

Nivellement de très haute précision

■ Johan LECLERCQ - Alain COULOMB

Ces dernières années, les géomètres du service de géodésie et nivellement de l'IGN ont repris une traverse de nivellement de grande précision réalisée une première fois en 1983 entre le marégraphe de Marseille et celui de Dunkerque. Cet important travail donne l'occasion de faire le point sur l'avancement du Nivellement de référence français (NIREF), sur les résultats obtenus jusqu'à ce jour et sur ceux attendus dans les prochaines années.

NIREF, vous avez dit NIREF ?

Le système altimétrique officiel français NGF/IGN69 est basé sur des observations de nivellement et de gravimétrie faites dans les années 60. Dès 1970, l'existence d'un important biais nord-sud de cette réalisation a été soupçonnée. C'est une des raisons pour lesquelles l'IGN a décidé en 1983, sous l'impulsion de Michel Kasser, d'observer une traverse de nivellement de grande précision entre Marseille et Dunkerque, puis, plus tard, d'établir un réseau de nivellement de grande précision, dénommé NIREF (nivellement de référence), qui comprend cette traverse de Marseille à Dunkerque.

Le NIREF est aujourd'hui mis en place à partir de spécifications écrites en 1996 par Henri Duquenne, alors chercheur au Laboratoire de recherche en géodésie (LAREG) à l'IGN, même si ces recommandations de 1996 n'ont pu être appliquées dans leur totalité pour des raisons économiques. Il réalise une référence altimétrique à usage scientifique la plus exacte possible, compte tenu des connaissances scientifiques et techniques. Le NIREF n'est pas destiné à devenir le nouveau système altimétrique officiel en France continentale ; un changement aurait en effet de nombreux inconvénients et ne serait pas facilement accepté par les utilisateurs. Conjointement avec d'autres sciences et techniques (la marégraphie, l'altimétrie par satellite, la gravimétrie absolue, le positionnement par géodésie spatiale, etc.), il participe à la recherche sur les références verticales et à leur unification en Europe [il est envisagé que les observations NIREF

MOTS-CLÉS

Nivellement, précision, biais, systématisme, NIREF, NGF/IGN69

deviennent la nouvelle contribution française au Réseau européen unifié de nivellement (REUN ou UELN)]. NIREF constitue un outil pour les autres sciences et notamment les sciences de la Terre : il contribue à l'étude des déformations de la croûte terrestre et à celle des variations temporelles et spatiales du niveau des mers.

Le réseau NIREF, qui s'étend limitativement à la France continentale, est notamment composé de traverses de nivellement dont les extrémités sont des marégraphe ou des réseaux de nivellement de pays limitrophes. Cependant, comme ce réseau de grandes traverses est trop lâche pour devenir la seule contribution française à REUN, l'IGN a proposé à EUREF (sous-commission régionale de l'Association internationale de géodésie pour les références géodésiques en Europe) d'intégrer à NIREF les ré-observations de sections

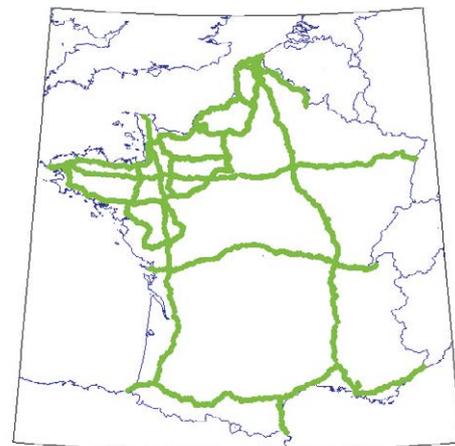


Figure 1. Réseau NIREF de 2016. En 2017, l'IGN a entamé une traverse Nice-Genève longeant au mieux la frontière franco-italienne.

de 1^{er} ordre faites dans les années 90 dans le nord-ouest de la France (dans le reste du pays, les observations originales de 1^{er} ordre, corrigées d'un biais estimé grâce à NIREF, pourraient peut-être un jour intégrer NIREF).

