

Developpement d'Une Nouvelle Methode de Traitement des Observations GPS: Organigramme du Logiciel IAVGPS

Tayeb TACHALLAÏT, El Hassan BENAÏM et Lahcen BAHI, Maroc

Key words: global positioning system, differential method, transformed observations method, processing, development, C++, FORTRAN.

SUMMARY

The most important step in global positioning system cycle is observations processing. GPS positioning accuracy is directly related to this step.

Differential processing is the common method used in GPS data processing, because it offers an appropriate accuracy to geodetic applications. This method allows also an efficient errors processing. However, it causes some technical constraints and exigencies. In order to resolve those problems, and to eliminate systematic errors, an alternative method called "Transformed observations method" was created and developed.

In this study, the purpose was a software development under C++ Builder, using existing FORTRAN sources code witch are developed before.

The developed software (IAVGPS) is based on pseudo-ranges and phases observations exploitation, using the transformed observations method. It allows network processing point by point, and calculates coordinates of each point in WGS84 coordinate system .

Mots-clés : système de positionnement global, méthode des observations transformées, méthode différentielle, traitement, développement, C++, FORTRAN.

RESUME

Le traitement des observations GPS est l'étape la plus importante du cycle du système de positionnement global car la précision du positionnement dépend directement de cette étape.

Les méthodes différentielles sont les plus utilisées dans le traitement car elles offrent une précision convenable aux applications géodésiques et permettent un traitement efficace des erreurs entachant le système. Cependant l'utilisation de ces méthodes entraîne quelques contraintes et exigences, raison qui justifie la naissance et le développement d'une méthode nouvelle, appelée méthode des observations transformées, qui pare aux problèmes posés par les méthodes différentielles, et qui élimine les erreurs systématiques du système.

L'objet de ce travail est de développer, à partir des sources en langage FORTRAN existantes développées auparavant, une application sous l'environnement C++ Builder permettant le traitement des observations GPS.

L'application développée (IAVGPS) est basée sur l'exploitation des observations de pseudo-distances et de phases en utilisant la méthode des observations transformées. Elle permet de traiter un réseau de points station par station et calculer les coordonnées de chaque station dans le système WGS84.

Developpement d'Une Nouvelle Methode de Traitement des Observations GPS: Organigramme du Logiciel IAVGPS

Tayeb TACHALLAÏT, El Hassan BENAÏM et Lahcen BAHI, Moroc

INTRODUCTION

Auparavant et jusqu'à nos jours, les méthodes différentielles de traitement des observations GPS restent les méthodes les plus utilisées dans les logiciels développés jusqu'à présent. Ces méthodes offrent aux utilisateurs en général et aux géodésiens en particulier, une précision largement suffisante, ce qui a fait du système de positionnement global un outil de travail efficace et puissant dans les projets géodésiques de grande envergure. Cependant ces méthodes présentent un certain nombre d'inconvénients tant au niveau technique qu'au niveau économique pour ne citer que les problèmes liés à la simultanéité des observations faites sur différents récepteurs.

La nouvelle méthode de traitement des observations GPS dite « méthode des observations transformées » est développée dans le cadre d'une recherche de doctorat menée par T. Tachallait. Elle est engagée dans l'objectif d'éliminer les différents problèmes que posent les méthodes différentielles, et offrir à l'utilisateur la possibilité de faire le traitement des observations GPS dans des conditions où les méthodes différentielles se trouvent inefficaces. C'est dans ce cadre que la présente étude trouve ses fins que l'on peut résumer en deux volets :

PARTIE THEORIQUE

- Rappel de l'étude théorique de la nouvelle méthode : modèles mathématiques, étude des erreurs, conséquences d'application.

PARTIE PRATIQUE

- Développement de l'application logicielle IAVGPS. Les routines de calculs sont écrites en FORTRAN, tandis que l'interface utilisateur ainsi que le module principal sont développés sous l'environnement C++ Builder.

1. METHODE DES OBSERVATIONS TRANSFORMEES

1.1. Introduction

La méthode des observations transformées proposée pour le traitement des observations GPS est basée sur l'exploitation des propriétés d'une matrice idempotente particulière U_o . L'application de cette matrice aux observations originales non différenciées (pseudo-distances et phases) permet d'aboutir à des observations transformées géométriquement similaires et exemptes des effets des erreurs systématiques à caractère constant. D'autre part, cette méthode évite la corrélation géométrique entre les observations et permet le traitement de chaque station à part en utilisant toutes les observations qui lui sont relatives.

