

Trajectoire d'avion par GPS pour la gravimétrie aéroportée

■ F. DUQUENNE, A.V.OLESEN, J. CALI

Pour améliorer le géoïde français sur la Corse un levé de gravimétrie aéroportée a été réalisé par une collaboration entre KMS, l'Université de Bergen, l'ESGT, l'IGN et l'INSU. Les mesures gravimétriques ont été positionnées à l'aide de GPS. A bord de l'avion, deux récepteurs étaient connectés à une seule antenne. Au sol quatre récepteurs étaient installés sur la côte d'Azur française ainsi que deux en Corse. Les trajectoires ont été calculées plusieurs fois, avec chaque station de référence, dans le sens direct et dans le sens inverse au moyen du logiciel GRAFNAV. La longueur des lignes de base atteint plusieurs centaines de kilomètres. Les différentes solutions sont comparées et combinées, ce qui donne une bonne estimation de la précision en position, vitesse et accélération. La précision en position absolue horizontale est meilleure que 10 cm, et 20 cm en vertical. En positionnement relatif sur la trajectoire la précision est bien meilleure, de l'ordre du centimètre. Les calculs GPS sont expliqués ci-dessous ainsi que les résultats des comparaisons en position, vitesse et accélération par trajectoire.

Le calcul du quasi-géoïde Français (QGF98) a mis en évidence des erreurs dans la gravimétrie marine entre la Côte d'Azur et la Corse (Duquenne H, 1998). Profitant de la mission de gravimétrie aéroportée en Méditerranée (CAATER), un levé gravimétrique aéroporté a été réalisé en collaboration entre le service du cadastre danois KMS, l'université de Bergen (Norvège), l'ESGT, l'IGN et l'INSU du 20 au 22 février 2001.

L'avion ARAT (Fokker 27) de l'IGN, affrété par l'INSU, piloté par un équipage de l'IGN, a volé à une altitude d'environ 300 m et une vitesse d'environ 300 km/h. L'avion a utilisé trois aéroports pour décoller et atterrir : Toulon, Bastia et Ajaccio. Dans la suite nous présentons la détermination des trajectoires par GPS, en essayant d'en déduire des précisions sur la position, la vitesse et l'accélération de l'avion.

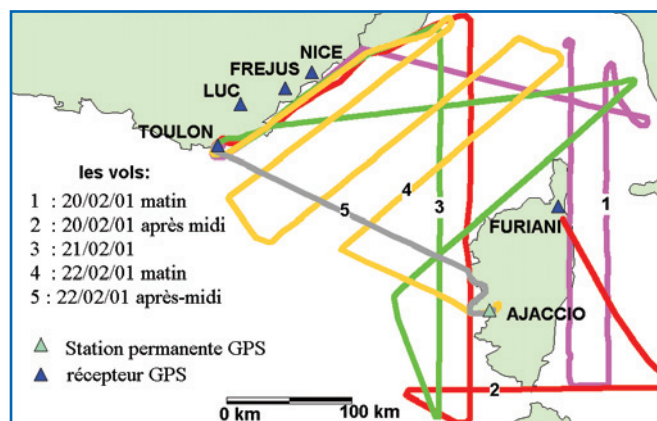


Figure 1 : trajectoires de l'avion et stations GPS de référence.

Les observations GPS

A bord de l'avion, deux récepteurs bifrèquence sont connectés à la même antenne. La cadence d'enregistrement des observations est une seconde. Les récepteurs sont mis en route au moins un quart d'heure avant le décollage, et restent quelque fois allumés quelques dizaines de minutes à l'atterrissage. Ceci permettra d'initialiser le calcul en mode cinématique par un positionnement statique.

Au sol six stations GPS sont installées pour servir de référence : quatre sur la Côte d'Azur et deux en Corse (fig. 1). La station de TOULON est sur l'aéroport et les stations de FURIANI et AJACCIO à quelques kilomètres des aéroports de Bastia et Ajaccio.

L'ensemble des stations enregistre les observations toutes les secondes. Les stations AJACCIO, FURIANI et FREJUS sont des points du nouveau réseau géodésique français, le RGF.

Les calculs GPS

Dans un premier temps les coordonnées de toutes les stations au sol sont calculées dans le système géodésique Français RGF93 qui est similaire au système européen ETRS89.

Le calcul est réalisé avec le logiciel SKI version 2.3, en mode statique "ionosphere free" (L3), avec toutes les observations enregistrées sur ces stations pendant les vols de l'avion. Les coordonnées obtenues sont centimétriques.

