

CERN Projet LHC

mesure par GPS
du réseau
géodésique

Tristan BLAUDET



Photo 1 – Embase universelle équipée d'une antenne

AGATE Géomètres experts à Grenoble s'est vu confier par le Groupe Métrologie de positionnement et Topométrie du CERN, les observations géodésiques par GPS du canevas de base du LHC (Large Hadron Collider).

FINALITÉ DE LA MISSION, CAHIER DES CHARGES

Le seul moyen d'assurer l'homogénéité géométrique de toutes les installations du CERN est de disposer d'un référentiel géodésique de précision millimétrique. C'est la raison pour laquelle le Groupe Métrologie a créé et amplifié un réseau de piliers géodésiques équipés d'un repère à centrage forcé. Le dernier réseau correspondant à la construction du collisionneur LEP, a été mesuré avec un distance-mètre à deux lasers en 1983, 1985 et 1986, l'homogénéité des points était de l'ordre de 1,5 mm.

Dans le cadre de son projet LHC, le CERN a besoin de construire deux tunnels de 3 kilomètres de long reliant l'accélérateur SPS au LHC. Le but de la géodésie de ce projet est de s'assurer de l'homogénéité des piliers existants soit en raison de l'ancienneté des mesures, soit en raison de leur instabilité éventuelle.

Le CERN a donc décidé de faire procéder aux mesures par GPS d'une partie des piliers géodésiques (*plan 1*).

Le Cabinet AGATE a été choisi par le Groupe Métrologie de Positionnement et Topométrie pour réaliser les mesures par GPS des points géodésiques du canevas de base du LHC (Large Hadron Collider).

Le cahier des charges était le suivant :

– Cinq piliers géodésiques de référence réputés stables sont considérés comme les points primordiaux connus dans le système tridimensionnel du CERN en tenant compte du géoïde local et sont à utiliser comme points d'appui,

– Treize piliers s'appuyant sur ce réseau primordial, répartis au voisinage des sites des travaux sont à observer ainsi qu'un point IGN (Eche-

nevex III a) pour le rattachement futur à ERTS89. Soit un total de 19 points,

– La précision requise est un écart type de ± 5 mm sur l'ensemble du réseau réparti sur une surface de 13 km x 8 km (*plan 1*). Pas de précision altimétrique requise,

– La durée des observations doit être comprise entre 1/2 heure et 1 heure avec un nombre d'antennes le plus grand possible afin d'assurer une bonne garantie qualitative. Tous les sous-ensembles observés devront être appuyés sur au moins 4 des cinq points primordiaux.

– Deux séries de mesures totalement indépendantes devront être réalisées pour tous les points, mesures réalisées dans des conditions de réception différentes. Les mesures devront être réalisées avec au moins cinq satellites au-dessus de 15 degrés.

– Les résultats devront être transformés du WGS84 dans le système local du CERN par une transformation de HELMERT basée sur les 5 points primordiaux après superposition des deux séries de mesures et analyse statistique des différences observées.

