

La campagne géodésique de SNCF Réseau pour la régénération de son infrastructure : de la préparation à la diffusion

Florian BIROT - Alex BONGIBAUT - Pierre LASSEUR - Mathieu REGUL

SNCF Réseau est un EPIC créé en 2015 lors de la réforme ferroviaire. C'est l'entité gestionnaire du réseau ferré national, en charge notamment de sa maintenance et de sa modernisation. C'est dans ce cadre, et sous l'impulsion d'un programme ambitieux, que SNCF Réseau va renouveler plusieurs centaines de kilomètres de voies et d'installations caténaïres chaque année. L'ensemble de ce linéaire fera l'objet d'investigations topographiques à destination des études projet. Que la méthode de levé soit de la tachéométrie traditionnelle ou de la lasergrammétrie, le besoin de géoréférencement précis est crucial sur de telles distances. L'existence d'un canevas alliant à la fois précision relative et absolue est donc nécessaire. La division ATT (Assistance Travaux et Topographie), rattaché à la Direction Ingénierie et Projets de SNCF Réseau, réalise une importante partie des canevas principaux aux abords des futurs chantiers de renouvellement. La campagne de l'année 2017 aura vu ses équipes réaliser environ 500 km de canevas sur une dizaine de zones. Devant ce volume important, les procédures de préparation, d'acquisition, traitement et livraison ont été revues. Nous proposons donc de détailler ici les règles de l'art et les pratiques du métier relatives aux observations et au calcul d'un canevas linéaire au sein de SNCF Réseau, en montrant en parallèle l'apport des outils digitaux et de la programmation dans notre travail.

MOTS-CLÉS

géodésie, canevas, GNSS, nivellement, SNCF Réseau, France

Topologie d'un canevas

Un canevas est une densification en points pérennes, aux abords du chantier à traiter, du réseau géodésique localement en vigueur. Les canevas conformes aux prescriptions internes de SNCF Réseau sont construits de la façon suivante.

Pour des levés par méthode classique, un couple de points intervisibles et interdistant de 300 mètres est installé tous les 1 500 mètres le long de la voie. Dénommés "canevas d'ensemble principaux", ils excèdent désormais rarement un linéaire de 10 km. Pour des levés par lasergrammétrie embarquée, méthode à présent courante chez SNCF Réseau, l'interdistance entre couples consécutifs est élevée à 5 km, tout en conservant l'intervisibilité des points d'un même couple. Nous parlons alors de "canevas pseudo-géodésiques". Pour ces canevas, les points sont en premier lieu utilisés comme pivots RTK lors de la phase de positionnement des points de calage – ou GCP – le long du parcours réalisé avec le système LiDAR, puis comme pivot PPK pour le calcul de sa trajectoire. Si le nuage de points n'est pas exhaustif sur certains endroits et que des compléments par une autre méthode de levé sont nécessaires, les points de canevas peuvent, soit servir de pivots encadrant pour densifier la polygonale par GNSS, soit servir de pivots RTK, soit de points encadrants pour une polygonale tachéométrique.

Les points sont matérialisés par des bornes à ancrages de 80 cm, ou des rivets scellés si un support béton pérenne est disponible.



Figure 1. Une borne aux abords d'une ligne ferroviaire



permet dans un premier temps de faire le piquetage prévisionnel des points de canevas. Ce pré-positionnement des points se fait encore manuellement en les plaçant sur un fond de carte – BD ORTHO OU BD SCAN – et en privilégiant la simplicité des accès (passages à niveaux, quais de gare) et les zones dégagées (hors d'un tunnel ou d'un canyon). Cette opération est la seule qui requiert une intervention humaine, mais elle est d'autant plus justifiée qu'un opérateur qui place lui-même les points sur une carte s'approprie mieux le chantier à venir.

À partir des 3 paramètres ferroviaires cités ci-dessus, on est capable de trouver automatiquement les repères de nivellement, sites géodésiques et stations RGP à utiliser lors des opérations de rattachement. Pour cette étape, la division ATT se sert des couches géoréférencées du NGF, du RBF, et du RGP, dans un format ShapeFile.