Pour les calculs de trajectoire le logiciel utilisé est GRAFNAV version 6.0. Il s'agit d'un calcul de positionnement relatif,

- entre un point de référence au sol et le récepteur de l'avion, toutes les secondes.

Les mesures de phase sont traitées sur les deux fréquences L_1 , L_2 , en formant les équations d'observation en double différence :

$$\nabla\Delta\Phi = \nabla\Delta\rho + \lambda\nabla\Delta N + \nabla\Delta\delta\rho_{iono} + \nabla\Delta\delta\rho_{tropo} + \nabla\Delta m + \nabla\Delta e + \nabla\Delta\varepsilon_\phi \quad (1)$$

ϕ : mesure de phase [m]

ρ : distance géométrique entre satellite et récepteur :

$$\rho = \sqrt{\Delta X^2 + \Delta Y^2 + \Delta Z^2} \quad [\text{m}]$$

N : ambiguïté entière [cycles]

$\delta\rho_{iono}$: correction ionosphérique [m]

$\delta\rho_{tropo}$: correction troposphérique [m]

m : erreur due aux multi trajets [m]

e : erreur due aux éphémérides [m]

ε_ϕ : bruit de la mesure de phase [m]

Les inconnues sont les coordonnées (X,Y,Z) du récepteur de l'avion et N , les ambiguïtés entières.

Les options du calcul présenté ici sont les suivantes :

- éphémérides précises de l'IGS,
- combinaison L_3 (ionosphere free) qui permet d'éliminer le premier ordre de l'effet ionosphérique. Ceci est indispensable ici puisque les longueurs des lignes de base sont de plusieurs centaines de kilomètres.
- utilisation du modèle troposphérique SASTAMOINEN : la correction troposphérique reste le problème majeur de la précision sur la hauteur. Il n'y a pas de mesure de météorologie, ni au sol, ni dans l'avion.

Cependant ici le problème est minimisé par le fait que l'avion vole bas (300 m d'altitude), et donc il y a peu de variation entre les stations au sol et le récepteur embarqué.

- Résolution des ambiguïtés sans fixation (solution flottante) : la résolution des ambiguïtés se fait différemment au début de la trajectoire (initialisation) et en cours de vol :
 - Au début (ou à la fin de la trajectoire pour les calculs inverses) on calcule la position du récepteur avant décollage, en statique, à partir de la station la plus proche. Puis dans le calcul cinématique on fixe la première position, ce qui permet de résoudre facilement les ambiguïtés, même si on détermine la trajectoire à partir d'une station très éloignée (plusieurs centaines de kilomètres)
 - En vol, un algorithme de résolution des ambiguïtés en vol est utilisé.
- Il n'y a pas de traitement particulier des multi trajets, ce qui peut provoquer des problèmes de résolution d'ambiguïtés. Des multi trajets à la station de référence peuvent durer quelques minutes, tandis que les multi trajets au niveau de l'avion sont en général furtifs, à cause du mouvement de l'avion qui provoque des changements rapides de la position relative des satellites. En calculant la trajectoire à partir de plu-

sieurs stations, et en les comparant on peut mettre en évidence les multi trajets sur les stations au sol. Ceux de l'avion influent sur la résolution des ambiguïtés, mais cet effet diffère selon la distance entre l'avion et la station de référence.

Résultats des comparaisons de trajectoires

Les trajectoires ont été calculées avec toutes les stations quand cela était possible, c'est à dire lorsque le récepteur de la station était allumé avant le décollage de l'avion. On a aussi procédé au calcul de la trajectoire inverse, lorsque le récepteur est resté allumé suffisamment longtemps après l'atterrissage pour pouvoir calculer sa position en statique.

On peut remarquer ici que pour les aéroports de Bastia et Ajaccio la station la plus proche est à 10 km pour l'un et 3 km pour l'autre ce qui nécessite un temps d'observation d'au moins une demi-heure. Dans la suite on détaillera par des graphiques la comparaison de la trajectoire du 20/02/01 après-midi (n°2) calculée à partir de Toulon d'une part et d'Ajaccio d'autre part. Ces deux stations sont éloignées l'une de l'autre de 250 km.

■ Comparaison en position

Les figures 2, 3 et 4 montrent les différences en latitude, longitude et hauteur de la trajectoire 2 entre le calcul avec la référence à Toulon et celui avec la référence à Ajaccio.

