

Champ de vitesse GPS du Nord-Est de la France

apport des stations permanentes pour une précision submillimétrique

■ Eric HENRION - Patrice ULRICH - Frédéric MASSON

Le fossé rhénan s'étend du sud de l'Alsace jusqu'à Francfort. Il correspond à une plaine d'environ 300 kilomètres de long sur 40 kilomètres de large, entre les Vosges et la Forêt Noire. Ces massifs d'environ 1500 m d'altitude constituent les épaulements du fossé.

Le fossé rhénan présente une sismicité significative, historique et instrumentale, principalement dans sa partie sud, comme en témoigne le séisme très destructeur de Bâle de 1356. Au nord, la vallée du Rhin se poursuit vers les Pays-Bas où là aussi une activité sismique significative est observée. L'objectif de notre étude est d'évaluer la déformation actuelle de cette région à partir des réseaux géodésiques permanents existants, en calculant un champ de vitesse précis à partir des stations de deux réseaux géodésiques français, le RENAG et le RGP, complétés par quelques stations suisses, allemandes, belges et néerlandaises. Nous verrons qu'une analyse fine des données géodésiques permet une estimation des vitesses de déplacement de la surface terrestre avec une précision très inférieure au millimètre par an.

Réseaux géodésiques permanents utilisés

Le RENAG (REseau National GNSS – <http://webrenag.unice.fr>) regroupe un ensemble de stations GNSS installées et gérées par des laboratoires de recherche et des organismes d'État qui mettent en œuvre et utilisent les mesures GNSS continues à des fins scientifiques autour de 3 grandes thématiques : mesurer la faible déformation crustale en France et dans les régions frontalières, étudier le contenu en vapeur d'eau de l'atmosphère, étudier les mouvements verticaux transitoires induits par la surcharge des océans et le chargement hydrologique.

Le RGP (Réseau GNSS Permanent) regroupe l'ensemble des stations archivées et traitées par l'IGN. Le RGP a été initié afin de proposer au grand public une couverture GNSS accessible depuis toute la France. La méthode de positionnement relatif permet d'atteindre rapidement une

précision centimétrique. Mais elle nécessite 2 récepteurs, un récepteur mobile pour mesurer le point d'intérêt et un récepteur fixe qui sert de référence. Pour que cette méthode soit utilisable partout en France, divers réseaux GNSS commerciaux ou non, ont été installés. Le RGP regroupe une grande partie de ces données. Ainsi la densité des stations disponibles permet d'obtenir des lignes de base courtes. Le réseau RGP peut donc répondre aux besoins d'une large variété d'utilisateurs pour le positionnement en chantier, le guidage d'engins, le maintien de la référence nationale en coordonnées ou plus simplement pour du guidage routier, d'ambulances... L'objectif du RGP est de fournir un réseau GPS d'appui à ses utilisateurs.

La mise en service du RGP a débuté en novembre 2000 grâce aux efforts conjoints du LAREG (Laboratoire de Recherche en Géodésie) et du SGN (Service de Géodésie et de

MOTS-CLÉS

GPS, fossé rhénan, vitesse, déformation, réseaux permanents

Nivellement) de l'IGN. Le RGP résulte en partie de la loi d'orientation pour l'aménagement et le développement durable du territoire (loi n° 99-533 du 25 juin 1999 article 53, J.O. du 29 juin 1999 ; décret d'application n° 2000-1276 du 26 décembre 2000, J.O. du 28 décembre 2000) :

“Les informations localisées issues des travaux topographiques ou cartographiques réalisés par l'État, les collectivités locales, les entreprises chargées de l'exécution d'une mission de service public, ou pour leur compte, doivent être rattachées au système national de référence de coordonnées géographiques, planimétriques et altimétriques défini par décret et utilisable par tous les acteurs participant à l'aménagement du territoire”. Tous les travaux avec des données localisées doivent être rattachés au système de référence national



Figure 1a. Position des stations GPS disponibles dans le nord-est de la France en 2002.