1.2. Utilisation des matrices idempotentes pour le traitement des observations

1.2.1. Application à un cas général

Soit un vecteur \bar{L} de n observations :

$$\bar{L}_{(1,n)}^T = [l_1 \ l_2 \ l_3 \ \dots \ l_n] \quad (1.1)$$

De chaque observation, on soustrait la moyenne arithmétique de toutes les observations ce qui donne :

$$\tilde{L} = \begin{bmatrix} \tilde{l}_1 \\ \tilde{l}_2 \\ \vdots \\ \tilde{l}_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} l_1 - l_m \\ l_2 - l_m \\ \vdots \\ l_n - l_m \end{bmatrix} \quad (1.2)$$

Avec

$$l_m = \sum_{i=1}^n l_i / n$$

Sous forme matricielle, on peut écrire :

$$\tilde{L} = U_0 \bar{L} \quad (1.3)$$

Ou bien :
$$\tilde{L} = (1/n)(nI - EE^T) \bar{L} \quad (1.4)$$

Avec

$$\begin{aligned} E_{(1,n)}^T &= [1 \ 1 \ 1 \ \dots \ 1] \\ I &: \text{matrice identité d'ordre } n \\ U_0 &= (1/n)(nI - J) \end{aligned} \quad (1.5)$$

La matrice $J=EE^T$ est une matrice carrée d'ordre n dont tous les éléments sont égaux à 1.

1.2.2. Forme et caractéristiques de la matrice U_0

La matrice U_0 est d'ordre n , et admet comme forme générale explicite (Gale 1965, Leclerc 1989 et 1990) :

$$U_0 = 1/n \begin{bmatrix} (n-1) & -1 & -1 & \dots & -1 \\ -1 & (n-1) & -1 & \dots & -1 \\ -1 & -1 & \dots & \dots & -1 \\ -1 & -1 & -1 & \dots & (n-1) \end{bmatrix} \quad (1.6)$$

La matrice U_o possède les propriétés suivantes (Graybill 1983) :

- les éléments de la diagonale sont tous égaux à $(n-1)/n$ et les éléments en dehors de la diagonale sont tous égaux à $(-1/n)$.
- la somme des éléments de la diagonale est égale à $(n-1)$.
- la somme des éléments d'une ligne ou d'une colonne est égale à zéro.

c'est à dire: $U_o E = 0$ et $E^T U_o = 0$

- c'est une matrice idempotente symétrique de rang $(n-1)$.
- $U_o = U_o U_o$
- $U_o = U_o^T$

1.2.3. Application au modèle mathématique de compensation

Dans le cas du système GPS, chaque observation peut être exprimée en fonction des paramètres sous la forme (Leclerc 1990) :

$$\hat{L} = F(\bar{X}) \quad (1.7)$$

Dans laquelle :

$$\bar{L} = \bar{L} + \hat{V} \quad (1.8)$$

Et
$$\bar{X} = \bar{X}_0 + \hat{X} \quad (1.9)$$

Où :

\bar{L} : vecteur des observations effectuées,

\bar{L} : vecteur des observations compensées,

\hat{V} : vecteur des résiduelles estimées,

\bar{X}_0 : vecteur des valeurs approchées des paramètres,

\bar{X} : vecteur des estimés des paramètres,

\hat{X} : vecteur des corrections à apporter aux valeurs approchées des paramètres.

Sous forme linéarisée, l'équation (1.7) devient :

$$A \hat{X} = \hat{V} + W \quad (1.10)$$

Où :

$$A = \left. \frac{\partial F}{\partial X} \right|_{X_0} \quad : \text{matrice des coefficients des paramètres.} \quad (1.11)$$

$$W = \bar{L} - F(\bar{X}_0) \quad : \text{vecteur des termes constants.} \quad (1.12)$$

Multipliant les deux membres de l'équation (1.10) par la matrice idempotente U_o définie en (1.6), on obtient :

$$\tilde{A} \hat{X} = \tilde{L} + \tilde{V} - \tilde{F}(\bar{X}_0) \quad (1.13)$$

Dans laquelle :

$$\tilde{A} = U_o A \quad ; \quad \tilde{L} = U_o \bar{L} \quad ; \quad \tilde{V} = U_o \hat{V} \quad \text{et} \quad \tilde{F}(\bar{X}_0) = U_o F(\bar{X}_0) .$$

L'application de la loi de propagation des erreurs permet de déduire la matrice de variances-covariances des observations transformées comme suit :

$$\Sigma_{\tilde{L}} = U_0 \Sigma_L^{-1} U_0 \quad \text{puisque} \quad U_0^T = U_0 \quad (1.14)$$

En supposant que les observations originales sont obtenues d'une façon indépendante et avec égale précision (σ^2), on aura comme matrice de variances-covariances :

$$\Sigma_L^{-1} = \sigma^2 I \quad (1.15)$$

D'où :
$$\Sigma_{\tilde{L}} = \sigma^2 U_0 \quad (1.16)$$

Selon la définition d'une inversion généralisée, (Boullion et Odell 1971, Gale 1965, Graybill 1983) on aura :

$$U_0^{-1} = U_0^T = U_0 \quad (1.17)$$

D'où :

$$\Sigma_{\tilde{L}}^{-1} = \frac{1}{\sigma^2} U_0 \quad (1.18)$$

1.2.4. Elimination des paramètres à coefficients constants

Reprenons l'équation (1.10) et multiplions de part et d'autre par la matrice U_0 .

On obtient :
$$U_0 A \hat{X} = U_0 (\hat{V} + W) \quad (1.19)$$

et subdivisons la matrice A et le vecteur \hat{X} de manière à mettre en évidence les paramètres ayant un coefficient constant, ainsi le produit $A \hat{X}$ s'écrit sous la forme :

$$A \hat{X} = [A_1 \quad A_2] \begin{bmatrix} \hat{X}_1 \\ \hat{X}_2 \end{bmatrix} \quad (1.20)$$

où :

A_1 : sous-matrice des coefficients constants.