On peut remarquer que la variation de coordonnées est inférieure à 8 centimètres en horizontal et 14 cm en hauteur. Un "décrochement" intervient entre les époques 230110 et 230284 soit pendant 174 s. L'amplitude atteint 4 cm en horizontal et 12 cm en vertical. On voit par ailleurs qu'entre ces deux époques le décrochement est à peu près constant. On peut identifier la cause de cet écart. Il pourrait être provoqué par un changement de constellation des satellites reçus par l'avion (Bruton A.M., 2000). Ce n'est pas le cas ici, les satellites observés sont les mêmes avant et après l'incident et sont au nombre de huit. On peut suspecter des multitrajets soit à l'une des stations, soit sur l'avion. Pour cela le calcul avec plusieurs stations peut nous aider : ici on fait trois comparaisons de trajectoires :

- Toulon-Ajaccio
- Toulon-Nice
- Nice-Ajaccio

Les deux premiers calculs mettent en évidence le décrochement, tandis que le dernier n'en présente pas. On peut en déduire que probablement il y a un multi trajet à la station de

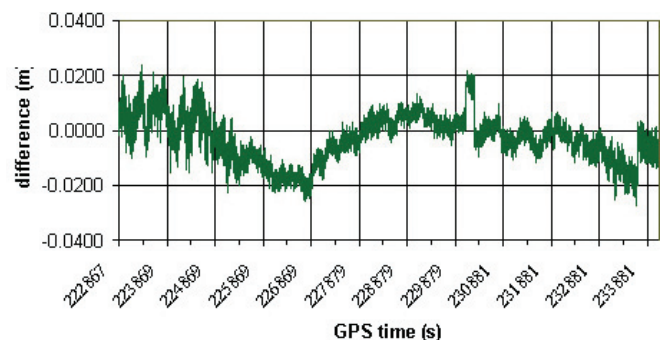


Figure 2 : différence de coordonnées composante Nord.

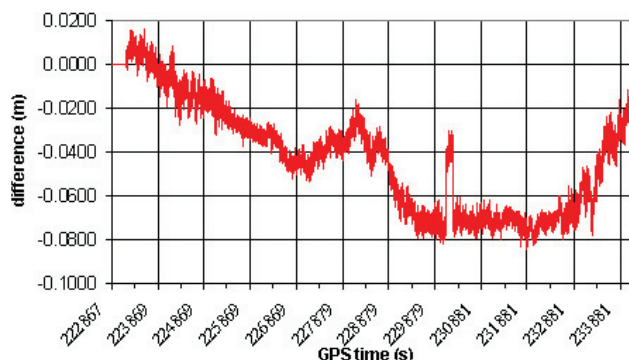


Figure 3 : différence de coordonnées Est.

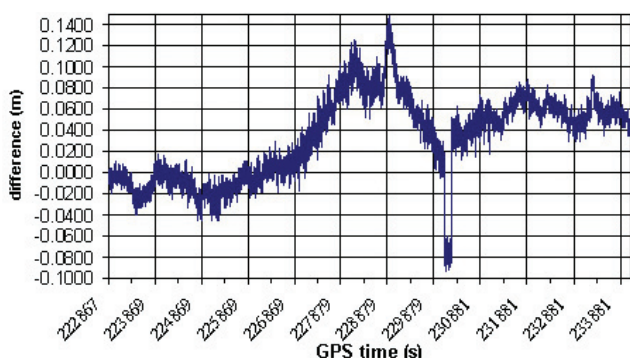


Figure 4 : différence en hauteur.

Toulon. Pour en être sûr, on a procédé à un calcul des trois lignes de bases en statique. L'examen des résidus montre des résidus forts (3-4 cm) sur un même satellite pour les lignes de base Toulon-Ajaccio, et Toulon Nice, tandis que la ligne de base Nice-Ajaccio a des résidus faibles (1-2 mm) sur ce satellite. Le multi trajet à la station Toulon semble confirmé, et on peut retirer quelques observations sur le satellite 17 puis refaire le calcul de la trajectoire.

Pour chaque trajectoire on présente ci-dessous une comparaison avec deux stations de référence.

Tableau 1 : trajectoires comparées (tableaux 2 à 4).

N°	REFÉRENCE 1	REFÉRENCE 2	LONGUEUR
1	Toulon	Ajaccio	980 km
2	Toulon	Ajaccio	970 km
3	Toulon	Ajaccio	1200 km
4	Toulon	Furiani	1150 km
5	Toulon	Ajaccio	270 km

Le résumé des comparaisons en coordonnées pour chaque trajectoire est donné dans les tableaux 2, 3 et 4. En moyenne la précision en position horizontale est meilleure que 10 cm, et 20 cm en vertical. On voit ici l'influence de la troposphère sur la composante verticale.

Tableau 2 : différences des composantes nord (m).

