

L'ENSEIGNEMENT DES METHODES DE LOCALISATION SUR SATELLITES

Par Claude Million

De l'Association Française de Topographie

Adresse : AFT 136 bis rue de Grenelle-75700 PARIS 07SP

Tel : 01 43 98 84 80 - Fax : 01 47 53 07 10

e-mail : aftopo@club-internet.fr

ملخص

توجد هناك صعوبة أساسية في تعليم طرق تحديد المواقع اللاسلكي على أقمار صناعية مسماة عادة (GPS) ، في حين أن كواكب أخرى ممكن أو يمكن استعمالها . مع ذلك فإن هذه الصعوبة تعتبر عامة تماما: و هي تنتج من كوننا قد تعودنا على تعليم المساحة الحقلية بطلبنا من التلاميذ إجراء حسابات يدوية ، و حتى بمساعدة آلات حاسبة ، على قياسات نادرة منجزة من طرف الحاسبين أنفسهم، في حين أن الآن ، فإن قياسات الأقمار الصناعية تعتبر عديدة ، وهي منجزة بأجهزة وفي معظم الأحيان بدون تدخل بشري، و أن الحسابات لا يمكن مباشرتها بدون استعمال آلة الحاسوب بسبب عدد القياسات و/ أو لكون هذه الحسابات نفسها معقدة.

RESUME

Il existe une difficulté fondamentale pour enseigner les méthodes de radiolocalisation sur des satellites artificiels, plus communément appelés G P S , alors que d'autres constellations peuvent, ou pourront être utilisées. Cette difficulté est, au demeurant, tout à fait générale : Elle résulte du fait qu'on était habitué à enseigner la topométrie en faisant faire aux élèves des calculs manuels, même aidés de puissantes calculettes, sur des mesures rares réalisées par les calculateurs eux-mêmes, alors que, maintenant, les mesures sur satellites sont très nombreuses, et réalisées par les appareils pratiquement sans intervention humaine, et que les calculs ne peuvent être entrepris sans utiliser un ordinateur, en raison même du nombre des mesures, et/ou de la complexité des calculs eux-mêmes.

ABSTRACT

There is a fundamental difficulty to teach radiolocalisation methods on artificial satellites, commonly named GPS, whereas, other constellations can or could be used. This difficulty is, for all that, completely general : It results from the fact that we were used to teach field surveying by making students do manual calculations, even helped by strong calculators, on rare measurements realized by the calculators themselves, whereas, now, the measurements on satellites are numerous and realized by devices practically without human intervention and that measurements could not be undertaken without using a computer because of the number of measurements and/or the complexity of the calculations themselves.

LES MESURES MODERNES

De fait, si on y regarde bien, de nos jours, toutes les mesures, tout en étant au moins deux fois plus nombreuses que jadis, sont faites et enregistrées directement par les appareils, que ce soit par des mesures au sol ou sur des satellites ; ces derniers n'ayant fait que remplacer les anciens points de triangulation, en gros, et même en très gros, au lieu de faire un relèvement sur des points connus on fait la même opération sur des satellites. De même, les calculs sont tout réalisés par des logiciels tout faits (les « canned software » des anglo-saxons).

Donc, le problème qui se pose, s'étend, en réalité, à tous les types de mesures, et des calculs, des géomètres ou des topographes. On a choisi celui de la localisation sur satellites comme emblématique, alors qu'il est très loin d'être le seul à être touché par ce phénomène absolument général.

Pour l'essentiel, les mesures modernes sont toutes automatisées, c'est-à-dire que personne n'intervient pour faire une appréciation quelconque, celle-ci, même la lecture sur une mire, étant automatique. A temps égal, ces mesures sont donc plus rapides et plus sûres,

donc plus nombreuses, leur nombre peut devenir tel qu'on ne puisse plus du tout les maîtriser manuellement : A titre d'exemple, on a eu à traiter par simulation 300.000 mesures sur 300 points. Il était bien évident que, sauf exception, les mesures fausses ne pouvaient être examinées que par le logiciel, tout examen manuel était exclu !

LES CALCULS MODERNES.