Pour les repères de nivellement du NGF, une requête spatiale est effectuée pour obtenir tous les repères NGF en bon état et situés à moins de 2 km de la zone chantier. Cette routine offre un gain de temps très important par rapport à une méthode manuelle qui consisterait à télécharger les fiches depuis le serveur de fiches de l'IGN. Suivant la taille du chantier, l'opération peut prendre plusieurs heures (cas d'un canevas de 100 km de long par exemple). Avec ce programme, la requête renvoie son résultat en moins d'une minute.

Pour les sites RBF, la sélection est faite sur les plus proches voisins du chantier, et dont la précision planimétrique est indiquée " < 1 cm". Puisque ce type de points va être utilisé lors du contrôle absolu pendant l'ajustement du réseau GNSS, il est nécessaire d'avoir la meilleure précision disponible. La précision des points du RBF n'est pas toujours inférieure à 1 cm, et certains sites n'ont que des points précis à 5 voire à 10 cm en planimétrie. On ne peut donc les utiliser pour contrôler des points que l'on souhaite précis à mieux que 2 cm. La densité de sites RBF, environ un tous les 25 km, fait qu'on en utilise en général 3 à 4 par chantier. L'opération prend une fraction de seconde, là où il aurait fallu quelques minutes à la main sur le serveur de fiches de l'IGN.

Canevas Castelhaudary – Carcassonne

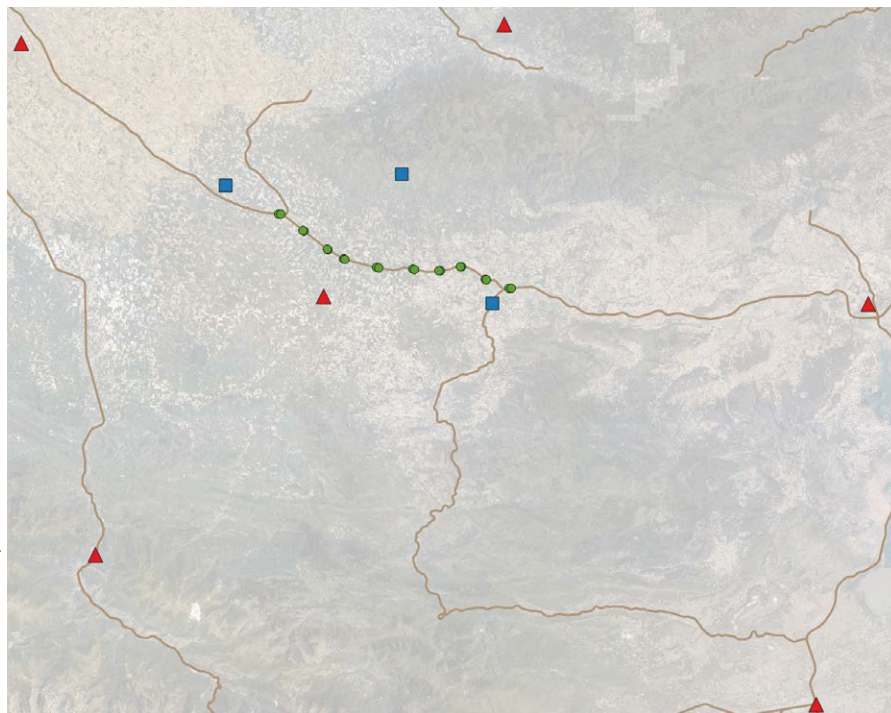


Figure 4. Stations RGP encadrant le chantier (en rouge) – sites RBF de précision 1 cm aux abords du chantier (en bleu)

Enfin, les stations RGP sont sélectionnées en tant que plus proches voisins de l'ensemble {points de canevas + sites RBF}. On vérifie que cette sélection constitue l'enveloppe convexe du réseau complet.

Dans un logiciel Open Source comme QGIS, toutes ces étapes peuvent être automatisées au moyen de scripts Python utilisant les outils PyQgis.