NIREF est observé en nivellement géométrique motorisé (NIGEMO), technique plus rapide et moins sujette aux erreurs de réfraction que le nivellement traditionnel à pied. L'ensemble du réseau est observé en aller-retour avec des tolérances strictes (dans 80 % des cas, les écarts-types calculés sur les



Figure 2. Nivellement motorisé (NIGEMO).



différences aller-retour sont inférieures à $0,83 \text{ mm/km}^{1/2}$). Pour des raisons financières, aucune mesure de pesantEUR n'a encore été faite sur le réseau.

La traverse Marseille-Dunkerque s'est offert une nouvelle jeunesse

Afin d'obtenir une plus grande cohérence temporelle des observations NIREF, la traverse Marseille-Dunkerque (la plus ancienne de toutes) a été ré-observée entre 2012 et 2016. La nouvelle traverse présente cependant plusieurs différences avec celle de 1983 :

- pour plusieurs raisons, notamment les problèmes de sécurité liés à l'augmentation du trafic automobile depuis 1983, l'itinéraire suivi n'est pas partout le même ;
- pour des raisons budgétaires, la nouvelle traverse a été observée en plusieurs campagnes de quelques mois, réparties sur 5 années, alors que l'ancienne mesure avait pu être réalisée plus rapidement, par deux équipes opérant d'avril à septembre 1983 ;
- pour la traverse de 1983, la distance moyenne entre les repères nivelés était d'environ 2 km, "ceci permettant d'aller le plus rapidement possible". Pour des raisons économiques (partenariat avec la Compagnie nationale du Rhône, mise à jour combinée du

réseau NGF/IGN69, etc.), la méthode opératoire a été différente pour la nouvelle traverse (environ 900 points nivelés en 1983 et près de 2000 sur la traverse récente) ;

- la traverse de 1983 a été observée avec des niveaux opto-mécaniques Zeiss Ni-002 qui comportaient un compensateur à miroir réversible. La traverse récente a été nivelée au moyen de niveaux électroniques Trimble® DiNi®.

Les calculs récents ont été analogues à ceux réalisés en 1983. Ils ont été conduits en plusieurs phases. Dans un premier temps, la pesanteur des points observés en nivellement a été interpolée grâce à une couverture gravimétrique dense du territoire. Les valeurs de g ainsi obtenues ont permis de corriger les dénivelées brutes issues des observations de chaque travée. Par la suite, un calcul en bloc a permis d'ajuster par moindres carrés les mesures et d'obtenir les cotes géopotentielle de tous les points du réseau, à partir d'un repère de nivellement proche du marégraphe de Marseille (repère immatriculé M.abc). Puis les altitudes normales "façon NGF/IGN69" de tous ces points ont été calculées à partir de ces cotes géopotentielle et de l'ellipsoïde de référence Hayford 1909.

Il est vite apparu que les deux traverses présentent des écarts qui grandissent

en allant vers le nord, avec un maximum de 8 cm à Dunkerque (un biais qui paraît grand en bout de ligne, mais qui correspond cependant à un décalage de moins de $70 \mu\text{m}$ par kilomètre parcouru). L'analyse des données a mis assez rapidement hors de cause la méthode de calcul, car ce décalage entre les traverses est présent aussi dans les données brutes.

Une analyse plus approfondie des différences entre les deux traverses a été entreprise afin de sélectionner la dénivelée globale la plus exacte. En mettant de côté les points fixes (points intermédiaires non matérialisés durablement), les repères de nivellement observés par une seule des deux traverses et les repères ayant visiblement bougé depuis 1983, nous avons obtenu une liste de 285 points intermédiaires permettant d'analyser plus en profondeur les écarts (en moyenne, un point tous les 4,5 km).

L'examen poussé de ces comparaisons a permis d'éliminer plusieurs causes possibles pour cet écart. Ses brusques augmentations ne sont corrélées :

- ni avec le profil altimétrique du parcours ;
- ni avec les coupures entre les tronçons de différentes années ;
- ni même avec la direction prise dans les mesures (le tronçon le plus au nord a été mesuré du nord vers le sud).