A_2 : sous-matrice des coefficients non constants.

\hat{X}_1 : vecteur de u_1 paramètres à coefficients constants.

\hat{X}_2 : vecteur de u_2 paramètres à coefficients non constants.

$u = u_1 + u_2$: nombre total de paramètres.

La matrice A_1 a la forme suivante :

$$A_1 = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & \dots & a_{1u_1} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & \dots & a_{2u_1} \\ \cdot & \cdot & & & \cdot \\ \cdot & \cdot & & & \cdot \\ \cdot & \cdot & & & \cdot \\ a_{u_1 1} & a_{u_1 2} & \dots & \dots & a_{u_1 u_1} \end{bmatrix}$$

Elle peut s'écrire aussi en fonction de E vecteur de termes égaux à 1 comme suit:

$$A_1 = [a_1 E \ a_2 E \ a_3 E \ \dots \ a_{u1} E]$$

Ainsi en remplaçant A_1 par son expression dans l'équation (1.20) on obtient :

$$U_0 A \hat{X} = U_0 [a_1 E \ a_2 E \ a_3 E \ \dots \ a_{u1} E \ |A_2] \begin{bmatrix} \hat{X}_1 \\ \hat{X}_2 \end{bmatrix} \quad (1.21)$$

Et puisque $U_0 E = 0$, toutes les variables à coefficients constants vont s'éliminer de l'équation (1.21) on obtient alors :

$$U_0 A \hat{X} = U_0 A_2 \hat{X}_2 \quad (1.22)$$

Cette multiplication permet ainsi d'éliminer tous les termes constants du modèle mathématique et permet de réduire les erreurs systématiques, dont les modèles contiennent des paramètres constants.

Le modèle mathématique devient :

$$U_0 A_2 \hat{X}_2 = \tilde{A}_2 \hat{X}_2 = U_0 (\hat{V} + W) \quad (1.23)$$

En conséquence il ne reste à évaluer que les paramètres \hat{X}_2 dont les coefficients sont exprimés par la matrice A_2 et qui sont variables.

1.3. Application des matrices idempotentes aux observations GPS

Considérons un ensemble d'observations faites sur un satellite à partir d'un seul récepteur pendant une période de temps durant laquelle aucun saut de cycle ne s'est produit. Appelons ce temps d'observation un groupe d'observations.

Chaque groupe d'observations est formé d'observations dont le nombre dépend de l'intervalle de temps choisi juste avant le début des observations, et aussi de la période d'observation.

L'application des matrices idempotentes aux observations GPS (pseudo-distances, phases...), permet d'aboutir à des observations transformées pour chaque ensemble d'observations formant une session simple.

1.3.1. Pseudo-distances

L'équation d'observation simplifiée pour le cas de l'observation pseudo-distance peut s'écrire sous la forme:

$$P = [\rho] + [\varepsilon] \quad (1.24)$$

avec :

P : vecteur des observations de pseudo-distances pour une session simple,

ρ : distance géométrique séparant le satellite du récepteur,

ε : corrections incluant les erreurs de modélisation.

En appliquant la matrice idempotente U_0 au vecteur des observations originales P on obtient :

$$\tilde{P} = U_0 P \quad (1.25)$$

où :

\tilde{P} : vecteur des observations transformées.

1.3.2. Phases

L'équation d'observation simplifiée pour l'observation phase s'écrit

$$\Phi = [\rho] + [\varepsilon] + \lambda E N \quad (1.26)$$

où :

N : ambiguïté de phase initiale,

λ : longueur d'onde.

De la même manière, on peut écrire :

$$\tilde{\Phi} = U_0 \Phi \quad (1.27) \text{ où :}$$

Φ : vecteur des observations originales des phases,

$\tilde{\Phi}$: vecteur des observations transformées.

1.3.2.1. Elimination de l'ambiguïté de phase initiale

L'ambiguïté de phase est un paramètre qui reste constant pour toutes les observations formant une session simple. Ainsi ce paramètre s'élimine en passant des observations originales aux observations transformées.

D'après l'équation (1.26) on a :

$$\tilde{\Phi} = U_0 [\rho + \varepsilon] + \lambda U_0 E N \quad (1.28)$$

Et comme $U_0 E = 0$, on aura:

$$\tilde{\Phi} = U_0 [\rho] + U_0 [\varepsilon] \quad (1.29)$$

Ainsi le modèle mathématique des observations de phases devient exempt de l'effet de l'ambiguïté de phase.

1.3.2.2. Identification des sauts de cycles

L'ambiguïté de phase est le nombre entier de cycles de la phase porteuse reconstruite dans un ensemble de mesures ininterrompues à partir d'un seul passage d'un satellite à un seul récepteur. La valeur de l'ambiguïté de phase initiale demeure la même tant et aussi longtemps qu'un saut de cycles ne s'est produit.

Cependant cette valeur subit une variation par rapport à sa valeur initiale chaque fois qu'une interruption de capture des signaux est produite à cause d'un obstacle quelconque.