Le réseau {canevas + NGF + RBF + RGP} est alors formé. Il est exporté avec toutes les métadonnées vers des outils de visualisation cartographique, soit au format KML à ouvrir avec Google Earth, soit au format CSV pour être diffusé sous une URL BatchGeo. Le catalogue de fiches signalétiques – parfois plusieurs centaines – n'a pas besoin d'être imprimé. L'URL de la fiche étant une métadonnée, elle peut être téléchargée d'un simple clic sur le champ correspondant dans l'outil choisi. L'accès aux points de canevas et aux sites RBF en véhicule est également facilité, car ils peuvent être directement définis comme point d'arrivée dans un itinéraire sous l'appli de navigation utilisée, sans jamais avoir besoin de taper les coordonnées à la main.

La préparation complète d'un canevas pseudo-géodésique de 100 km prend

environ une heure pour un opérateur expérimenté sur ces travaux, contre 2 jours auparavant, le temps étant principalement dédié au pré-piquetage puis au contrôle visuel des tâches automatisées.

Mise en place, observation et calcul d'un canevas

■ Mise en place

Les points sont mis en place sur le terrain accompagnés d'une plaquette en aluminium sur laquelle est gravé un identifiant unique.

Au moment de la pose, les métadonnées du point sont enregistrées grâce à un formulaire sur tablette synchronisé avec un serveur de stockage. On y stocke notamment les photos du point,



Figure 5. Un point de canevas équipé de sa plaquette d'identification

▶ une position approchée, un croquis avec des cotes.

■ Un réseau GNSS qui cherche son équilibre

Les composantes planimétriques et altimétriques sont déterminées séparément. La planimétrie est calculée par méthode GNSS statique post-traité, nommée "GNSS multi-stations" dans l'état de l'art donné par [Legros et al., 2013]. L'altimétrie est établie par nivellement direct de précision.

La France métropolitaine est particulièrement bien équipée en matière de sites donnant l'accès au système géodésique national qu'est le RGF93. Via les stations GNSS permanentes du RGP – plus de 400 en France continentale, zone d'intervention de SNCF Réseau – ou via les sites du RBF – plus de 1 000 points publiés avec une précision planimétrique inférieure à 1 cm, on arrive à encadrer la zone de chantier.

Les coordonnées Est et Nord des points du canevas sont déterminées par un calcul GNSS en réseau, c'est-à-dire par le calcul de lignes de base formant un maillage homogène, puis par des phases d'ajustement permettant de lisser les résidus sur l'ensemble des points.

Le réseau est conçu en 3 sous-réseaux :

- le réseau de points de canevas : ce sont les points de SNCF Réseau à calculer ;
- la 1^{re} couronne de points connus et publiés par l'IGN. Ce sous-réseau est constitué des stations RGP et/ou sites RBF encadrant directement le chantier. On les inclut dans le réseau et sont considérés comme points nouveaux, ce qui veut dire qu'ils sont calculés et non fixés. Leur rôle est double : améliorer l'homogénéité du réseau, et fournir un échantillon de points de contrôle, car leurs coordonnées obtenues seront comparées à leurs coordonnées connues ;
- la 2^{de} couronne de points connus et publiés par l'IGN. Ce sous-réseau est constitué des stations RGP encadrant les points de canevas et la 1^{re} couronne. Ils forment l'enveloppe convexe de l'ensemble des points. Ils sont considérés comme fixes en fin de traitement.

