



Positionnement GNSS statique et cinématique appliqué à l'étude des déformations tectoniques de la Terre

Static and kinematic GNSS positioning for the study of the tectonic deformations of the Earth

Pierre Briole¹

¹ *Laboratoire de Géologie (LG) CNRS : UMR8538, École Normale Supérieure de Paris, Université de recherche Paris Sciences Lettres (PSL), 45 Rue d'Ulm 75005 Paris - France*

Mots clés (en français et en anglais) :

Présentation en session plénière / Plenary session communication

Résumé / Abstract

Au cours des années 1960 l'accumulation de décennies d'observations variées permit aux physiciens du globe de s'accorder sur deux théories simples, l'une permettant de modéliser les mouvements des plaques tectoniques, l'autre permettant de modéliser la rupture sismique. Les développements de la géodésie allaient alors permettre d'apporter des validations supplémentaires et des raffinements à ces modèles. Les données de nivellement, extrêmement précises, furent fondamentales pour l'étude des séismes. Dès leur apparition, les mesures de géodésie spatiale basées sur le VLBI et le SLR apportèrent les premières mesures géodésiques directes des mouvements des plaques.

L'arrivée, à l'aube des années 1990, de deux nouveaux outils, le GPS et l'interférométrie radar à synthèse d'ouverture, constitua un tournant majeur qui allait donner peu à peu un rôle fondamental à la géodésie dans l'étude de la dynamique de la Terre de l'échelle globale à l'échelle locale. La précision et la densité croissante d'observations GPS (puis GNSS), la disponibilité de séries temporelles plus longues, couvrant désormais trois décennies, a permis de faire progresser considérablement les modèles initiaux. Le caractère non purement élastique de la croûte et du manteau sous-jacent est clairement démontré par de nombreux enregistrements de mouvements distribués dans le temps, comme par exemple les relaxations post-sismiques qui peuvent être observées pendant des années après les plus gros séismes.

Ces observations apportent des contraintes sur la rhéologie de l'intérieur de la Terre dans les zones où les séismes nucléent et par conséquent sur les temps nécessaires pour que des contraintes migrent dans le milieu d'une zone aux zones adjacentes qui pourraient à leur tour rompre parce que d'autres failles s'y trouvent. Il existe aussi des observations de plus en plus nombreuses montrant l'existence de glissements asismiques sur des failles, ceci à toutes les échelles, depuis des petites failles très superficielles jusqu'à de grandes interfaces de subduction. L'existence de ce type de phénomène fut envisagée dès le grand séisme du Chili de 1960 au cours duquel des enregistrements de sismomètres longue période et de gravimètres suggéraient que près de la moitié de l'énergie sismique pourraient avoir été libérée de manière « silencieuse » dans les minutes précédant le choc principal. Mais ce n'est qu'à partir de l'arrivée du GPS que ces phénomènes ont pu être observés de mieux en mieux, puis utilisés quantitativement pour modéliser les processus.

Les grands séismes sont souvent les plus destructeurs et ce sont aussi ceux qui génèrent les plus gros signaux. Ce sont ceux pour lesquels le GPS a permis de faire les plus grandes avancées théoriques ces dernières années. Cependant ces grands séismes sont rares et ne sont pas le reflet de la diversité de la déformation tectonique de la Terre qui possède aussi des zones de déformation plus faible, plus distribuée, et dans lesquelles, a priori, l'aléa

est moins élevé. C'est le cas de l'Europe et de la Méditerranée par exemple. Si dans ces régions l'aléa est plus faible, le risque sismique n'en est pas moins négligeable, en raison de la densité de population, de la possible existence d'infrastructures à risques, et de la possibilité d'événements rares mais très forts et très superficiels et potentiellement très meurtriers s'ils se produisent sous une ville. Les failles responsables de ces séismes peuvent être de dimensions assez modestes, typiquement 10 à 20 km. La surveillance géodésique de telles failles est un challenge à la fois pour l'interférométrie radar et pour le GNSS. Pour l'interférométrie radar parce que la rareté des événements impose de s'intéresser à de longues séries temporelles de données, bien plus longues que la durée de vie d'une mission spatiale. Pour le GNSS parce que la taille de grille nécessaire au sol est du kilomètre typiquement, donc à plusieurs ordres de grandeur de la densité des réseaux GNSS permanents existants ou envisageables dans n'importe quel pays.