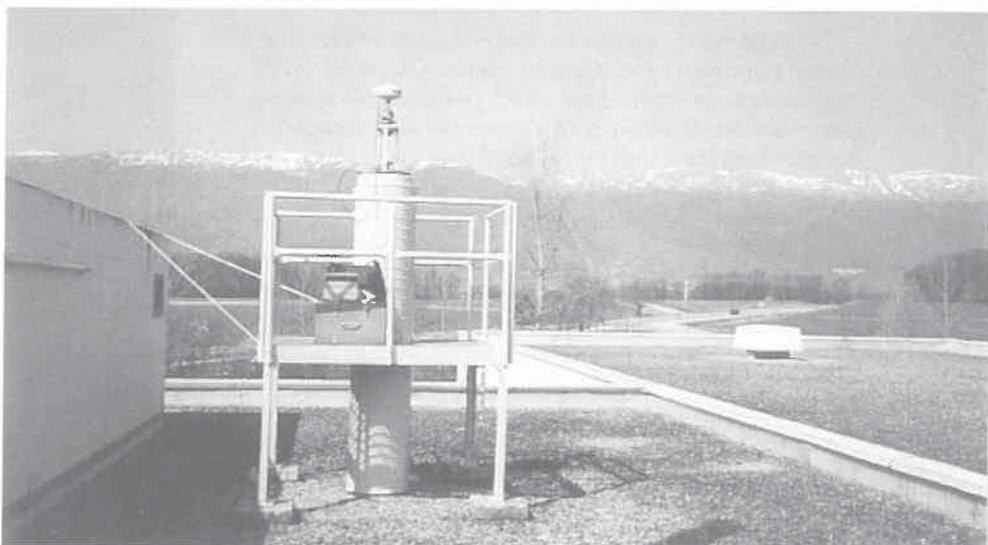


Photo 2 – Pilier 304 sur l'immeuble CERN



Photo 3 – Équipement standard donnant les mesures

ORGANISATION ET LOGISTIQUE DU CHANTIER GPS

Nous avons soumis au Groupe Métrologie un schéma d'organisation s'appuyant sur une procédure qui était la suivante :

- Une équipe de deux personnes ;
- Étude des masques afin d'optimiser les fenêtres d'observation et éviter les multitrajets éventuels ;
- Mise en œuvre simultanée de, au minimum 6 récepteurs et au maximum 8 récepteurs GPS ;
- Schéma d'organisation des sessions et cheminements permettant l'observation simultanée de 15 ou 28 vecteurs par session durant un temps établi à 45 minutes minimum en commun pour l'ensemble des récepteurs fonctionnant dans une même session ;
- Observations réalisées avec un GDOP (Geometric Dilution Of Precision) inférieur à 4 ;
- Orientations précises des antennes dans la même direction afin d'éliminer les erreurs d'excentrement, les antennes étant toutes issues du même constructeur, leurs différences de type (SR200 ou AT 302) et d'excentrement sont pris en compte au moment des transferts dans le logiciel de calcul ;
- Utilisation lors des calculs à l'aide du logiciel SKI 2.2 d'un modèle troposphérique de Hopfield et d'un modèle ionosphérique standard, utilisation des éphémérides radiodiffusées, les éphémérides précises n'apportant pas de précision supplémentaire ;

– Analyse des résultats des calculs des vecteurs pris en compte sessions par sessions ;

– Ajustement des sessions en laissant les points libres afin de mettre en évidence les éventuels vecteurs posant problème, puis ajustement par journée de l'ensemble des sessions.

Au niveau logistique, la difficulté n'a pas tellement été de réunir les 4 ou 6 antennes GPS manquantes mais de les réunir simultanément. Que nos confrères soient ici remerciés de leur concours.

Les moyens suivants ont été mis en œuvre : 4 capteurs GPS Leica SR299, 2 capteurs GPS Leica SR399 (photo 4), 2 capteurs GPS Leica SR399E/AT 302, 10 batteries GEB71, 4 batteries accu « moto », câbles, chargeurs, 1 Micro-ordinateur portable AST 900 N équipé du logiciel SKI 2.2 et d'un module d'ajustement, enfin un stock de multi-prises et de rallonges afin de pouvoir recharger toutes les batteries le soir à l'hôtel.

