

Exemples d'utilisation des vitesses de plaque pour la détermination de canevas géodésiques et la mesure de déformations de surface
 Journée GEOPOS - 10 mars 2016

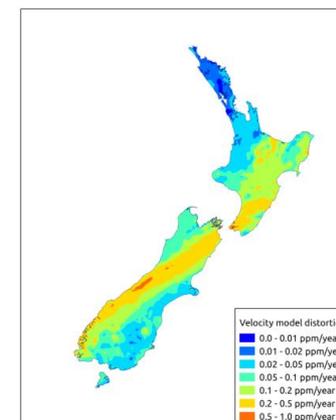
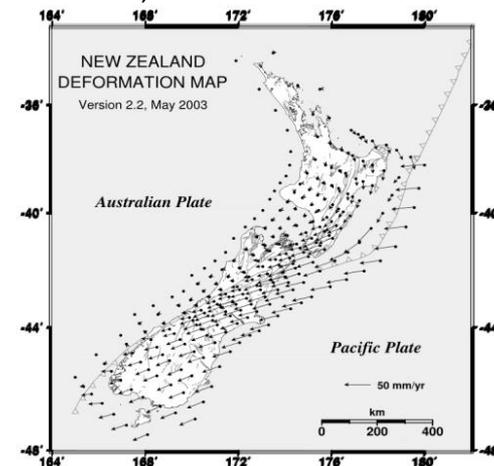
- Introduction : contextes industriels d'utilisation des vitesses de plaque
- Méthodes mise en œuvre
- Problématiques en jeu
- Utilisation des vitesses de plaque pour la détermination de canevas géodésiques dans deux cas de figure (Guinée, Irak)
- Utilisation des vitesses de plaque pour les mesures de déformations de surface au Brunei
- Conclusion

Introduction

- Contextes industriels d'utilisation impérative des vitesses de plaque, sous-plaque voire structure géologique / bassin(déplacements intra plaque: cisaillements, glissements et autres déformations locales)
 - Géoréférencement **précis** (redondance et géométrie équilibrée requises) à un **canevas d'appui non rigide** : zone d'intérêt très étendue, sur plusieurs plaques ou en limite de plaque
 - Géoréférencement dans des régions **peu pourvues en stations permanentes**
 - Campagnes réalisées sur de **longues échelles temporelles** (mesures continues ou épisodiques)
 - Utilisation de **services de calcul en ligne** (coordonnées fournies dans la dernière réalisation de l'ITRF à l'époque des mesures)

- Deux types de projets (Fugro Geoid)
 - Réalisation locale d'un référentiel géodésique à une **époque antérieure** à celle des mesures (géométrie du réseau différente)
 - Mesures de déformation de surface **en l'absence de stations de référence proches**

Déformation du canevas géodésique de Nouvelle Zélande (Beavan et al, 2001)



Méthodes mises en œuvre dans l'industrie

Méthodes mises en œuvre dans l'industrie

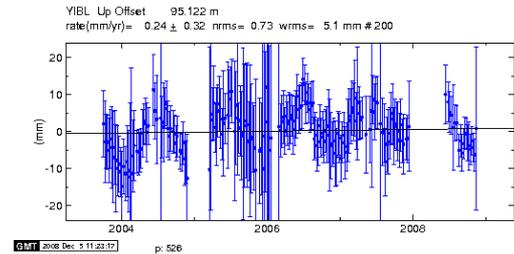
- Données utilisées
 - **Réseaux de stations permanentes** avec positions et vitesses fiables (stations stables hors oscillations et autres déformations modélisables : surcharges océaniques et hydrologiques)
 - **Positions à jours des sauts/glislements** consécutifs à des tremblements de terre corrigés pour un nombre suffisant de stations (stations renommées après chaque discontinuité, par ex BAKO.GPS, .1PS, 2PS etc...)
 - Le cas échéant, **paramètres de rotation de plaque connus** (modèles géologiques ou cinématiques)

- Séquence de calcul
 - **Calcul du réseau à l'époque des mesures** (utilisation des coordonnées et vitesses des stations d'appui [IGS, CocoNet etc.])
 - **Calcul des vitesses sur les sites d'intérêt** (points géodésiques ou de monitoring) par application des paramètres de rotation de plaque (calculés ou récupérés)
 - **Récupération des paramètres de rotation** de plaque de modèles disponibles (vecteur d'Euler : pole de rotation et vitesse angulaire)
 - Ou **calcul de ces paramètres** à partir de stations permanentes régionales judicieusement situées (>2½ ans, éloignées des limites de plaques et autres zones de déformation, équilibrées au plan géométrique)
 - **Contrôle de validité des vitesses calculées** : magnitude des vitesses résiduelles (par rapport à leur incertitude) des stations permanentes utilisées pour le calcul du modèle de plaque, variation des coordonnées de points présumés stables après applications des vitesses)

Problématiques en jeu

■ Canevas d'appui insuffisant

- **Nombre et géométrie** des stations permanentes régionales insuffisants (idéalement, plusieurs stations permanentes locales)
- **Stations trop récentes** (temporaires: stabilité non prouvée, vitesse non fiable)
- **Stations instables** (affectées de déformations non modélisables)
- **Précision insuffisante des coordonnées utilisées** : typiquement réseaux de CORS nationaux ou sauts de positions consécutifs à des tremblements de terre ou autres déformation (subsidence, tassement de la structure support, failles actives ou réactivées...)



■ Limites des modèles de vitesses de plaque

- Pole de rotation et vitesse angulaire publiés **plus ou moins précis selon les régions** (NUVEL 1A, ITRF2000)
- **Mouvements intra plaque non modélisés** (hors Europe et autres zones pourvues de nombreuses CORS) ou résultats difficilement accessibles à l'industrie (nombreuses études universitaires pouvant recouvrir partiellement la zone d'intérêt [Delft, ITB])
- Calcul de vitesses à partir d'un **canevas insuffisant** (nombre, fiabilité, situation et géométrie des stations)
- Même avec un modèle de vitesse précis, en l'absence de station permanente locale, les coordonnées (position et hauteur) calculées sont biaisées par l'imprécision du délai troposphérique (stations de référence trop éloignées, modèles insuffisamment précis [VMF1])
- Que l'on utilise un modèle existant ou issu d'un calcul, le contrôle de validité des vitesses utilisées est difficile (longues durées d'observation ou plusieurs campagnes d'observations) voire impossible (canevas géodésique)

■ Modèles géologiques

- **NNR-NUVEL-1A** : modèle géologique global dont les vitesses ont été estimées à partir de la variation des anomalies magnétiques au fond des océans sur 3.16 millions d'années (et pas à la vitesse de déplacement de l'écorce terrestre actuelle)
- C'est le modèle adopté par l'IERS pour l'alignement des différentes réalisations de l'ITRS (*rotation et rotation rate [i]*), **et à ce jour le seul modèle disponible par défaut intégré à Bernese (v5.2)**
- **NNR-MORVEL** [DeMets et al, 2010] et **NNR-MORVEL56** [Argus et al, 2011] semblent plus concordants avec les modèles cinématiques (vitesses mesurées sur les CORS [Altamini et al, 2012])