Les lignes de base à calculer sont déterminées en effectuant la triangulation de

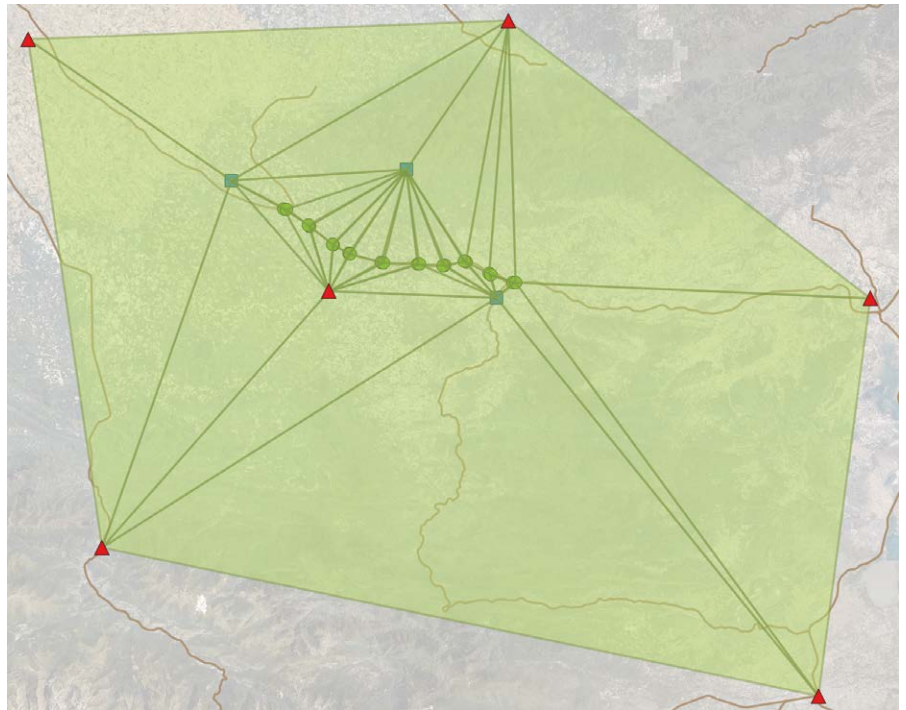


Figure 6. Triangulation de Delaunay du réseau

Delaunay de l'ensemble des points des 3 sous-réseaux. Cette triangulation a l'avantage de donner les lignes de base les plus courtes possible et les mieux réparties autour de chaque point. Elle assure également la présence des lignes de bases entre points nouveaux consécutifs.

D'un point de vue graphique, cela fournit en général un réseau avec une "colonne vertébrale" constituée des points nouveaux, contrainte de part et d'autre par la 1^{re} couronne, le tout étant bloqué dans le système RGF93 par la 2^{de} couronne.

Dans le cas d'un canevas situé proche de la frontière, il n'est pas toujours possible d'avoir une 2^{de} couronne formant bien l'enveloppe convexe du réseau. On utilise alors des stations étrangères. Si les réseaux GNSS permanents régionaux mettent rarement leurs données brutes à disposition aussi simplement que le RGP, l'EPN (*Euref Permanent Network*), réseau qui regroupe les stations EUREF et IGS situées sur le territoire européen, rend les fichiers RINEX accessibles sur un serveur FTP. Cependant, une vigilance particulière est nécessaire pour utiliser des coordonnées cohérentes avec le RGF93, c'est-à-dire publiées dans la réalisation ETRF2000. Le RGF93 a été

recalculé dans sa dernière mise à jour à partir de stations connues en ETRF2000 époque 2009.0, tandis que les stations EPN sont publiées en ETRF2000 époque 2005.0. Leur vitesse de déplacement annuelle est publiée, ce qui permet de les exprimer à l'époque 2009.0. Les précisions souhaitées en fin de calcul nous permettent de faire l'approximation $RGF93 = ETRF2000@2009.0$, ce qui serait probablement réfuté par les géodésiens les plus pointus.

Il faut aussi faire attention au fait que les coordonnées exprimées dans l'en-tête des RINEX des stations EPN ne sont pas les coordonnées publiées, mais bien des coordonnées approchées. Le standard RINEX n'impose effectivement pas de donner des coordonnées précises. En tant qu'utilisateurs assidus du RGP, qui publie dans l'en-tête RINEX les coordonnées publiées, on aurait tendance à l'oublier.

■ Acquisition des données brutes

Les durées d'enregistrement de mesures GNSS statiques sont les suivantes :

- 20 minutes communes pour le calcul du vecteur entre 2 points du même couple ;
- 30 minutes communes entre 2 points de couples consécutifs pour tout autre vecteur, la formule suivante s'applique :



durée de station = 30 min + 1 min par km de ligne de base au-delà de 20 km + 1 min par 100 m de dénivelée.

Sur le terrain, cela se traduit par la tenue de plusieurs sessions d'occupation sur chaque point. Ainsi, on assure l'indépendance linéaire des lignes de base. On évite en effet d'avoir dans le réseau une figure fermée – un triangle ou tout autre polygone – dont tous les côtés sont calculés à partir de la même session d'observations. Ceci est très important pour vraiment bénéficier de la notion de contrôle et de redondance propre aux calculs en réseau.

