

Titre : Long term multi-sensor InSAR analysis of surface displacement over Hispaniola Island.

Encadrants de thèse : Romain Jolivet, Eric Calais

Les séismes sont classiquement interprétés dans le cadre du concept de « cycle sismique », envisagé depuis une centaine d'année. Ce cycle est défini par de longues périodes de lentes d'accumulation de contraintes le long des failles sous l'effet du mouvement continu des plaques pavant la surface de la Terre en alternance avec des glissements rapides relâchant, rapidement, lors d'un séisme tout ou partie de l'énergie accumulée [Reid 1911]. Cependant depuis la mise en lumière des séismes lents et des glissements asismiques dans les années 1990, cette vision simple du cycle sismique est remise en question [e.g. Dragert et al, 2001 ; Peng & Gombert, 2010]. Ces séismes lents et glissements asismiques sont observés dans les zones de failles actives et libèrent une partie de l'énergie sismique accumulée plus lentement qu'un séisme ordinaire (i.e plusieurs jours à mois comparés à quelques secondes pour les séismes ordinaires) mais à toutes les échelles de temps et d'espace [e.g. Burgmann, 2018]. En relâchant une partie de l'énergie accumulée, ils contribuent ainsi à modifier significativement l'aléa sismique dans une zone donnée, et ainsi modifier la probabilité d'occurrence d'un séisme de forte magnitude. Séismes lents et glissement asismiques, s'ils ne produisent pas ou peu d'ondes sismiques peuvent libérer une partie non négligeable du budget énergétique d'une faille active, avec des magnitudes équivalentes pouvant aller jusqu'à 8 (observée à ce jour). Ce renversement de nos connaissances sur le cycle sismique constitue un véritable changement de paradigme et requiert de nouvelles observations.

L'étude et la caractérisation de la variété d'évènements de glissements sismiques et asismiques de durée et de taille variable est primordiale pour quantifier le bilan des forces accumulées et comprendre la physique sous-jacente, vers une meilleure évaluation du risque sismique.

Initialement, des mesures géodésiques, essentiellement par Global Positioning System (GPS) [Rogers & Dragert, 2003], ont permis d'explorer les caractéristiques des glissements lents et du chargement intersismique avec des mesures de déplacements de la surface du sol dans les zones de failles actives. Ces caractéristiques ont été étudiées dans les zones de subduction ainsi que le long de grands systèmes de failles continentaux, comme par exemple le long de la faille de San Andreas ou de la faille Nord Anatolienne. Il a ainsi été mis en évidence récemment qu'il existe une très grande variété de type de glissements asismiques et qu'un continuum semble relier les séismes et les séismes lents. Cependant dans beaucoup de région du globe, les épisodes de chargement et de déchargement sismique ou asismique sont peu documentés du fait de couverture spatiale éparse des réseaux GPS [e.g. Jolivet et al, 2012]. De plus, une vaste archive d'images satellitaires (Radar ou optique) existe mais ne permet pas pour le moment de déterminer un scénario cohérent de la déformation sur plusieurs décennies. L'étude de tels phénomènes nécessite donc la mise en place d'un outil permettant une fusion systématique et globale de toutes les mesures géodésiques pour déterminer un champ de déformation de la surface en 4D (3D + temps) le long des failles actives sur de longues périodes de temps.

Un moyen pour résoudre le problème de couverture spatiale et temporelle vient des missions d'observation spatiales de la Terre. La quantité de données d'imagerie SAR (Radar à Synthèse d'Ouverture) et optique n'a fait que s'accroître dans les 30 dernières années. L'imagerie Radar permet

de mesurer finement (i.e au mm près) l'évolution temporelle des déplacements du sol [Simons & Rosen, 2015]. Cette méthode permet aujourd'hui une cartographie systématique de toutes les régions activement déformées du monde (Figure 1). Ces données sont aujourd'hui disponibles et les chaînes de traitement pour chaque type d'image sont bien établies. La plupart des études actuelles se réduisent à l'utilisation d'un seul capteur (par exemple ALOS dans le cas de Haïti), ce qui limite fortement notre capacité à étudier les failles actives sur des échelles de temps supérieures à quelques années. Il n'existe pas encore de méthode permettant de fusionner les mesures réalisées par différents satellites ou capteurs dans une série temporelle commune de la déformation. L'obtention de longues séries temporelles de données SAR avec une grande couverture spatiale et des précisions de l'ordre de la centaine de mètres nous permettrait d'étudier finement les comportements des failles, la physique des tremblements de terre et d'envisager le risque sismique de manière plus sereine.