■ Modèles cinématiques

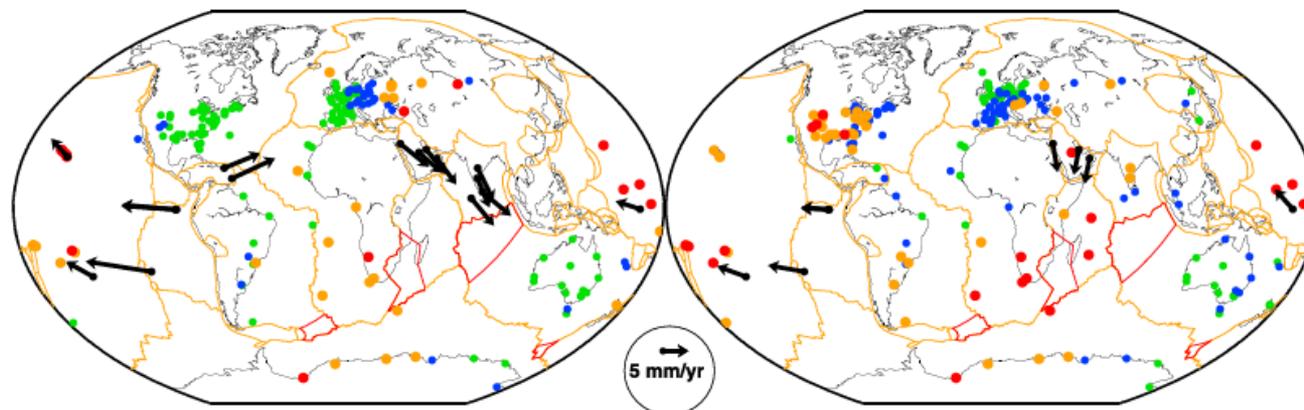
- Divers modèles globaux (**ITRF2000** [Altamini et al, 2002], **PB2002** [Bird, 2003], **APKIM2005** [Drewes et al, 2009]), **ITRF2005** [Altamini et al, 2007], **ITRF2008** [Altamini et al, 2012] ont été développés par diverses institutions, mais:
 - Ils sont difficilement accessibles en dehors de la communauté scientifique des géodésiens (par exemple ITRF2008-PMM [Altamini et al, 2012], n'est pas intégré dans Bernese alors que celui-ci est le logiciel le plus utilisé en géodésie, en particulier par les instituts géographiques, Gamit-GlobK étant plus utilisé en géophysique, notamment en géodynamique)
 - Il ne semble pas que l'un d'entre eux soit officiellement recommandé par l'IERS (stage de recherche)
 - Il semble qu'ils soient encore perfectibles (plaques non rigides, limites de plaques et zones de déformation)
- Modèles régionaux (issus de la recherche académique)
 - Ils ont encore moins de statut officiel que les modèles globaux
 - Ils sont encore plus difficilement accessibles en dehors d'une petite communauté
 - Selon les cas, ils ne sont pas disponibles pour l'industrie (droits, coûts, délais...)
 - Même si ces conditions étaient remplies, ils ont été déterminés dans un contexte particulier (statut mal connu, en tout cas non officiel), et ils sont pas toujours très documentés (pas d'accès aux données, par exemple les séries temporelles des stations temporaires)

[i]: ITRF1992, 1994, 1996, 1997 and 2000 alignés sur NNR Nuvel 1A, puis ITRF2005 aligné sur ITRF2000, et ITRF2008 aligné sur ITRF2005 (IERS TN#36)

■ Quelle méthode choisir ?

- **Pas de consensus sur un modèle particulier semble-t-il** (UNAVCO en propose un certain nombre, l'AIUB n'a pas jugé utile d'intégrer dans Bernese (v5.2) un modèle autre que NNR NUVEL 1A, et si GlobK (v10.6) dispose de plusieurs modèles, dont NNR Nuvel 1A, ITRF2000, ITRF2005 et ITRF2008 [deux versions successives], la documentation n'en parle pas, les rares informations relatives à ces modèles n'étant accessibles que dans les lignes de code en Fortran)
- Il semble que la plupart des géophysiciens / géodésiens (utilisateurs de Gamit-GlobK ou Plate Motion Calculator UNAVCO) **calculent leurs propres paramètres** (pole d'Euler et rotation angulaire) à partir d'un réseau de CORS ad hoc (temporaire)
- Utilisation d'un **outil de calcul de vitesses** (UNAVCO, DGFI, Université du Wisconsin etc...) avec l'un des modèles disponibles par défaut (NUVEL1A, ITRF2000, APKIM2005-IGN ou DGFI, NNR-NORVEL56 etc.) ou avec des paramètres de rotation régionaux spécifiques (issus de la recherche académique)
- **Calcul des paramètres de rotation** (GlobK) à partir d'un sous-réseau de stations permanentes ou temporaires (répartition actuelle très déséquilibrée)

Différences des vitesses brutes entre ITRF2008 et NNR Nuvel 1A (à gauche) ou Morvel56 (à droite) [Altamini et al, 2012]



Exemples d'utilisation des vitesses de plaque

Exemples d'utilisation des vitesses de plaque

- **Détermination de canevas géodésiques à une époque de référence antérieure**
 - **Nombreux cas de figure** en Afrique, Moyen-Orient, Caraïbes (Sainte Lucie), Asie centrale (Tadjikistan et Kirghizstan), Asie du sud (Sri Lanka)
 - Exemple particulier de **Simandou, Guinée**
 - Exemple particulier de **Majnoon, Irak**
 - Homogénéité avec données précédentes (réseau d'appui, cartographie LiDAR)
 - Champ de vitesses imprécis susceptible de compliquer l'extension ultérieure du canevas géodésique (pipelines)
 - Homogénéité avec canevas existants
 - Réalisations de canevas à différentes époques

- **Mesures de déformation de surface en l'absence de références stables à proximité**
 - **Nombreux cas de figure** au Moyen-Orient (Oman), Asie centrale (Kazakhstan), golfe Arabo-Persique, (Qatar), Bornéo, détroit de Macassar (Indonésie)
 - Exemple particulier de **Mer de Chine Méridionale au large de Bornéo (Brunei)**
 - Pas de station de référence à proximité
 - Zone d'intérêt en bordure de plaque
 - Déformations lentes, grande précision requise (mm), donc canevas d'appui nécessairement équilibré

Exemple de Simandou (Guinée)

Exemple de canevas géodésique : Guinée

Détails du projet

- Client : Rio Tinto
- Durée : Juin 2012 – Octobre 2013
- Localisation : Guinée

Contexte

Simandou devrait être le plus grand projet d'infrastructure intégrée d'extraction et de transport de minerai de fer jamais développé en Afrique et comprendra une mine, une ligne de chemin de fer Trans-Guinéenne d'environ 700 km, et un port en eau profonde.

