

Mise en évidence par GPS de la déformation des failles actives lentes : exemple de la faille de la Moyenne-Durance (SE France)

J.M. Noguét (1) - S. Baize (2)



(1) CNRS-Géosciences Azur, 250, rue Albert Einstein, Sophia Antipolis 06560 Valbonne F
(2) IRSN-BERSSIN, BP 17, 92262 Fontenay-aux-Roses Cedex F

Poster présenté en septembre 2006 au colloque WEGENER à Nice

Un séisme correspond au relâchement brutal d'une déformation de la partie superficielle de la croûte terrestre au niveau d'une faille active. La connaissance de la déformation accumulée peut donner accès à la magnitude et la récurrence des séismes associés à la faille. C'est l'objet de la géodésie qui permet la mesure de l'évolution avec le temps des distances entre plusieurs points. Cette mesure concerne des périodes de plusieurs années, ce qui en fait une approche totalement complémentaire de la sismologie (observations sur quelques secondes) et de la géologie (observations sur des milliers d'années). Les récentes améliorations du système GPS (satellites, récepteurs, logiciels de calcul, réseaux de référence) permettent aujourd'hui de reconnaître des mouvements relatifs inférieurs au mm/a sur des distances de 10 à 100 kilomètres.

La participation de l'IRSN au réseau GPS national et sa contribution au développement de réseaux locaux, permet à l'institut de progresser dans l'étude des failles actives en France métropolitaine et ainsi dans la connaissance de l'aléa sismique autour des installations nucléaires. L'IRSN dispose d'environ 7,5 ans d'observation sur deux stations encadrant la faille de la Moyenne-Durance près du centre de Cadarache. Cette durée de mesure est l'une des plus longues existante en France et en Europe. La collaboration établie avec le CNRS permet d'exploiter les données disponibles et de savoir ainsi si la déformation qui a conduit aux séismes historiques est aujourd'hui détectable par GPS.

1 Contexte sismotectonique

... en domaine intraplaque, loin de la zone de convergence active du Maghreb (3-7 mm/y), mais près d'une limite structurale majeure (les Alpes externes) entre les plaques Eurasie et Adriatique, qui subit une rotation anti-horaire (Noguét & Calais, 2003);
... un taux de déformation faible (0.1 mm/y) en Europe de l'ouest, avec une sismicité faible à modérée;
... mais quelques failles actives sont connues, comme la faille du Vauch (Jura) ou la faille de la Moyenne-Durance (MDF, Provence) où le taux de déformation géologiques long-terme sont estimés entre 0.1 et 0.01 mm/y;
... le long de la MDF, le catalogue de sismicité historique nationale (SISFRANCE) et la base de données instrumentales (IRSN) soulignent clairement l'activité actuelle de cette faille (Cushing et al., accepté).

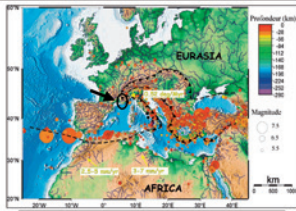


Figure 1
Contexte sismotectonique : les vitesses relatives (Eurasie fixe) sont d'après Noguét & Calais (2003) et Noguét (2002)

La faille de la Moyenne-Durance (MDF)
La MDF est longue de 80 km, de direction N30°, avec une cinématique décrochante sénestre. Elle sépare le bassin de Forcalquier à l'ouest et celui de Valensole à l'est. Cette faille est enracinée dans le "set" tectonique (couche violette, fig. 3), mais l'existence d'une faille de socle (rouge) est suspectée.
Une activité post-Miocène est attestée sur la totalité de la faille (Cushing et al., accepté), avec un possible paléoséisme d'âge pléistocène supérieur (Gauthier, 1995).
La sismicité est clairement associée à la faille, avec une séquence de séismes destructeurs depuis le XVIII^e siècle et avec une sismicité marquée (séisme IRSN).



