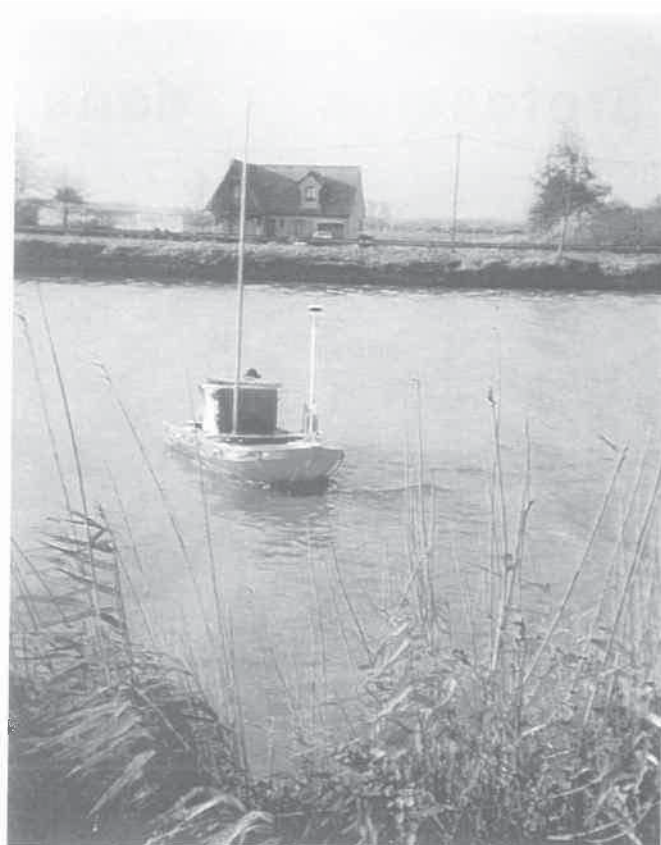


levers de profils en travers sur le canal à grand gabarit du nord-pas-de-calais

la
solution
g.p.s



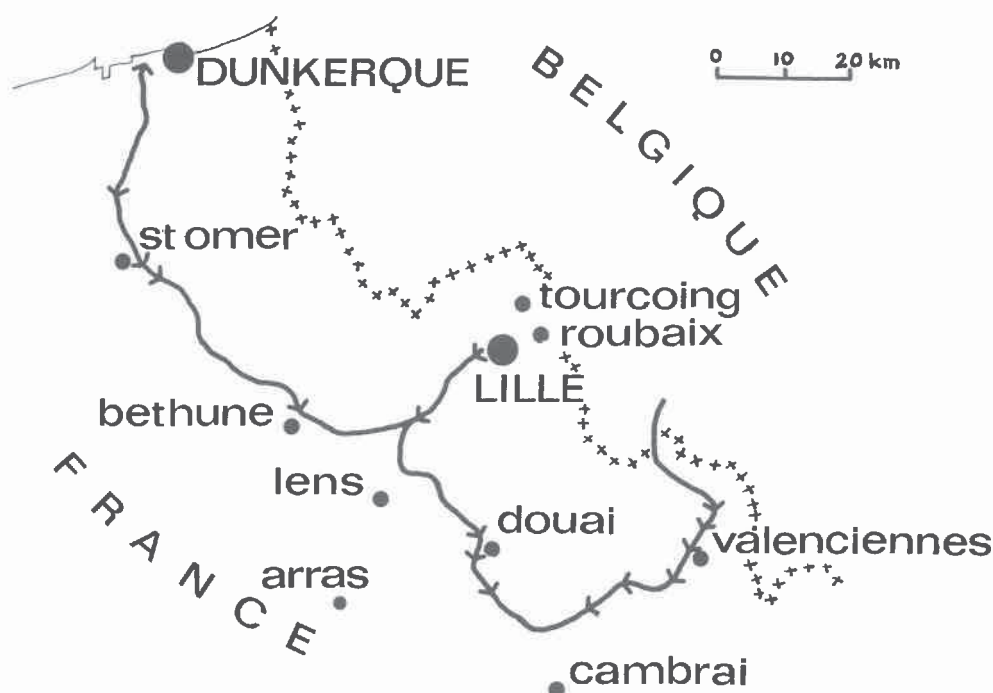
*François Morel. Ing. ESGT (promo 96)
(SCP. J. Misson et F. Morel. G.E. dplg associés)
Partenaires : ACTHYD. SGDS international. GPH.*

première partie

Introduction

Dans le cadre de l'étude de faisabilité de la liaison à grand gabarit entre la Seine et les canaux du Nord-Pas-de-Calais, les Voies Navigables de France (V.N.F.) ont pris la décision d'effectuer le lever de profils en travers de 210 km de canaux, entre Mortagne-du-Nord (frontière Belge) et Dunkerque (Mer du Nord). Cette mission consistait à lever un profil en travers du canal et de ses berges tous les 500 m et à positionner les ponts et autres ouvrages de franchissements. Il s'agissait donc de réaliser pour chaque profil d'une part un levé bathymétrique sur la largeur du canal et d'autre part, le levé topographique des abords.