Programme de travail

Définir la géodésie complète de l'ensemble du projet (mine, ligne de chemin de fer, port)

- Construction de 212 piliers, bornes et repères géodésiques scellés (affleurements rocheux)
- GPS, nivellement et gravimétrie terrestre
- Détermination des positions et altitudes orthométriques précises
- Modélisation du géoïde d'un corridor de 700x30 km

Difficultés

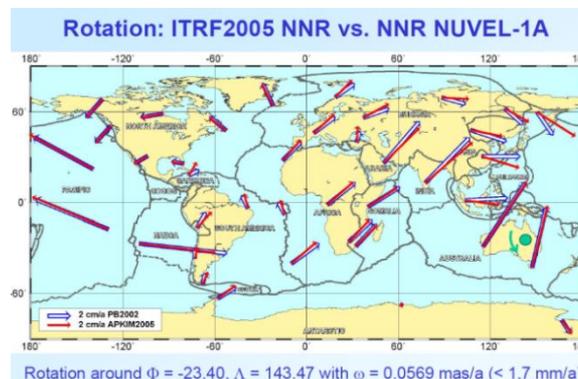
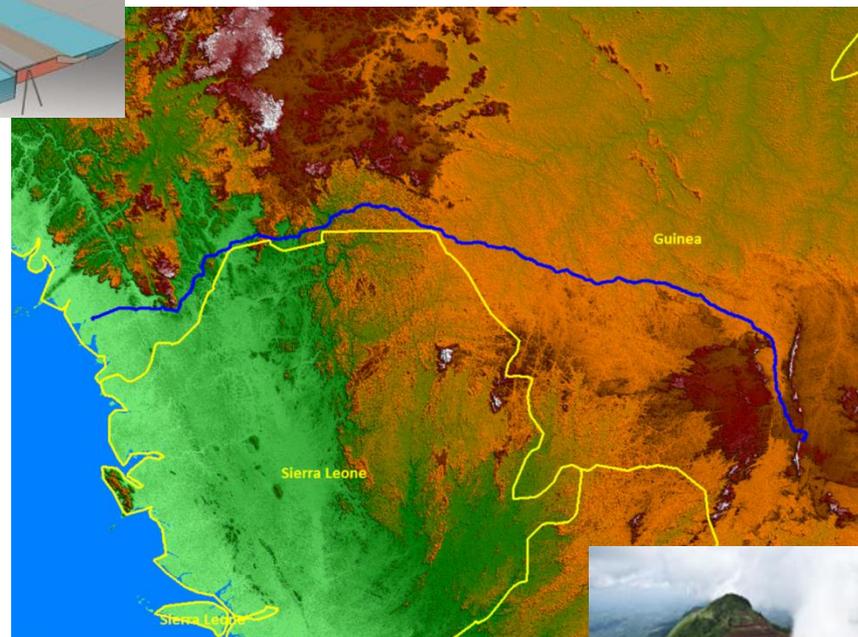
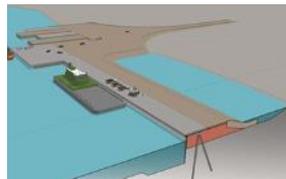
- **Géographie** : étendue du projet, terrain montagneux, pentes raides, forêts denses, réseau hydrologique dense et marécages
- **Logistique** : pas d'hébergement/restauration et centres de ravitaillement fiables, pénuries de carburant fréquentes, zones de pandémies, gestion du personnel (8 expatriés, 123 personnels locaux)
- **Technique** : Réseau géodésique précis, rattachements géodésiques précis, nivellement géométrique de précision, calcul d'altitudes orthométriques précises (réseau ajusté en côtes géopotentielles), modèle de géoïde précis



Exemple de canevas géodésique : Guinée

■ Contraintes

- Chemin de fer Trans-Guinéen avec nombreux ouvrages d'art (tunnels, viaducs), piliers et bornes géodésiques répartis sur 700 km
- Différentes phases réparties sur plusieurs années
- Polygone d'appui à référencer dans une réalisation de l'ITRS à une époque antérieure (homogénéité avec réseau d'appui incomplet, mosaïque ortho photographique et MNT LiDAR)
- Exigences de précision élevées (polygone d'appui de voie ferrée)
- Modèle de vitesse questionnable a priori (peu de CORS et enregistrements intermittents)



ITRF2005 vs NNR Nuvel 1A
(Drewes et al, DGFI, 2007)

Exemple de canevas géodésique : Guinée

- Rattachement géodésique
 - Calcul des vitesses des piliers de 1er ordre
 - A l'aide de NNR Nuvel 1A
 - A l'aide d'un calcul GlobK à partir de 6 stations IGS de la plaque nubienne
 - Transformation depuis l'époque des mesures vers l'époque de référence
 - Calcul par adaptation géodésique à l'époque de référence 2011.0 (plaque supposée rigide)
 - Choix de l'un ou l'autre modèle non significatif dans ce cas (mais pas l'utilisation d'une similitude spatiale)

African (Nubian) Plate Euler Rotation Components				
	ω_x (°/Myr)	ω_y (°/Myr)	ω_z (°/Myr)	ω (°/Myr)
Nuvel-NNR	0.051	-0.178	0.225	0.291
6 IGS stations	0.035	-0.171	0.208	0.271

Station P09 Velocity Components			
	Vx (m/yr)	Vy (m/yr)	Vz (m/yr)
Nuvel-NNR	0.0012	0.0233	0.0181
6 IGS stations	0.0010	0.0217	0.0177

Station P09 Coordinates (ITRF08 Epoch 2011.0)			
	N (m)	E (m)	Hell (m)
IERS (Nuvel-NR)	-.4006	-.7471	-.615
6 IGS stations	-.4015	-.7506	-.615
Geodetic fit	-.4417	-.8003	-.617

Exemple de Majnoon (Irak)

Exemple de canevas géodésique : Irak

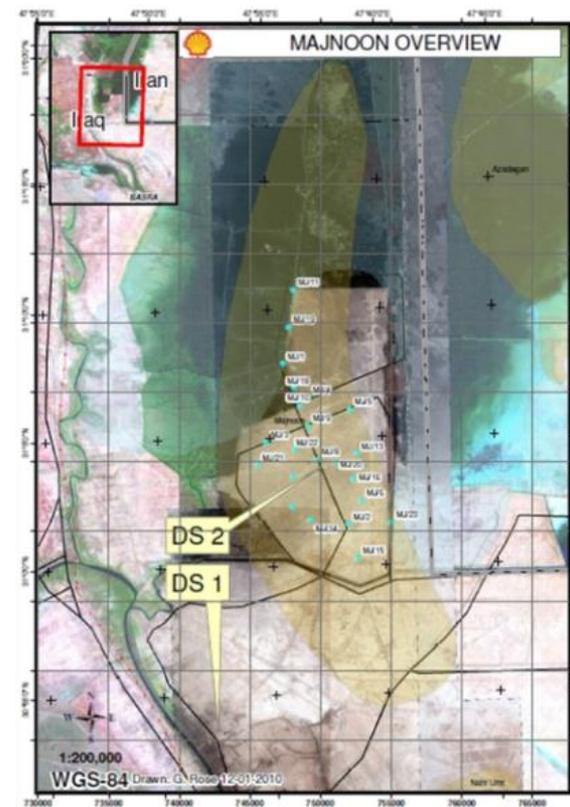
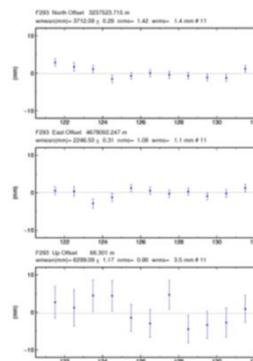
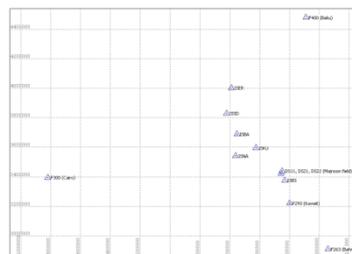
■ Détails du projet

- Client : SHELL
- Période : 2010
- Localisation: Irak (Majnoon)

■ Programme de travail

Le canevas récemment observé (2010) devait être déterminé dans le référentiel IGRS (cohérent avec l'ITRF2000 Epoque 97.0).