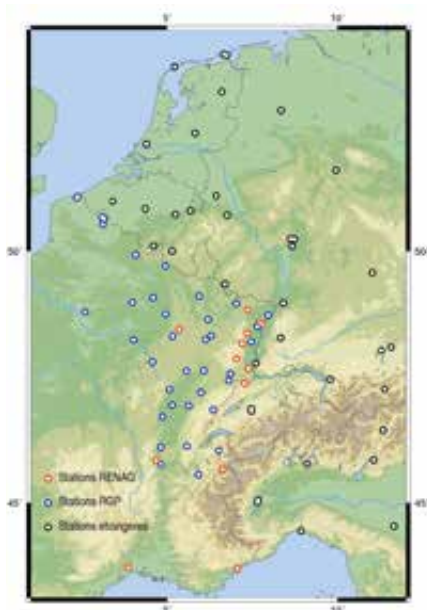


Figure 1b. Réseau des stations utilisées dans cette étude, disponibles en 2014. Dans la zone représentée sur la figure 1a, l'ensemble des stations disponibles est utilisé. Dans le reste de la carte, seule une sélection de stations est utilisée.

▶ RGF93. Le RGP est pleinement opérationnel depuis février 2004. Les autres stations utilisées proviennent des réseaux publics des pays voisins, comme le GREF (*Geodetic Reference Network of Germany*) en Allemagne. La couverture GPS n'a cessé de se densifier ces dernières années. La figure 1a montre les stations disponibles autour du fossé rhénan au lancement du RGP, la figure 1b celles disponibles en 2014 autour du fossé rhénan et l'ensemble du réseau utilisé pour cette étude. La densité du réseau au niveau du fossé rhénan a largement doublé en l'espace de 12 ans. Cette densité accrue de stations permet de produire un champ de vitesse dense, de comparer les vitesses avoisinantes les unes aux autres, et de déceler plus facilement les vitesses aberrantes, qui peuvent résulter d'un effet très local. Au final, nous utiliserons un ensemble de 100 stations dont 18 de référence. Les stations de référence font partie pour 14 d'entre elles du réseau IGS dont les coordonnées sont données dans l'ITRF2008 (*International Terrestrial Reference Frame 2008*). Elles encadrent globalement le réseau et se situent en Espagne, Italie, Pologne, Ukraine, Suède...

Traitement des séries temporelles

Le traitement des données a été réalisé avec la suite de logiciels GAMIT/GLOBK (*GPS Analysis at MIT/Global Kalman filter*) développée au MIT (*Massachusetts Institute of Technology*). Il s'agit d'un logiciel scientifique non commercial. L'article "Méthodes de travail dans les réseaux GNSS 3^e partie : Méthode du statique multi-stations" de la revue XYZ n°134 présente les différents types de traitements GNSS statiques. Dans cette étude, la méthode utilisée dans les calculs de la suite GAMIT/GLOBK correspond au positionnement relatif "multi-stations" (fiche n°7 – figure 2). Cette méthode s'effectue en post-traitement, avec l'utilisation d'orbites finales très précises. La précision annoncée de la méthode sur le positionnement étant inférieure à 2 cm, si la période d'observations couvre plusieurs années, on

peut obtenir une précision submillimétrique sur les vitesses de déplacement. Le traitement des données s'effectue en 2 grandes étapes. Avec GAMIT, on obtient une position journalière pour chaque station. GAMIT fonctionne en utilisant un certain nombre de programmes dont le plus important est SOLVE. SOLVE génère une solution journalière non contrainte pour chaque station à l'aide d'une estimation par moindres carrés des paramètres : coordonnées, délais zénithaux, et ambiguïtés. GLOBK utilise ces solutions journalières pour produire la solution finale contrainte par l'application d'un filtre prédictif de Kalman. En sortie, on obtient les séries temporelles de position de chaque station contraintes grâce aux stations de référence. On réalise alors un post-traitement de ces séries temporelles. Deux types de problèmes sont observés dans les séries temporelles : 1- des points ponctuels aberrants très éloignés

