

**l'aérotriangulation
appuyée
sur
des
mesures
g.p.s.**

**faites
en
vol
à
bord
de
l'avion**

Le traitement des mesures

Claude Million

PRÉAMBULE

Dès la fin de 1985 on avait entrepris une étude des possibilités d'emploi de mesures aéroportées en aérotriangulation ; le programme initial était très vaste et comprenait l'étude des possibilités de mesure des hauteurs sol-appareil à l'aide d'un distancemètre laser, de mesures altimétriques barométriques ultra-précises faites à bord, enfin de l'utilisation de GPS pour déterminer la position des coordonnées du point de prise de vue.

Des trois méthodes, la dernière s'avérait alors la moins prometteuse, car les fenêtres GPS et les fenêtres photogrammétriques étaient rarement en concordance : un excellent GDOP, avec, au plus, cinq satellites, à trois heures du matin ne permet pas de faire de la bonne photogrammétrie !

La météorologie, l'inclinaison du soleil en fonction des saisons, la croissance de la végétation, qui conditionnent la réalisation de la plupart des prises de vues de qualité, sont des contraintes immuables, et ce n'est que lorsque GPS est devenu disponible presque en permanence qu'on a pu mesurer les potentialités considérables de l'association de ces deux techniques.

INTRODUCTION

L'expérience française en la matière a été bien résumée par l'Ingénieur Géographe Yves EGELS, qui a été le promoteur de l'usage de ce procédé à l'I G N, dans un article publié dans « Géomètre » et on ne saurait dire mieux que ce qui a été dit sur ce sujet ; toutefois la presse technique étrangère a été particulièrement riche en ce domaine en 1993 et, quoiqu'elle n'apporte pas de réelles nouveautés, il est intéressant de l'analyser pour voir ce qui renforce les idées qu'on avait mises en œuvre en ce domaine, ou ce qui les contredit.

On a donc choisi d'analyser les documentations de trois publications spécialisées traitant de ce sujet :

1. Un numéro spécial de Photogrammetric Engineering and Remote Sensing sur ce sujet en Novembre 1993.
2. Un Compte Rendu du Comité Directeur et de la Commission des Présidents de l'O E E P E, c'est-à-dire de l'organisation européenne de la photogrammétrie.
3. Un article du professeur F.ACKERMANN dans Photogrammetric Record en Octobre 1994.

À notre grand regret toutes les expériences présentées sont étrangères car, apparemment, on a oublié de faire appel aux spécialistes Français.

Les références utilisées sont toutes citées en bibliographie.

DESCRIPTION TECHNIQUE

Le principe lui-même est fort simple : Il s'agit de déterminer les positions des points de vue des photographies aériennes, qui sont habituellement « relevées » dans l'espace 3-D sur des point d'appui connus au sol, par le moyen d'un récepteur GPS embarqué dans l'avion qui prend les vues, en enregistrant les signaux GPS reçus

pendant la prise de vue, pour les traiter en différé. Voir une étude de la géométrie du système dans [10] et [11].

L'objectif est de se passer de la plus grande part des points d'appui au sol, qui sont coûteux à déterminer, voire de s'en passer totalement, car le bloc de photographies, lui-même, permet, dans un cas comme dans l'autre d'ailleurs, à l'aide de GPS ou de points d'appuis, de relier les

photographies entre elles par les mesures faites sur des points homologues vus sur plusieurs photographies et, par conséquent, de les lier par une *aérotriangulation*. Il est plus simple de comparer les mesures GPS faites dans l'avion aux mesures que le stéréopréparateur fait habituellement au sol, ce qui a fait dire à Yves EGELS que : « le stéréopréparateur est dans l'avion ».

Pour obtenir une précision compatible avec les opérations photogrammétriques, un second récepteur, à poste fixe, de préférence pas trop loin du chantier photographié, doit être utilisé simultanément sur un point quelconque, ou mieux encore sur un point connu.

Les résultats obtenus seront des vecteurs point fixe-point mobile qui sont introduits, après traitement des mesures brutes par des logiciels de fabricants, dans des logiciels d'aérotriangulation préalablement aménagés pour les recevoir.

Les logiciels des fabricants suivent, soit le principe de la trajectographie, soit celui du traitement cinématique, avec ou sans, lorsque cela reste possible, détermination en temps réel et en vol, ou mieux en différé, des ambiguïtés entières.