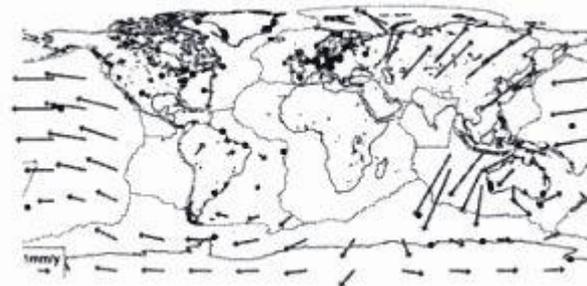
- Calcul de 13 points géodésiques locaux (points de 1er ordre observés 10j et CORS NOAA Irak) en ITRF2005 à l'époque moyenne des mesures puis en IGRS.
- Analyse de la cohérence du réseau de CORS



Champ de Majnoon
(Shell, 2010)

Exemple de canevas géodésique : Irak

- Problématique liée au modèle de vitesse de plaque
 - Les coordonnées IGRS des CORS NOAA locales **n'ont pas pu être utilisées pour le géoréférencement** car:
 - Leurs coordonnées avaient été extrapolées de 2008-2010 (époque de leur détermination) à 1997 en utilisant NNR-Nuvel-1a
 - Leur stabilité n'était pas prouvée (séries temporelles trop courtes)
 - Leur géométrie vis à vis de la zone d'intérêt était déséquilibrée
 - L'utilisation d'un modèle de vitesse inapproprié aurait entraîné des incohérences significatives dans les coordonnées référencées en ITRF2000 époque 97.0 **dès lors que le réseau aurait été étendu en utilisant des stations permanentes IGS** (par exemple, polygonale lors de la construction de pipelines)



Différences de vitesses des modèles
ITRF2000 et NNR-NUVEL-1A (Altamini et al, 2004) :
pas de données ITRF2000 sur la plaque Arabe

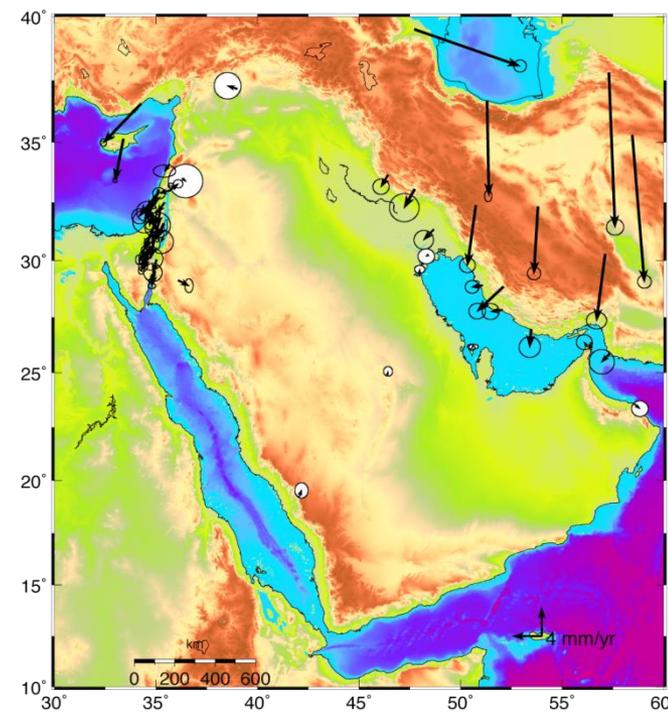
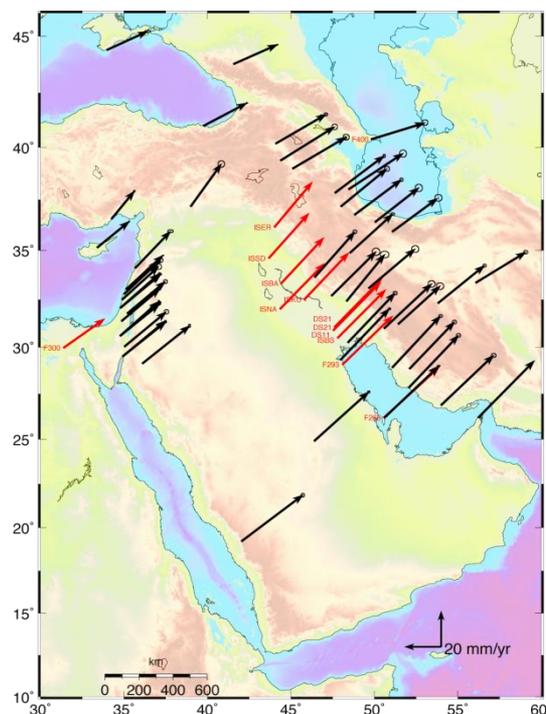
Exemple de canevas géodésique : Irak

■ Séquence de calcul utilisée

- Transformation depuis ITRF2005 vers ITRF2000 des coordonnées à l'époque des mesures avec les paramètres de transformation publics
- Détermination des paramètres de rotation de la plaque arabe (pole d'Euler et vitesse angulaire) au moyen de 5 stations
- Application du modèle de vitesses calculé aux coordonnées des points géodésiques locaux (1^{er} ordre et CORS NOAA Irak) pour passer de l'époque des mesures à l'époque de référence 1997.0

Vitesses des stations
relativement à:

- L'ITRF2005
- La plaque arabe



Exemple de canevas géodésique : Irak

■ Analyse des résultats

- Ecart significatifs entre les deux jeux de coordonnées en IGRF: **le mouvement vers le N de la plaque arabe par rapport à l'Eurasie tel que fourni par le modèle cinématique calculé apparaît plus lent d'environ 10 mm/an par rapport au modèle géologique NNR Nuvel 1A** (coordonnées originales décalées d'environ 7 cm vers le sud).
- Cohérence pluri centimétrique des CORS Irak en planimétrie, un peu moins en altimétrie: écarts de 6.8 à 7.5 cm en N, 0.2 à 0.7 cm en E, et -2.6 à +2.4 cm en hauteur entre les deux jeux (EMQ des résidus de l'adaptation géodésique de 0.9 cm en planimétrie et 3.4 cm en altimétrie); **le choix de l'un ou l'autre modèle affecte donc clairement les coordonnées des CORS**

Comparaison entre NNR
Nuvel 1A
et le modèle
cinématique GlobK
calculé

Velocities Comparison in ITRF2000									
SITE	IGS/GlobK	NOAA	Delta	IGS/GlobK	NOAA	Delta	IGS/GlobK	NOAA	Delta
	Vx (mm/yr)	Vx (mm/yr)	Vx (mm/yr)	Vy (mm/yr)	Vy (mm/yr)	Vy (mm/yr)	Vz (mm/yr)	Vz (mm/yr)	Vz (mm/yr)
ISBA	-0.0261	-0.0271	-0.0010	0.0063	0.0024	-0.0039	0.0218	0.0269	0.0051
ISBS	-0.0285	-0.0293	-0.0008	0.0071	0.0034	-0.0037	0.0238	0.0291	0.0053
ISER	-0.0250	-0.0262	-0.0012	0.0040	0.0000	-0.0040	0.0209	0.0258	0.0049
ISKU	-0.0270	-0.0279	-0.0009	0.0064	0.0025	-0.0039	0.0225	0.0277	0.0052
ISNA	-0.0265	-0.0274	-0.0009	0.0075	0.0036	-0.0039	0.0221	0.0273	0.0052
ISSD	-0.0253	-0.0265	-0.0012	0.0055	0.0016	-0.0039	0.0212	0.0262	0.0050