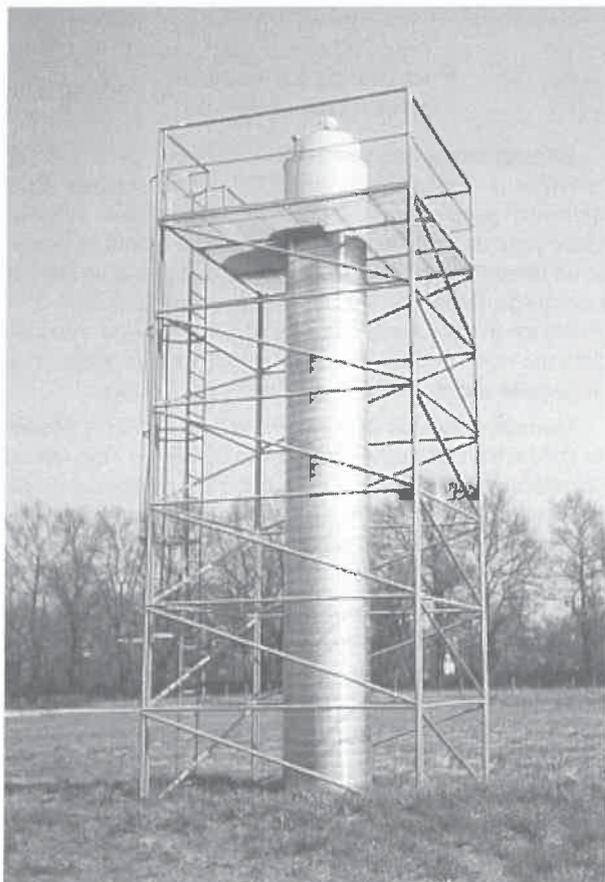


Photo 4 – Pilier 223, hauteur : 8 mètres

LES MESURES GPS

La mission d'observations s'est déroulée les 30 et 31 mars 1998.

Nous avons prévu d'effectuer 5 sessions par jour, chaque session est prévue sur 2 heures afin de laisser le temps de déplacer les antennes mobiles au nombre de 4, puisque les 4 autres antennes restent à poste fixe durant toute la journée sur les points primordiaux.

La composition des sessions du jour 1 a été la suivante (en gras, les points primordiaux) :

Session 1							
353	231	233	230	375	225	226	Ech.IIIa
Session 2							
353	231	233	230	375	365	225	226
Session 3							
353	231	223	304	314	306	225	226
Session 4							
353	231	304	216	307	210	225	226
Session 5							
353	231	210	215	451	229	225	226

La composition des sessions du jour 2 a été la suivante (en gras, les points primordiaux) :

Session 1							
353	231	-	-	451	229	225	226
Session 2							
353	231	215	210	307	316	225	226
Session 3							
353	231	306	314	304	223	225	226
Session 4							
353	231	365	230	233	225	226	Ech.IIIa
Session 5							
353	231	375	230	233	225	226	-

Ainsi, les observations ont pu être réalisées à des jours et heures différentes donc avec des constellations très différentes.

Un de nos premiers problèmes a été d'optimiser les passages multiples de frontière entre la France et la Suisse afin de limiter au plus court les formalités douanières, un bon transitaire et de la patience sont nécessaires.

La deuxième difficulté fut, comme d'habitude pourrait-on dire, le problème des batteries. En effet malgré un équipement de 14 batteries (constructeur et « moto ») le risque de voir une session interrompue par une mise en veille d'un des récepteurs incite fortement à un changement par anticipation d'une batterie montrant un risque d'arrêt inopiné. Fort heureusement le Groupe Métrologie possède un parc de batteries qui, sans nous laisser l'embarras du choix, nous a permis de résoudre un nombre important de problèmes.

Toutes les mesures ont été réalisées par centrage forcé sur les piliers, nous avons rencontré un certain nombre de problèmes au niveau des verrouillages des plaques universelles de centrage forcé (alésage 30 mm) des piliers géodésiques (sphères CERN de type Taylor-Hobson diamètre 88,9 mm, voir photo 1).

Globalement, l'ensemble du programme des sessions d'observations a pu être respecté, seules deux sessions ont été amputées de façon partielle de leurs observations, l'une par un problème de batterie, l'autre par un délai de franchissement des douanes.

CALCULS

Les lignes de base ont toutes été observées par la méthode de mesures statiques, la durée de chaque session de mesures a été comprise entre 45 et 90 minutes, les enregistrements ont été réalisés toutes les 20 secondes, soit un nombre d'époques enregistrées compris entre 135 et 270.