Figure 2

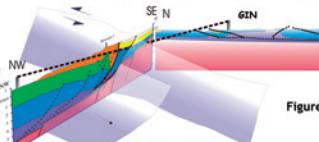


Figure 3

2 Le réseau et les données

Plus de 7,5 années de données enregistrées en continu ...

Le développement du réseau continu en France a commencé au début des années 90. Deux stations proches de la MDF étaient en fonctionnement en 1998, financées par l'IRSN. Cet institut est aussi impliqué dans d'autres études de la déformation active par GPS en France (Alpes, Jura, Pyrénées), combinant des stratégies continues et temporaires (figure 4).

Les 2 stations permanentes de GINA et MICH participent aux réseaux nationaux (RENAG et RGP).

Ces deux points ont été choisis pour étudier le chargement intersismique de la faille :

- Cette ligne de base inclut le segment actif de la MDF;
- Elle est parallèle à l'axe de la contrainte horizontale maximale;
- La distance entre chaque site et la faille (10 km) est suffisante pour représenter l'épaisseur élastique de la faille.

Les données enregistrées couvrent presque toute la période 1998-2005 (seulement 4% de données perdues)...

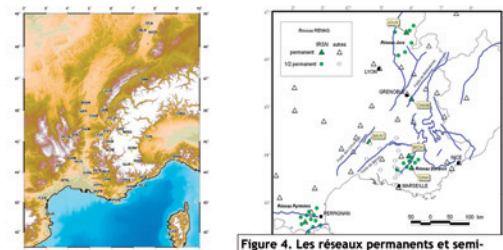


Figure 4. Les réseaux permanents et semi-permanents dans le SE de la France.
A gauche, nous montrons les stations utilisées dans le calcul.

4 Séries temporelles

Figure 5 : séries temporelles de chaque station dans le référentiel ITRF2000

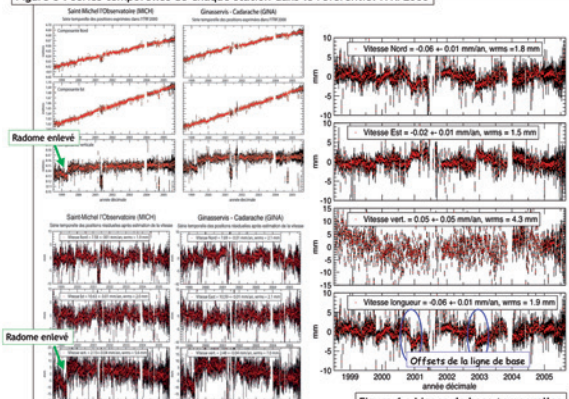


Figure 6 : Lignes de base temporelles

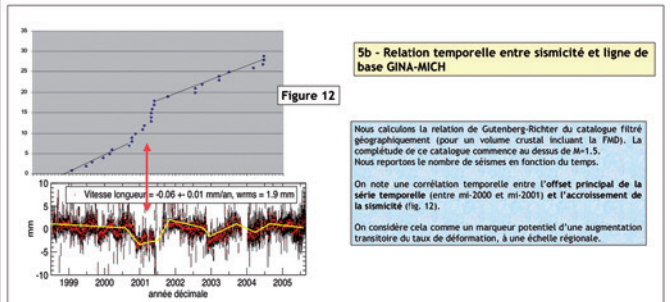
Les calculs ont été faits avec le logiciel libre GANIT/GLOBK, à partir des bases de données RENAG et RGP (IGN).

Les positions sont estimées en utilisant une approche en réseau libre. En premier lieu, les coordonnées sont calculées simultanément avec les corrections orbitales et troposphériques. Les déplacements sont aux unités solides terrestres, à la charge océanique et aux variations de la rotation de la Terre, ont été prises en compte. Dans un 2nd temps, une transformation à 7 paramètres est réalisée pour obtenir les positions et la variance associée, dans le réseau de référence ITRF 2000.