L'identification des sauts de cycles consiste en la détermination de l'étape où le saut de cycles s'est produit, et pouvoir par conséquent séparer les observations contenant des sauts de cycles de celles qui n'en contiennent pas.

Pour ce faire considérons une série d'observations relatives à un seul récepteur et un seul satellite. Supposons que lors de la session de ces observations un saut de cycles s'est produit et a changé par conséquent la valeur de l'ambiguïté de phase initiale. Ceci peut être exprimé comme suit :

$$\begin{array}{l}
 \varphi_1 = \rho_1 + \varepsilon_1 + \lambda N \\
 \varphi_2 = \rho_2 + \varepsilon_2 + \lambda N \\
 \dots \\
 \varphi_i = \rho_i + \varepsilon_i + \lambda N
 \end{array}
 \left. \vphantom{\begin{array}{l} \varphi_1 \\ \varphi_2 \\ \dots \\ \varphi_i \end{array}} \right\} \begin{array}{l} \text{Observations ne contenant} \\ \text{pas de sauts de cycles.} \end{array} \dots$$

saut de cycles

$$\begin{array}{l}
 \varphi_{i+1} = \rho_{i+1} + \varepsilon_{i+1} + \lambda N + \partial N \\
 \varphi_{i+2} = \rho_{i+2} + \varepsilon_{i+2} + \lambda N + \partial N \\
 \dots \\
 \varphi_n = \rho_n + \varepsilon_n + \lambda N + \partial N
 \end{array}
 \left. \vphantom{\begin{array}{l} \varphi_{i+1} \\ \varphi_{i+2} \\ \dots \\ \varphi_n \end{array}} \right\} \begin{array}{l} \text{Observations contenant} \\ \text{un saut de cycles.} \end{array}$$

Sous forme matricielle on aura :

$$\begin{bmatrix} \varphi_1 \\ \varphi_2 \\ \vdots \\ \varphi_{i+1} \\ \vdots \\ \vdots \\ \varphi_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \rho_1 \\ \rho_2 \\ \vdots \\ \rho_{i+1} \\ \vdots \\ \vdots \\ \rho_n \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \vdots \\ \varepsilon_{i+1} \\ \vdots \\ \vdots \\ \varepsilon_n \end{bmatrix} + \lambda N \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ \vdots \\ \vdots \\ \vdots \\ \vdots \\ 1 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \vdots \\ \partial N \\ \vdots \\ \vdots \\ \partial N \end{bmatrix}$$

En passant au vecteur des observations transformées en multipliant par U_0 on obtient :

$$U_0 \begin{bmatrix} \varphi_1 \\ \varphi_2 \\ \vdots \\ \varphi_{i+1} \\ \vdots \\ \varphi_n \end{bmatrix} - U_0 \begin{bmatrix} \rho_1 \\ \rho_2 \\ \vdots \\ \rho_{i+1} \\ \vdots \\ \rho_n \end{bmatrix} - U_0 \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \vdots \\ \varepsilon_{i+1} \\ \vdots \\ \varepsilon_n \end{bmatrix} = \lambda N U_0 \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ \vdots \\ \cdot \\ \vdots \\ 1 \end{bmatrix} + U_0 \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \vdots \\ \partial N \\ \vdots \\ \partial N \end{bmatrix}$$

En exploitant la propriété $U_0 E = 0$ et l'expression de U_0 on arrive à :

$$U_0 \begin{bmatrix} \varphi_1 \\ \varphi_2 \\ \vdots \\ \varphi_{i+1} \\ \vdots \\ \varphi_n \end{bmatrix} - U_0 \begin{bmatrix} \rho_1 \\ \rho_2 \\ \vdots \\ \rho_{i+1} \\ \vdots \\ \rho_n \end{bmatrix} - U_0 \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \vdots \\ \varepsilon_{i+1} \\ \vdots \\ \varepsilon_n \end{bmatrix} = \frac{1}{n} \begin{bmatrix} -(n-i)\partial N \\ -(n-i)\partial N \\ \vdots \\ -(n-i)\partial N \\ i \partial N \\ \vdots \\ i \partial N \end{bmatrix}$$

Prenant le vecteur résultat à droite et faisons la différence entre chaque élément du vecteur et celui qui le suit on obtient ainsi le vecteur suivant :

$$\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \vdots \\ \partial N \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix} \quad (i)^{eme} \text{ ligne}$$

On constate que le terme correspondant à (i) est non nul, on peut conclure que le saut de cycles s'est produit après l'observation φ_i , et affecte toutes les observations ultérieures à cette observation. En déterminant i on peut séparer les observations affectées et non affectées par le saut de cycle et faire ainsi le traitement pour chaque groupe à part.

1.4. Conséquences de l'application des matrices idempotentes

La méthode des observations transformées permet de traiter chaque groupe d'observation à la fois. Le groupe d'observation est formé par toutes les observations (ne contenant aucun saut de cycles) faites sur le même satellite à partir du même récepteur. Les équations d'observation sont faites dans l'ordre : station, satellite et époque d'observation, de ceci découle un certain nombre de conséquences.

1.4.1. Réduction des erreurs systématiques à caractère constant

L'application des matrices idempotentes aux observations a pour effet d'éliminer l'effet des erreurs systématiques à caractère constant.