À cet effet, le Global Positionning System (GPS) en temps réel a été retenu, tant pour la bathymétrie que pour la topométrie. Pour les mesures de profondeur du canal, le GPS a été couplé à un sondeur électroacoustique. Le présent rapport vise à effectuer dans un premier temps une description des particularités de cette mission qui ont dictées notre choix, puis à analyser le travail effectué, les résultats obtenus et les leçons à tirer de l'utilisation du GPS pour ce type de chantier.





Berge dégagée — adaptée au lever GPS

LES PARTICULARITÉS DE LA MISSION

Le terrain

Le canal à grand gabarit du Nord-Pas-de-Calais a une longueur de 210 km. Sa largeur moyenne est d'environ 50 m et sa profondeur varie de 50 cm en bord de berge (hors configuration particulière du type quai) à 4 m 50 environ à l'axe. Géographiquement, le chantier s'étend de Mortagne-du-Nord (frontière belge du côté de Valenciennes) à Dunkerque (mer du Nord) en passant entre autres, par les villes de Valenciennes, Denain, Douai, Lille, Béthune et Saint Omer. Le canal compte le long de ce tracé, 16 biefs avec une dénivellée totale de 33 m entre le bief le plus haut et celui le plus bas.

Les berges du canal sont de nature variable. On notera d'abord la présence de berges instables à végétation denses de Mortagne à Denain soit sur le quart du tracé. Ensuite, la qualité des berges devient meilleure (berges bétonnées ou empierrées) mais jusqu'à Béthune elles restent relativement peu dégagées (présence d'une bande de végétation d'environ 5 m au-delà des chemins de halage le long du canal). Enfin, sur la dernière partie du tracé (de Béthune à Dunkerque) soit le tiers du parcours, le canal est bien dégagé (en dehors des zones urbanisées) et très accessible.

Deux éléments semblent importants à noter dans cette description. D'abord la possibilité d'utiliser le GPS sur les berges du canal, sur la majeure partie du tracé même si localement, la végétation posera des problèmes de réception du signal satellite (obligation d'utiliser le



Rangée d'arbres pouvant poser des problèmes locaux

niveau et la chaîne en se basant sur un point levé par GPS). Ensuite, la possibilité d'accéder facilement aux berges à partir d'un bateau à faible tirant d'eau sur les trois quarts du tracé (berges bétonnées).

Les spécifications

La mission qui nous a été confiée consistait à lever :

- 414 profils à sec et en eau du TN rive gauche au TN rive droite.
- 152 ponts par deux points XY à l'axe.

La description du travail telle que définie dans le marché était la suivante :

« Les profils comportent environ 10 à 12 points sur chaque rive (fossés, bords des chemins de services, talus du canal...) et tous les points en eau nécessaires à la représentation du profil complet, (...). Les points en eau seront espacés de 1 m sur les zones en talus et de 5 m sur les zones horizontales délimitées par le plafond du canal. Sur les zones en talus, une dénivellée supérieure au mètre sur un intervalle de 1 m devra faire l'objet d'une recherche ponctuelle pour déterminer une rupture de pente éventuelle. »

Aucune technique de levé particulière ne nous a donc été imposée par les VNF. On notera en outre que seul 15 km de berges sur les 210 à lever étaient munis de points de référence connus en XYZ (un point tous les 500 m environ). Il s'agit du tronçon entre le port de Lille et la jonction des canaux (après l'écluse de Don).

La position des profils à lever tous les 500 m a été imposée par les Voies Navigables de France sous la forme de points d'axe théoriques connus en XY dans le système Lambert1. Toutefois, il nous était possible de nous déporter de ± 50 m par rapport à ces profils théoriques, en cas de difficulté de mesure (mauvaise réception du signal satellite, présence de péniches le long des berges du canal...).