1. Généralités

On rappellera brièvement que GPS est toujours un système militaire qui se protège d'ennemis potentiels qui voudraient l'utiliser ou le rendre inefficace, et par contrecoup de tous les perfectionnements apportés par les utilisateurs non autorisés, et ce, par des dégradations volontaires des informations et des signaux.

Actuellement (1996), 24 satellites sont utilisables et, pratiquement, on dispose, à chaque instant d'au moins cinq satellites bien situés au-dessus de l'horizon, jamais moins de quatre, avec parfois un maximum de douze, que beaucoup de récepteurs ne sont pas en mesure de recevoir tous ensemble.

Tous ces signaux qui sont issus d'une même source, l'oscillateur, sont évidemment corrélés, et il est largement fait usage de cette intéressante particularité.

2. Récepteurs NAVSTAR-GPS

Les récepteurs GPS aéroportés sont identiques aux appareils utilisés au sol, sur des véhicules ou sur des bateaux, sinon qu'ils disposent d'une liaison avec la chambre de prise de vue, laquelle envoie un signal *dans le récepteur GPS* lorsque l'objectif est ouvert, pour dater l'heure de la prise de vue. Ce problème qui avait causé d'énormes soucis lors de la phase expérimentale, semble avoir été bien résolu par les fabricants de chambres de prise de vue, il faut dire que les choses étaient compliquées par le fait qu'on voulait utiliser plusieurs systèmes embarqués, et que les autres systèmes utilisaient la base de temps de la chambre, qui était très imprécise comparée à celle de GPS ; en outre le problème de l'envoi d'un top dans le récepteur GPS existait du fait que le signal était généré par l'électronique de déclenchement de la chambre, alors que, maintenant, c'est un capteur *dans la chambre* qui capte la lumière de l'objectif quand il est ouvert et qui déclenche un signal envoyé au récepteur GPS.

Ces récepteurs sont soit monofréquence (L1 modulée par C/A et P) soit bifréquence (L1 et L2, cette

dernière fréquence est modulée par le seul code P), les seconds étant meilleurs que les premiers pour corriger les erreurs de réfraction ionosphérique.

Le gouvernement américain a introduit un accès sélectif (SA) aux mesures de telle sorte qu'un « bruit » est superposé aux signaux des codes, afin de diminuer la précision des mesures. Il est fait de même sur les positions des satellites diffusées pendant la réception, celles-ci sont faussées délibérément pour dégrader la précision des positions déterminées, en temps réel, à l'aide d'un seul récepteur. Cette dernière mesure impose d'utiliser deux récepteurs, dont un reste fixe, et de n'utiliser que les différences des positions données par ces deux récepteurs, pour éliminer ses effets, les expériences, très prometteuses, qu'on avait menées avec le seul récepteur de l'avion ne sont, hélas, plus du tout d'actualité. Toutefois, on doit signaler, même si une seule initiative a été prise à ce jour sur cette possibilité, qu'un service rend disponibles, en différé, les positions exactes des satellites toutes les quinze minutes, il ne serait pas impossible, dans le principe, de reprendre cette idée, lorsque les corrections ionosphériques exactes homologues des positions seront, elles-mêmes, disponibles.

En mode différentiel la précision sur la position des points en code C/A serait de 3 à 5 mètres, pour de 30 à 100m avec un seul récepteur. En revanche, en mode différentiel, avec le code P *lorsqu'il était accessible* [4], on pouvait compter sur 0,30 à 0,50 mètre. Ceci est, hélas, terminé.

La cadence de réception de GPS, lorsqu'il est associé à la photogrammétrie, est généralement la plus élevée possible ; on note couramment des cadences de réception d'un point par seconde, la cadence la plus élevée semble être de deux points par seconde [9], le récepteur français SERCEL, utilisé à l'IGN, a adopté une cadence de 0,6 seconde, il n'empêche que pendant ce laps de temps un Mystère 20 parcourt 100 mètres, et qu'il faudra interpoler l'instant de prise de vue au milieu de ces 100 mètres ; cette interpolation gagne donc à être soignée.