L'équipe terrain évolue en rotations pour collecter toutes les mesures nécessaires au calcul du réseau. La synchronisation et la navigation des agents est aisée grâce aux applis de messagerie de groupe. Ces applis permettent également de partager la localisation des points de canevas, ce qui est particulièrement pratique pour les agents devant trouver un point qu'ils n'ont pas eux-mêmes installé. La Division ATT est en général composée de 4 personnes, chacune gérant un couple de points. Dans quelques cas, il y a eu jusqu'à 8 opérateurs en simultané, pour un total de 16 récepteurs déployés en même temps – de quoi couvrir de grands linéaires rapidement.

Traitement des observations

Les sessions d'observations des mêmes satellites au même moment de deux points différents permettent de calculer la ligne de base, ou vecteur, entre ces points. Les composantes 3D d'un vecteur correspondent à la différence de coordonnées géocentriques cartésiennes entre les 2 extrémités. Lorsque toutes les lignes de base de la triangulation sont calculées – avec la fixation des ambiguïtés entières *a minima* sur la fréquence *ionofree*, on contrôle leur cohérence par le calcul de fermeture de boucles. Chaque boucle indépendante du réseau est isolée, et la somme de leurs vecteurs est effectuée. Une boucle ferme théoriquement à zéro car le point de départ est aussi celui d'arrivée. La valeur de la fermeture est normalisée en la ramenant à la taille de la boucle, c'est-à-dire à la distance parcourue le long des vecteurs de celle-

Boucle 7

De	A	dX[m]	dY[m]	dZ[m]	Epoque
43200	38940	-2828.1550	1529.0672	2659.8924	09/20/2016 13:33:50
38940	VIEILLEVIGNE	954.1768	-8605.1223	-1101.8093	09/20/2016 12:07:10
VIEILLEVIGNE	43200	1873.9869	7076.0534	-1558.0807	09/20/2016 12:53:30
Est:	-0.0014 m	Test W:	-0.35		
Nord:	-0.0048 m		-0.55		
Altitude:	0.0078 m		0.89		
Erreur de fermeture:	<u>0.0092 m</u>	(0.5 ppm)	Ratio:	(1.2205961)	
Longueur:	20384.3838 m				

Figure 7. Caractéristiques de la fermeture de boucle

ci, ce qui donne une fermeture en ppm. En général on obtient des fermetures planimétriques inférieures à 1 ppm. Une fermeture dépassant les 10 ppm démontre en général la présence d'une ligne de base de mauvaise qualité. Chaque ligne de base se trouvant dans au moins 2 boucles indépendantes, c'est en croisant les informations issues de boucles dégradées qu'on peut retrouver la ligne de base fautive et l'exclure du calcul. Dans ce cas, la surabondance de données issues du terrain et des multiples occupations permet d'avoir accès à une autre session pour ce vecteur, tout en gardant l'indépendance linéaire du réseau.

La validation de cette phase permet d'avoir confiance dans la qualité des mesures. On entre ensuite dans la phase d'ajustement du réseau, avec en 1^{er} lieu l'ajustement libre. Les lignes de base ne sont pas modifiées – les 3 composantes gardent la même valeur – mais sont positionnées de manière à

ce que la somme des écarts au carré de chaque détermination de chaque point avec leur position moyenne soit la plus faible possible. Ceci a pour effet de lisser les résidus sur tout le canevas, et l'expérience montre que les écarts-types en position de chaque point deviennent équivalents à 1-2 mm près.

L'analyse peut aussi être portée sur la forme et l'orientation des ellipses de confiance sur chaque point. On chercherait alors à avoir des ellipses faiblement aplaties et toutes orientées de la même façon. Cette étape validée, c'est ici l'homogénéité du canevas qui est qualifiée. Cette phase permet de s'assurer que le réseau se comporte de la même manière d'un bout à l'autre du canevas. Il reste à passer dans la dimension "absolue" de l'ajustement, à savoir vérifier que le réseau est cohérent avec la réalisation locale du RGF93. Il s'agit dans un 1^{er} temps de l'ajustement à contraintes minimales. On donne ici à un point

