

MINISTERE DE L'EDUCATION NATIONALE, DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE

CONSERVATOIRE NATIONAL DES ARTS ET METIERS

ECOLE SUPERIEURE DES GEOMETRES ET TOPOGRAPHES

MEMOIRE

Présenté en vue d'obtenir

Le diplôme d'ingénieur E.S.G.T.

**UTILISATION DU LOGICIEL DE L'UNIVERSITE DE BERNE
POUR LE TRAITEMENT DE DONNEES GPS EN PRODUCTION
AUTOMATISATION DES PROCESSUS ET STRATEGIES DE CALCULS**

Stage réalisé au sein
du Service de Géodésie et de Nivellement
de L'Institut Géographique National

Soutenu le 10 septembre 2002
Par LEGRAND Juliette

Jury

Président : Monsieur DUQUENNE Henry
Membres : Madame DUQUENNE Françoise
Monsieur DUQUESNOY Thierry

1, Boulevard Pythagore - 72000 LE MANS – Téléphone : 02.43.43.31.00 – Fax. 02.43.43.31.02

Avant-Propos

Je suis particulièrement reconnaissante à Monsieur Michel Kasser, chef du Service de Géodésie et de Nivellement, de m'avoir accueillie dans son service.

Je remercie chaleureusement Madame Françoise Duquenne et Monsieur Henri Duquenne pour la confiance qu'ils m'ont manifestée et pour avoir accepté de participer à mon jury de stage.

J'exprime toute ma reconnaissance à mon maître de stage Monsieur Thierry Duquesnoy pour son entière disponibilité et pour toute l'aide qu'il m'a apporté.

Je remercie Messieurs Bruno Garayt et Alain Harmel pour avoir pris le temps de répondre à mes nombreuses questions.

Monsieur Pierre Fridez de l'université de Berne a toujours répondu rapidement à mes mels. Qu'il en soit ici remercié.

Merci à Messieurs Patrick Bouron, Eric Fourestier, Thierry Gattacceca et Pierre Vergez pour leur aide et leurs conseils.

Merci à Mesdames Sylvie Lige et Odile Dieda pour leur soutien et leur bonne humeur communicative.

Je tiens également à remercier l'ensemble des personnes que j'ai côtoyées au Service de Géodésie et de Nivellement pour m'avoir chaleureusement accueillie.

Enfin, je ne peux finir cette page sans remercier ma mère pour son soutien tant moral que financier.

Table des Matières

1. INTRODUCTION.....	1
2. LE GPS.....	2
2.1. GÉNÉRALITÉS	2
2.2. LES SOURCES D'ERREURS.....	2
2.2.1. <i>Les dégradations volontaires</i>	2
2.2.1.1. L'accès sélectif (SA : Selective Availability).....	2
2.2.1.2. L'antibrouillage (AS : Anti-Spoofing)	3
2.2.2. <i>Les multitrajets</i>	3
2.2.3. <i>Les orbites</i>	3
2.2.4. <i>la modélisation des centres de phase des antennes</i>	4
2.2.4.1. Le centre de phase de l'antenne de réception.....	4
2.2.4.2. Le centre de phase de l'antenne d'émission.....	4
2.2.5. <i>Erreur de propagation dans l'ionosphère</i>	5
2.2.5.1. généralités.....	5
2.2.5.2. Effet de l'ionosphère sur la position.....	5
2.2.5.3. Modélisation et estimation de l'ionosphère.....	5
2.2.5.3.1. Utilisation de données externes	5
2.2.5.3.2. Estimation de paramètres ionosphériques.....	5
2.2.5.4. Le logiciel de Berne.....	6
2.2.6. <i>Erreur de propagation dans la troposphère</i>	6
2.2.6.1. Généralités.....	6
2.2.6.2. Effet de la troposphère sur la position	7
2.2.6.3. Modélisation de la troposphère.....	7
2.2.6.4. Estimation des paramètres	7
2.2.6.5. Le logiciel de Berne.....	8
2.3. AUTRES PHÉNOMÈNES INFLUENÇANT LA PRÉCISION DU POSITIONNEMENT.....	8
2.3.1. <i>les coordonnées du pôle et ses paramètres de rotation</i>	8
2.3.2. <i>La surcharge océanique</i>	9
3. UTILISATION DU LOGICIEL DE BERNE	10
3.1. PRÉSENTATION DU LOGICIEL DE BERNE	10
3.1.1. <i>Les programmes de traitements (Bernese GPS Processing Programs)</i>	10
3.1.2. <i>Le système de menu (Bernese GPS Menu System)</i>	11
3.1.3. <i>Le BPE (Bernese Processing Engine)</i>	11
3.1.3.1. Introduction	11
3.1.3.2. Le principe de fonctionnement.....	12
3.1.3.2.1. Le fichier PCF	13
3.1.3.2.2. Les répertoires d'options OPT	13
3.1.3.2.3. Les scripts.....	13
3.1.3.2.4. Les fichiers de protocole.....	13
3.1.3.2.5. Fonctionnement du PCS.....	13
3.1.3.2.6. Le panneau des variables DAT151__PAN	14
3.2. DÉROULEMENT D'UN CALCUL.....	15