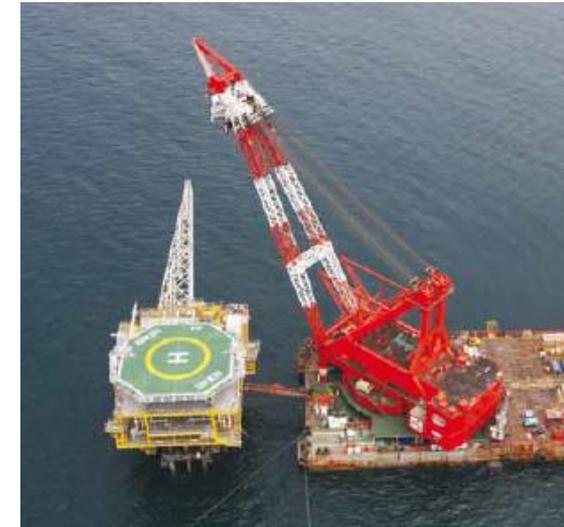
Displacement from Epoch 1997.0 to Epoch 2010.34									
SITE	IGS/GlobK	NOAA	Delta	IGS/GlobK	NOAA	Delta	IGS/GlobK	NOAA	Delta
	DX (m)	DX (m)	DX (m)	DY (m)	DY (m)	DY (m)	DZ (m)	DZ (m)	DZ (m)
ISBA	-0.3482	-0.3615	-0.0133	0.0838	0.0320	-0.0518	0.2907	0.3588	0.0682
ISBS	-0.3806	-0.3909	-0.0103	0.0943	0.0454	-0.0490	0.3178	0.3882	0.0704
ISER	-0.3334	-0.3495	-0.0161	0.0539	0.0000	-0.0539	0.2787	0.3442	0.0655
ISKU	-0.3602	-0.3722	-0.0120	0.0847	0.0334	-0.0514	0.3007	0.3695	0.0688
ISNA	-0.3530	-0.3655	-0.0125	0.0994	0.0480	-0.0514	0.2945	0.3642	0.0696
ISSD	-0.3380	-0.3535	-0.0155	0.0739	0.0213	-0.0526	0.2823	0.3495	0.0672

Exemple de Mer de Chine Méridionale (Brunei)

Exemple de mesures de déformation de surface : Brunei

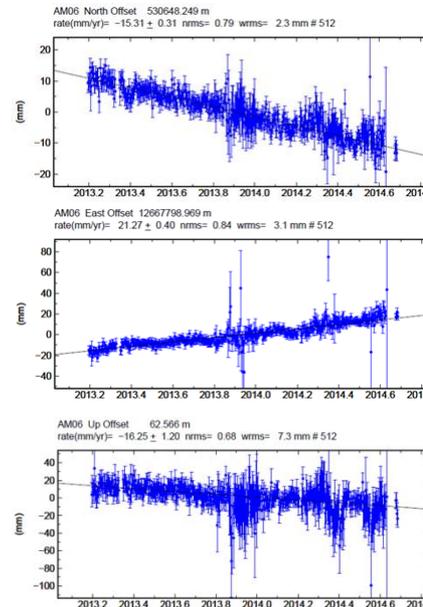
■ Contexte

- Le gestionnaire du champ attendait une **légère subsidence** sur les différentes plateformes du champ, associée ou non à des mouvements horizontaux
- **Les solutions standard ne décelaient aucun mouvement clair** (Trimble Integrity Monitoring et post-traitement) quelque soit l'intervalle de temps considéré (trimestriel, biannuel, annuel)



Travaux

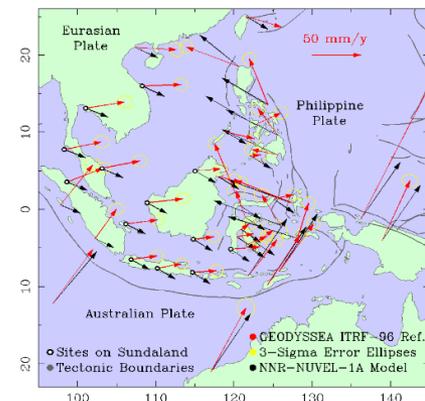
- Réalisation d'un référentiel à l'époque zéro (9 stations de monitoring)
- Post-traitement d'observations GPS continues (**18+ mois** pour les stations de monitoring, **3 ans** pour calculer les paramètres de rotation de la sous plaque)



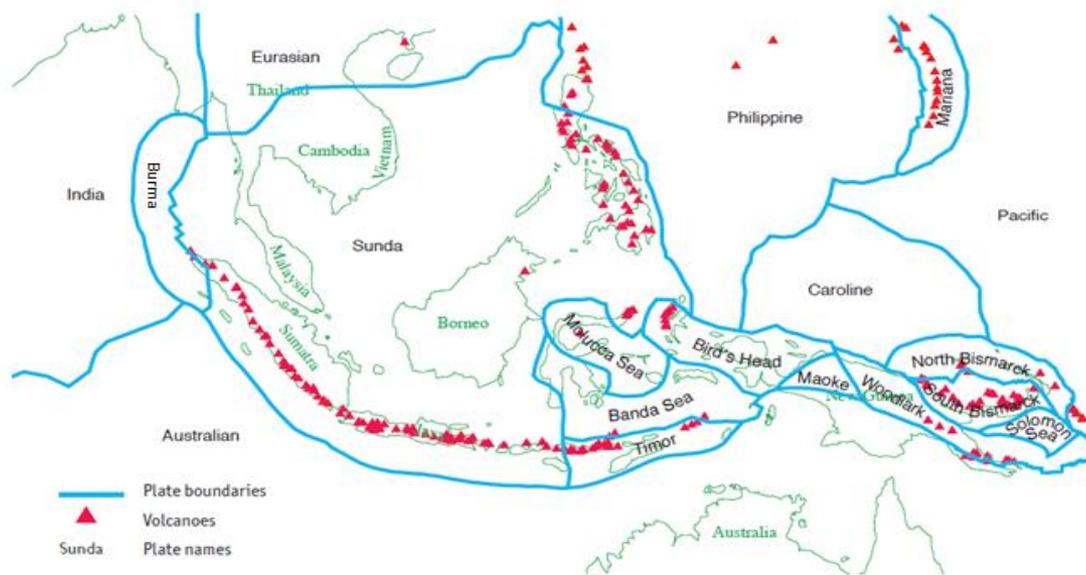
Exemple de mesures de déformation de surface : Brunei

■ Problématiques

- **Stations de référence instables** (structures)
- Activités **perturbant la réception des signaux GPS** (forage, construction...)
- **Mouvement de la sous-plaque Sunda mal connu** : D'après [Tregoning, 1996], Nuvel 1A ne contient pas de données sur l'arc de Sunda; pas de vitesse de subduction non plus utilisée sur la fosse de Java (Sunda trench), différences relevées sur CORS KAYA de 5mm/a en VN et -10 mm/an en VE (campagnes entre 1994 et 2003)