En conséquence la capacité future des scientifiques et des pouvoirs publics à appréhender les déformations liées à des séismes modérés à forts, jusqu'à la magnitude 6, dépend de leur capacité à mettre en place des méthodes nouvelles permettant de mesurer non plus seulement des ensembles peu nombreux de points GNSS épars, mais des lignes continues d'observations par exemple en utilisant tous types de réseaux (réseaux de communications ferroviaires, routiers, ... ; réseaux électriques, informatiques, ...) continus

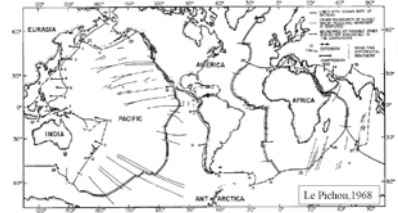
Positionnement GNSS statique et cinématique appliqué à l'étude des déformations tectoniques de la Terre

Pierre Briole - CNRS/ENS-PSL
28 mars 2018



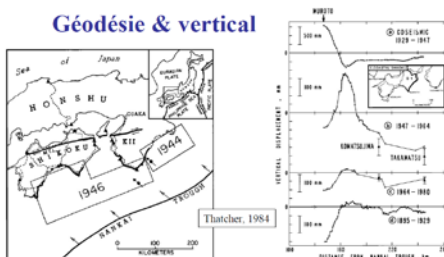
IS GEOLOCALISATION ET NAVIGATION
DANS L'ESPACE ET LE TEMPS

Plaques tectoniques



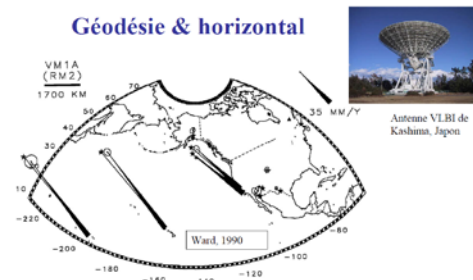
Au cours des années 1960 l'accumulation de décennies d'observations variées permit aux physiciens du globe de s'accorder sur deux théories simples, l'une permettant de modéliser les mouvements des plaques tectoniques, l'autre permettant de modéliser la rupture sismique.

Géodésie & vertical



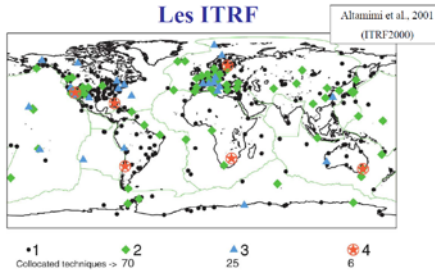
Les développements de la géodésie allaient alors permettre d'apporter des validations supplémentaires et des raffinements à ces modèles. Les données de nivellement, extrêmement précises, furent fondamentales pour l'étude des séismes.

Géodésie & horizontal



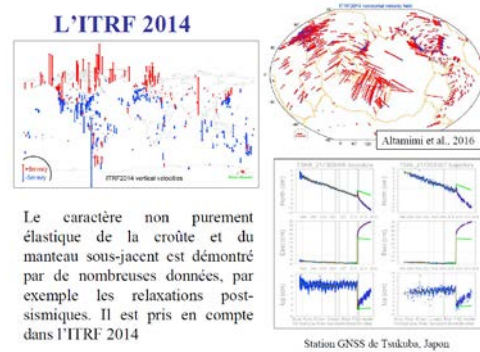
Dès leur apparition, les mesures de géodésie spatiale basées sur le VLBI et le SLR apportèrent les premières mesures géodésiques directes des mouvements des plaques.

Les ITRF



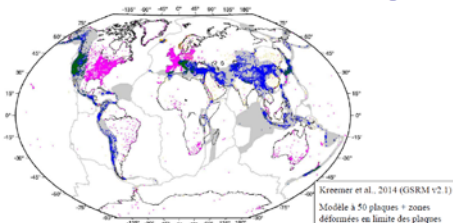
L'arrivée du GPS constitua un tournant majeur qui allait donner peu à peu un rôle fondamental à la géodésie dans l'étude de la dynamique de la Terre de l'échelle globale à l'échelle locale.