Puisque l'erreur systématique n'est pas nécessairement constante, son influence est considérablement réduite.

Ainsi on forme des observations transformées de pseudo-distances et de phases géométriquement semblables avec élimination des paramètres à coefficients constants (ambiguïté de phase initiale, coefficients constants des modèles des erreurs de synchronisation des horloges,...).

1.4.2. Utilisation de l'ensemble des observations

Toutes les observations sont utilisées dans le traitement pour l'estimation des paramètres. Il n'y a pas de négligence d'une partie d'observations à cause de la simultanéité comme c'est le cas dans le traitement en mode différentiel.

1.4.3. Absence de corrélations entre les stations

Cette méthode de traitement des observations GPS évite la corrélation géométrique artificielle entre les stations terrestres, qui est produite par les différences simples, doubles et triples.

1.4.4. Procédure simple d'identification des sauts de cycles

La méthode permet d'identifier facilement les sauts de cycles ce qui permet de traiter les observations par groupes ne contenant pas de sauts de cycles.

1.4.5. Exigences modestes en moyens

La méthode proposée n'utilise aucune différence entre les groupes d'observations.

Elle permet le traitement séquentiel simple de tout un réseau par un ensemble de matrices dont les dimensions sont minimales pour chaque point terrestre. Ce qui réduit ainsi les calculs à faire. D'autre part, la méthode permet de traiter chaque session à part, en conséquence avec un seul récepteur on peut obtenir une solution GPS.

2. REALISATION DE L'APPLICATION IAVGPS

Le but principal de cette étude est d'adapter et compléter un logiciel de traitement des observations GPS par la méthode des observations transformées dont les principes théoriques sont expliqués à la section précédente (pour plus de détails se référer au symposium GPS90 à Ottawa).

Les programmes sources écrits en FORTRAN ont servi de base pour aboutir à une application adaptée aux nouvelles versions du format d'échange universel RINEX. Le logiciel a gagné en performance, en facilité d'utilisation (interface Windows), mais surtout en évolutivité grâce à la Programmation Orientée Objet (POO) complètement supportée par l'environnement de développement «C++ Builder» qui a servi comme plate-forme pour l'intégration des modules FORTRAN.

2.1. Méthodologie

Nous sommes partis d'un ensemble de fichiers sources en langage FORTRAN (routines et fonctions) conçus pour fonctionner sous DOS. Le langage C++ est utilisé pour réaliser l'interface utilisateur ainsi que le module principal. On est donc amené à une sorte de programmation en langages mixtes, où il s'agit de résoudre le problème de communication entre les deux langages (appel des fonctions et passage des arguments).

2.2. Les étapes de traitement des observations GPS par l'application réalisée

Le traitement des observations GPS suivant la méthode des observations transformées est assuré par un certain nombre d'étapes. A chaque étape correspond un module. Ainsi on peut résumer le processus de traitement des observations comme suit :

- Lecture des données sous format RINEX (module RINLEC).
- Création d'un fichier des orbites des satellites à des intervalles de temps constants de part et d'autre du temps d'observation de chaque époque (module TSTXYZ).
- Création du fichier des séries de Lagrange et leurs dérivées (module TSTFGH).
- Analyse des sauts de cycles dans le cas des observations des phases (module ANAPHA).
- Traitement des observations de pseudo-distances et de phases (modules POSDIS et POSPHA).

Les modules POSDIS et POSPHA permettent le traitement des observations de pseudo-distances et de phases respectivement, d'une façon similaire. Il convient de tenir compte des sauts de cycles quand il s'agit du module POSPHA. Cette étape consiste en :

- Détermination du nombre total des paramètres de la station.
- Application du modèle ionosphérique aux observations.
- Application du modèle troposphérique aux observations.
- Calcul de l'erreur d'horloge de la station.
- Calcul du temps de réception corrigé (temps GPS).
- Calcul de l'erreur d'horloge du satellite.
- Calcul du temps d'émission corrigé.
- Transformation des coordonnées inertielles des différents satellites en coordonnées terrestres moyennes.
- Formation des équations d'observations pour la station.

- Formation des équations normales de la station.
- Application de la matrice idempotente de transformation aux équations d'observations.
- Solution par moindres carrées des paramètres de la station.
- Calcul de l'ellipsoïde d'erreur.

Les figures 2.1, 2.2, 2.3, 2.4, 2.5, montrent les organigrammes hiérarchiques des modules formant l'application réalisée.

2.3. Présentation de l'application

L'interface utilisateur de l'application a été conçue en respectant les règles d'ergonomie mentionnées dans la documentation du SDK (Microsoft Software Development Kit), et de façon à ce que les détails du traitement soient encapsulés.

La figure 2.7 montre l'écran principal de l'application, et les commandes accessibles *via* le menu principal sont illustrées par la figure 2.8.