Comparaison de NNR Nuvel 1A et Geodyssea ITRF96, Michel et al, 2001

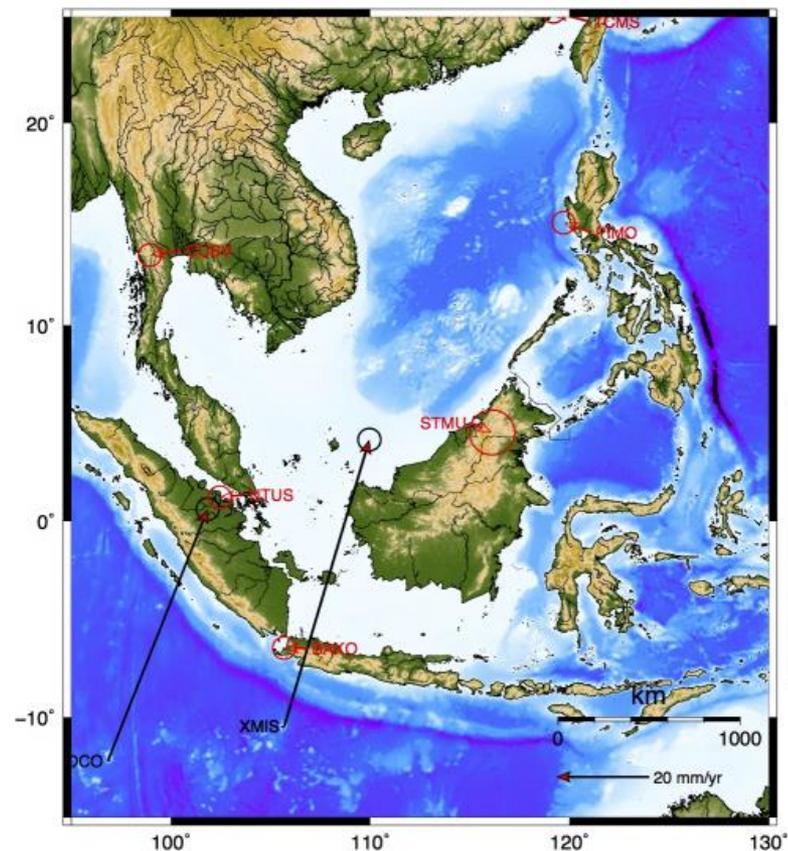
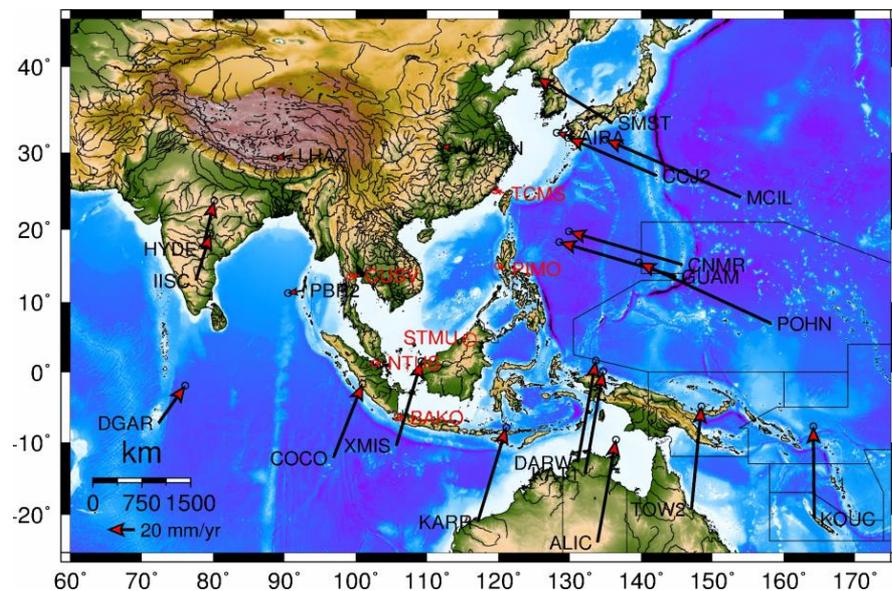


NOAA, 2010

Exemple de mesures de déformation de surface : Brunei

- Calcul de paramètres de rotation
 - 6 stations IGS, 3 ans d'observations GPS

Vitesses des stations relativement à la sous-plaque Sunda

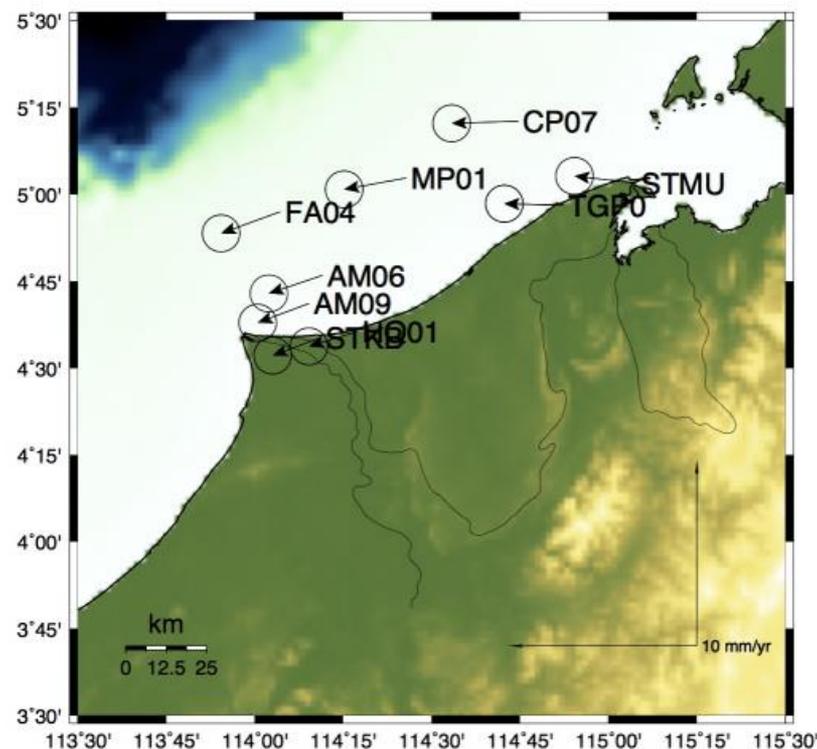
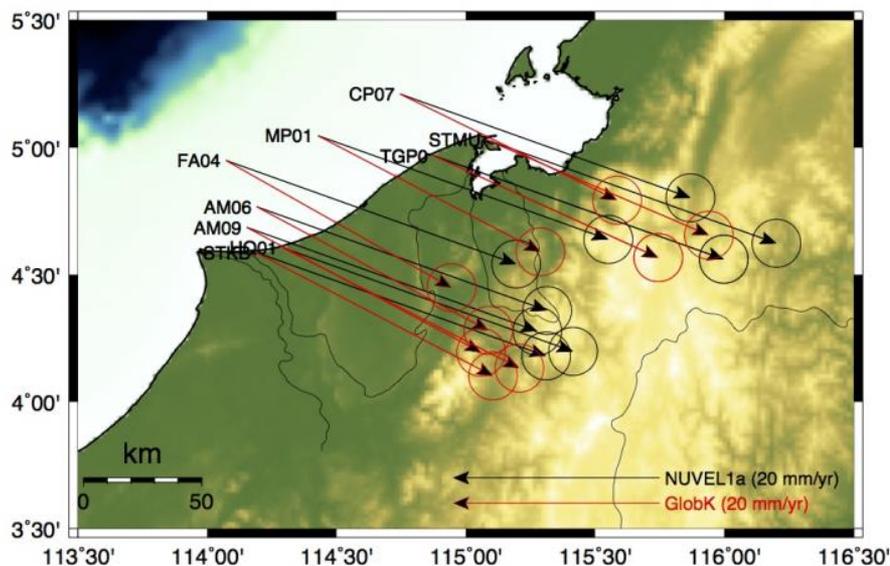


Exemple de mesures de déformation de surface : Brunei

- Comparaison des vitesses issues du modèle géologique NNR Nuvel 1A et du modèle cinématique calculé pour Sunda (6 stations IGS, 3 ans)