3. Localisation du point de vue par GPS différentiel

Les données transmises par les satellites sur leurs positions instantanées sont faussées volontairement, il n'est donc pas possible d'obtenir la position en vol d'un point isolé à partir d'un avion à moins de 100 m près, en revanche, les positions faussées de deux points pas trop éloignés sont très corrélées, ce qui est évident puisque les récepteurs reçoivent, au même instant, des informations faussées des mêmes quantités, de telle sorte que leurs différences de coordonnées peuvent être connues avec une précision bien supérieure (3 à 5 m avec le code grossier C/A, et de 0,30 à 0,80 m pour le code précis P). Ceci, et d'autres raisons qu'on va voir, impose l'utilisation simultanée d'un récepteur fixe au sol et d'un récepteur mobile, dans l'avion. Pour annuler les seules dégradations volontaires des informations les deux récepteurs pourraient être assez éloignés, mais on cherche aussi, en utilisant deux récepteurs, à profiter de la corrélation d'autre erreurs, involontaires celles-ci, telles que les erreurs de réfraction sur le long parcours des ondes (20.200km à la verticale 25.900Km à la quasi-horizontale), dans ce cas, plus le récepteur mobile et le

récepteur fixe sont proches, plus forte sera la corrélation entre les erreurs de réfraction des deux réceptions, erreurs que le traitement par différence annulera.

L'utilisation, près du chantier, d'un poste fixe ne semble s'imposer que sur les chantiers de haute précision, et encore, certains expriment de sérieuses réserves sur ce point ; du point de vue économique la photogrammétrie ne tolère aucun « fil à la patte ».

On sait également qu'on annule, par différences, les décalages des horloges des récepteurs et du temps GPS. Ainsi les doubles différences ne présentent plus de biais d'horloge. Pour éliminer les ambiguïtés de cycle de la phase de la porteuse il faut faire à nouveau des différences entre les mesures reçues à deux époques successives ; seulement ces « triples différences » ont ce qu'on appelle une « faible géométrie » c'est-à-dire que les différences successives pour éliminer les erreurs systématiques ont amplifié le jeu inévitable des erreurs accidentelles et de leur corrélation.

3.1. Code lissé par la phase

Les principales erreurs systématiques étant éliminées on peut estimer que les erreurs sur la mesure d'un vecteur GPS sont les suivantes :

Phase 2 à 5mm ambigus (de 0 à 0,20m)

Code C/A 2 à 8 m non ambigus

Code P 0,20 à 0,80 m non ambigus mais crypté donc inutilisable maintenant sauf mise en œuvre de procédés de décryptage par corrélation du code P sur L1 et L2.

La très grande précision de la mesure ambiguë de la phase comparée à celle de la mesure du code a amené à imaginer la procédure suivante :

Comme pendant la réception, et tant que celle-ci reste ininterrompue, il est possible de cumuler la phase, c'est-à-dire de compter les cycles et les fractions de cycles qui séparent deux réceptions, cette mesure a une précision millimétrique, les erreurs commises sur les différences de différences de positions sont donc négligeables par rapport aux différences de positions elles-mêmes, ce qui permet de lier ces dernières entre elles et de les cumuler pour en améliorer la précision. Si la réception continue est assez longue on lie entre elles n positions en code C/A par exemple. La précision globale de l'ensemble ne négligeant que les erreurs de mesure de la phase sont de :

$$\frac{2 \text{ à } 8 \text{ m}}{\sqrt{n}}$$

n peut atteindre 100 par minute de vol, soit 1.000 pour dix minutes de vol, la précision résultante peut atteindre de 7 à 25 cm. C'est ce qui est obtenu couramment en photogrammétrie aidée par GPS.

On comprendra pourquoi le code P est inaccessible aux particuliers, car avec ce code précis on obtiendrait dix fois mieux, ce qui ouvrirait la voie à la recherche des ambiguïtés entières de la phase :

En effet, dès qu'on accède à une précision de l'ordre du $1/6^{\circ}$ de la phase on peut calculer les ambiguïtés entières de la phase avec de très grandes chances de succès, ce calcul ouvre la voie des précisions mieux que centimétriques sur la position des points, à ce sujet les résultats de [4] sont parfaits.

De nombreux très brillants essais, largement publiés, ont été obtenus par ce moyen aujourd'hui inaccessible au commun des photogrammètres, le code P étant crypté.

