi d'être entrepreneur, donc de solliciter des fonds auprès de tout bailleur potentiel et de répondre à des appels d'offres...

Géologiquement, Haïti reste un territoire à déchiffrer. La carte géologique au 1/250 000^e réalisée au début des années 1980 est maintenant insuffisante face aux enjeux économiques (ressources minérales et hydriques), ceux liés aux risques telluriques (séismes, glissements de terrain) ou hydrologiques, ou à l'exposition du littoral et des terres agricoles au changement climatique global. Elle doit être déclinée, au moins dans certaines régions, avec une résolution spatiale bien supérieure. Par exemple, les terrains du quaternaire – les deux derniers millions d'années – qui y sont représentés d'une couleur grise uniforme contiennent en fait des informations de premier ordre sur les modifications du climat, du niveau des mers, ou du régime sismique sur cette période très récente dans laquelle nous évoluons, l'anthropocène. Il y a sur cette île une myriade de sujets de recherche pour de jeunes chercheurs haïtiens dans les riches et divers domaines des « sciences de la planète », depuis la sismologie jusqu'au changement climatique, en prise directe avec des enjeux sociétaux de première importance. Il faut motiver les membres d'une jeune génération à devenir acteurs, et auteurs, de nouvelles découvertes sur notre environnement, ses ressources et ses menaces. Pour ce faire, il est indispensable qu'il existe dans le pays des formations de haut niveau adossées à des laboratoires de recherche performants.

8. CONCLUSION

Les séismes peuvent être perçus comme l'un des moindres maux en Haïti. Pourtant, 35 secondes de mouvement du sol le 12 janvier 2010

138. edumed.unice.fr/fr/eduseis

139. www.fondation-lamap.org

140. the.fondation-lamap.org/the/

141. Rappelons ici, en note de bas de page car ce thème ne mérite pas mieux, que la prévision opérationnelle des séismes reste aujourd'hui impossible. Que des recherches sur ce sujet aient lieu est une chose. Qu'une entreprise internationale cherche à soutirer de l'État haïtien plusieurs millions de dollars pour opérationnaliser ce concept est par contre plus que douteux. On se posera sans doute la question, dans quelques années, « *kot kob prediksyon tranbleman tè a?* ».

142. raspberrysshake.org

143. Calais, E., Boisson, D., Symithe, S., and Momplaisir, R. Monitoring Haiti's Quakes with Raspberry Shake. EOS 100 (2019).

ont coûté au pays 11 milliards de dollars et plus de 200 000 vies humaines, mettant un frein à un processus de développement lent, mais alors engagé. On ne peut pas dire, en 2019, qu’Haïti s’en soit remise – mais il faut pourtant avancer.

Le séisme du 12 janvier 2010 a amorcé un rebond de l’activité de recherche en géosciences en Haïti. Il a permis de démultiplier des partenariats internationaux jusqu’alors limités. Des opportunités nouvelles de formation et de recherche innovantes en sont issues. De fait, les géosciences en Haïti ont immensément plus progressé ces 10 dernières années que pendant le quasi statu quo des 20 années précédentes.

Mais les structures qui ont permis ces progrès sont fragiles, à la fois financièrement et en termes de ressources humaines capables. Par ailleurs, bien des dangers guettent ces progrès à venir, par exemple la difficulté de juger objectivement de la qualité de certaines études, la probabilité de départ vers l’étranger de jeunes néoformés en

géosciences, ou l’acceptation de projets lucratifs en dépit de l’indigence de leur retour scientifique.

Le défi est donc d’adjoindre à une vision scientifique moderne, ancrée dans des outils, méthodes et questionnements partagés au plus haut niveau international, une vision pragmatique locale, cohérente avec le vivier d’étudiants et de chercheurs et avec des opportunités financières raisonnablement utilisables. Haïti a le droit à la (géo)science, et à la meilleure possible, comme tout autre pays. ■

REMERCIEMENTS

Cet article a bénéficié d’une relecture attentive et de commentaires pertinents de Roberte Momplaisir, Dominique Boisson, et Bernard Mercier de Lépinay. L’auteur remercie le comité éditorial de lui avoir offert l’occasion de présenter cette réflexion personnelle, qui n’engage que lui.

Eric Calais, Ph.D. est Professeur à l’École normale supérieure (Paris, France), après une carrière essentiellement passée aux Etats Unis. C’est un géologue spécialiste des régions sismiques actives du globe dont les chantiers de recherche incluent la Caraïbe, l’Afrique de l’Est et l’Asie centrale. Il est membre de l’Académie des Sciences et de l’Institut Universitaire de France. Il a reçu les prix Jacob de l’Académie des Sciences pour ses travaux sur l’application de la géodésie spatiale à l’étude des séismes et le prix Frank Press de l’Association Américaine de Sismologie pour ses travaux sur le séisme d’Haïti. Eric Calais a co-dirigé la task-force des Nations Unies suite au séisme d’Haïti en 2010 puis y a travaillé comme conseiller scientifique pour les Nations Unies dans le cadre de la reconstruction post-séisme de 2010 à 2012. Il est l’auteur de «*Science et conscience dans la post-urgence du séisme d’Haïti*», éditions L’Harmattan (2017). eric.calais@ens.fr