	Fiche 5	Fiche 6	Fiche 7
Méthode	Statique		
	Temps réel	Post-traitement	
	NRTK moyenné	Pivot central	Multi-stations
Moyens matériels (capteurs, logiciels, abonnement)	+ / ++	+ / ++	+++
Savoir-faire	+	++	+++
Moyens humains (personnel, temps passé)	+	++ / +++	+++
Gamme de précision (1σ)	2-3 cm	< 2 cm	
Types de travaux	Lever, contrôle, rattachement	Canevas Contrôle	Contrôle auscultation
Limitations	Couverture du réseau GNSS Couverture du réseau GPRS (existence de zones blanches)	Pas d'implantation possible, Calcul du point non garanti avant traitement	
		Calcul de courtes lignes de base uniquement (< 5 km)	
	Lors du lever : mise en station irréprochable et surveillance de la stabilité des équipements		
Avantages	Bon compromis simplicité de mise en œuvre/précision	Temps d'occupation réduit	Précision et exactitude "ultimes"

Figure 2. Méthodologie du traitement GNSS.

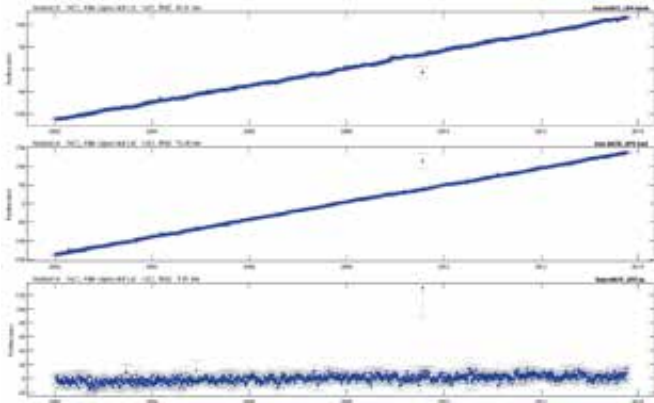


Figure 3a. Série temporelle de la station MATE avant correction des valeurs aberrantes.

des autres valeurs, et 2- des sauts, c'est-à-dire une discontinuité dans la série temporelle. Avant de calculer le champ de vitesse il faut corriger ces erreurs.

La correction des points aberrants (*outliers*) s'effectue à l'aide d'un script détectant les valeurs trop écartées de la moyenne. Le seuil choisi est de 3σ

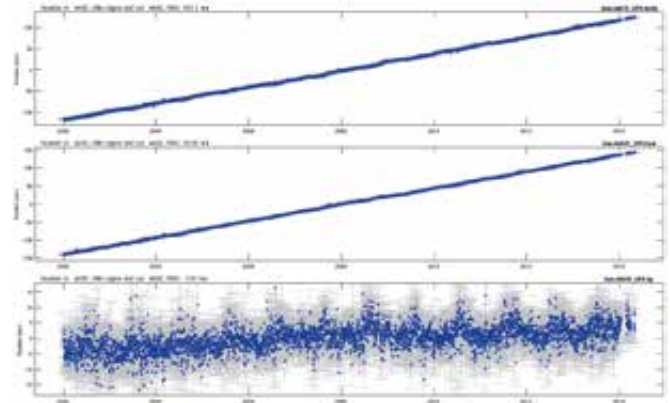


Figure 3b. Série temporelle de la station MATE après correction des valeurs aberrantes.

soit 3σ , σ étant la précision *a priori* de la détermination de la composante verticale dont la détermination est la moins précise. Lorsqu'un écart à la moyenne est supérieur au seuil décrit précédemment, la station est exclue pour la journée en question. On peut observer cela sur la figure 3, sur l'exemple de la station MATE située en Italie.

Le second type d'erreurs est plus difficile à traiter. Les discontinuités dans les séries temporelles sont pour la plupart causées par des changements d'antennes. En effet, le centre de phase peut se trouver légèrement translaté une fois la nouvelle antenne installée. Mais il peut aussi y avoir des discontinuités non expliquées par un changement d'antenne. Il faut donc analyser toutes les séries temporelles afin de déceler celles comportant des sauts. Les sauts sont préalablement détectés. Puis les séries temporelles sont modélisées par une tendance, une variation saisonnière et les sauts. Chacun des paramètres est estimé par moindres carrés, dont l'amplitude des sauts. Ces sauts sont ensuite introduits dans le fichier nommé "station.info" qui contient l'historique de chaque station (changement d'antenne ou récepteur). La correction consiste, pour une station donnée, à insérer le déplacement inverse à celui mesuré à la date du saut. Un exemple du résultat est donné sur la figure 4 pour la station CHAS se situant en France. La discontinuité, très visible pour les composantes Est et verticale sur la figure 4a, a disparu après traitement sur la figure 4b. Après le traitement du saut, on passe d'un RMS (*Root Mean Square* : moyenne