Les tolérances

Compte tenu de l'utilisation qui sera faite de ces profils, calcul de cubature pour l'avant-projet sommaire de la liaison à grand gabarit Nord-Seine, et de la nature des berges et du fond de canal (vase), les valeurs suivantes ont été retenues :

- **Points caractéristiques** : (bord de berge en béton, chemin de halage, autre point « dur ») : précision relative d'environ **3 cm** en XY et Z.
- **Autres points en topométrie** : Précision relative inférieure à **5 cm** en XY et Z avec possibilité de se décaler de quelques mètres, en conservant un Z et un abscisse constant si le lever d'un point particulier du profil s'avère impossible.
- **Bathymétrie** : Précision relative d'environ **5 cm** en XY et Z. L'objectif pour la bathymétrie était entre autre d'assurer une cohérence entre le dernier point de bathymétrie et le premier point de levé topométrique (continuité du profil).

À cette précision, il convient d'ajouter la notion « d'écart maximal par rapport à l'axe théorique du profil en travers ». Il a été fixé à ± 1 m compte tenu de la manœuvrabilité du bateau et des conditions de navigation (temps de réponse du moteur, vent, courant, passage de péniches...). On comprend aisément qu'au regard de la distance interprofil (500 m) et de la régularité du fond du

canal (faible variation du Z, perpendiculairement au profil en travers), un tel écart n'a qu'une incidence marginale sur la modélisation du fond du canal.

Conclusion

Les caractéristiques de ce chantier étaient donc les suivantes :

- Une configuration en linéaire sur 210 km et 100 m de large environ (dont 50 m immergés).
- Des berges relativement dégagées sur les deux tiers du tracé et généralement accessibles à partir d'un bateau à faible tirant d'eau.
- Une position des profils imposée par les voies navigables avec un décalage de ± 50 m en cas de difficulté de mesure.
- La possibilité de se décaler de quelques mètres par rapport au profil théorique tout en conservant un abscisse précis et un Z cohérent.
- La nécessité d'assurer une continuité entre la bathymétrie et la topométrie.
- L'absence de points de référence (polygonation) sur la plupart des berges du canal.

Dès lors, la solution GPS temps réel nous a semblé être la plus compétitive, d'autant plus qu'elle répondait à plusieurs exigences :

- Réduire le temps d'installation et le nombre des stations de référence sur le canal malgré la configuration du chantier (210 km en linéaire). Il convient de noter que l'établissement d'un canevas n'était pas explicitement présent au marché.
- Utiliser une méthode permettant d'effectuer à la fois le lever topométrique et bathymétrique.
- Obtenir une précision de quelques centimètres en X, Y et Z.
- Pouvoir se positionner en temps réel sur un profil théorique imposé tout en gardant une souplesse de mesure (léger décalage possible).
- Fournir des coordonnées XYZ Lambert de tous les points mesurés sur le terrain.

Compte tenu de l'envergure et de la configuration du chantier, l'utilisation de la topométrie classique était difficilement envisageable. La description précise de la méthode GPS Temps réel et des résultats obtenus, va par la suite en faire l'illustration.

Pour la topométrie

La méthode GPS semi-cinématique en temps réel permet d'obtenir in situ, les coordonnées tridimensionnelles des points levés. Pour cela, un récepteur GPS dit « pivot » est placé de façon statique sur un point connu dans le système WGS84. Un autre récepteur (« mobile ») occupe les uns après les autres les points à localiser, avec une phase de mesure statique de quelques secondes sur chaque point.

Un lien radio transmet en continu vers le récepteur mobile les mesures effectuées par le pivot. Le calculateur du mobile peut alors déterminer en temps réel la position précise des points levés après résolution des ambiguïtés entières. Cette résolution peut se faire lors d'une phase d'initialisation statique ou plus commodément pendant le déplacement. On parle alors de résolution en vol (On The Fly).

Les coordonnées de chacun des points mesurés sont ainsi déterminées et contrôlables presque instantanément. La précision relative est de l'ordre de 1 cm + 2 mm/km en planimétrie et 2 cm + 2 mm/km en altimétrie dans un rayon pouvant aller jusqu'à 10 km autour de la station de référence (pivot).

Toutefois, il convient de noter que le GPS ne permet d'obtenir qu'une hauteur ellipsoïdale et non une altitude. Suivant les ondulations du géoïde par rapport à l'ellipsoïde de référence choisi et en l'absence d'un modèle local précis, la qualité de l'altimétrie peut donc être dégradée de plusieurs centimètres par kilomètre.