Les répétabilité sont de 2 mm pour X et Y et 5-7 pour Z (figure 5), qui sont des valeurs classiques pour les données acquises en continu.

Les rms des séries temporelles sont 30% plus fortes que celles des lignes de base (figures 5 & 6), car une grande part des processus responsables du bruit affectant ces séries ont une longueur d'onde plus grande que la ligne de base GINA-MICH (chargement hydrologique et atmosphérique, effets troposphériques).

Nous remarquons 2 offsets principaux dans les lignes de base (amplitude : 3-4 mm) qui ne sont pas corrélées avec des changements instrumentaux (fig. 6).



5b - Relation temporelle entre sismicité et ligne de base GINA-MICH

Nous calculons la relation de Gutenberg-Richter du catalogue filtré géographiquement (pour un volume crustal incluant la MDF). La complétude de ce catalogue commence au-dessus de M=1.5. Nous reportons le nombre de séismes en fonction du temps.

On note une corrélation temporelle entre l'offset principal de la série temporelle (entre mi-2000 et mi-2001) et l'accroissement de la sismicité (fig. 12).

On considère cela comme un marqueur potentiel d'une augmentation transitoire du taux de déformation, à une échelle régionale.

3 Étude du bruit & calcul de l'incertitude

Le bruit enregistré par la ligne de base GINA-MICH est corrélé dans le temps et un modèle de bruit simple (bruit blanc) ne peut pas être appliqué pour déterminer les incertitudes. Ceci semble commun à toutes les longues séries temporelles GPS (ex Zhang et al., 1997). En effet, le spectre de puissance des séries temporelles souligne clairement que le bruit coloré domine à basse fréquence (i.e. quelques semaines, fig. 7). Nous avons utilisé la méthode de Williams (Williams, 2003; Williams et al., 2004), basée sur l'Estimateur de Probabilité Maximale, qui optimise le modèle de covariance des séries temporelles, la vitesse et les fluctuations annuelles. Nous estimons ainsi simultanément la vitesse (avec sa déviation standard) et les caractéristiques du bruit.

L'analyse du bruit montre que la prise en compte de bruit blanc seul ne permet pas d'ajuster correctement la distribution temporelle des résidus. Une régression linéaire simple donne une bonne estimation de la vitesse, mais sous-estime largement l'incertitude (30). Le meilleur modèle de bruit est proche de celui combinant bruit blanc et bruit coloré de scintillement: nous trouvons un spectre de puissance avec un indice spectral de -1.3 (i.e. bruit de scintillement). Cette analyse donne que l'amplitude du bruit blanc est de 1.5 mm et que l'amplitude du bruit de scintillement est de 3 mm/a.

L'analyse de bruit indique qu'une durée de mesure de 7,5 années aboutit à une précision de 0.3 mm/y pour chaque composante horizontale (1σ), correspondant à une précision de 0.6 mm/y (à un niveau de confiance de 95%). Les caractéristiques du bruit suggèrent qu'une précision de 0.1 mm/y pourra être atteinte dans le futur (fig. 8).

Composante	Calcul	1σ	1σ + 1σ	1σ + 1σ + 1σ	1σ + 1σ + 1σ + 1σ
Nord	RENAG	-0.04±0.01	-0.04±0.15	-0.14±0.29	-0.07±0.23
Est	RENAG	-0.03±0.01	-0.04±0.14	-0.14±0.25	-0.11±0.25
Vertical	RENAG	0.05±0.05	-0.43±0.31	-0.31±0.24	-0.31±0.24
Longueur	RENAG	-0.04±0.01	-0.07±0.14	-0.08±0.05	-0.05±0.30

1σ : bruit blanc ; 1σ : bruit de scintillement ; 1σ : bruit de marche aléatoire ; 1σ : bruit d'indice fracturation
Pour ce niveau de précision, notre jeu de données ne révèle pas de taux de déformation clair. Néanmoins, il est possible de proposer une fourchette du taux de déformation pour la ligne de base, with a 95% confidence level : -0.1 mm/y ± 0.6