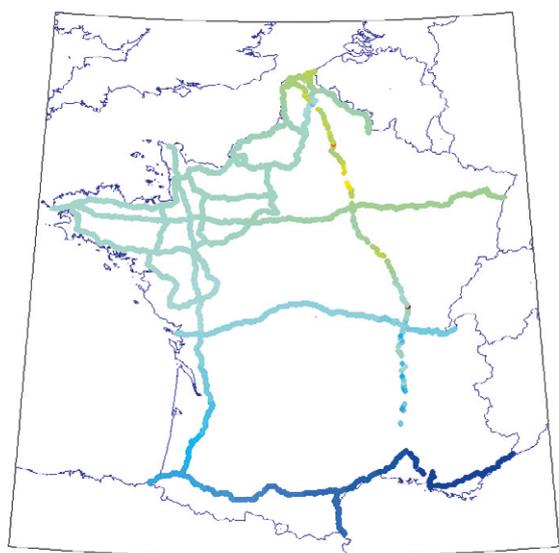


Figure 3. Écart sur les points NIREF avec ou sans la nouvelle traverse (valeurs en cm).

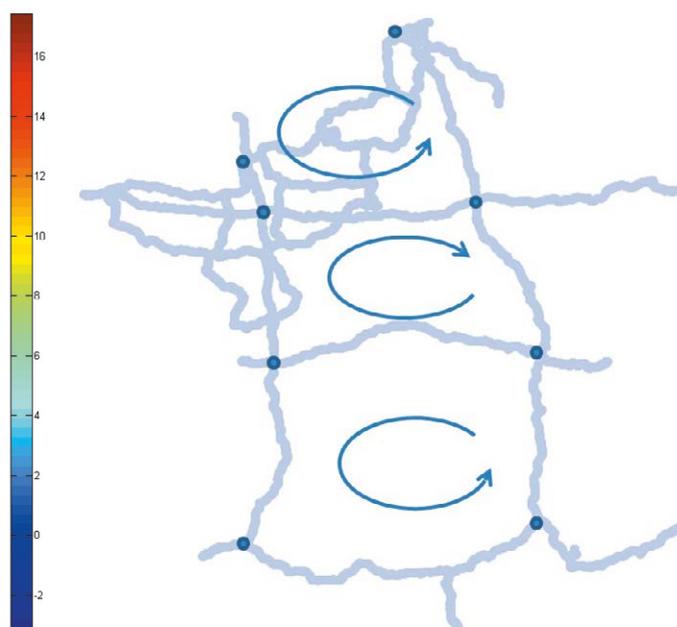


Figure 4. Grandes boucles du réseau NIREF.

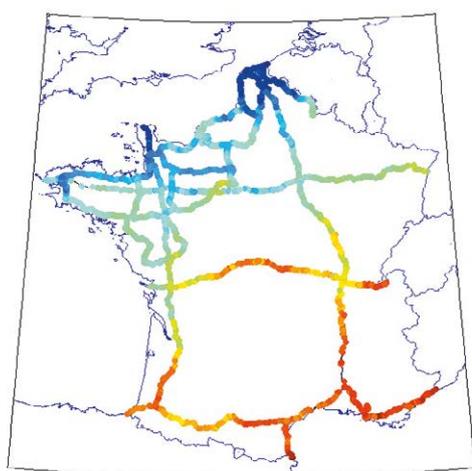


Figure 5. Biais nord-sud entre NGF/IGN69 et NIREF (valeurs en cm).

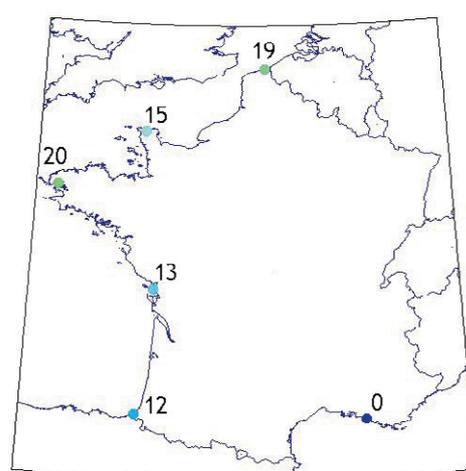
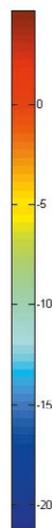
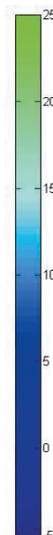


Figure 6. Altitude du niveau moyen de la mer sur le littoral continental français (valeurs en cm).