Pour la bathymétrie

Là encore, la méthode GPS temps réel permet d'obtenir instantanément les coordonnées du centre de phase de l'antenne à l'aide du lien radio. Le bateau ne pouvant avoir de phase rigoureusement statique, les mesures s'effectuent en continu (cinématique pure) fournissant ainsi une surdensité de points. Le levé s'apparente alors à de la trajectographie. De même, la résolution des ambiguïtés entières se fait forcément en mouvement (On The Fly).

La précision relative sur les points mesurés est la même que pour le levé terrestre (1 cm + 2 mm/km en planimétrie et 2 cm + 2 mm/km en altimétrie).

Matériel utilisé

- 3 récepteurs GPS Bifréquence Trimble (modèle 4000 et 4400).
- 3 radios modems SATEL (1 émetteur et 2 récepteurs).
- 1 sondeur électroacoustique Tritech.
- IPC portable comprenant le logiciel de navigation et d'acquisition de données bathymétrique SATS développé par GPH.



Rangée d'arbres rendant aléatoire le levé des points (fonction de la configuration spatiale des satellites)

Processus de mesure

Un récepteur GPS ainsi que la radio émettrice sont placés sur la station de référence connue en coordonnées Lambert et après transformation, dans le système WGS84. Celle-ci sert de station de référence commune pour le levé bathymétrique et topométrique.

Un deuxième récepteur GPS placé dans un sac à dos, relié à un carnet de terrain électronique et à une radio réceptrice portable permet l'acquisition des données topométriques. Enfin, un troisième récepteur GPS avec radio réceptrice situé sur le bateau et couplé à un sondeur permet d'effectuer les mesures bathymétriques. L'enregistrement des données du GPS et du sondeur se fait alors sur un PC à l'aide d'un logiciel spécial d'acquisition de données bathymétriques.

Cette méthode nécessite donc une équipe de trois personnes, une personne responsable de la station de référence et des changements de pivot qui évolue indépendamment des deux autres (déplacements en voiture), une personne responsable des mesures bathymétriques et pilote du bateau et une troisième effectuant les mesures topométriques. Le mode de déplacement d'un profil à l'autre pour les mesures terrestres est le bateau, les berges étant accessibles à partir du canal.

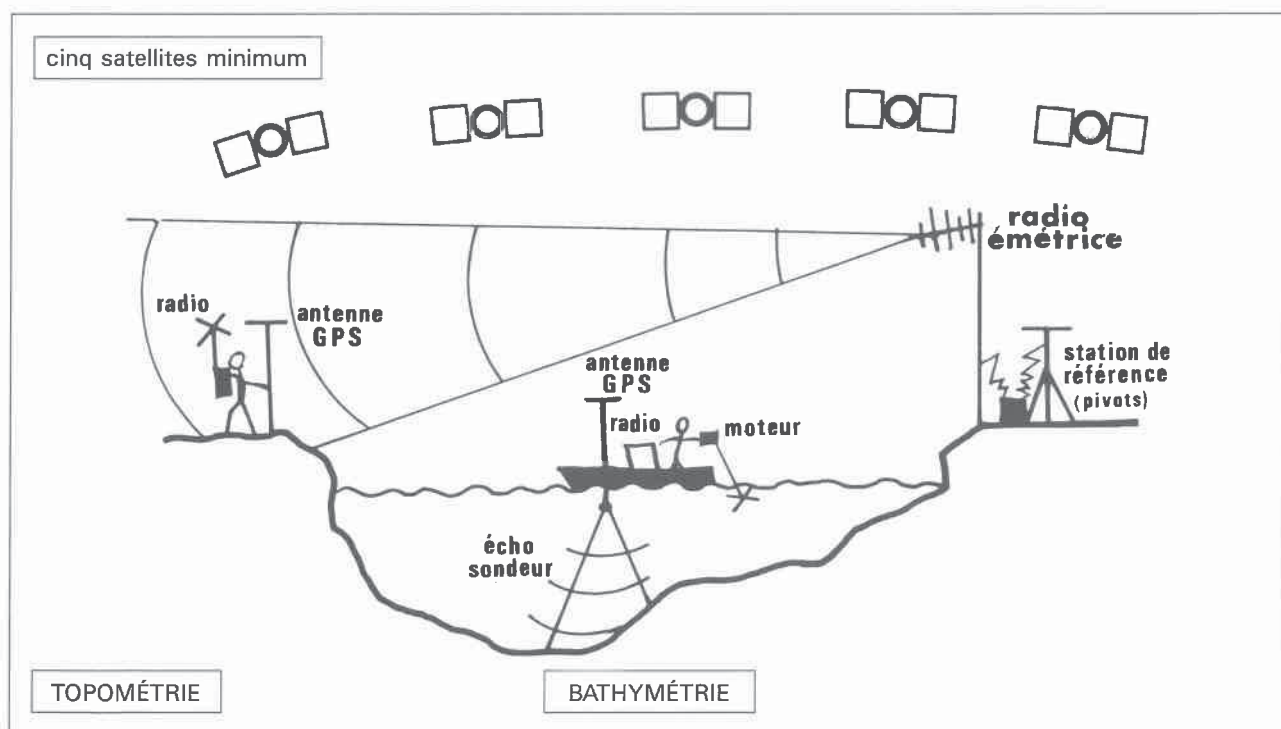
il s'agit du logiciel **SATS** développé par **GPII** (Philippe Gaudillère). Il permet en outre d'acquérir simultanément les données GPS et les données d'un sondeur électroacoustique à une cadence paramétrable (dans notre cas 5 Hz soit 5 mesures par seconde).