Lors de l'observation des 5 piliers du réseau primordial dans une même session de 4 heures, un récepteur supplémentaire a été placé sur le point du RBF Eche-nevex III a, ce qui permet d'avoir via les données WGS84 de l'IGN une connaissance de la position du chantier à quelques centimètres près et nous permettait donc d'assurer le minimum d'erreurs de ppm sur les vecteurs calculés ensuite entre les points.

Au cours des sessions suivantes, chaque point du réseau secondaire a été déterminé par la mesure des lignes de base sur au moins 4 des 5 points primordiaux. Des contraintes supplémentaires se sont donc rajoutées car nous déterminons dans le même temps des vecteurs entre les points secondaires.

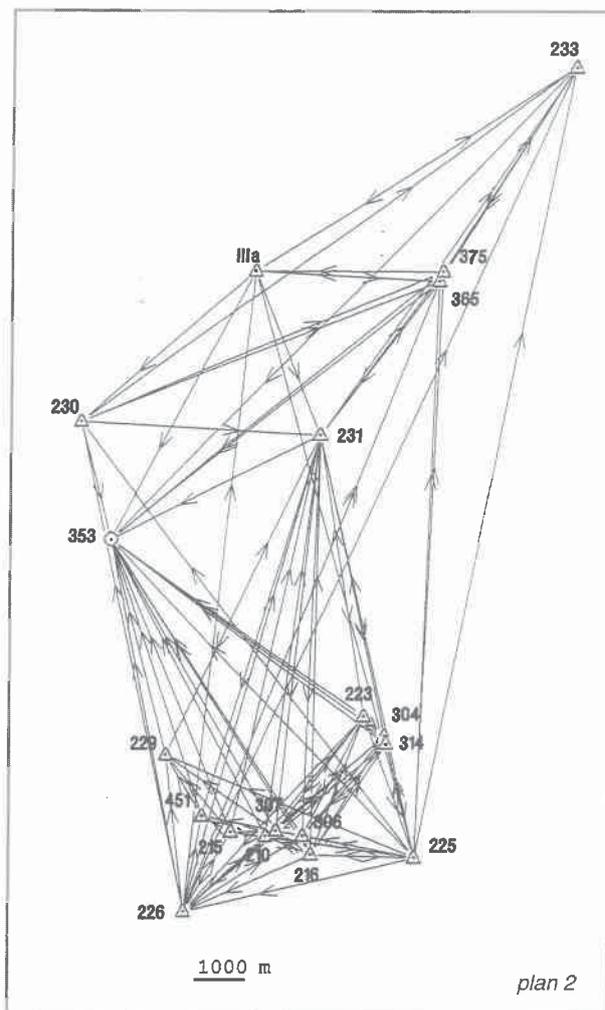
L'ensemble des observations nous a permis d'obtenir un facteur de redondance calculé suivant la formule :

$$F = (R-1) \times S / (N-1)$$

Avec R = nombre de récepteurs, S = nombre de sessions et N = Nombre de points observés

Soit pour ce chantier F = 3,9, ce facteur de redondance aurait dû se trouver à 4, mais une panne de batterie élimine 2 points du nombre d'observés.

Les calculs des lignes de bases ont été réalisés sessions par sessions en appliquant un fenêtrage des observations suivant les sessions de mesures, cette décomposition des calculs permet une meilleure analyse des résultats.



Pour chaque session le nombre de lignes de bases calculables est donné par la formule : $L = R \times (R-1) / 2$ où R est le nombre d'antennes utilisées simultanément.

Soit, dans notre cas **28 lignes de bases observées simultanément dans les sessions** les plus favorables, les lignes de bases indépendantes étant quant à elles au nombre de 7 soit R-1. Tous les vecteurs ont été calculés afin d'obtenir une meilleure cohésion possible du réseau final (plan 2).