▶ Finalement, en l'absence de source d'écart clairement identifiée, il a été impossible de privilégier une traverse par rapport à l'autre. Face à ce constat et pour affiner les premiers résultats obtenus, une analyse détaillée des résidus du calcul en bloc fut réalisée pour mettre en exergue les observations moins précises dans les deux traverses. En raison de la faible redondance des données et des points intermédiaires présents dans la nouvelle traverse, une dizaine de dénivelées a pu être écartée. Cette opération ne supprima pas le cumul d'écart, mais permit néanmoins d'enlever du calcul final des observations de moins bonne qualité.

Une autre comparaison fut faite entre les deux traverses : la fermeture des trois grandes boucles du réseau. Le NIREF, avec ses nombreuses traverses, permet de former des boucles et de vérifier que le nivellement d'une boucle donne une fermeture réduite en revenant sur le point de départ. Ce contrôle de fermeture avait déjà été utilisé lors de précédents calculs pour valider les différentes traverses ajoutées. Toutefois, les résultats de ces fermetures ne permirent pas d'éliminer une traverse au profit de l'autre, puisque chacune prévalait par rapport à l'autre dans une partie des boucles testées.

Finalement, les deux observations de la traverse Marseille-Dunkerque, à quelques mesures près, ont été conservées et réunies dans le calcul en bloc du réseau. Lors du calcul

précédent, qui utilisait uniquement la traverse de 1983, l'écart entre la réalisation altimétrique NGF/IGN69 et celle associée à NIREF atteignait 23 cm à Dunkerque. Avec l'ajout de la nouvelle traverse, cette valeur passe à 19,6 cm. Bien que la traverse récente présente un écart avec la première, elle confirme le constat d'un biais nord-sud du système altimétrique NGF/IGN69 (ordre de grandeur : 20 cm), enrichit le réseau NIREF et continue à améliorer la référence altimétrique sur le territoire français continental.

NIREF et niveau de la mer

En combinant les mesures NIREF et les mesures du niveau de la mer produites par SONEL (système d'observation du niveau des eaux littorales) les niveaux moyens de la mer enregistrés par neuf marégraphes peuvent être exprimés dans le système altimétrique NIREF. Selon NGF/IGN69, le niveau moyen océanique croissait avec la latitude alors que selon NIREF les valeurs obtenues sont relativement constantes, et en tous cas ne montrent pas de pente nord-sud. NIREF semble donc plus exploitable que le système NGF/IGN69 pour relier entre elles les références des différents marégraphes français. NIREF permet également d'estimer la dénivelée entre le niveau moyen océanique et le niveau moyen de la Méditerranée à Marseille, le premier étant d'une quinzaine de centimètres supérieur au second. ●

Contacts

Johan LECLERCQ, technicien d'études au Service de géodésie et nivellement de l'IGN, johan.leclercq@ign.fr

Alain COULOMB, chef du Département "Réseau de référence matérialisés" au Service de géodésie et nivellement de l'IGN, alain.coulomb@ign.fr

Bibliographiques

KASSER Michel "Un nivellement de très haute précision : la traversée Marseille-Dunkerque 1983" - C.R. Acad. Sci. Paris, t.309, série II, p.695-700, 1989.

DUQUENNE Henri : "Projets de spécifications produit du nivellement de référence français" - Document interne IGN, 1996.

COULOMB Alain "Nivellement de référence (NIREF) - Spécifications internes" - Document interne IGN, 2011.

Les deux derniers documents très techniques et internes à l'IGN sont disponibles sur demande aux auteurs ou à la rédaction.

ABSTRACT

*Very high accuracy leveling
Few years ago, surveyors of the Geodesy and Leveling Department of the IGN (French Geographical Institute) have resurveyed a great accuracy leveling traverse first carried out in 1983 between the tide gauge of Marseilles and that of Dunkirk. This important work gave us the opportunity to take stock of the progress of the leveling reference in France (NIREF), on the results obtained today and on those expected within the next years.*