N°	MOYENNE	RMS	MIN	MAX
1	-0.059	0.072	-0.118	0.053
2	-0.003	0.009	-0.024	-0.0273
3	-0.019	0.049	-0.066	0.064
4	-0.027	0.110	-0.126	-0.136
5	-0.011	0.055	-0.160	-0.039

Tableau 3 : différences des composantes est (m).

N°	MOYENNE	RMS	MIN	MAX
1	-0.088	0.091	-0.126	-0.012
2	-0.042	0.049	-0.085	0.015
3	-0.011	0.031	-0.079	0.098
4	0.003	0.039	-0.096	0.108
5	-0.099	0.102	-0.170	0.033

Tableau 4 : différences en hauteur (m).

N°	MOYENNE	RMS	MIN	MAX
1	0.081	0.112	-0.043	0.191
2	0.033	0.051	-0.094	0.148
3	0.025	0.046	-0.137	0.151
4	0.026	0.083	-0.164	0.183
5	0.129	0.179	-0.220	0.264

■ Comparaison en vitesse

La vitesse est calculée à partir des positions :

$$x'(t) = \frac{x(t+1) - x(t-1)}{2} \quad (2)$$

On a déjà remarqué que la précision relative sur la trajectoire était nettement meilleure qu'en absolu, et bien sûr on retrouve cela sur la vitesse qui est meilleure que 0.005 m/s en horizontal, et 0.010 m/s en vertical. La vitesse verticale est moins bonne, et plus perturbée qu'en horizontal. On remarque que le décrochement en position a très peu d'influence en vitesse, quelques cm/s, quelques secondes au début et à la fin de l'incident.

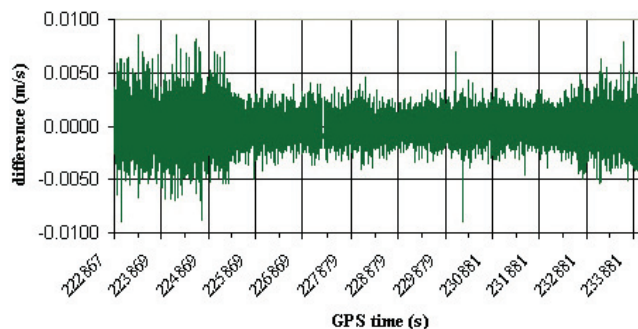


Figure 5 : différence de la composante nord de la vitesse.

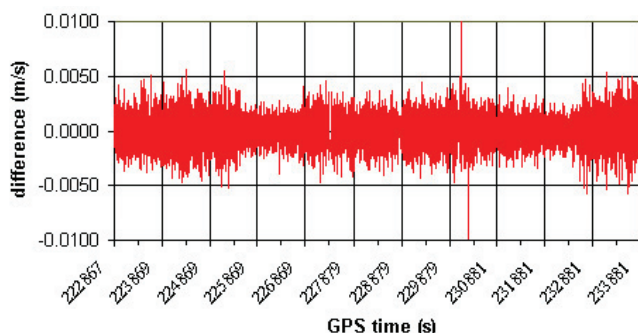


Figure 6 : différence de la composante est de la vitesse.

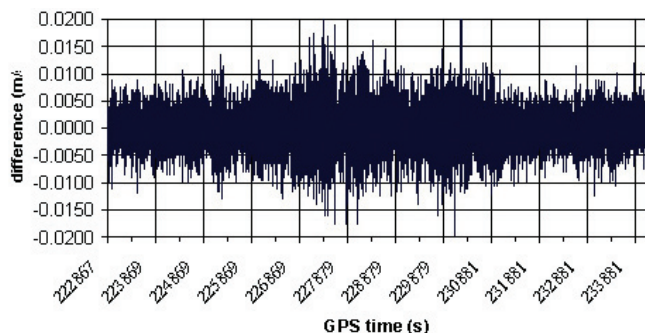


Figure 7 : différence de la composante verticale de la vitesse.

- Les tableaux de 5 à 7 donnent les statistiques sur les différences en vitesse pour toutes les trajectoires, en m/s. En moyenne on constate des écarts de 2-3 mm/s en vitesse horizontale et 4-5 mm/s en vitesse verticale.

Tableau 5 : différences en vitesse (composante nord, m/s).

N°	MOYENNE	RMS	MIN	MAX
1	-2.10^{-5}	0.002	-0.005	0.005
2	-3.10^{-6}	0.001	-0.005	0.005
3	2.10^{-8}	0.001	-0.006	0.005
4	2.10^{-6}	0.003	-0.011	0.011
5	2.10^{-7}	0.002	-0.005	0.006

Tableau 6 : différence en vitesse (composante est, m/s).