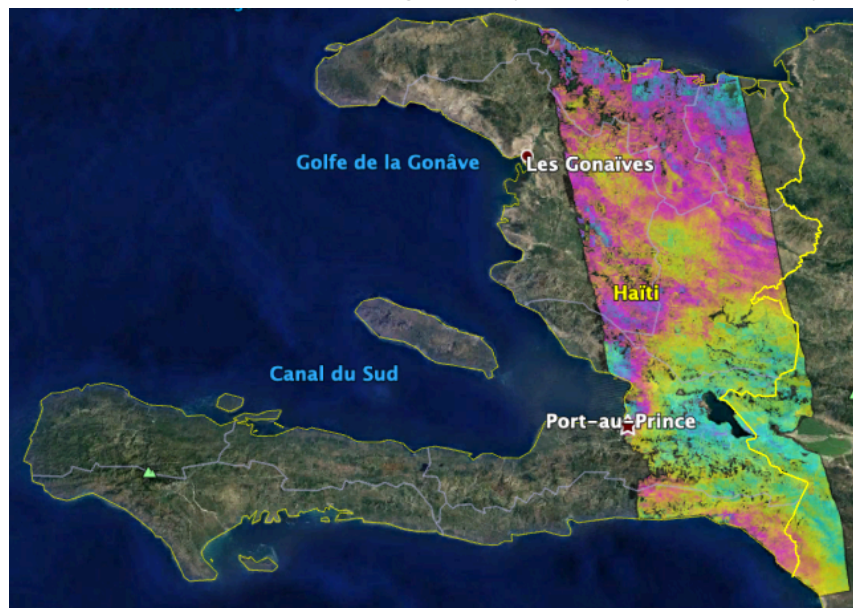


Figure 1 : Exemple d'un interférogramme de la track 136 déroulé sur l'île d'Hispaniola. Issu des données du satellite ALOS (2006-2011) et effectué entre les acquisitions de Février 09, 2008 et Janvier 28, 2010. Correction effectuée à partir du modèle atmosphérique ERA-5 et le programme PyAPS. Image cosismique au séisme de 2010 de Haïti, elle met en avant la qualité des données des satellites ALOS pour les zones tropicales et montre la subsidence autour de Port-au-Prince.

L'objectif méthodologique de ce projet de thèse est de créer ce nouvel outil qui prend en compte les différents modes d'acquisition des satellites et permet de réaliser un jeu unique de données. Ce jeu de données pouvant être étendu sur plus de 30 ans permettrait d'obtenir une description des différents modes de glissements possibles sur une zone précise. Le développement récent au laboratoire de géologie de l'ENS d'outils de détection permettant de manipuler de grands volumes de données permettra de démarrer cette étude. L'objectif est à terme de caractériser tous les événements de glissement à l'échelle mondiale en traitant l'archive de données Radar de l'ESA (Agence Spatiale Européenne). Nous baserons cette méthode sur un filtre de Kalman [Dalaison & Jolivet, under review], que nous adapterons pour la fusion d'information de plusieurs capteurs.

Ce sujet propose de tester cette approche sur l'île d'Hispaniola (Haïti et République Dominicaine) où la variabilité du comportement mécanique des failles actives ainsi que les différents types de glissement restent peu explorés. Ce manque d'information est lié d'une part aux courtes séries temporelles GPS disponibles (il n'existe en effet que très peu de station mesurant en continu) et à

l'existence de jeux de données satellitaires disparates provenant de différentes missions. Pourtant la plaque Caraïbes et ses frontières avec l'Amérique du Nord et du Sud, marquées par des subductions et de grands systèmes de failles décrochantes, constitue un laboratoire naturel privilégié pour le test de ce nouvel outil pour l'étude des glissements, sismiques ou asismiques ainsi que pour une meilleure compréhension de la géodynamique à petite échelle dans la région caraïbienne.