À l'issue de chaque calcul de session les résultats donnent pour chaque vecteur les éléments suivants permettant de valider ou non les mesures :

- Les durées de mesure communes à chaque vecteur,
- Le nombre d'époques utilisées durant les sessions,
- L'évolution des paramètres de PDOP et de GDOP durant les mesures (fenêtrage possible)
- Les EMQ et ratios de la solution retenue, c'est-à-dire l'EMQ après fixation des ambiguïtés pour le jeu le plus favorable,
- La valeur effective des EMQ des vecteurs avant fixation des ambiguïtés,
- Le niveau d'importance sur lequel le test d'hypothèse est construit,
- Le nombre de sauts de cycles,
- Les coordonnées finales des vecteurs et les écarts-types.

Ensuite, et pour chaque session, un calcul d'ajustement a été réalisé, tous les points étant libres. Les résultats, une fois analysés, ont été validés.

Trois ajustements finaux ont été réalisés : ajustement sessions 1, 2, 3, 4, 5 du jour 1 ; ajustement sessions 6, 7, 8, 9, 10 du jour 2 ; ajustement de toutes les sessions réunies jour 1 plus jour 2.

Les paramètres de calcul des ajustements sont :

- La fixation du point 226 avant chaque calcul,
- Le nombre d'itérations pour le calcul est fixé à 2,
- Le niveau de confiance pour la précision des points est fixé à 68 %, soit $\pm 1 \sigma$.

Les résultats des ajustements permettent d'analyser :

- Les écarts-types a priori et a posteriori,
- Les critères de fiabilité sur les vecteurs et les critères de confiance sur les points,
- Les résidus géodésiques de chacun des vecteurs,
- Les matrices réduites de variance et covariance géodésique,
- Les coordonnées géodésiques ajustées.

RÉSULTATS

Les résultats des mesures des points du réseau sont exprimés en coordonnées cartésiennes dans le référentiel WGS84 (ellipsoïdal et géocentrique). Ces coordonnées ont ensuite été converties dans le système local du CERN par une transformation de Helmert. Pour ce faire nous avons été amenés à réaliser une translation manuelle sur les coordonnées locales du CERN afin de permettre le calcul de la similitude par le logiciel SKI :

$$(dx = + 439\,000, dy = + 46\,000, dz = + 458\,000)$$

Ces constantes ont été retranchées après application de la matrice de transformation 3D.

Dans un premier temps, nous avons calculé les transformations 3D pour passer dans le système CERN avec

un facteur d'échelle fixé à 0 ppm. Le but de figer ce paramètre était de permettre d'analyser finement les mesures brutes ajustées entre le jour 1 et le jour 2. Les écarts maximum constatés donnaient certaines différences de coordonnées proches de la limite de la tolérance spécifiée par le Groupe Métrologie.

Après analyse statistique de notre part puis discussions et accord avec notre client nous avons procédé au recalcul des transformations en laissant le facteur d'échelle libre, l'observation des résultats permet de constater que les facteurs d'échelle entre les deux jours présentent de sensibles différences (-0,659 et -2,145 ppm) qui s'expliquent par :

- La variation des paramètres ionosphériques entre les 2 journées pour lesquelles nous n'avons pas calculé de modèles ionosphériques particuliers,
- La variation de l'échelle de temps des horloges internes,
- Les bruits de fond de la mesure,...

Par contre les résultats sont plus satisfaisants que dans la solution précédente quant aux écarts constatés.

La transformation utilisée a été une Helmert 3D à 7 paramètres basée sur le modèle Molodensky-Badekas qui fixe l'origine de rotation au centre du système A (WGS84). De ce fait cette origine varie en fonction des points communs utilisés, les paramètres de translation sont les composantes du vecteur depuis le centre de gravité du système A vers le centre de gravité des points communs du système B (système CERN).

Le tableau ci-dessous donne les écarts entre les mesures jour 1 et jour 2 : On constate que malgré les remises en station, les constellations et antennes différentes, les résultats jour 1 et jour 2 sont très proches, les problèmes des différences de coordonnées, particulièrement sur le point 231 sont à mettre sur le compte des difficultés rencontrées sur les embases de centrage forcé.