N°	MEAN	RMS	MIN	MAX
1	4.10^{-6}	0.001	-0.003	0.003
2	1.10^{-6}	0.001	-0.004	0.004
3	6.10^{-6}	0.001	-0.005	0.005
4	-5.10^{-6}	0.002	-0.007	0.007
5	2.10^{-6}	0.002	-0.016	0.016

Tableau 7 : différence en vitesse verticale (m/s).

N°	MEAN	RMS	MIN	MAX
1	2.10^{-5}	0.004	-0.010	0.010
2	6.10^{-6}	0.004	-0.013	0.012
3	-3.10^{-5}	0.005	-0.016	0.015
4	-7.10^{-6}	0.007	-0.021	0.022
5	-9.10^{-5}	0.006	-0.026	0.029

■ Comparaison en accélération

L'accélération est calculée à partir de la vitesse :

$$x''(t) = \frac{x'(t+1) - x'(t-1)}{2} \quad (3)$$

Les écarts en accélération sont très faibles, en moyenne moins de 2 mm/s² en horizontal et un peu plus de 3 mm/s² en vertical. L'effet du décrochement devient très petit.

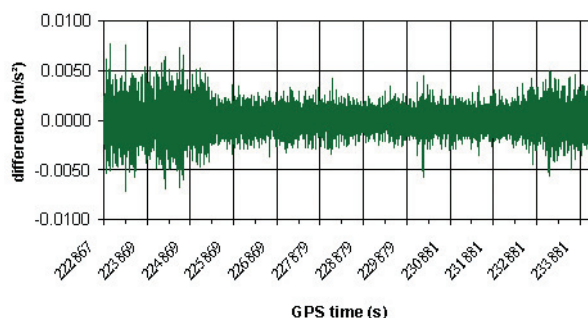


Figure 8 : différence en accélération (composante nord).

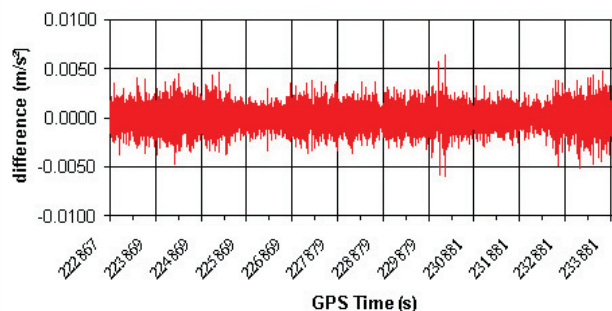


Figure 9 : différence en accélération (composante est).

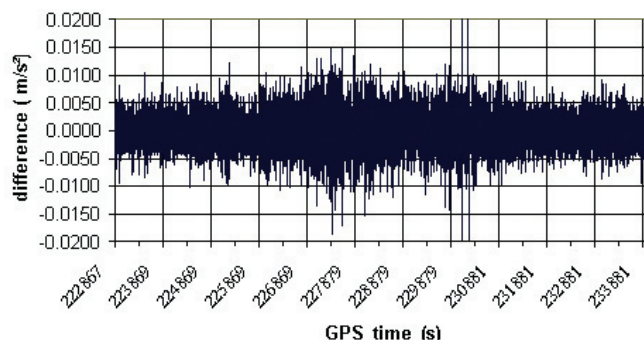


Figure 10 : différence en accélération (composante verticale).

Les tableaux 8 à 10 donnent les statistiques sur les différences d'accélération pour toutes les trajectoires en m/s².

Tableau 8 : différence en accélération (composante nord, m/s²).

N°	MOYENNE	RMS	MIN	MAX
1	-2.10^{-5}	0.002	-0.005	0.005
2	-3.10^{-6}	0.001	-0.005	0.005
3	2.10^{-8}	0.001	-0.006	0.005
4	2.10^{-6}	0.003	-0.011	0.011
5	2.10^{-7}	0.002	-0.005	0.006

Tableau 9 : différence en accélération (composante est, m/s²).

N°	MEAN	RMS	MIN	MAX
1	4.10^{-7}	0.001	-0.003	0.003
2	2.10^{-7}	0.001	-0.003	0.003
3	-1.10^{-7}	0.001	-0.004	0.004
4	2.10^{-6}	0.001	-0.005	0.005
5	3.10^{-6}	0.001	-0.004	0.004

Tableau 10 : différence en accélération verticale (m/s²).