De même, les calculs sont devenus trop compliqués pour rester du ressort de calculatrices, même très perfectionnées. En effet, le nombre des mesures augmentant, les compensations par les moindres carrés s'imposant même pour les déterminations les plus banales où elles pourraient avantageusement ne pas être employées, telles que les cheminements, il n'est plus possible de conduire les calculs autrement qu'à l'aide d'un ordinateur.

Mais il n'y a rien de pédagogique dans l'utilisation d'un logiciel « fermé », surtout lorsqu'on n'a pas participé à son élaboration. Il est tout à fait normal que le praticien emploie de tels logiciels, en revanche, on n'apprend rien à le faire, sauf si on est intervenu dans sa conception, voire son écriture, et on en est souvent très loin.

Tout le problème de l'enseignement moderne des calculs dans la topographie, et de bien d'autres disciplines est là.

L'enseignement supérieur de la topométrie et de la topographie doit donc naviguer entre deux écueils : la « suite, pimentée de topographie, d'un cours de programmation », et/ou l'utilisation confiante de logiciels du commerce dont l'usage a confirmé la validité.

LA OU LES SOLUTIONS.

On ne connaît pas bien les solutions françaises données à ce problème, on croit savoir que celles-ci varient de la calculatrice en conscience, à l'ordinateur en aveugle, ou l'ordinateur en conscience pour les « doctorants » ou les « pré-doctorants ». On connaît mieux les solutions données à l'étranger, et c'est celles qu'on va décrire.

L'écueil qu'on veut éviter est toujours de « plomber » un cours de topographie, ou au demeurant de n'importe quoi d'autre, en l'engloutissant de programmation informatique. Soit il ne faudrait dispenser les cours de calculs topographiques qu'aux élèves disposant d'une solide expérience en programmation, soit il

faut faire en sorte que les problèmes de programmation soient allégés. Bien que ce ne soit pas des programmeurs qu'on veuille former, c'est surtout la première solution qui prévaut en général. En effet, ce n'est pas pour rien que les professions de l'informatique, déficitaires en personnel, « piochent » dans le vivier des ingénieurs pour compléter leurs équipes, c'est surtout parce que le problème qu'on évoque n'est pas résolu correctement. On forme d'abord des informaticiens puis, ensuite seulement, des spécialistes de différentes disciplines techniques. A l'étranger, dans les pays du Nord et aux Etats-Unis, on utilise une forme allégée du système informatique. C'est elle qu'on voudrait examiner.

LE CHOIX DU SYSTEME INFORMATIQUE ALLEGE

La multiplicité des mesures, et surtout, pour tout dire leur nombre, rend inévitable le recours aux compensations par les moindres carrés.

Les calculs de compensation par les moindres carrés ne peuvent être menés sur des calculatrices que dans des cas d'école qui ne sont pas ceux de la pratique, il faut donc bien avoir recours à l'ordinateur, et à des programmes d'algèbre linéaire.

Donc dès le début de notre démarche, qu'on le veuille ou non, l'ordinateur s'impose. Il s'agit, par conséquent, de « rapprocher » son emploi de celui d'une calculatrice.

Le choix du langage, après de probables essais semble s'être porté sur « Matlab » qui, à l'origine, avait été créé, à la fin des années 1970, dans les Universités de Stanford et du Nouveau-Mexique, pour enseigner la théorie des matrices et l'algèbre linéaire à partir de sous-programmes Fortran, mais en se libérant de la lourdeur d'écriture de ce langage, notamment de la déclaration des variables et du « dimensionnement » des tableaux, et, surtout, en le rendant interactif comme une calculatrice. D'où, d'ailleurs son nom : Mat lab pour Matrix Laboratory.

Depuis, ce langage s'est compliqué, pas toujours dans le sens initial, mais surtout pour copier les langages concurrents ou semblables, si bien que le langage s'est alourdi, sans pour autant que ce soit dans le sens qu'on souhaiterait, à savoir le calcul matriciel ou l'algèbre linéaire. Si bien que les utilisateurs sont obligés de le compléter en écrivant eux-mêmes les programmes qui manquent qui ne sont souvent que des programmes d'une très large utilisation en algèbre linéaire !