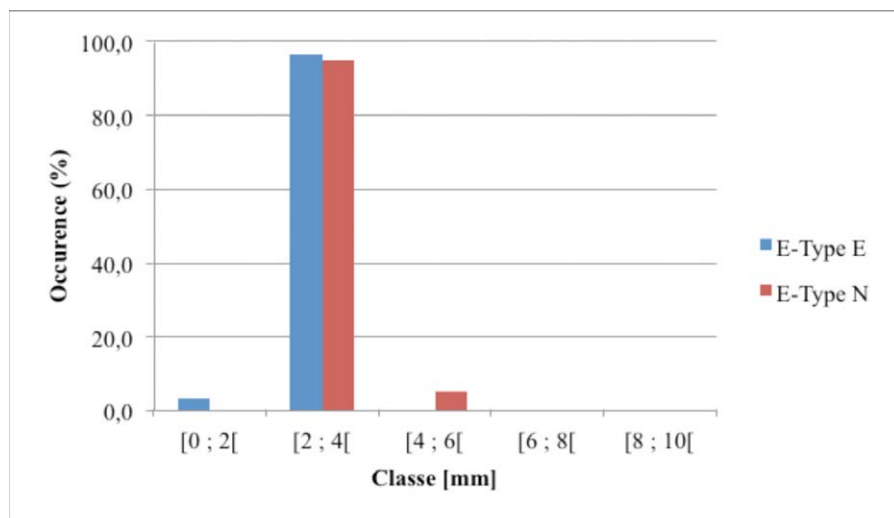


Figure 8. Répartition des écarts-types des points du réseau après ajustement libre



connu dans le RGF93 – typiquement un point de la 2nde couronne car ceux de la 1^{re} ne seront pas fixés – la qualité de point fixe. Cela équivaut à dire que les lignes de base partant de ce point auront pour origine les coordonnées connues de ce point et ne pourront pas être translatées, contrairement aux autres, comme lors de l’ajustement libre. En d’autres termes, il s’agit de répartir les résidus de position du point fixe sur le reste du réseau, et de ce point seulement – les écarts-types des autres points vont donc très peu changer, et surtout de débiter la mise en cohérence du réseau avec le RGF93. L’analyse est réalisée sur les écarts entre les coordonnées calculées de chaque point du RGF93 et leurs coordonnées publiées par l’IGN. Cet écart est généralement inférieur à 15 mm sur chaque composante. Ce seuil est parfois dépassé, soit en cas de mouvement du point connu – cas de bornes géodésiques en zones d’aléas, soit si le point est très éloigné du point fixe, auquel cas celui-ci est calculé par de très longues lignes de base. Un de ces cas pouvant survenir, c’est surtout la tendance globale de tous les points connus qui est observée.

Pour terminer, confiants dans nos mesures, dans l’homogénéité du canevas, et dans sa cohérence locale avec le RGF93, il reste à donner aux autres points connus de la 2nde couronne la qualité de point fixe. Cette étape se

RGP/RBF	Écarts à la position publiée (cm)	
	Est	Nord
ANGL	-0.4	0.7
BOUG	-0.3	1.0
BRE2	0.5	1.1
CARQ	-0.5	1.0
LA BOISSIERE	-0.8	-0.2
LES ESSARTS	-0.1	0.8
LES LANDES	0.0	1.0
MACH	-0.2	0.6
SAGI	-0.2	2.2
TREM	-0.4	1.9
VIEILLEVIGNE	-0.3	0.7

Figure 9. Écarts entre position recalculée et position publiée des points connus, après l’ajustement pré-contraint