Ce type de mesure nécessite bien sûr un traitement particulier pour épurer les données enregistrées (suppression des points litigieux) et ne conserver que ce qui est nécessaire (un point par mètre ici). Ce traitement sera également effectué à partir du logiciel SATS. Nous en décrirons les grandes lignes plus tard (lissage du fond du canal, lissage du « plan d'eau », interpolation pour obtenir les coordonnées XYZ des points du fond du canal tous les mètres...).

ÉTABLISSEMENT DU CANEVAS DE POINTS DE RÉFÉRENCE

La phase de préparation du chantier consistait essentiellement à mettre en place **les points de références** le long du canal en fonction des résultats de la reconnaissance terrain et à préparer le fichier de **points d'axe** des profils en travers (2 points par profil) à insérer dans la base de données du logiciel SATS (droites de référence utilisées pour la navigation).

SCHEMA DE PRINCIPE



Pour se positionner sur l'axe des profils à mesurer, les données du GPS utilisées pour la bathymétrie sont exploitées en temps réel (grâce à la liaison radio) par un logiciel de **navigation**. Le pilote connaît ainsi à tout moment sa position par rapport à l'axe du profil à mesurer (distance et cap à suivre). La méthode GPS temps réel permet ainsi d'éviter la phase d'implantation sur le terrain de l'axe des profils à lever.

Le logiciel utilisé dans le cadre de ce chantier regroupe les fonctions de navigation et d'acquisition de données,

Le nombre de stations installées

La mission de préparation était donc principalement une mission de mise en place d'un canevas de points le long du canal. Les avantages de la méthode GPS Temps réel sont dans cette optique certains. En effet, les profils étant espacés de 500 m, une méthode de levé classique aurait impliqué la mise en place d'au moins une station par profil, soit 420 stations minimum pour l'ensemble du chantier. Compte tenu de la précision de la méthode et de la portée théorique des radios, le recours au GPS

permettait d'envisager l'installation d'une trentaine de stations soit, une tous les 6 km.

En réalité, la nécessité d'un lien radio permanent entre la station de référence et les mobiles nous a obligé à réduire la distance entre les stations. En effet, les constructeurs garantissent pour les radios une portée **en vue directe** allant jusqu'à 3 à 5 km suivant le type d'antenne utilisé. Mais chaque obstacle rencontré entre l'émetteur et le récepteur peut limiter fortement cette portée en fonction de sa nature (béton, acier, bois feuillu ou non...).

Dans le cadre de notre chantier, les obstacles étaient non seulement les ponts et autres ouvrages de franchissement du canal mais également et surtout les méandres de ce dernier et donc la végétation à ces abords. La reconnaissance du terrain a ainsi permis d'identifier les positions propices à l'implantation des stations, à la fois pour optimiser l'utilisation des radios mais également pour capter un nombre suffisant de satellites pour le GPS. De manière générale, nous avons choisi les points les plus hauts rencontrés le long du canal (la portée des radios est d'autant plus grande que l'antenne émettrice est haute).

En définitive, la distance moyenne constatée entre les stations de référence est de **3 km**, portant ainsi le nombre de pivots à **65**.