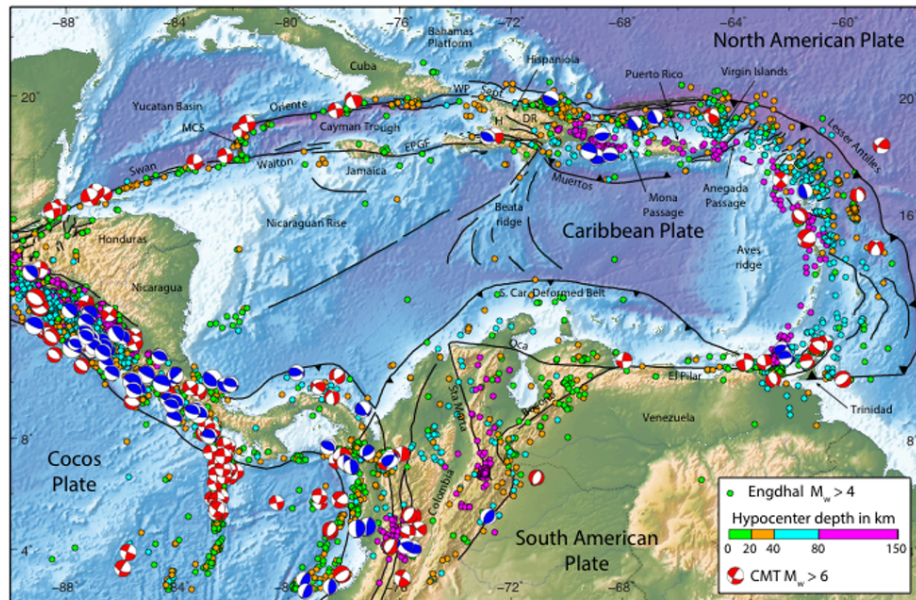


Figure 2 : Carte sismotectonique des Caraïbes [Symithe et al, 2015]. Les lignes noires présentent les failles majeures associées aux limites de plaques. Les cercles colorés présentent la sismicité relocalisée (1960-2008) [Engdahl et al, 1998] en fonction de leurs profondeurs. Les mécanismes aux foyers des séismes sont issues catalogue Global CMT (1976-2014) [Ekstrom et al, 2012]. Les mécanismes inverses en bleu, les autres en rouges.

La subduction de la plaque nord-américaine sous la plaque caraïbes (Figure 2) montre des variations latérales de couplage qui semble être relié à une segmentation du régime tectonique le long de l'arc [Manaker et al., 2008]. Avec des zones sismiquement actives proches, de Haïti au Nord avec ces failles d'Hispaniola et Enriquillo (ayant rompu en 2010, $M_w=7.3$) et au Venezuela au Sud avec la faille d'El Pilar [Pousse et al, 2016]. Les cartes d'accumulation de contrainte de coulomb [Ali et al, 2008] fondés sur des modèles prenant en compte la paléosismicité montre l'activité sismique importante de la zone (Séisme des Iles Caïman : $M_w=7.8$) et suggère l'importance d'avoir accès à de longues séries temporelles de données afin d'estimer au mieux les zones à même d'accumuler des contraintes et donc de rompre prochainement. La pluralité des contextes tectoniques allant de subduction frontale (Petites Antilles) à subduction oblique (Porto Rico) et subduction-collision (Hispaniola) combinée à ces aires densément peuplées font d'elle une région sous haute surveillance.

L'originalité de cette approche est donc de combiner les données disponibles depuis les 30 dernières années afin de réaliser en utilisant le filtre de Kalman développé au laboratoire de Géologie de l'ENS de créer des séries temporelles de déformation au niveau des Caraïbes qui n'ont jamais pu être faites et étudié à ce jour. L'équipe encadrante possède les différents pôles de compétences nécessaires afin de pouvoir aiguiller et aider le candidat dans ces investigations. Une expertise dans le domaine de l'Interférométrie SAR et du machine learning par Romain Jolivet, et une expertise sur la géodynamique des Caraïbes et l'utilisation des GPS par Éric Calais.

Afin de comprendre l'évolution des contraintes dans la zone des Caraïbes, nous souhaitons donc :

- a) Créer une méthodologie nouvelle permettant l'obtention d'une série temporelle de déplacement de la surface à partir des différentes images venant de différents satellites, intégrant aussi les données GPS disponibles.
- b) Réaliser ces analyses en séries temporelles sur les 30 dernières années sur l'île d'Hispaniola, dans les Caraïbes
- c) Confronter ces résultats aux modèles de géodynamiques des Caraïbes construits essentiellement à partir des points GPS, et les inclure dans ces modèles.

Le premier objectif de la thèse (1^{ère} année) sera de mettre en place un outil capable de récupérer, traiter les différentes données des missions satellites (ALOS1-2, Sentinel1A-B, ERS1-2, Envisat et RADARSAT) et de fusionner les informations, en fonction des modes d'acquisition (Stripmap dans le cas de ALOS, WideSwath dans le cas de Sentinel, etc). Cet outil sera basé sur une assimilation de données géodésiques pour la reconstruction d'un champ de déplacement en 3D. Un temps non négligeable sera également passé à inclure les séries temporelles et mesures de campagne GPS dans cette analyse.

Le second objectif de la thèse (2^{ème} année) sera de tester cette méthode développée au laboratoire de Géologie de l'ENS et de l'appliquer aux données disponibles sur les Caraïbes. Puis nous confronteront ces nouveaux résultats aux modèles et cartes de couplage le long des grandes failles caribéennes. Enfin ces résultats seront implémentés dans de nouveaux modèles. Ces résultats présentant la synthèse de plus de 30 ans de données permettront notamment de comprendre plus en détail le comportement des zones ayant récemment rompu (en particulier Haïti [Calais et al, 2010] et aux îles Caïman en 2020). Cette étude permettra également d'entrevoir les zones les plus à mêmes de rompre dans le futur où la déformation et les contraintes s'accumulent.