N°	MEAN	RMS	MIN	MAX
1	2.10^{-5}	0.003	-0.007	0.007
2	4.10^{-7}	0.003	-0.011	0.011
3	1.10^{-5}	0.003	-0.013	0.013
4	-4.10^{-7}	0.006	-0.018	0.018
5	2.10^{-5}	0.004	-0.013	0.011

Les comparaisons montrent que l'on obtient l'accélération avec une bonne précision de l'ordre de quelques mm/s² quelles que soient les longueurs des lignes de bases. Ces résultats semblent significatifs car le bruit est en moyenne 0 à tout instant et la corrélation dans le temps est de quelques secondes.

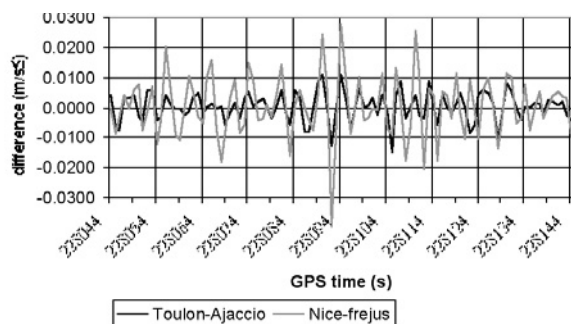


Figure 11 : Différences en accélération verticale : zoom sur 100 s.

La figure 11 montre un zoom sur 100 s de la comparaison des accélérations verticales de la trajectoire 2, d'une part avec les références Toulon-Ajaccio, d'autre part Nice-Fréjus. On peut constater clairement une corrélation entre les bruits des deux comparaisons, ce qui montre que la combinaison de plusieurs trajectoires ne pourra pas éliminer tous les bruits.

Utilisation pour la gravimétrie aéroportée

Le GPS permet d'une part de positionner les mesures gravimétriques et d'autre part contribue à leur réductions. En ce qui concerne le positionnement la précision obtenue est largement suffisante, pour la réduction des observations il faut discuter selon la correction.

Le calcul des anomalies gravimétriques au niveau de l'avion est obtenu par : (Olesen A.V., 2002).

$$\Delta g = A_z - A_{z0} - h'' + \delta g_{Eötvös} + \delta g_{tilt} + g_0 - \gamma_0 - (h - N) \partial \gamma / \partial h \quad (4)$$

où A_z est la lecture au gravimètre, A_{z0} la lecture à la référence, h'' l'accélération verticale de l'avion donnée par GPS ramenée au point de mesure, $\delta g_{Eötvös}$ la correction d'Eötvös (formule de Harlan, 1968), g_0 la valeur de la pesanteur à la référence, γ_0 la valeur de l'accélération normale, h la hauteur ellipsoïdale donnée par GPS, N la hauteur du géoïde (modèle EGM96) et δg_{tilt} la correction d'horizontalité du bras du gravimètre. Les déterminations GPS interviennent dans trois termes :

- La correction $-(h-N) \partial \gamma / \partial h$ qui corrige la mesure pour la ramener au niveau 0 : la variation de γ par rapport à la hauteur est de $-3.086 \times 10^{-6} s^{-2}$ donc une erreur de 1 mètres sur h donne une erreur de $1 \mu m/s^2$ (0.1 milligal). La précision de h par GPS est largement suffisante.
- La correction d'Eötvös est due à la vitesse de l'avion (composante verticale de l'accélération de Coriolis) : d'après (Torge W., 1989), à la vitesse 300 km/h, pour une précision de la correction de $5 \mu m/s^2$ (0,5 milligals), il faut une précision sur la vitesse d'au moins 0.03 m/s. Donc le GPS répond à cette précision sans traitement particulier.
- la correction de l'accélération verticale de l'avion est la plus délicate, car pour avoir une précision de 1 milligal il faudrait une précision sur l'accélération verticale GPS de $10^{-6} m/s^2$. Comme le montre le tableau 10 la précision est de l'ordre de quelques mm/s^2 . Cependant, on peut voir dans la figure 11, qui est un zoom sur 100 s que la corrélation en temps est de quelques secondes et la moyenne nulle à tout moment. Il apparaît qu'il est facile de filtrer.

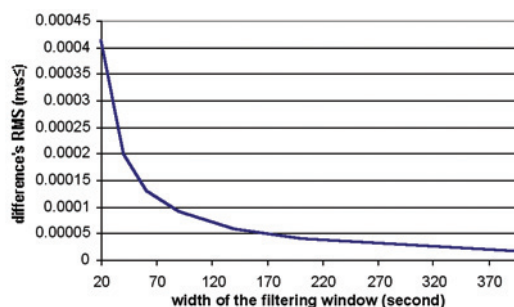


Figure 12 : RMS des différences d'accélération en fonction de l'ordre du filtre de Savitzky Golay.