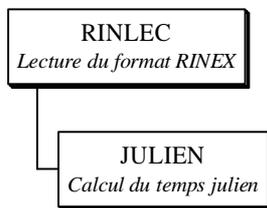


Figure 2.1 : Organigramme hiérarchique du module RINLEC

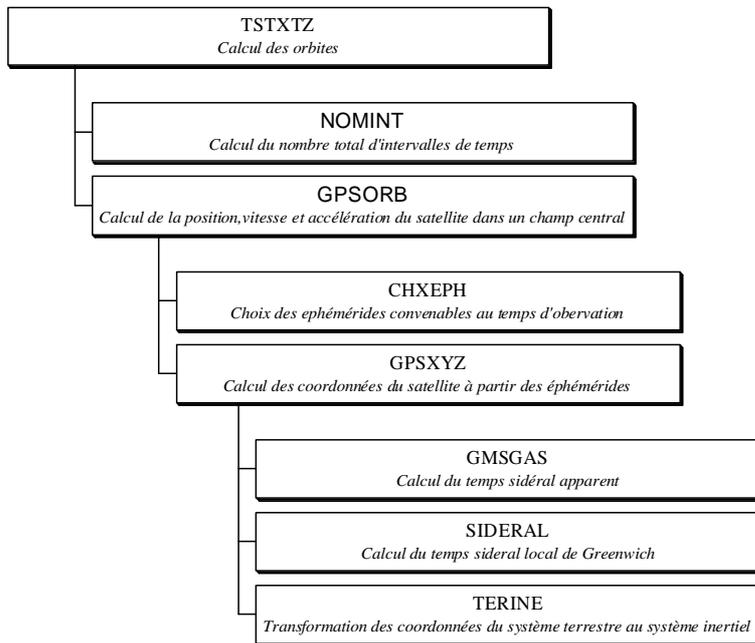


Figure 2.2 : Organigramme hiérarchique du module TSTXYZ

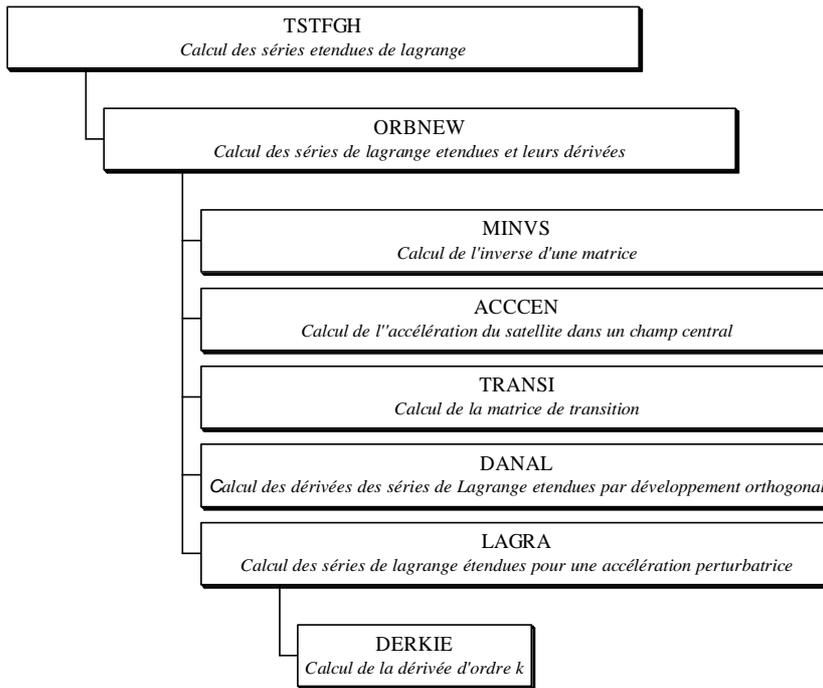


Figure 2.3 : Organigramme hiérarchique du module TSTFGH

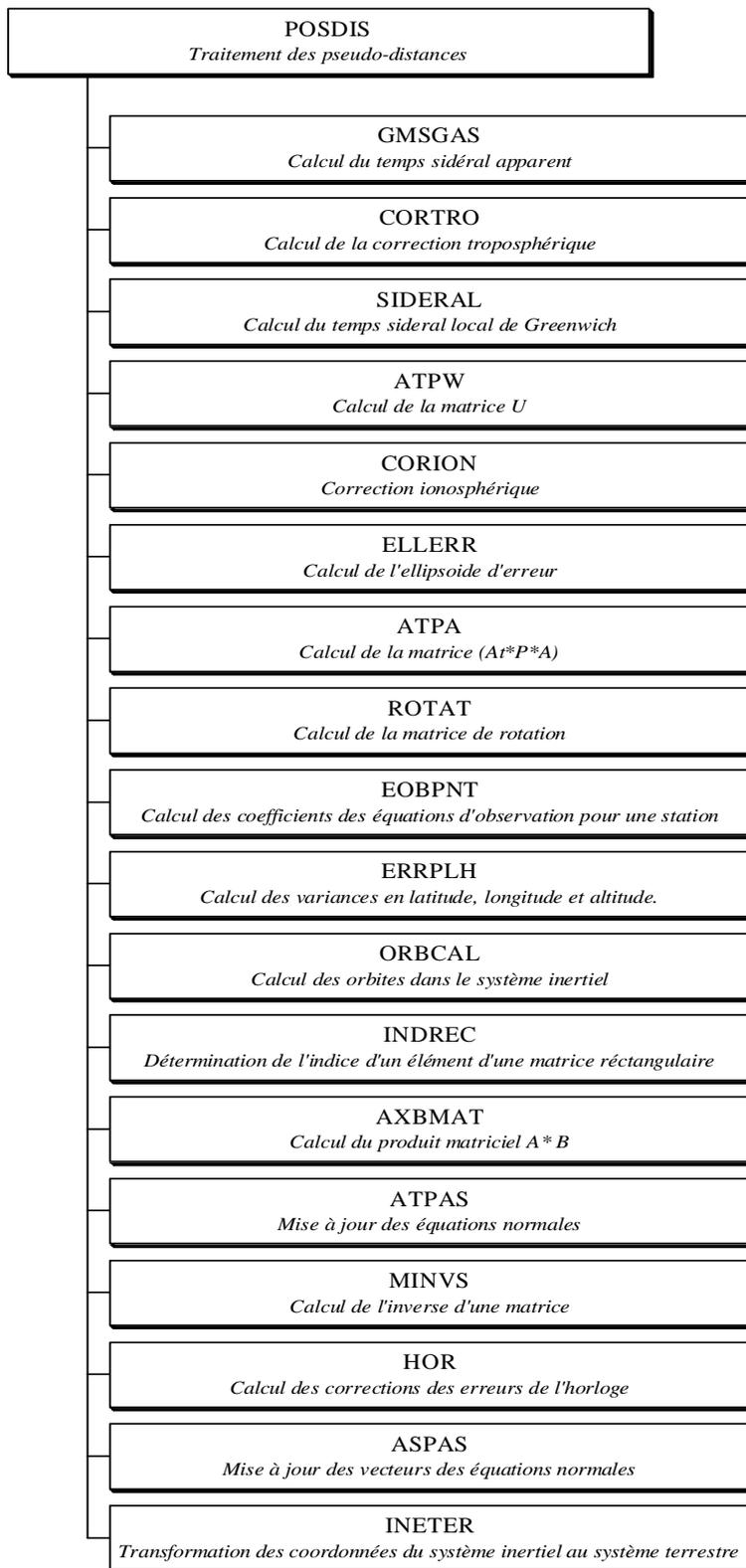


Figure 2.4 : Organigramme hiérarchique du module POSDIS