3.2.1.	<i>La préparation d'un calcul</i>	15
3.2.1.1.	La création de la campagne.....	15
3.2.1.2.	Les fichiers nécessaires au traitement.....	15
3.2.1.2.1.	Les fichiers généraux spécifiques au logiciel de Berne.....	15
3.2.1.2.1.1.	La calibration d'antennes.....	15
3.2.1.2.1.2.	Paramètres des satellites.....	16
3.2.1.2.1.3.	Manœuvres des satellites.....	16
3.2.1.2.1.4.	Les informations concernant le pôle.....	16
3.2.1.2.2.	Les fichiers de données.....	16
3.2.1.2.2.1.	Les fichiers d'observations.....	16
3.2.1.2.2.2.	Les éphémérides.....	17
3.2.1.2.3.	Les fichiers annexes concernant les stations.....	18
3.2.1.2.3.1.	Le fichier de traduction d'antenne/récepteur TRN.....	18
3.2.1.2.3.2.	Les fichiers spécifiques à la campagne.....	18
3.2.1.2.3.2.1.	Le fichier de coordonnées CRD.....	18
3.2.1.2.3.2.2.	Le fichier de lignes de base BSL.....	18
3.2.1.2.3.2.3.	Le fichier FIX.....	19
3.2.1.2.3.2.4.	Le fichier SIG.....	19
3.2.1.2.3.2.5.	Le fichier BLQ.....	19
3.2.1.2.3.2.6.	Le fichier de correspondance des noms de stations et de correction des hauteurs d'antennes	19
	19	
3.2.1.3.	Le panneau de session.....	19
3.2.2.	<i>Le traitement</i>	20
3.2.3.	<i>L'analyse des résultats</i>	21
3.3.	LES OPTIONS DE CALCUL.....	22
3.3.1.	<i>Les données disponibles</i>	22
3.3.2.	<i>L'angle de coupure</i>	22
3.3.2.1.	Utilisation d'une seule ou des deux fréquences.....	25
3.3.3.	<i>Choix de la stratégie de résolution des ambiguïtés</i>	25
3.3.3.1.	Positionnement rapide statique.....	25
3.3.3.2.	Positionnement statique bifréquence.....	26
3.3.4.	<i>Détermination de paramètres troposphériques</i>	26
3.3.4.1.1.	L'utilisation de modèles et de fonctions de projection.....	26
3.3.4.1.2.	Les paramètres troposphériques estimés.....	28
3.3.5.	<i>Le nombre d'étapes lors de l'estimation des paramètres</i>	32
3.3.5.1.	Présentation des stratégies.....	32
3.3.5.1.1.	Stratégie 1 : 3 GPSEST + résidus.....	32
3.3.5.1.2.	Stratégie 2 : 3 GPSEST.....	32
3.3.5.1.3.	Stratégie 3 : 2 GPSEST.....	32
3.3.5.1.4.	Stratégie 4 : 1 GPSEST.....	32
3.3.5.2.	Résultats.....	33
3.3.6.	<i>Recherche d'un indicateur de validité des calculs</i>	34
3.3.7.	<i>Les pistes à explorer</i>	38
3.3.7.1.	La stratégie de création des fichiers de simples différences.....	38
3.3.7.2.	Utilisation d'un modèle ionosphérique.....	38
3.3.8.	<i>Conclusions</i>	38
4.	LES AUTOMATISMES DE TRAITEMENTS IMPLÉMENTÉS ET LES UTILITAIRES ASSOCIÉS	40
4.1.	LES UTILITAIRES DÉVELOPPÉS POUR LES TESTS DE CALCULS.....	40
4.1.1.	<i>Le lancement automatique des calculs et l'archivage des données</i>	40
4.1.2.	<i>L'exploitation des résultats</i>	41
4.2.	LES PROGRAMMES D'AUTOMATISATION DES CALCULS.....	41
4.2.1.	<i>Le principe de l'automatisation</i>	41
4.2.1.1.	Les difficultés rencontrées.....	42
4.2.1.1.1.	La récupération des fichiers nécessaires au traitement.....	42
4.2.1.1.2.	Le nom de la campagne et sa création.....	42
4.2.1.1.3.	La création des fichiers concernant les stations.....	42
4.2.1.1.4.	La mise à jour des coordonnées.....	42
4.2.1.1.5.	La création des fichiers au format Berne.....	42
4.2.1.1.6.	Le programme MAUPRP.....	43
4.2.1.1.7.	Le panneau de session.....	43
4.2.1.2.	Les solutions apportées.....	43
4.2.1.2.1.	Récupération des fichiers nécessaires au traitement.....	43
4.2.1.2.2.	La campagne.....	43