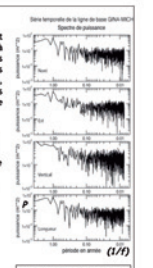


Figure 7 : P-Pe/10p

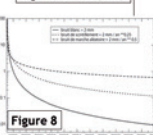


Figure 8

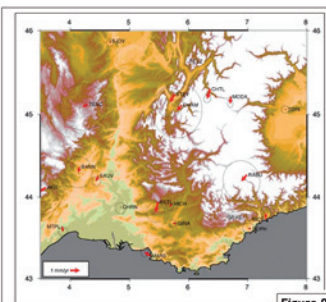


Figure 9

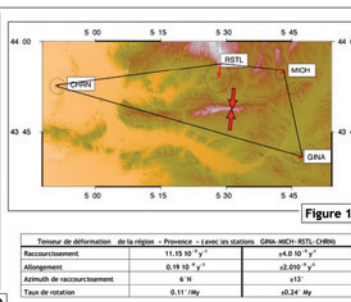


Figure 10

Nous avons aussi calculé une "solution en réseau" (Noguét & Calais, 2003) pour décrire le champ de vitesse. Nous avons combiné (avec des faibles contraintes) les solutions journalières pour obtenir ce champ de vitesse dans le référentiel ITRF2000. La vitesse relative GINA-MICH est de -0.07 ± 0.12 mm/y d'après ce calcul et le pôle de rotation de l'Eurasie est proche de ceux déjà publiés (long -101.8° E, lat 56.79° N, 0.26° /My).

Aucun site n'a une vitesse relative (par rapport à l'Eurasie) supérieure à 1 mm/y (fig. 9). Dans la région Provence, le tenseur de déformation obtenu donne une contraction NS (fig. 10) qui est presque parallèle à la moyenne des axes P du tenseur de contraintes dérivée des mécanismes au foyer des petits séismes locaux (fig. 11).



Figure 11

5a - Tenseur de déformation géodésique vs tenseur de contraintes déduit des mécanismes au foyer des séismes locaux

References
Benedictis, A. (1996). Thèse de Doctorat, Université de Montpellier.
Cushing et al. (accepté). Géophys. J. Int.
Gauthier, A. (1995). Thèse de Doctorat, Université d'Orsay.
Noguét, J.-M. (2002). Thèse de Doctorat, Université de Nice-Sophia.
Noguét, J.-M., & Calais, E. (2003). Géophys. J. Int., 154, 72-88.
Temple, C. (1987). Bull. Soc. géol. Fr., 10, 533-540.
Williams, S. D. P. (2003). J. Geod., 78, 483-494. doi:10.1007/s00190-002-0283-4.
Williams, S. D. P., et al. (2004). J. Geophys. Res., 109, B03412. doi:10.1029/2003JB002741.
Zhang, J., et al. (1997). J. Geophys. Res., 102, 18,035-18,055.

5 Déformation régionale

Conclusions

- Les vitesses relatives sont inférieures à 1 mm/y, par rapport à la plaque Eurasie.
- La vitesse relative entre GINA-MICH montre un régime en raccourcissement (<0.1 mm/y).
- Ceci est compatible avec une cinématique en décrochement sénestre déduit de la géologie et de la sismologie.
- Les incertitudes restent fortes. Elles ont été estimées en utilisant un modèle de bruit incluant du bruit de scintillement (flicker noise).
- La valeur finale retenue pour la ligne de base GINA-MICH est -0.1 mm/y ± 0.6.
- Le tenseur de déformation déduit de la géodésie est cohérent et compatible avec les mécanismes au foyer des séismes connus sur la faille.
- Un changement transitoire dans la ligne de base est corrélé dans le temps avec un changement de taux de sismicité.