3.1.1 Trajectographie. [2], [6], [7]

On décrira plus en détail ce moyen qui est largement associé à la photogrammétrie. La Société SERCEL s'est fait une spécialité de l'utilisation de GPS avec des récepteurs en mouvement, bateaux, automobiles et avions. L'expérience française est basée sur un large emploi de ces récepteurs, et ce qui va avec : des logiciels de cette société.

Comme pour les autres sociétés fournissant des matériels et des logiciels, une grande discrétion est observée sur les méthodes utilisées, en dehors des publications, on est réduit à des supputations, et c'est ce qu'on a dû faire dans notre étude.

La méthode qu'on a indiquée ci-dessus semble avoir été affinée pour donner ce qui suit :

Contrairement aux méthodes cinématiques, qu'on verra plus loin, on ne s'astreint pas à la détermination des entiers de phase, mais on s'impose de rechercher une estimation réelle (non entière) de l'ambiguïté sur chaque satellite, à la différence des ambiguïtés entières le résultat est très **robuste**. Une coupure de la réception n'empêche pas de déterminer des positions 3D + T, mais la phase est interrompue et son cumul ne peut être poursuivi. Dans notre étude on avait confondu « section de mesure GPS » et « bande de vol photogrammétrique » et trouvé des quantités d'avantages à cela, d'abord les interruptions de réception se produisaient en fin de bande, lorsque l'avion faisait son virage, de plus, cela évitait de « décentrer l'antenne », les composantes du décentrement étant confondues avec les constantes de translation variables d'une bande à l'autre, cet intérêt était encore souligné dans [16] par un auteur qui fait autorité.

L'avantage considérable était de ne pas avoir à faire de calcul de décentrement, lequel est rendu imprécis par le fait que la chambre n'est pas liée **rigidement** à l'avion. L'erreur principale est introduite par l'angle de dérive de l'avion appliqué à l'excentrement de l'antenne.

Hélas, cette confusion, ou plutôt cette « consolidation » entre le vecteur de décentrement et le modèle de translation des mesures GPS n'est plus de mise, car on dispose d'un plus grand nombre de satellites, ce qui permet assez souvent à l'avion de prendre son virage sans perdre la réception sur trop de satellites, si bien que la « section » est, fréquemment, bien plus grande que la bande. L'intérêt est évident : avec des durées de réception plus longues le lissage des pseudo-distances par la phase est bien meilleur, et la précision augmente d'autant.

Autre avantage, il n'était absolument pas possible d'appuyer les bandes isolées puisque la mesure GPS est alors comparable à un point d'appui unique au centre de chaque cliché.

On a modélisé les coordonnées GPS en les considérant comme connues à une constante de **translation près** la majorité des auteurs ajoute ses dérivées par rapport au temps (à notre avis c'est une erreur) ; ceci donne plus d'importance aux mesures de différences de coordonnées entre les sommets qui, par la mesure continue de la phase entre deux sommets, est de précision meilleure que centimétrique. À cet égard, les résidus de compensation de l'aérotriangulation sur les valeurs absolues des coordonnées GPS ne sont pas représentatifs de la précision de GPS, mais de son exactitude (Ecart GPS-bloc photo-

grammétrique), ce qui n'est pas du tout la même chose, rappelons que la liaison sol-GPS n'est assurée que par le ou les points d'appui, et que les différences de coordonnées sommet à sommet sont données, à un facteur d'échelle près, par le bloc d'aérotriangulation.

Le traitement de trajectographie ne cherche pas à résoudre les ambiguïtés de phase, mais à les estimer à une valeur non entière, la meilleure possible, pour l'ajouter aux mesures de phase qui deviennent alors non ambiguës, et sont utilisées comme des pseudo-distances peu bruitées, pour poursuivre par une solution différentielle classique.

Le réel problème est celui que pose la réfraction ionosphérique, qui peut atteindre 50 mètres dans les conditions très défavorables et pour des « visées » très inclinées. Si la réfraction troposphérique est, de son côté, assez bien modélisée pour qu'on puisse considérer que son calcul n'entache pas le résultat d'erreurs importantes, la réfraction ionosphérique reste un problème habituellement résolu par des mesures sur deux longueurs d'onde L1 et L2. Dans le cas qui nous occupe, où les mesures GPS servent d'abord à guider l'avion dans son vol, et plus accessoirement à économiser le nombre des points d'appui qu'il est nécessaire d'utiliser pour caler le bloc, l'emploi d'un récepteur bifréquence plus coûteux n'a pas été jugé indispensable.