En effet, le langage étant encore resté trop général, des auteurs [1] ont dû développer des programmes spécialement dédiés à G P S, écrits selon son code particulier. Le bénéfice est donc réduit aux fonctionnalités intrinsèques du langage qui sont le développement en ligne, l'absence de déclarations, ce qui reste assez mince tout de même, si on note que ce qu'on écrit est traduit par un « interpréteur » avant exécution, c'est-à-dire qu'il n'est pas compilé, au contraire des instructions propres au langage lui-même qui, bien entendu, le sont, ce qui accélère d'autant le calcul. Contrairement à ce qu'affirme la notice cet enrichissement n'en est pas un, puisque les algorithmes développés par les utilisateurs n'ont pas été repris dans le langage, bien que certains comme les algorithmes de moindres carrés soient d'un usage très courant en algèbre linéaire. Il semble que Matlab se soit ingénié à faire comme ses concurrents, Maple et Mathematica, sans se soucier de son créneau propre, si bien que c'est un langage comme les autres, un de plus, et que ses avantages apparaissent après des efforts considérables pour se plier à sa programmation spécifique, donc que le but poursuivi n'est pas atteint. Bien sûr, on peut se servir des « briques logicielles » élaborées par les auteurs [1], mais si on se lance dans cette direction, qui est peut-être la bonne, il y a des solutions plus traditionnelles.

Donc une grosse déception, il semble qu'il serait possible de faire aussi bien en se passant tout simplement des fonctionnalités de Matlab et en les remplaçant par celles des langages plus traditionnels Fortran, Basic, Pascal, C++, et leurs variantes « Visual ».

C'est en ce sens qu'on va montrer qu'un assemblage de petits sous-programmes permettrait en les assemblant en travaux pratiques de faire tous les exercices illustrant un cours.

RAPPEL SUR LES CALCULS G P S MINIMAUX.

Tels qu'ils se présentent à l'enseignement de la topographie, les calculs n'ont pas à traiter tous les cas que l'usage de G P S pourrait permettre, notamment tout le domaine de la navigation peut rester de côté sans dommage pour l'« enseigné ». En outre, les situations les plus difficiles, telles que celles d'un récepteur mobile placé sur un avion pour faire, par exemple, de la photogrammétrie peut être laissée en attente. Enfin, dans les cas les plus difficiles lorsqu'on manque de temps, ce qui est généralement la situation dans l'enseignement,

le cas de la détermination cinématique peut être éludé, on peut ne traiter que le calcul statique.

Donc, on peut ne traiter que le cas où on utilise deux récepteurs ou plus, en **G P S différentiel** -ou plutôt « **différenciel** » comme on l'écrit souvent, en commettant une faute d'orthographe, mais en commettant cette faute pour être encore plus clair, ou pour dire G P S par différences en se pliant à la mode du jour !

En fait, l'organisation des logiciels professionnels de la topographie sont des plus simples ils comportent quatre ou cinq grandes parties qu'on peut résumer comme suit :

Déclarations générales

Lire les données et les mesures

Calculer (Calculs topologiques et calculs métriques)

Ecrire les résultats et les rendre utilisables soit en les affichant soit en les plaçant dans les fichiers adéquats.

Dessiner (Eventuellement)

Le programme général et même chaque sous-programme, peuvent donc être réduit à ces cinq macro-instructions !

Le premier travail consiste à stocker dans un fichier les mesures brutes dans leur format d'origine en format standard, RINEX par exemple, si ce n'est déjà fait par le récepteur.

Ceci peut constituer un premier élément tout fait du « Meccano » logiciel que l'étudiant devra bâtir en travaux pratiques. En plus des mesures brutes, il s'agira aussi d'éventuellement traduire en langage clair, A S C I I par exemple, les éléments des éphémérides nécessaires pour la suite des calculs, qui sont reçues en binaire - comme, d'ailleurs, tout ce qui est émis par les satellites - mais sous un format non directement utilisable, si le récepteur ne le fait pas. Pour cela, le langage Matlab ne présente aucun intérêt particulier. Il n'y a pas non plus un intérêt pédagogique particulier à faire programmer cette partie par l'étudiant, en revanche, ce peut être un exercice intéressant en informatique.