L'ITRF 2014



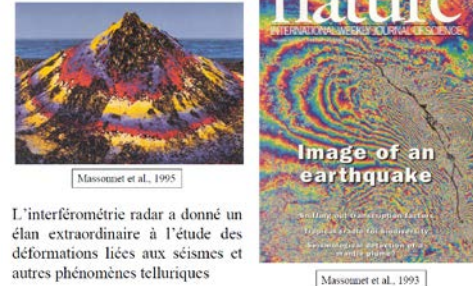
Le caractère non purement élastique de la croûte et du manteau sous-jacent est démontré par de nombreuses données, par exemple les relaxations post-sismiques. Il est pris en compte dans l'ITRF 2014

Les modèles de mouvement des plaques



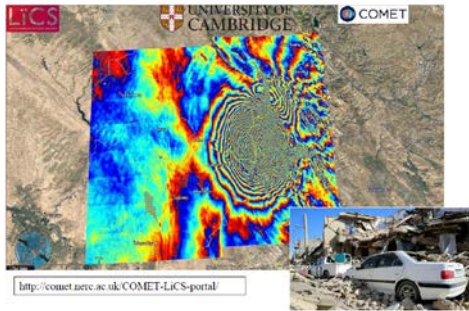
La précision et la densité croissante d'observations GPS (puis GNSS), la disponibilité de séries temporelles plus longues, couvrant désormais trois décennies, a permis de faire progresser considérablement les modèles initiaux.

Cartographie des déformations du sol par interférométrie radar



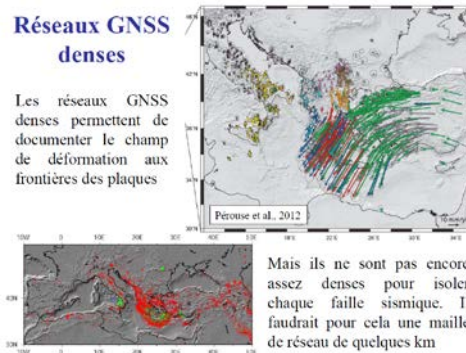
L'interférométrie radar a donné un élan extraordinaire à l'étude des déformations liées aux séismes et autres phénomènes telluriques

Séisme du Kurdistan 12/11/17 $M_w = 7.3$

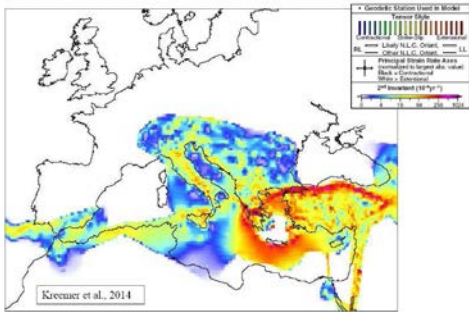


Réseaux GNSS denses

Les réseaux GNSS denses permettent de documenter le champ de déformation aux frontières des plaques



Déformation en Méditerranée d'après le GPS



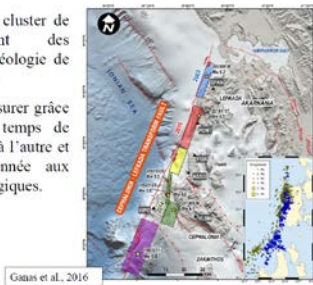
En verts, séismes méditerranéens étudiés par géodésie (nivellement, trilatération, GNSS, InSAR) depuis 1900



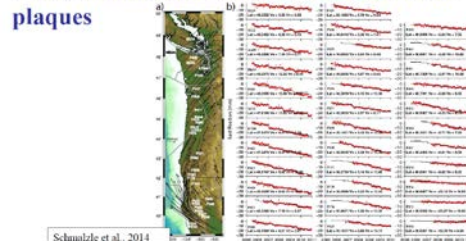
Les séismes (et déformations associées) peuvent se produire en cascade

Les observations de cluster de séismes apportent des contraintes sur la rhéologie de l'intérieur de la Terre.

Il est possible de mesurer grâce à la géodésie les temps de transfert d'une zone à l'autre et de relier cette donnée aux observations sismologiques.