Précision escomptée

Chaque station couvre donc en moyenne un linéaire de 3 km de canal (1,5 km de part et d'autre). D'où le tableau de précision suivant :

	XY	Z
Précision relative (source documentation Trimble)	1 cm + 2 mm/km	2 cm + 2 mm/km
Précision relative à 1,5 km	1,3 cm	2,3 cm

Il convient pour être tout à fait exact d'ajouter aux valeurs ci-dessus l'erreur due à l'ondulation du géoïde par rapport à l'ellipsoïde supposée être de l'ordre de 1 cm/km dans notre cas (valeur confirmée lors du nivellement des stations). La précision relative obtenue en altimétrie à 1,5 km est de **3,8 cm** tant pour la topométrie que pour la bathymétrie. Bien entendu, la précision absolue sera identique sous réserve d'avoir calculé, sur la station de référence, l'écart entre le géoïde et l'ellipsoïde (nivellement des stations).

Enfin, pour la bathymétrie, il faut également ajouter la précision du sondeur qui est de l'ordre de **5 cm** s'il est correctement calibré (modification de la vitesse de propagation du son dans l'eau à chaque changement de bief ou des conditions météorologiques).

Méthode de mesure et résultats

Le système de mesure utilisé pour la réalisation du canevas de points de référence est le GPS. Pour obtenir une précision suffisante et un réseau de point cohérent d'un bout à l'autre du chantier, l'exploitation des mesures a été effectuée en Post-traitement au bureau (calcul de compensation, calcul de paramètre de transformation, adaptation du réseau IGN...). Deux méthodes de mesures par GPS ont été successivement mises en œuvre sur le terrain.

Dans un premier temps, c'est la méthode du **rayonnement** à partir d'un point IGN situé à moins de 10 km qui a été choisie. Les points IGN sont alors reliés entre eux par un polygone pour d'une part valider leur position (comparaison des lignes de base) et d'autre part calculer les paramètres d'adaptation des vecteurs GPS au réseau local. Par ailleurs, par mesure de contrôle, un point double a été mesuré entre chaque paire de points IGN.

L'inconvénient de cette méthode est qu'elle ne permet pas de déceler une faute sur l'un des points rayonnés. Elle n'est donc pas fiable à 100 % et n'a été utilisée que pour le quart des stations mesurées (15 stations sur 65). Bien entendu, un contrôle des stations a été effectué sur le terrain lors du levé sous la forme de points doubles mesurés par GPS en temps réel entre chaque station de référence. Cela nous a permis de valider les résultats trouvés par la méthode du rayonnement.

Dans un second temps, c'est la méthode du **cheminement** qui a été utilisée. Les récepteurs progressent alors à « saute-mouton », chaque station étant reliée à ses voisines par un vecteur GPS. Les points IGN sont levés au passage tous les 15 km environ, et les cheminements sont refermés tous les 45 km. Ce mode opératoire se prêtait particulièrement bien à la configuration de notre chantier (chantier linéaire). Les temps de mesure choisis pour les lignes de base entre deux stations étaient de 10 min (Fast Static) et entre deux points IGN de 25 à 40 min.

Pour le traitement, le chantier a été décomposé en 4 zones tant par souci d'homogénéité que pour permettre la progression des travaux de levé des profils. Pour chaque zone, l'intégration des vecteurs au réseau IGN a été effectuée par la méthode à 7 paramètres (3 translations + 3 rotations + 1 facteur d'échelle) avec un recouvrement entre zones pour obtenir un réseau de stations cohérent d'un bout à l'autre du chantier. N'oublions pas que les coordonnées de deux points IGN de 4^e ordre distants de 10 km sont déterminés à 20 cm près !

Au minimum, quatre points d'appui IGN ont été utilisés pour chaque transformation, avec entre zones voisines, au moins un point IGN commun. Nous avons ainsi trouvé, lors du calcul des paramètres de transformation, un résidu moyen sur les points IGN pour les quatre zones **inférieur à 4 cm** et un écart maximal entre deux zones de **5 cm**.

La cohérence du réseau a de plus été vérifiée en temps réel sous la forme de point double pris à partir de deux stations consécutives. Les écarts trouvés ont été en moyenne de l'ordre de **3 cm en planimétrie** et **2 cm en altimétrie** (ce qui correspond à peu près à la précision du levé GPS en temps réel !).

Nota : La réalisation du réseau de points de référence a été mise en œuvre sur le terrain dans un premier temps à l'aide du matériel Trimble. Ensuite, afin de permettre aux travaux de levé des profils de progresser, nous avons utilisé deux autres récepteurs (GPS Leica System 200).

(fin de la première partie)

La deuxième partie de cet article paraîtra dans notre prochain numéro (72) en septembre. Elle traitera de la productivité, du traitement des mesures et du comportement du matériel.