Différences entre les vitesses des modèles Sunda et Nuvel 1A

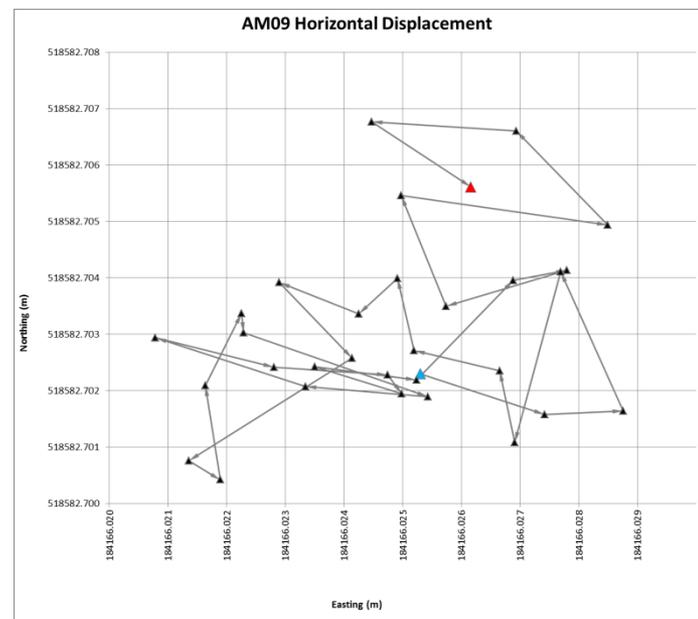
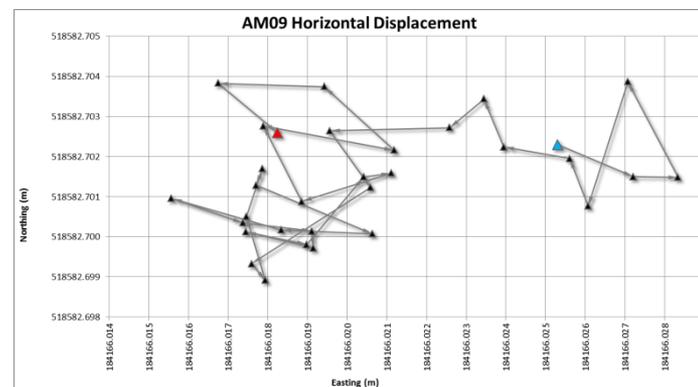
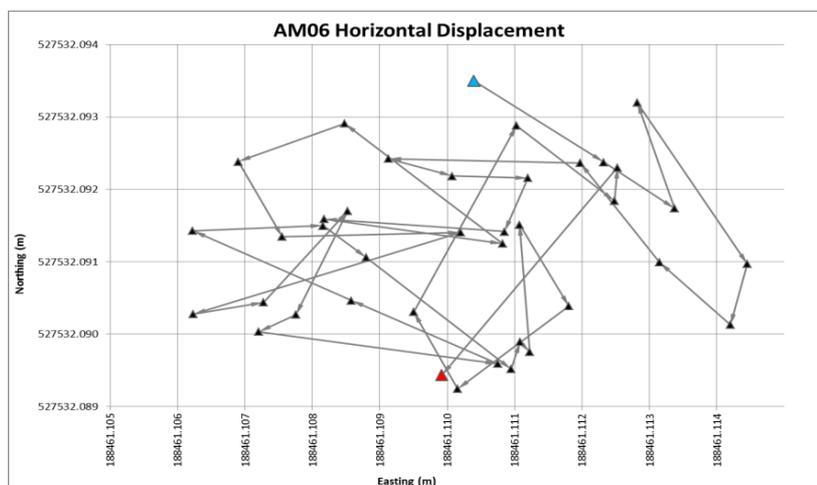
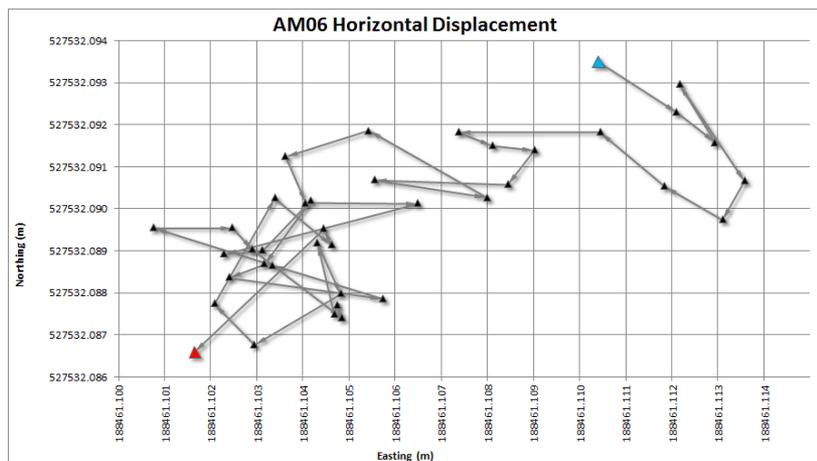
Vitesses des stations selon Nuvel 1A et Sunda



Exemple de mesures de déformation de surface : Brunei

■ Résultats

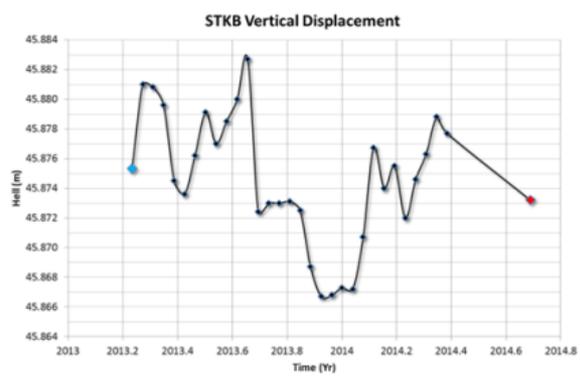
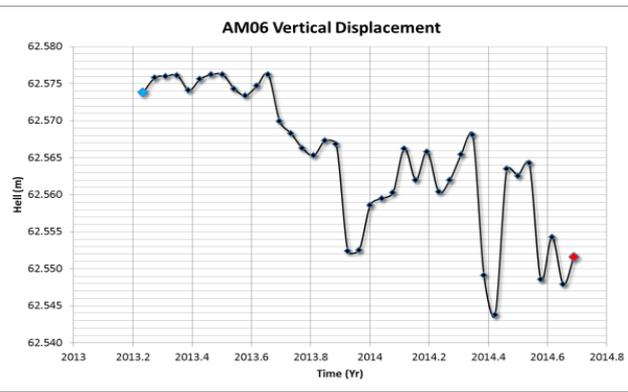
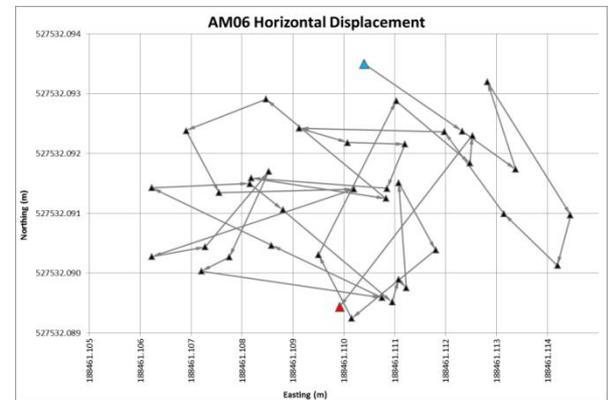
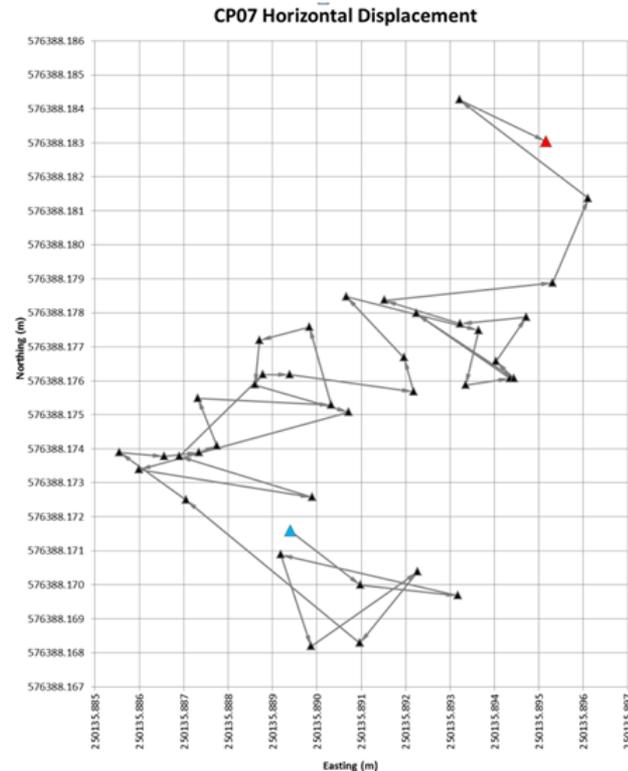
- Déplacements apparents de plateformes (intervalle 14j) avec NNR Nuvel 1A et GlobK/Sunda (6 stations x 3 ans), respectivement