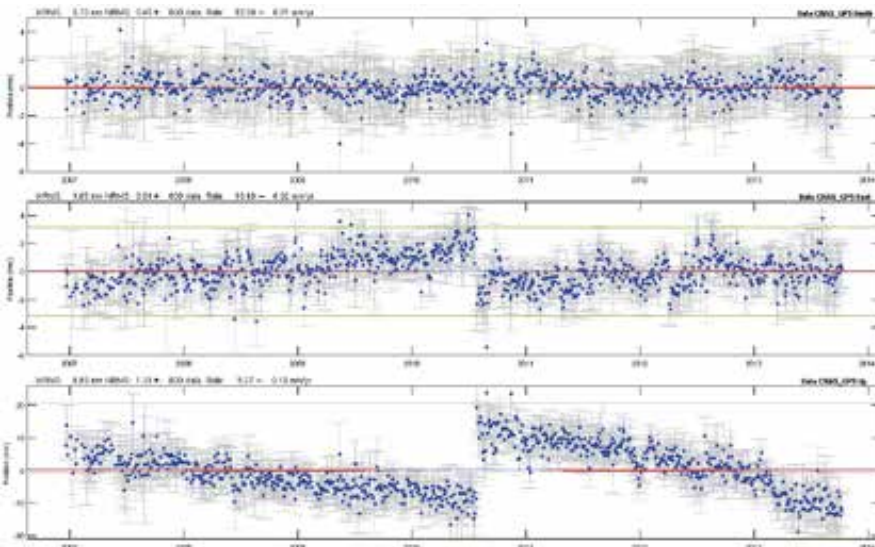


Figure 4a. Série temporelle de la station CHAS avant correction du saut.

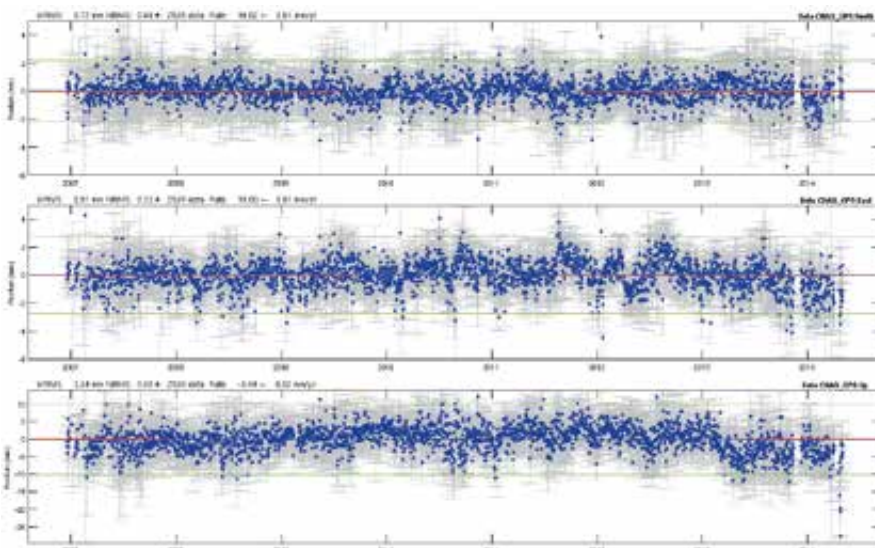


Figure 4b. Série temporelle de la station CHAS après correction du saut.