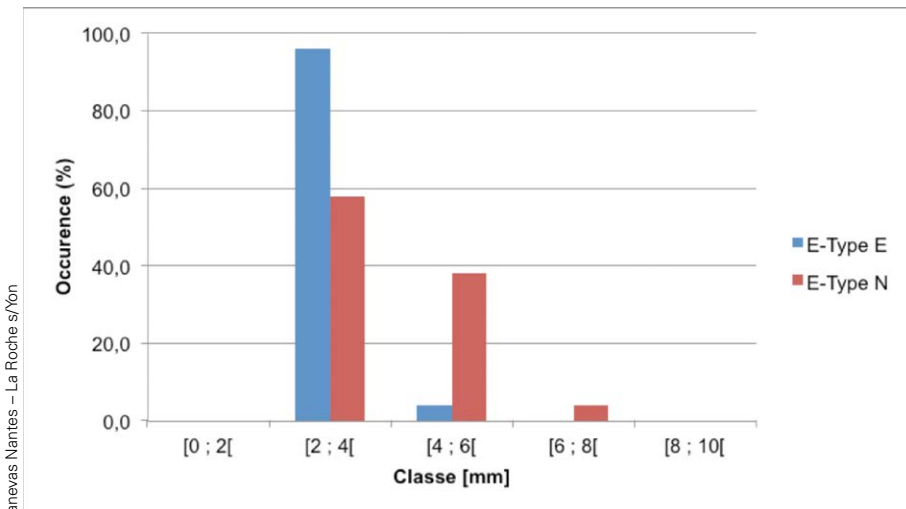


Figure 10. Répartition des écarts-types des points du réseau après ajustement contraint

différencie des autres car elle amène des contraintes dans le réseau. On parle d’ajustement contraint. La figure est déformée de manière à ramener les points connus à leur position vraie. Cela a tendance à augmenter les écarts-types des points calculés car ils “absorbent” les résidus de tous les points nouvellement fixés. L’analyse se porte donc sur ces valeurs et sur leur répartition. En général ils sont groupés autour d’une valeur à 2-3 mm près.

Cette analyse donne une indication sur la précision relative du canevas. Quant à la précision absolue, elle est contrôlée à partir des points de la 1^{re} couronne, en faisant la même comparaison que lors de l’ajustement à contraintes minimales. On vérifie qu’ils sont calculés à moins de 15 mm de leur position connue.

Les coordonnées planimétriques des points nouveaux obtenues après la phase d’ajustement contraint sont celles livrées et publiées. Elles s’expriment dans une projection associée au RGF93, à savoir le Lambert93 ou la

RGP/RBF	Écarts à la position publiée (cm)	
	Est	Nord
LA BOISSIÈRE	-0.6	-0.6
LES ESSARTS	0.0	0.0
LES LANDES	0.1	-0.2
VIEILLEVIGNE	-0.1	-0.4

Figure 11. Écarts entre position recalculée et position publiée des points connus, après l’ajustement contraint

CC 9 zones la plus appropriée pour le chantier, c’est-à-dire celle où l’altération linéaire est la plus faible. L’emploi de coordonnées exprimées en Lambert I, II, III etc. (ancien) dans le référentiel NTF est évidemment proscrit.

■ Un nivellement direct traditionnel

L’altitude de chaque point est déterminée par nivellement direct de précision en cheminement double. Les repères du NGF aux abords du chantier sont utilisés. Suivant les cas, soit l’ensemble des points du canevas est inclus dans un seul et même cheminement, soit chaque couple est rattaché aux repères NGF proches. La stabilité du NGF devant être contrôlée, il y a toujours au moins 2 repères utilisés. Prenons l’exemple du rattachement altimétrique d’un couple dans un canevas pseudo-géodésique. Deux cas de figure s’offrent à nous :

- rattachement par un cheminement encadré seul : le couple de points est inclus entre 2 repères NGF. La fermeture est comparée à la tolérance officielle des cheminements de précision de l’arrêté de 1980, à défaut d’avoir pu mettre en pratique l’arrêté de 2003 sur ce genre de mesures.
- 2 cheminements, un bouclé et un encadré : le cheminement bouclé part d’un repère NGF, inclut le couple de points, puis ferme sur le même repère. La tolérance utilisée ici est basée sur la précision donnée par le constructeur du niveau, car seules les mesures entrent en jeu dans la fermeture. Le



Figure 12. Cas d'un rattachement avec un simple cheminement encadré - les RN en violet, les points de canevas en vert

cheminement encadré, lui, est fait entre le repère NGF utilisé précédemment et un autre. La tolérance est calculée avec la formule décrite ci-dessus.