La détermination de la valeur absolue de la correction ionosphérique avec un récepteur monofréquence est inaccessible, seule sa variation pendant une section, peut être estimée avec une précision moyenne. Par conséquent l'estimation qu'on fait de l'ambiguïté reste entachée d'une erreur de réfraction ionosphérique qui ne peut être connue qu'à posteriori, à partir des réseaux mondiaux d'observation.

Si, comme cela arrive parfois, la position de la constellation a été « rafraîchie » en cours d'observation, cela est pris en compte par un saut égal au récepteur fixe et au récepteur mobile.

Il ne s'agit que de la mise en œuvre d'une idée émise par GOAD [17] il y a de cela longtemps (1990-1991). On remarquera que le calcul n'utilise que les mesures, et n'a aucun besoin des positions des satellites, qui sont d'ailleurs fréquemment diffusées fausses. Les méthodes de calcul utilisées existaient déjà dans [18] et [19], on a donc été les puiser à la source.

On a ainsi pu écrire un logiciel ouvert, c'est-à-dire dont le code source est accessible et améliorable au gré de l'utilisateur, et non plus à celui du fabricant.

Certains considèrent que par les différences entre la station fixe et la station mobile on peut obtenir une précision de l'ordre de 0,10 m, et assez souvent de la moitié de cette valeur, d'autres disent obtenir le millionième de la longueur du vecteur, mais pour 500 Km cela fait déjà 0,50 m, mais d'expérience on obtient mieux que cette dernière estimation : Dans de bonnes conditions, avec un GDOP de 3, on aura un vecteur d'erreur moyen quadratique de 0,15 m.

3.2. Solution cinématique. [3], [13]

De nombreux auteurs étrangers font état de résultats exceptionnels obtenus à l'aide de logiciels de cinématique.

On cherche également, par ce moyen, à calculer les ambiguïtés, mais on cherche surtout à obtenir leur valeurs entières, afin d'améliorer le résultat.

Pour cela les signaux sur les deux longueurs d'onde L1 et L2 doivent être enregistrés, le plus souvent les phases seules sont observées et mises en œuvre.

Il faut bien dire que, sauf dans les livres et les revues où il est fait état de succès probants, dans la production courante on ne connaît que des tentatives de déterminer les ambiguïtés entières, avec un retour au calcul des ambiguïtés réelles (non entières) pour des résultats de l'ordre de ceux qu'on vient de voir. Voir les résultats de [5] sur ce sujet.

Traditionnellement, l'avion faisait un point fixe au départ et à l'arrivée sur un point connu afin de déterminer les ambiguïtés entières, d'abord pendant une heure puis, plus récemment lorsque des algorithmes d'initialisation rapide ont été mis au point, pendant dix minutes. Nulle doute que l'initialisation en vol « On the Fly » (OTF) n'ait été tentée depuis, car la contrainte du point fixe au sol n'était pas commercialement réaliste d'autant que cette contrainte était doublée de celle de ne pas perdre la réception en vol, ce qui était une véritable gageure, sauf si, évidemment, la réinitialisation en vol était possible. Voir [11] et [14].

D'après les publications, il semble que le temps de réinitialisation en vol (OTF) soit proportionnel à la distance entre le récepteur fixe et le récepteur mobile. Pour des vecteurs de 10 Km il faudrait, selon les essais de LEICA [19] en bateau et en automobile, au moins 200 secondes, que penser de distances se comptant en centaines de kilomètres (500 dans [17]). Pour réinitialiser en vol, il faudra prendre en compte les contraintes proprement photogrammétriques, par exemple la durée moyenne de prise de vue d'une bande qui est de cinq à dix minutes, il faudrait pouvoir réinitialiser en un temps plus bref, le virage lui-même prend, en moyenne également, six minutes, il ne paraît pas réaliste de faire, comme cela a été suggéré, des virages à plat pour éviter de « perdre » des satellites, cela augmenterait la durée de vol qui est un élément essentiel du coût global. Voir [11] et [16]. Il est infiniment plus astucieux de placer l'antenne en un point de l'avion où la coupure de réception est rare, c'est-à-dire au sommet de l'empennage vertical.