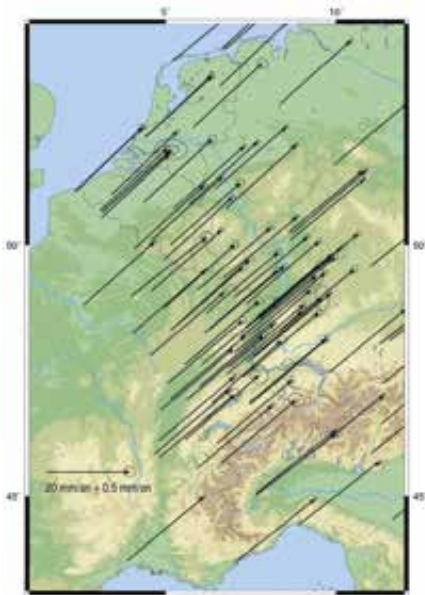


Figure 5. Vitesses horizontales dans l'ITRF. Est principalement illustré le déplacement de la plaque Eurasie.

quadratique) de 1,05 mm à 0,91 mm pour la composante Est et de 6,89 mm à 3,34 mm pour la composante verticale.

Champ de vitesse

Après un nettoyage complet des séries temporelles, le calcul du champ de vitesse peut s'effectuer, là encore avec le logiciel GLOBK. Le logiciel GLOBK calcule les vitesses de chaque station en y ajoutant à la vitesse moyenne les nouvelles données au fur et à mesure. D'où l'intérêt d'avoir auparavant corrigé les déplacements fictifs et les sauts inexistantes dans les données.

GLOBK permet d'obtenir les vitesses dans le référentiel ITRF08. La figure 5 présente ce champ de vitesse, qui montre principalement le mouvement vers le nord-est de la plaque eurasienne à une vitesse de plus de 2 cm/an. Si l'on s'intéresse aux déformations actives locales, il faut supprimer le mouvement de la plaque eurasienne en soustrayant aux vitesses sorties de GLOBK les vitesses théoriques de la plaque Eurasie à chaque site. Ici, pour mettre en évidence les déformations locales et supprimer un biais résiduel lié à la mise en référence après la prise en compte du pôle de la plaque Eurasie, nous avons déterminé notre propre pôle par minimisation des résidus. Les résultats sont montrés sur la

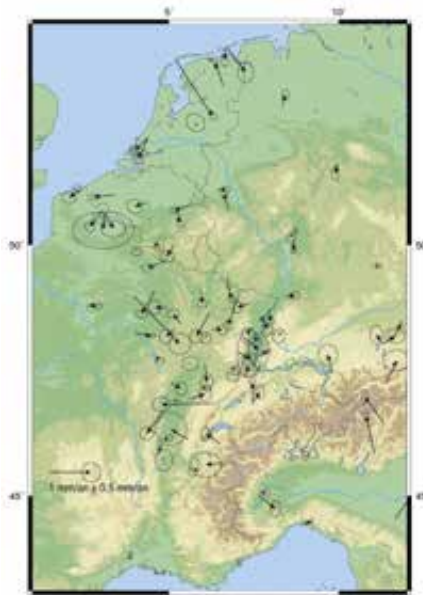


Figure 6. Vitesses horizontales dans un référentiel Eurasie stable.

figure 6 (composante horizontale) et sur la figure 7 (composante verticale).

Une partie délicate du travail consiste à estimer les erreurs sur les vitesses. Nous avons, pour réaliser ce travail, utilisé le logiciel CATS (*Create and Analyze Time Series*) développé par Simon D. P. Williams. CATS produit un modèle de la série temporelle grâce à la méthode des moindres carrés et procède ensuite à une analyse des résidus. Il y a 3 méthodes d'évaluation du bruit : une estimation par maximum de vraisemblance (MLE : *maximum likelihood estimation*), une estimation spectrale similaire à la méthode MLE (cette méthode a un temps de calcul plus court mais est moins précise), et une méthode d'estimation empirique (Williams 2008). La méthode utilisée est MLE qui permet de détecter différentes sortes de bruits. En effet, on pourra distinguer 2 types de bruits principaux : un bruit aléatoire et un bruit à corrélation temporelle. Le premier est appelé bruit blanc (*white noise*) et le second bruit de scintillation (*flicker noise*) qui est un bruit coloré (Mao 1999). Un bruit blanc se caractérise par une dispersion aléatoire mais constante tout au long du signal, alors qu'un bruit coloré aura un caractère saisonnier. Le logiciel CATS peut ainsi estimer plusieurs modèles d'erreurs, celui choisi sera une combinaison du bruit blanc et du bruit de scintillation. Grâce à ce modèle,