Ce sujet de doctorat s'intéresse donc à l'apport de l'interférométrie radar et de l'imagerie satellitaire en général pour élucider et améliorer les modèles géodynamiques et les déformations tectoniques associées. Cette étude devrait mettre en exergue la variabilité du couplage mécanique dans l'espace et dans le temps au sein des grandes failles de cette zone. La variabilité de ces comportements nous informant en partie sur les processus mécaniques qui pourrait déclencher de grands séismes.

Ce projet sera mené dans une équipe multidisciplinaire, mêlant des expertises en géophysique, géodésie et modélisation dynamique à l'échelle globale. Le projet permettra au doctorant de développer des compétences en analyses de données géophysiques multiples, ainsi qu'en traitement de données pour interpréter les déformations observées dans un cadre de tectonique globale. Il développera aussi des compétences en modélisation physique et numérique. L'objectif de ce projet est de construire un profil polyvalent entre spécialiste des données spatiales et expert en géodynamique. Les outils de base existant déjà au laboratoire, il s'agira pour le doctorant ou la doctorante de se former dans des conditions saines et solides avec une équipe de doctorants et de post-doctorants travaillant sur des thématiques similaires.

Références et liens :

- Ali S.T., Freed A.M., Calais E., Manaker D., McCann W.R. (2008). Coulomb stress evolution in Northeastern Caribbean over the past 250 years due to coseismic, postseismic and interseismic deformation, *Geophysical Journal International*, vol. 174, pp 904–918.
- Berardino P., Fornaro G., Lanari R. and Sansosti E. (2002) A new algorithm for surface deformation monitoring based on small baseline differential SAR interferograms in *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 40, pp 2375-2383.
- Bürgmann, R. (2018). The geophysics, geology and mechanics of slow fault slip. *Earth and Planetary Science Letters*, vol. 495, pp 112-134.
- Calais, E., A. Freed, G. Mattioli, F. Amelung, S. Jonsson, P. Jansma, S.-H. Hong, T. Dixon, C. Prépetit, and R. Momplaisir, (2010). Transpressional rupture of an unmapped fault during the 2010 Haiti earthquake, *Nature Geoscience*, vol. 3, pp. 1–6.
- Dragert H., Wang K. James S. T., (2001). A Silent Slip Event on the Deeper Cascadia Subduction Interface, *Science*, pp 1525-1528
- Ekström, G., M. Nettles, and A. M. Dziewonski, (2012) The global CMT project 2004-2010: Centroid-moment tensors for 13,017 earthquakes, *Phys. Earth Planet. Inter.*, 200-201, 1-9.
- E. Robert Engdahl, Rob van der Hilst, Buland R. (1998). Global teleseismic earthquake relocation with improved travel times and procedures for depth determination. *Bulletin of the Seismological Society of America* ; 88 (3), pp 722–743.
- Jolivet R., Lasserre C., Doin M.-P., Guillaso S., Peltzer G., Dailu R., Sun J., Shen Z.-K., and Xu X. (2012), Shallow creep on the Haiyuan Fault (Gansu, China) revealed by SAR Interferometry, *J. Geophys. Res.*, 117
- Manaker D. M., E. Calais, A. M. Freed, S. T. Ali, P. Przybylski, G. Mattioli, P. Jansma, C. Prépetit, J. B. De Chabaliér (2008). Interseismic Plate coupling and strain partitioning in the Northeastern Caribbean, *Geophysical Journal International*, vol. 174, pp 889–903,
- Peng, Z., Gombert, J. (2010) An integrated perspective of the continuum between earthquakes and slow-slip phenomena. *Nature Geosciences*, vol. 3, pp 599–607.
- Pousse Beltran, L., Pathier, E., Jouanne, F., Vassallo, R., Reinoza, C., Audemard, F., Doin, M. P., and Volat, M. (2016), Spatial and temporal variations in creep rate along the El Pilar fault at the Caribbean-South American plate boundary (Venezuela), from InSAR, *J. Geophys. Res. Solid Earth*, vol. 121, pp 8276– 8296,
- Reid H. F. (1911) *The Elastic-Rebound Theory of Earthquakes* (University of California Publications, *Bulletin of the Department of Geology*), 6, pp 413–444.
- Rogers R., Dragert H. (2003) Episodic Tremor and Slip on the Cascadia Subduction Zone : The Chatter of Silent Slip *Science*, 1942-1943.
- Simons M., and Rosen P.A (2015). Interferometric Synthetic Aperture Radar Geodesy. In: Gerald Schubert (editor-in-chief) *Treatise on Geophysics*, 2nd edition, vol. 3, pp 339-385.
- Symithe S., E. Calais, and J. B. Chabaliér (2015). Current block motions and strain accumulation on active faults in the Caribbean, *Journal of Geophysical Research (Solid Earth)*, vol. 120, pp 3748–3774.