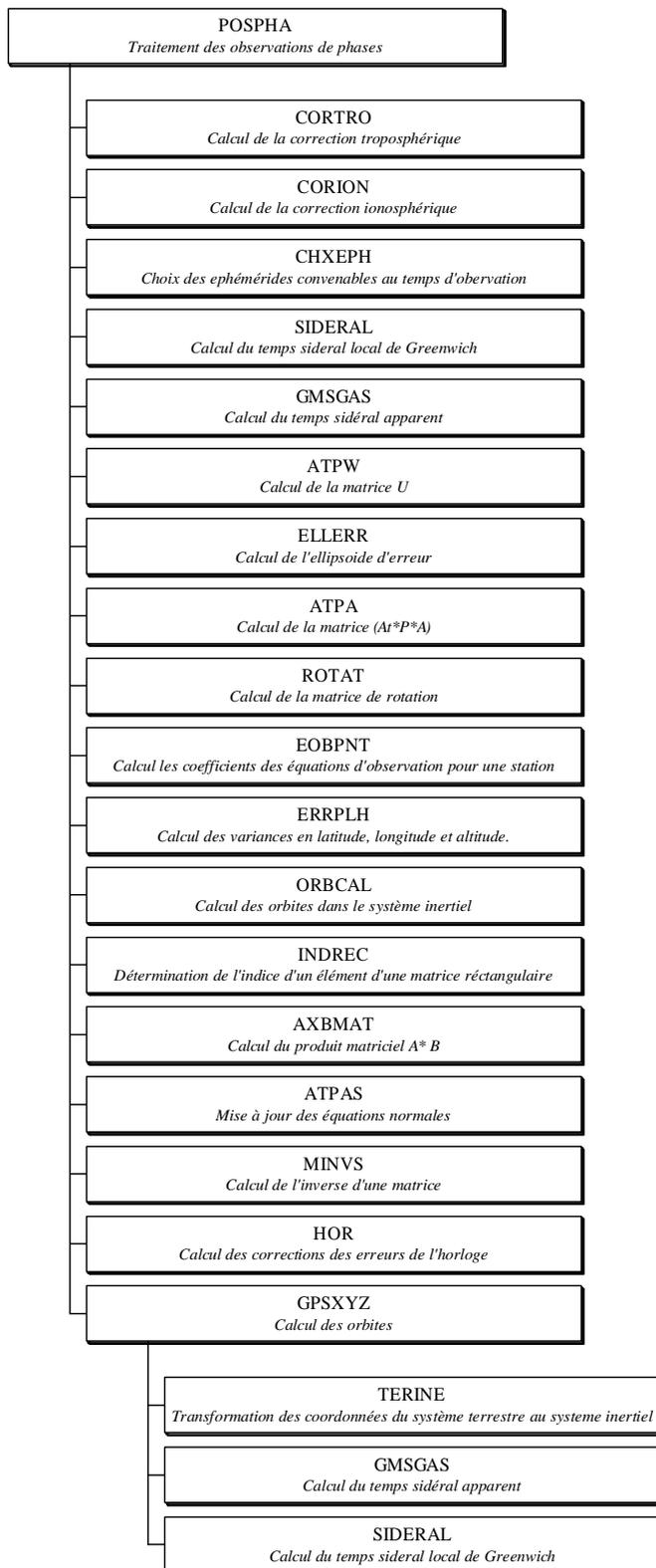


Figure 2.5 : Organigramme hiérarchique du module POSPHA

3. CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS

Le but de la présente étude est le développement d'une application logicielle IAVGPS qui permettra le traitement des observations GPS pour la détermination des coordonnées des stations