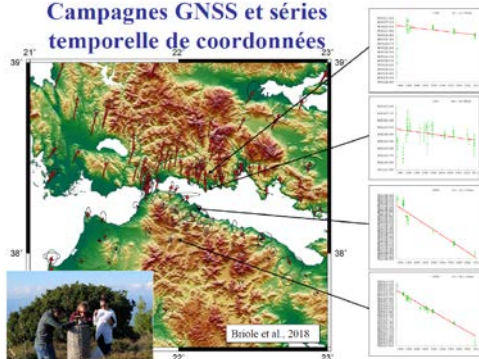


Mouvements transitoires aux frontières de plaques

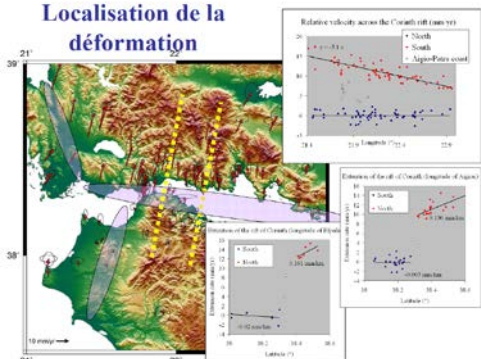


Il existe des observations de plus en plus nombreuses montrant l'existence de glissements aiséismiques sur des failles, ceci à toutes les échelles, depuis des petites failles très superficielles jusqu'à de grandes interfaces de subduction.

Campagnes GNSS et séries temporelle de coordonnées



Localisation de la déformation

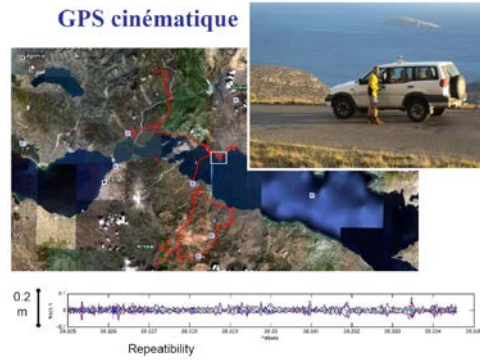


Combiner les avantages du GNSS et de l'InSAR pour le suivi des déformations de la Terre

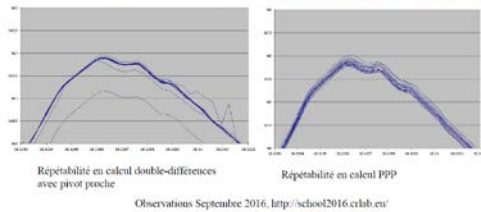
Il y a deux enjeux pour aller plus loin avec le GNSS et l'InSAR

- (1) Coté GNSS: Avoir des levés GNSS plus denses permettant de s'approcher localement de la densité de l'InSAR
- (2) Coté InSAR: Réussir à avoir des séries temporelles longues et cohérentes, au moins sur un certain nombre de pixels

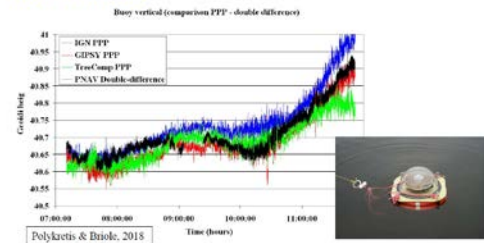
GPS cinématique



Il faut améliorer les logiciels de calculs GNSS cinématique PPP (+ hybridation)



Les logiciels PPP fonctionnent assez bien dans des cas simples (bouées) mais assez mal dans les applications réelles embarquées sur des véhicules



Pour un maillage d'observations GNSS de haute précision

Pour appréhender les déformations liées à des séismes modérés ($M < 6$), les scientifiques et les pouvoirs publics ont besoin d'observations très denses.

L'InSAR est efficace sur des temps courts, principalement pour le co-sismique. Sa perte de cohérence rapide (mois, ans) le rend inefficace pour mesurer l'accumulation séculaire de la déformation.

Les réseaux GNSS permanent et même ceux de campagnes n'ont pas la résolution spatiale suffisante pour imager les failles une à une.

Des réseaux cinématiques continus et maillés, utilisant de manière opportuniste les infrastructures existantes (ferroviaires, routiers, électriques, informatiques, ...) permettraient de résoudre une partie de ce problème.

Il faut des logiciels PPP performants