Dans la figure 12 on voit le RMS des différences en accélération verticale pour deux calculs d'une même trajectoire après filtrage de chaque accélération sur toute la trajectoire par un filtre de Savitzky Golay de différents ordres (Press W.H. et al., 1992) : l'ordre 20 correspond à un filtrage sur 40 s. A l'ordre 80, le RMS est environ $5.10^{-6} m/s^2$ (5 milligals) Pour le calcul des anomalies donné par l'équation (4), un filtre sur 200 s est appliqué sur Δg . Les mesures de gravimétrie et l'accélération verticale par GPS sont donc filtrées simultanément.

Une série de six filtres de Butterworth sont appliqués. Les figures 13 à 15 montrent les anomalies de gravité non filtrées, puis filtrées par des filtres de demi-amplitude en temps de 20 s et 200 s. L'application du filtre de 200 s donne un RMS sur l'accélération par GPS de $10^{-6} m/s^2$, la moyenne étant 0. On peut ainsi dire que la gravimétrie aéroportée n'est pas limitée en précision par GPS en considérant un filtrage à 200 s.

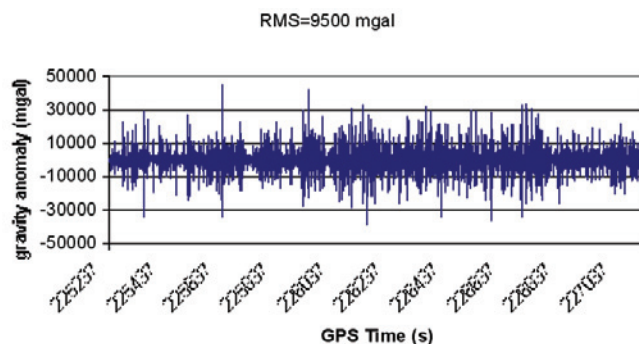


Figure 13 : anomalies de gravité brutes, non filtrées.

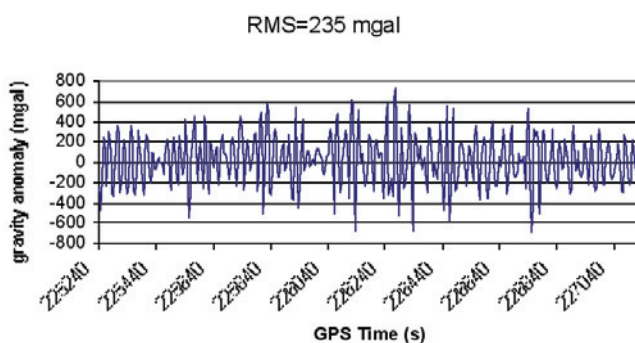


Figure 14 : Anomalies de gravimétrie filtre de 20 s.

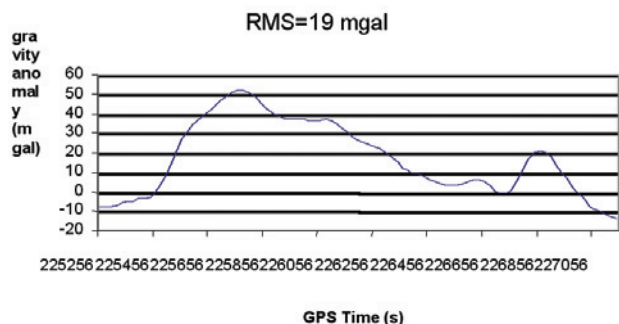


Figure 15 : Anomalies de gravimétrie filtre de 200 s.

Conclusions et perspectives

La détermination des trajectoires d'avion par GPS répond bien aux besoins de la gravimétrie aéroportée. Les précisions sans filtrage sont de l'ordre de 10 cm en position horizontale, de 20 cm en hauteur. La vitesse est obtenue à mieux que le centimètre par seconde et l'accélération à quelques mm/s^2 . Après filtrage sur 200 s en accélération verticale on obtient quelques mm/s^2 . On peut aussi constater que la méthode convient aussi à la photogrammétrie aérienne pour des échelles de cartographie jusqu'à 1 : 2000 ainsi que pour des levés lasers aéroportés.