3.3. Détermination des ambiguïtés de phase, les dérivés, les pertes de réception

On croit qu'il faut être clair, pour l'instant, la détermination d'ambiguïtés entières exactes est une possibilité qui doit plus à la chance, qu'à l'habileté de ses promoteurs. D'ailleurs, les modèles introduits dans les équations d'observation GPS, incorporées aux logiciels de calcul des blocs d'aérotriangulation tiennent explicitement compte des défauts dus à la fixation des ambiguïtés à des valeurs entières incorrectes !

Il a été constaté, qu'en pratique, il n'est pas possible d'empêcher les pertes de réception en vol, surtout au cours des virages, et lorsque la constellation change, un satellite se couche, d'autres se lèvent, et que, dans tous les cas, la solution par les pseudo-distances a été utilisée pour réinitialiser la bande ou une section coupée. Voir [11].

Les modèles des mesures GPS mettent en œuvre la possibilité d'introduire des dérives proportionnelles au temps de translation des bandes, ou des « sections », selon les auteurs. En effet, il a été reconnu que ces mystérieuses dérives des différences de coordonnées de la fin des années 1980 étaient dues à la fixation des ambiguïtés entières ou réelles à des valeurs erronées. Cette constatation est, d'ailleurs, utilisée pour vérifier, dans certains logiciels très précis, pour des mesures terrestres, « KART » par exemple, que la valeur entière de l'ambiguïté est fixée à une valeur exacte, si la dérive est nulle, l'ambiguïté est exacte.

Donc, les dérives dans le temps des translations des « sections » sont des artéfacts, et il n'y a pas lieu d'en tenir compte car on « affaiblit » la mesure en la modélisant sans raison.

BIBLIOGRAPHIE

[1] 1993 H. BURMAN GPS Block Supported Triangulation OEEPE-Project Royal Institute of Technology Department of Geodesy and Photogrammetry Stockholm.Suède.

Annexes au document précédent

- [2] J. TALTS Block Botkyrka. Suède.
- [3] A. HOEGHOLEN Block Eura. Finlande.
- [4] L.E. BLANKENBERG Block Friedrikstad. Norvège.
- [5] H. BURMAN Block Rörberg. Suède.
- [6] A. FLOTRON H SCHADE Block Sonviller. Suisse.
- [7] O. ANDERSEN Block Sperillen. Norvège.
- [8] T. HEUCHEL 6 Blocs de A à F. Allemagne.

Dans Photogrammetric Engineering and Remote Sensing (PERS) Numéro spécial de Novembre 1993 :

[9] S. CURRY K. SCHUCKMAN Practical Considerations for the Use of Airborne GPS for Photogrammetry. PERS.

[10] I. COLOMINA A note on the Analytics of Aerial Triangulation with GPS Aerial Control. PERS.

[11] F. ACKERMANN and H. SCHADE Application of GPS for Aerial Triangulation. PERS.

[12] D. MERCHANT Controlled Aerial Photogrammetry. PERS.

[13] A. GRUEN M. COQUARD H.G. KAHLE Photogrammetry and Kinematics GPS : Results of a High Accuracy Test. PERS.

[14] K. JACOBSEN Experience in GPS Photogrammetry. PERS.

[15] R.D. BECKER J.P. BARRIERE Airborne GPS for Photo Navigation and Phogrammetry : An Integrated Approach. PERS.

Photogrammetric Record, 14(84) : 861-874 (October 1994) :

[16] F. ACKERMANN Practical Experience with GPS Supported Aerial Triangulation.

Navigation, Journal of the Institute of Navigation. Volume 37 N° 3, Automne 1990 :

[17] GOAD Optimal Filtering of Pseudo-Ranges and Phases from Single-Frequency GPS Receivers.

Document interne de SERCEL 1995

[18] J.P. BARBOUX Trajectographie. (02. 1995) Manuscripta Geodetica (1995) 20 :96-109.

[19] W. OIU, G. LACHAPELLE, M.E. CANNON Ionospheric effect modelling for single frequency GPS users.