L'application IAVGPS est basée sur la méthode des observations transformées et permet de traiter une seule station à la fois.

Afin d'améliorer l'efficacité de l'application, on pense revoir les points suivants :

- Introduire les calculs du géoïde pour une bonne détermination altimétrique.
- Améliorer les modèles utilisés pour les corrections ionosphériques et troposphériques.
- Contrôler les modules d'intégration des orbites des satellites.
- Améliorer les modules de traitements.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- ALBER C., WARE R., ROCKEN C., BRAUN J., 2000, Obtaining single path phase delays from GPS double differences, (GEOPHYSICAL RESEARCH LETTERS, VOLo 27, NO 7, PAGES 2661-2664), University Corporation for Atmospheric Research.
- AZAGAGHE A., 1991, Traitement des observations GPS pour la détermination des lignes de base, Mémoire de 3^{ème} cycle, Département de Géodésie-Topographie I.A.V Hassan II, Rabat, Maroc.
- AZZOUZI R., 1998, Notes de cours sur le Système de Positionnement Global, Département de Géodésie-Topographie I.A.V Hassan II, Rabat, Maroc.
- BART P., 1999, Determination of the accuracy of the Global Positioning System's broadcast orbit and the WAAS-corrected orbit. University of New Brunswick Delft, Department of Geodesy and Geomatics, Canada.
- BENAIM E., 2000, Notes de cours de compensations géodésiques I, Département de Géodésie-Topographie I.A.V Hassan II, Rabat, Maroc.
- CORDE P., DELOUIS H., 2001, Cours Fortran 95, Institut du Développement et des Ressources en Informatique Scientifique (IDRIS), ORSAY CEDEX.
- DREYFUS M., 1972, Fortran IV, Centre Interarmées de Recherche Opérationnelle (CIRO), PARIS.
- DUPRAZ H., 1990, La méthode GPS, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, Département de Génie Rural, Suisse.
- FRALA B., 1997, les 1000 fonctions de programmation de Windows 95, Editions Marabout, Allier, Belgique.
- INPRISE CORPORATION, 1999, C++ Builder 4 Client/Server Foundations Courseware Manual, Scotts Valley, USA.
- LEBLANC G., 1998, C++ Builder 3, éditions Eyrolles, France.
- LOUISE G., 2001, Remarques de développement avec C++ Builder 5, <http://perso-club-internet.fr/glouise/>.
- MINISTERE DES APPROVISIONNEMENTS ET SERVICES CANADA, 1993, Guide pour le positionnement GPS.
- OURS BLANC DES CARPATHES, 1999, Introduction à C++ Builder, ISIMA.

- PETZOLD C., 1990, Programming Windows, Microsoft Press.
- SATIRAPOD C., WANG J., RIZOS C., 1994, Comparing Different GPS Data Processing Techniques for Modelling Residual Systematic Errors, School of Surveying and Spatial Information Systems, The University of New South Wales, Sydney, Australia.
- SERGE B., FRANCOISE.D, YVES.E, MICHELE.E, PASCAL.W, 1998, GPS Localisation et Navigation, Conseil National de l'Information Géographique, France.
- TACHALLAIT T., 2001, Notes de cours de compensations géodésiques II, Département de Géodésie-Topographie I.A.V Hassan II,Rabat, Maroc.
- TACHALLAIT T., LECLERC J.-G., SANTERRE.R, MAINVILLE.A, 1990, Développement d'une méthode de traitement des observations GPS, deuxième symposium international GPS90, Ottawa, Canada.
- TEUNISSEN P. J. G., 1996, GPS double difference statistics: with and without using satellite geometry, Delft Geodetic Computing Centre (LGR), Faculty of Geodesy, Delft University of Technology, The Netherlands.
- WELLS D. et al., 1986, Guide to GPS positioning, Canadian GPS associates.
- WERNER G., 1998, The receiver independent exchange format version 2, Astronomical Institute, University of Berne, Suisse.
- WILLMS G.,1996, Langage C, éditions Micro-Application, France.

Sites Internet :

www.geologie.ens.fr/~vigny/
www.gmat.unsw.edu.au/snap/gps/
www.ifag.de/Geodaesie/glo_proc/
www.navcen.uscg.mil/gps/

CONTACTS

Tayeb Tachallaït and El Hassan Belaïm
 Filière de Formation en Topographie
 IAV Hassan II
 Rabat
 MOROCCO

Lahcen Bahi
 Ecole Mohammedia des Ingénieurs
 Rabat
 MOROCCO