Exemple de mesures de déformation de surface : Brunei

■ Analyse des résultats

- L'erreur résiduelle du modèle cinématique calculé est suffisamment faible pour qu'aucune tendance significative n'apparaisse sur les déplacements des 10 stations de monitoring
- La précision du modèle calculé fournie par GlobK est $< 1\text{mm/an}$
- La précision relative des coordonnées à leur époque de mesure (moyennes sur 14j) fournie par GlobK est $< 1\text{mm}$
- La précision de la mesure des déformations de surface est $< 2\text{mm}$ en planimétrie et altimétrie



■ Résultats

- **Utilisation des vitesses de plaque indispensable** pour les projets d'envergure ou mal situés (canevas géodésiques et stations de mesures de déformation de surface)
- **Précision des coordonnées** (à jour des déformations post-sismiques) **et des vitesses** (calculées à partir de durées suffisantes) fondamentales
- **Utilisation de paramètres de rotation de plaque précis** dès lors que le géoréférencement doit être effectué dans un référentiel réalisé à une époque antérieure

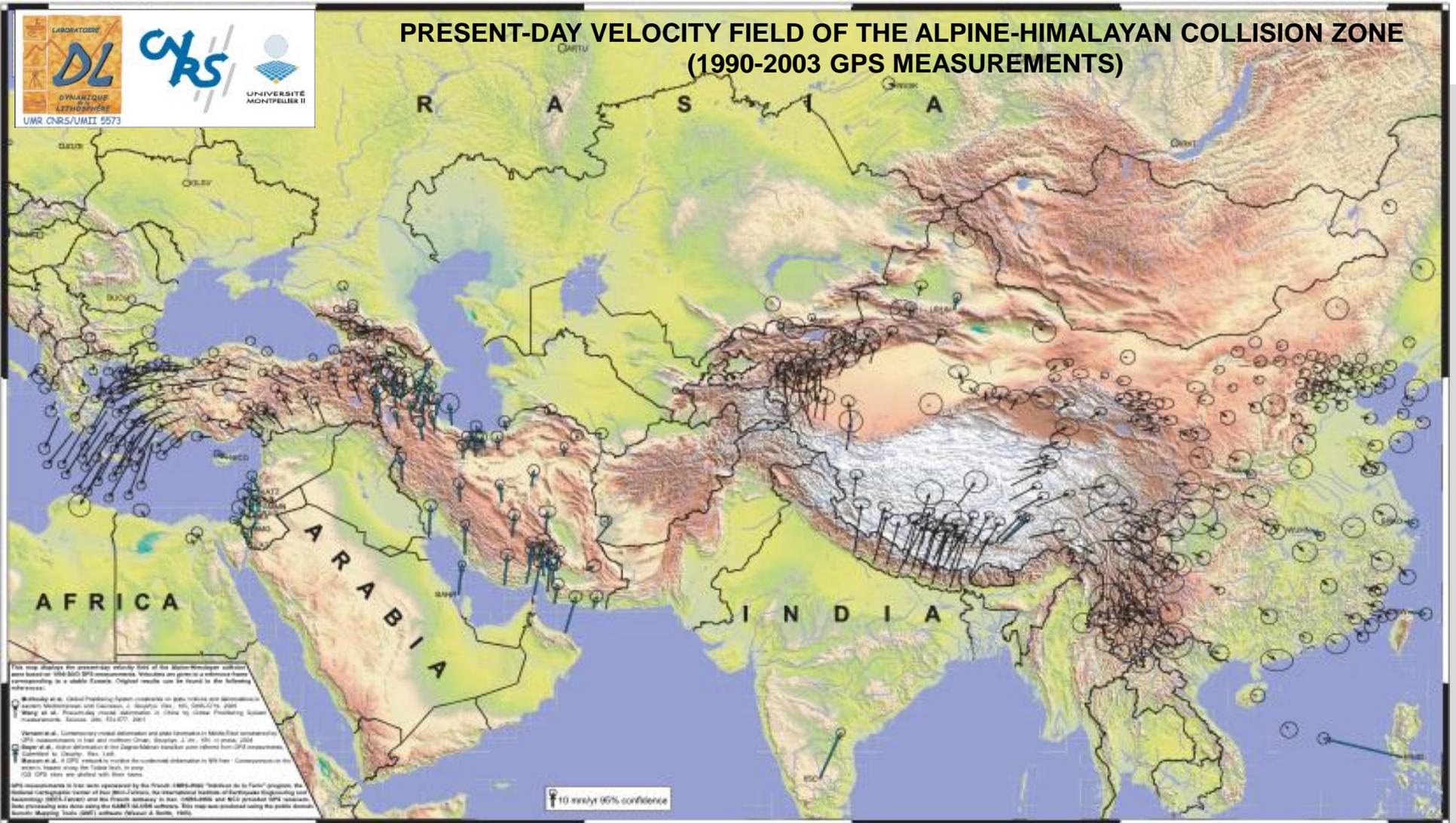
■ Difficultés

- Dans certaines régions du monde, **densité insuffisante des stations permanentes**, et **modélisation imparfaite des vitesses de plaque**, sous plaques et autres structures géologiques
- En l'absence de stations permanentes locales, modélisation du délai atmosphérique imparfaite (scintillement ionosphérique, fraction de vapeur d'eau dans la troposphère)

■ Perspectives

- **Densification des stations permanentes** ou temporaires pour l'amélioration des modèles
- Amélioration de la précision des paramètres de rotations de plaques, voire des sous-plaques et autres structures géologiques (deltas...)
- Amélioration de la résolution spatio-temporelle des modèles météorologiques (troposphère) au moyen de capteurs à terre ou embarqués (images Meris/Modis...)

PRESENT-DAY VELOCITY FIELD OF THE ALPINE-HIMALAYAN COLLISION ZONE (1990-2003 GPS MEASUREMENTS)



Vernant / CNRS - Université de Montpellier, 2004

Merci