ÉCARTS : (Jour 1) - (Jour 2)				
N°	écart en X (m)	écart en Y (m)	écart en Z (m)	Localisation
210	0,004	-0,004	-0,010	Immeuble CERN
215	-0,001	-0,001	-0,004	Immeuble CERN
216	0,003	-0,001	-0,012	Immeuble CERN
223	0,004	0,006	-0,013	Pilier 8 m
225	0,004	0,003	-0,001	Pilier MEYRIN
226	0,002	-0,004	-0,001	Pilier vignes
229	-0,002	-0,001	-0,004	Immeuble St Genis
230	-0,002	-0,006	0,000	Pilier Jura
231	-0,005	0,010	0,010	Pilier Veraz
233	0,004	-0,008	-0,004	Pilier Mont Mourex
304	0,000	0,006	-0,008	Immeuble CERN
306	0,006	0,003	-0,023	Immeuble CERN
307	0,003	-0,001	-0,009	Immeuble CERN
314	0,003	0,003	-0,009	Pilier
353	-0,004	-0,001	-0,004	Pilier
365	0,002	-0,003	-0,002	Immeuble CERN
375	0,000	-0,003	0,000	Pilier
451	0,000	-0,001	-0,005	Pilier 5,50 m
Illia	0,005	-0,010	0,045	Borne RBF

Les écarts constatés sur le point 233 correspondent très probablement au fait que durant le jour 1, une coupure de session s'est produite due à une panne de batterie.

Tous les points se trouvent dans la tolérance d'écart-type de ± 5 mm en XY demandés par le CERN.

Il est donc tout à fait pensable de mettre en œuvre de la mesure GPS dans le cadre de mesures géodésiques de précision et ceci de façon relativement aisée dans le cadre de ce type de canevas de dimension réduite.

Nous avons ensuite procédé au calcul des 10 sessions réunies dans un seul et même ajustement.

Calcul du réseau Global incluant les 10 sessions :
(coordonnées système CERN)

GPS réseau				
N°	X	Y	Z	Localisation
210	1661.406	2315.462	2468.002	Immeuble CERN
215	1200.676	2077.583	2481.529	Immeuble CERN
216	2360.373	2453.928	2451.996	Immeuble CERN
223	1821.910	4555.773	2476.278	Pilier 8 m
225	3639.960	3251.616	2435.168	Pilier MEYRIN
226	1288.260	723.737	2500.894	Pilier vignes
229	-259.011	2474.0312	487.073	Immeuble St Genis
230	-4176.620	5828.705	2745.541	Pilier Jura
231	-1130.981	7626.909	2527.483	Pilier Veraz
233	-1150.730	14165.762	2729.962	Pilier Mont Mourex
304	2242.236	4484.388	2468.772	Immeuble CERN
306	2103.957	2616.088	2454.365	Immeuble CERN
307	1740.200	2463.645	2456.709	Immeuble CERN
314	2325.642	4404.227	2457.810	Pilier
353	-2796.831	4648.589	2527.053	Pilier
365	-1009.616	10466.872	2513.124	Immeuble CERN
375	-1046.116	10615.796	2506.690	Pilier
451	706.614	2032.647	2447.620	Pilier 5,50 m
IIla	-3314.790	9105.692	2564.242	Borne RBF

Ces coordonnées ainsi ajustées et considérées comme définitives ont enfin été comparées au référentiel CERN local. Le tableau ci dessous met en parallèle la comparaison finale du réseau total avec les coordonnées fournies par le CERN.