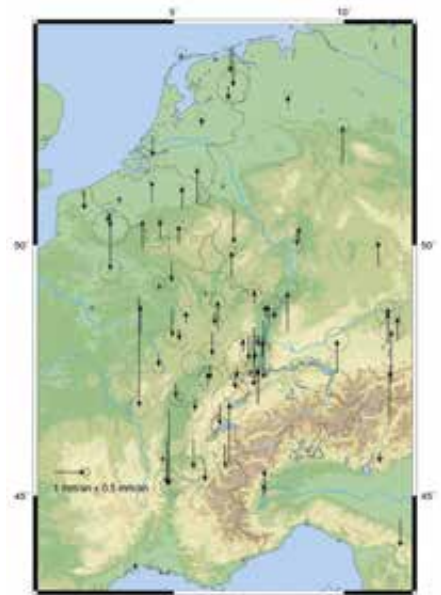


Figure 7. Vitesses verticales.

on peut calculer les ellipses d'incertitudes pour chaque vecteur du champ de vitesse (présentes sur les figures 5, 6 et 7).

Sur la figure 6, on observe que la majorité des vitesses horizontales sont de l'ordre de 0,2 à 0,3 mm/an pour des erreurs de même ordre. L'erreur estimée pour les meilleures stations (souvent celles avec la période d'enregistrement la plus longue) est de l'ordre de 0,2 mm/an et peut descendre jusqu'à 0,1 mm/an. On peut rapidement souligner quelques résultats importants concernant les vitesses horizontales :

- Concernant le fossé rhénan supérieur, il n'y a pas de mouvement significatif visible entre ses deux versants. Des stations de part et d'autre du fossé, à l'ouest en France et à l'est en Allemagne, présentent des vitesses très faibles, quelques fois proches de 0. Aujourd'hui, on peut dire que nous ne sommes pas encore capables de mettre en évidence par la géodésie des mouvements horizontaux significatifs autour du fossé rhénan. Cela ne signifie pas qu'il n'y en a pas du tout. Cela signifie simplement que s'il y en a, ils sont trop faibles pour être détectés par la technologie GNSS.
- De forts mouvements sont présents sur la zone littorale des Pays-Bas (jusqu'à 1,6 mm/an). Cette zone de la mer du Nord, est sujette à l'exploitation d'hydrocarbures. Est-ce cela que l'on observe ?

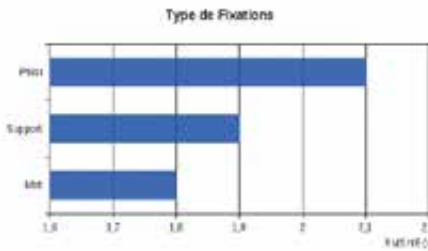


Figure 8a. Bruit blanc moyen en fonction du type de fixation.

- Dans les Alpes suisses, deux stations indiquent un mouvement vers le nord correspondant localement à du raccourcissement à travers les Alpes. Cela confirme des résultats déjà obtenus sur cette zone.

- Inversement rien de significatif n'est observé à travers les Alpes occidentales, ce qui là aussi confirme des résultats déjà connus.

D'après la *figure 7*, la majorité des vitesses verticales sont de l'ordre de 0,5 à 0,7 mm/an avec des erreurs pouvant varier de 0,5 à 1,5 mm/an. La zone littorale des Pays-Bas est en affaissement à une vitesse d'environ 1 mm/an pour des erreurs de 0,6 à 2,2 mm/an. En revanche, la Belgique présente une élévation cohérente à une vitesse d'environ 0,6 mm/an pour des erreurs de même ordre. Les Alpes (centrales et occidentales) sont en élévation à des vitesses supérieures au mm/an pour des erreurs variant entre 0,6 à 1,4 mm/an. Les déplacements dans la vallée et la plaine du Rhin restent faibles sur la composante verticale (de l'ordre de 0,3 à 0,4 mm/an pour des erreurs de 0,5 mm/an). Les déplacements du fossé rhénan semblent aussi faibles sur le plan altimétrique que planimétrique.

Monumentation

La solution fossé rhénan permet, avec ses 100 stations ayant des séries temporelles allant jusqu'à 12 ans, d'étudier l'effet de la monumentation sur le niveau de bruit et les erreurs. On divise le "monument" en 2 parties : le système de fixation de l'antenne, et les fondations sur lesquelles s'appuie le système de fixation.