En cas de cheminement hors tolérance, on vérifie que les deux branches du cheminement double sont homogènes, c'est-à-dire qu'elles présentent un écart de fermeture équivalent, à la précision de mesure près. Si un cheminement encadré est hors tolérance, mais que les 2 branches sont cohérentes, les mesures ne sont pas remises en question, mais plutôt la stabilité du NGF. On poursuit alors les mesures vers un autre repère. Les cheminements sont faits de manière à être nécessairement dans

l'un des deux cas expliqués ci-dessus. Pour les opérations de nivellement, l'équipe de terrain de la division ATT est scindée en 2 équipes de 2 personnes : l'une dédiée aux cheminements en emprises SNCF, sous dispositif de protection ferroviaire, l'autre pour les cheminements pouvant se faire intégralement dans l'espace public.

Lorsque l'ensemble des cheminements couvrant la totalité des points du canevas est effectué et contrôlé, l'altitude obtenue après compensation de l'écart de fermeture est celle retenue. Elle s'exprime dans le système altimétrique légal en France continentale en 2017, à savoir le système NGF - IGN69.

Publication des points

■ SmartTopo®, un portail Web dédié

En fin de traitement, les points, leurs coordonnées et autres attributs sont publiés sur SmartTopo, le portail Web public regroupant l'ensemble des points de canevas principaux mis en place pour le compte de SNCF Réseau depuis 2016 et calculés selon les méthodes expliquées précédemment.

Ce portail, accessible à l'adresse smarttopo.xyz, propose un affichage cartographique de chaque site mis en place. L'utilisateur peut générer les fiches PDF des points ou les extraire en

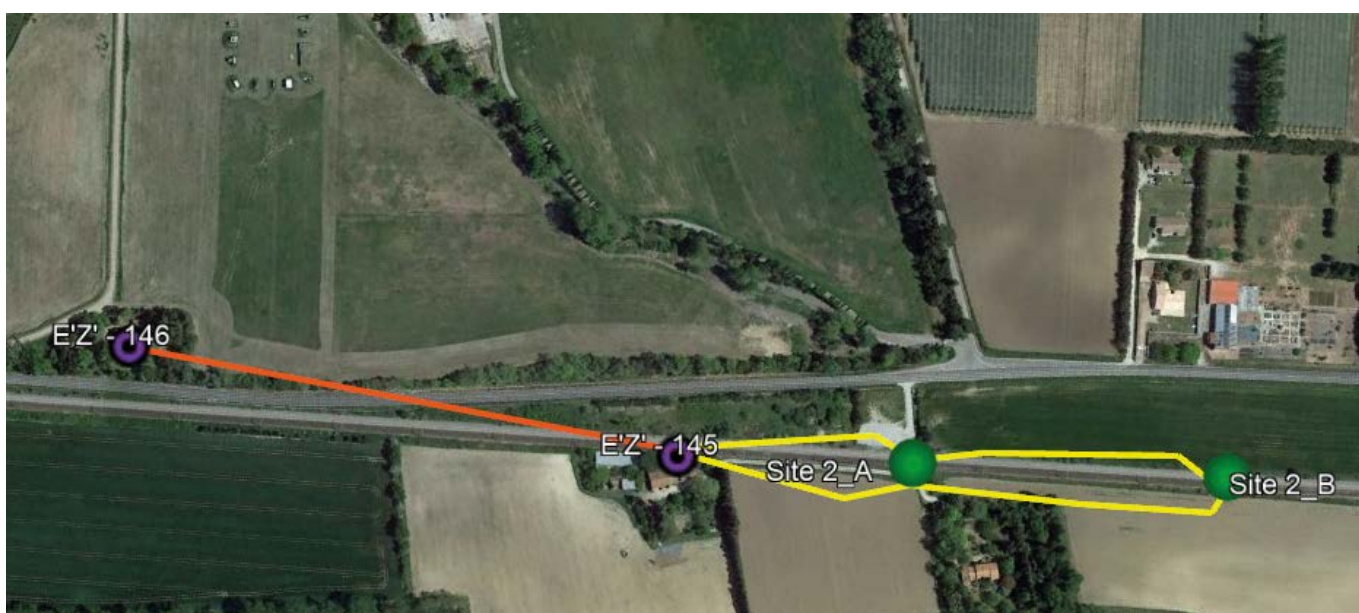


Figure 13. Cas d'un rattachement avec une boucle et un encadré - les RN en violet, les points de canevas en vert