Tableau des écarts constatés entre le réseau GPS et les coordonnées communiquées par le CERN :

N°	X	Y	Z	Localisation
210	-0.002	0.004	-0.005	Immeuble CERN
215	-0.004	-0.004	-0.006	Immeuble CERN
216	-0.001	0.001	0.006	Immeuble CERN
223	-0.001	0.002	0.014	Pilier 8 m
225	-0.003	0.005	0.013	Pilier MEYRIN
226	0.002	-0.006	-0.021	Pilier vignes
229	-0.005	-0.005	0.006	Immeuble St Genis
230	-0.019	0.001	-0.045	Pilier Jura
231	-0.001	0.001	0.017	Pilier Veraz
233	0.002	0.000	-0.012	Pilier Mont Mourex
304	-0.013	-0.002	-0.363	Immeuble CERN
306	-0.008	-0.005	-0.004	Immeuble CERN
307	-0.011	-0.006	-0.009	Immeuble CERN
314	-0.010	-0.006	0.039	Pilier
353	0.000	0.001	0.004	Pilier
365	0.013	-0.010	0.024	Immeuble CERN
375	0.011	0.003	0.058	Pilier
451	-0.001	-0.003	-0.023	Pilier 5,50 m
IIla	0.501	0.207	-1.666	Borne RBF

Les remarques qui viennent immédiatement au regard de ce tableau sont :

- Que le point Echenevex III a fourni en coordonnées CERN a été calculé dans un système différent que celui de l'ensemble des autres points, c'est-à-dire qu'il ne fait pas partie du réseau initial.

- Un commentaire sur le point 230 placé sur le flan Est du Jura, montre d'une part sa probable instabilité,

d'autre part les observations étant quant à elles totalement occultées coté Ouest par la montagne au-dessous d'un angle de 40°, ceci a pu également contribuer à un tel écart.

Les autres points n'appellent quant à eux aucunes remarques particulières, les différences de coordonnées montrent les aspects d'instabilité probable des points situés sur des immeubles.

ANECDOTES

Comme toujours, un géomètre en opérations subit son lot de petites histoires au hasard des chantiers. Deux d'entre elles ont marqué notre première journée, je vous les livre ici.

Lors de l'observation du point 229 qui est un pilier sur le toit d'un immeuble de Saint Genis, nous avons vu après 40 minutes, du haut de notre perchoir, arriver en force (5 véhicules dont la grande échelle) une bonne partie de la caserne de pompiers de St Genis. Nous ne nous doutions pas un seul instant que nous étions l'objet de ce déplacement. Dès qu'il accède au toit le premier pompier nous interpelle : "qu'est-ce que vous f... là?". Après explications, nous nous sommes rendu compte que des personnes logées dans les immeubles voisins avaient donné l'alerte à la tentative de suicide. Les pompiers s'étaient même déplacés avec le médecin psychologue au cas où...

Le même soir, mon coéquipier s'est vu refuser le franchissement de la frontière (avec ses 4 antennes GPS) par les douaniers français car la valeur marchande transportée était trop élevée et le bureau de transit fermé. Après une longue explication, il a été convenu qu'il puisse passer en France pour rejoindre son hôtel à condition présenter le matériel le lendemain...

CONCLUSIONS

Le GPS est un des maillons de la chaîne de mesures qui permet de s'affranchir des problèmes de météo, de répétition des mesures et donc de la durée globale d'une telle campagne. La force du système réside également dans le fait que l'on puisse mettre en œuvre un grand nombre d'antenne et ainsi obtenir un facteur de redondance qui garantit la fiabilité et la qualité des mesures.

Au delà, cette expérience s'est montrée enrichissante dans le sens où, lorsque les résultats de calculs passent à la "moulinette" du mathématicien du Groupe Métrologie, les questions posées relèvent souvent d'une rigueur scientifique d'un abord très différent de celui qui prévaut chez le géomètre de terrain.

Que toutes les personnes ayant participé de près ou de loin à cette opération trouvent ici le témoignage de notre gratitude pour leur aide précieuse.

Nous avons été très heureux d'avoir été choisis par le Groupe Métrologie du CERN pour cette campagne géodésique, la collaboration entre nos équipes a permis de se rendre compte que les préoccupations de tous géomètres sont bien les mêmes dès lors que l'on parle de mesures de précision, seuls les moyens d'y parvenir sont différents.