L'observation, puis le calcul avec plusieurs stations au sol permet un contrôle et une estimation de précision de la trajectoire, mais aussi d'identifier, voire de corriger les effets des multi-trajets. Les perspectives concernant les calculs est d'avoir un calcul multi-référence, c'est à dire qu'à tout instant chaque position est déterminée par les différentes stations aux sols. Les observations et les calculs à partir de plusieurs stations au sol, même lointaines permettent de vérifier et d'estimer la précision de la trajectoire. Ceci permet aussi d'identifier et de corriger des multi trajets comme dans le cas de la trajectoire n°2. Pour cette mission une seule station du réseau GPS permanent français (RGP) a été utilisée car les stations les plus proches n'étaient pas cadencées à la seconde. Si ces stations étaient modifiées pour enregistrer à la seconde, cela éviterait d'installer au sol des récepteurs pour chaque vol. ●

F. DUQUENNE

Laboratoire de Géodésie et Géomatique, Ecole Supérieure des Géomètres Topographes (ESGT) – chef du Service de la géodésie et du Nivellement, Institut Géographique National.
email : Francoise.Duquenne@ign.fr

A.V.OLESEN

Geodynamics Dept., National Survey and Cadastre (KMS)

J. CALI

Laboratoire de Géodésie et Géomatique, Ecole Supérieure des Géomètres Topographes (ESGT)

Remerciements

Ce projet a été possible grâce aux interventions de : C. Allet (INSU), A. Balandier (ESGT), P. Courbon, H. Duquenne (ESGT), R. Forsberg (KMS), A. Gidskehaug (Bergen University), M. Kasser (IGN), G. Penazzi (INSU), M. Pilotto (IGN), R. Riou (ESGT).

ABSTRACT

Key words : GPS, airborne gravimetry, trajectory

In order to improve the French geoid in the Corsican area an airborne gravimetric survey was carried out in close co-operation between KMS, Bergen University, ESGT, IGN and INSU. Gravimetric data were positioned and corrected using GPS. Aboard the plane, two receivers were connected to a single antenna. On ground four receivers were set on the French Riviera coast and two in Corsica. Trajectories were computed several times, with each reference station used in the direct and reverse way with GRAFNAV software. The baselines length reached several hundred kilometres. The solutions are compared and combined, and give a good estimate of position, velocity and acceleration accuracy. The accuracy in position is better than 10 cm in horizontal absolute position and 20 cm in height. In relative positioning the accuracy is to cm-level. Therefore we get precise velocity and acceleration. In the paper, the GPS computations are explained, and the results of comparison between different computations of the same trajectory is summarised in position, velocity and acceleration for each trajectory.

Références

- Bruton M.A. (2000).** Improving the accuracy and Resolution of SINS/DGPS Airborne Gravimetry. UCGE reports Number 20145. University of Calgary.
- Duquenne F. (2001).** Gravimétrie Aéroportée Corse-Provence : rapport du calcul des trajectoires GPS. Report. Ecole Supérieure des Géomètres et Topographes (France).
- Duquenne H. (1998).** QGF98, a new solution for the quasigeoid in France. Proceedings of the second continental workshop on the geoid in Europe. Reports of the Finnish Geodetic Institute, 98 : 4, pp251-255, M. Vermeer and J. Adam, editors.
- Duquenne H. (1999).** Comparison and combination of a gravimetric quasigeoid with a levelled GPS data set by statistical analysis. Physics and Chemistry of the Earth, vol.24 A, n°1, pp79-83.
- Forsberg R., Olesen A.V. and Keller K. (1999).** Airborne Gravity Survey of the North Greenland Shelf 1998. Kort. og Matrikelstyrelsen Technical Report n° 10.
- Olesen, A. V., R. Forsberg, K. Keller, A. Gidskehaug (2000 a).** Airborne Gravity Survey of Lincoln Sea and Wandel Sea, North Greenland. Chemistry and Physics of the Earth, Vol 25 A, pp 25-29.
- Olesen, A. V., A. H. Kearsley, R. Forsberg (2000b).** Great Barrier Reef Airborne Gravity Survey (Braggs'99). A Gravity Survey Piggy backed on an Airborne Bathymetry Mission. In : M. G. Siderius (ed.) : Gravity, Geoid and Geodynamics 2000, IAG symposium Vol. 123, pp. 247-251, Springer Verlag.
- Olesen A.V., Forsberg R., Keller K., Kearsley (2002)** A.H.W. : error sources airborne gravimetry employing spring-type gravimeter - In J. Adam and K.P. Schwarz (eds) : vistas for Geodesy in the new Millenium, IAG symposium vol.125, 205-210, Springer Verlag.
- Olesen A.V. (2002).** Airborne Gravity Project Povenice-Corsica February 20-22, 2001 - unpublished Report, National Survey and Cadastre, Denmark
- Press W.H., Tenkolsky A.A., Vetterling W.T., Flannery B.P. (1992).** Numerical recipes in Fortran. 2nd edition. Cambridge University Press.
- Torge W. (1989).** Gravimetry. De Gruyter Verlag.