Les *figures 8a* et *8b* présentent le bruit blanc moyen pour chaque type de fixation et fondation pour les composantes Nord et Est. Intuitivement, le

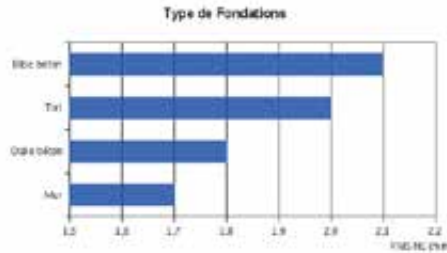


Figure 8b. Bruit blanc moyen en fonction du type de fondation.

pillier apparaîtrait comme le système de fixation le plus fiable. Mais en fait, les supports et mâts se révèlent être les meilleures fixations (*figure 8a*). Le mât accuse un bruit blanc moyen de seulement 0,85 mm calculé à partir de 53 stations, alors que le pilier a un bruit blanc de 0,95 mm pour un calcul sur 36 stations. De même, la fondation la plus fiable apparaîtrait être un bloc ou une dalle béton, alors que la *figure 8b* montre que le meilleur type de fondation s'avère être le mur. En effet, cette dernière possède un bruit blanc moyen de 0,83 mm pour un calcul sur 34 stations, tandis que le bloc béton admet un bruit blanc de 0,87 mm pour un même nombre de stations.

La conclusion que l'on peut en tirer est que la fiabilité d'une station ne peut se résumer à sa monumentation : d'autres paramètres entrent en jeu. Parmi eux, l'environnement va jouer un rôle important (pluviométrie, exposition au soleil, géologie...). La seule manière d'apprécier la qualité d'une station sera de calculer ses valeurs de bruits ou encore la dispersion de sa série temporelle en calculant son RMS.

Conclusion

Le travail présenté est appelé la solution RENAG fossé rhénan et est produit par l'EOST (<http://eost.unistra.fr/observatoires/renag-eost/la-solution-renag-fosse-rhenan/>). Cette solution s'appuie sur un réseau de 100 stations. Les vitesses obtenues sont submillimétriques, indiquant notamment que le fossé rhénan ne subit pas de déformation observable géodésiquement en dépit d'une sismicité régulière.

La technologie de positionnement GNSS permet d'obtenir des résultats avec une précision submillimétrique à condition d'avoir des périodes d'ob-

servations assez longues, une juste utilisation des logiciels de traitements, et des corrections adéquates des séries temporelles de position.

Outre les stations RENAG, l'étude a utilisé les stations du RGP, souvent installées dans un but tout autre qu'une étude tectonique. Leur but est souvent de fournir un service d'appui pour des utilisateurs ponctuels comme des géomètres ou d'autres acteurs de l'aménagement lors de différents chantiers. Il apparaît clairement que même si ce n'était pas leur but premier, il est possible d'utiliser ces stations comme éléments d'observations et de mener des études scientifiques avec de grandes précisions. Elles sont donc très intéressantes au-delà de leur utilisation initialement prévue. ●

Contact

Ecole et Observatoire des Sciences de la Terre, Strasbourg

Frédéric MASSON
frederic.masson@unistra.fr

Eric HENRION
erichenrion67400@gmail.com

Patrice ULRICH

Bibliographie

Legros, R., Morel, L., Viguier, F., Birot, F., 2013. *Méthodes de travail dans les réseaux GNSS 3^e partie Méthode du "statique multi-stations"*, XYZ, 134.

Mao, A., Harrison, C.G.A. & Dixon, T.H., 1999. *Noise in GPS coordinate time series*, J. geophys. Res., 104, 2797-2816.

Milcent, C. 2013. *Comparaison des logiciels de traitements de données GPS GAMIT/GLOBK et PPP et validation du logiciel PPP*

Williams, S.D.P., 2008. *CATS: GPS coordinate time series analysis software*, GPS Solut., 12, 147-153.

ABSTRACT

We propose a velocity field of the north-eastern part of France using GPS data from RENAG and RGP networks. Both careful processing and post-processing of the data (corrections of outliers and steps in the time series) allow the determination of velocities with a very high accuracy.