La « pièce logicielle » suivante, par ordre d'entrée en scène, serait le calcul des positions des satellites pendant le cours de la réception, après « conversion » du temps satellite en temps G P S. Ces positions se calculent, d'abord dans le plan de l'orbite, puis en 3D, à partir des éphémérides et de l'« heure G P S » du départ du signal, le message ne donne que l'« heure satellite » de ce départ. Ces calculs peuvent apparaître compliqués mais ne sont que des changements de temps, de référentiel en 3D, ce sont des calculs astronomiques banals ; l'intérêt pédagogique de leur programmation est aussi des

plus limité, on peut, pour voir, ne faire qu'un seul de ces calculs sur une calculette

On dispose ainsi des éléments permettant de faire un premier calcul assez grossier de la position approchée des **points isolés** - par opposition aux points groupés par paires de D G P S - on peut aussi introduire une position connue dans l'appareil, si on a des moyens plus fiables pour la déterminer, et sauter cette étape. On a proposé une formulation pour le faire [2], on a cité celle de Bancroft[3] et celle de Kleusberg[4]. C'est un sous-programme qui peut appeler un autre sous-programme absolument général de résolution d'équations linéaires et de compensation par les moindres carrés. Sa programmation, très facile, présente, en matière de G P S, un petit intérêt pédagogique, contenu surtout dans les différentes astuces utilisées.

Disposant d'une position assez approchée des points isolés on a de tous les éléments nécessaires pour calculer les corrections, d'abord aux mesures : **réfraction troposphérique** et **ionosphérique** qui sont fonction, notamment, de la distance zénithale de la distance mesurée, correction d'**aberration** aux positions des satellites, due à la rotation du référentiel pendant le parcours de l'onde, directement proportionnelle à la distance géométrique. Ce sont de petits calculs très simples parfaitement accessibles à une calculette.

Une fois les différentes corrections faites, on peut calculer les points isolés définitifs à l'aide des pseudo-distances. Il s'agit encore d'un programme de résolution de relations linéaires par les moindres carrés du point isolé. Ce calcul présente un intérêt pédagogique pour l'élève et cette programmation peut lui être réservée, étant entendu qu'il dispose des outils logiciels des calculs de compensation par les moindres carrés : normalisation, et résolution. Compliquer par une inversion paraîtrait totalement inutile à ce stade. Enfin, disons que l'usage de l'ordinateur est indispensable bien que certaines calculettes puissent faire ce travail, mais au prix de tant d'efforts inutiles !

On passe ensuite aux calculs par différences proprement dits : Le calcul classique par doubles différences, ou le calcul par simples différences qu'on a proposé [5], qui a l'avantage

entre autres, de permettre de calculer directement la matrice des variances-covariances par simple inversion de la matrice normale pour étudier la précision obtenue. Disons que, pour faire court, on peut passer, du moins en T P, sur les procédés utilisant les deux fréquences et leurs combinaisons linéaires éliminant la réfraction ionosphérique. On peut faire une détermination préalable des différences des ambiguïtés par filtrage des différences du code par les différences de la phase, c'est une opération simple, totalement indépendante de tous les autres calculs, qui permet de déterminer aussi les différences des variations des corrections ionosphériques qui sont un bon indice de la corrélation de ces erreurs, ou, par contre, déterminer en bloc : les différences des ambiguïtés, les différences des décalages d'horloge, en tant que simples variables auxiliaires, et surtout les différences de coordonnées des points, les seules utilisables.

CONCLUSIONS

Contrairement à ce qu'on avait pu croire en les abordant, les méthodes d'enseignement proposées ne sont pas un allègement du fardeau informatique qui pèse sur les épaules de l'enseignant, c'est une esquive, car l'apprentissage de Matlab ne sera, au final, d'aucune utilité à l'élève. Seule la tentative, même si elle ne fait que déplacer la difficulté est à applaudir.

REFERENCES

- [1] G.Strang & K.Borre Linear Algebra, Geodesy, and G P S Wesley-Cambridge Press-1997
- [2] C.Million Le calcul du point approché de G P S in X Y Z n°68 pp 99-101 1996-3
- [3] S.Bancroft An Algebraic Solution of the G P S Equations in I E E Transactions Aerospace and Electronic Systems AES-21 pp 56 59 1985
- [4] A.Kleusberg Die direkte Lösung des Räumlichen Hyperbelschnitts in Zeitschrift für Vermessungswesen pp 188 192 1994
- [5] Million A propos du calcul du point approché de G P S et de la correction d'aberration in X Y Z n°80 Annexe pp 67-68 1999-3.