4.2.1.2.3.	Automatisation de la création des fichiers concernant les stations	43
4.2.1.2.4.	Mise à jour des coordonnées.....	44
4.2.1.2.5.	La création du panneau de session.....	45
4.2.1.3.	Les points à améliorer	45
4.2.2.	<i>Les calculs de rattachement et le statique rapide</i>	45
4.2.2.1.	Le fichier de la campagne.....	46
4.2.2.2.	Les différentes configurations choisies.....	46
4.2.2.2.1.	Calcul en réseau.....	46
4.2.2.2.2.	Lignes de base	46
4.2.2.2.3.	Statique Rapide.....	47
4.2.3.	<i>Le nivellement par GPS</i>	47
4.2.3.1.	Principe du nivellement par GPS.....	47
4.2.3.1.1.	Les observations	48
4.2.3.1.2.	La méthode de calcul	50
4.2.3.2.	Implémentation des calculs	50
4.2.3.2.1.	Le fichier de la campagne.....	50
4.2.3.2.2.	Calcul par étape d'une mission.....	51
4.2.3.2.3.	Calcul global d'une mission.....	51
4.2.3.2.4.	Conclusion.....	52
5.	CONCLUSIONS.....	53

1. INTRODUCTION

Dans le cadre de ses activités, le Service de Géodésie et de Nivellement (SGN) de l'Institut Géographique National (IGN) traite des campagnes de mesures GPS de grandes précisions. Par exemple, l'entretien du réseau de nivellement de la France est réalisé par le SGN. Désormais, le réseau est entretenu à l'aide de la technique GPS associée à du nivellement direct. Pour le nivellement par GPS, la précision sur la composante verticale est primordiale.

Les logiciels des constructeurs négligent certains postes d'erreurs résiduels ce qui limite la précision des résultats. Ces erreurs sont en revanche correctement prises en compte par les logiciels scientifiques. En contrepartie, l'utilisation de ces derniers n'est pas aisée.

Le SGN utilise déjà couramment le logiciel scientifique de l'université de Berne "Bernese GPS Software Version 4.2" pour la réalisation de la référence nationale au travers du Réseau GPS Permanent (RGP) et souhaite bénéficier de ses avantages pour les travaux de production courante. Si l'utilisation en mode interactif du logiciel de Berne sous Windows est déjà répandue au sein du service, son module d'automatisation Bernese Processing Engine (BPE) ne fonctionne que sous UNIX. L'exploitation de cette fonctionnalité en production nécessite de travailler sous Windows.

La difficulté d'emploi du logiciel et le caractère fastidieux de la préparation des traitements ainsi que la possibilité de choisir de nombreuses options de calcul ont contraint le SGN à vouloir automatiser au maximum son emploi.

L'objet du stage est l'automatisation du logiciel de Berne en s'appuyant sur le BPE afin de se rapprocher dans la mesure du possible de la simplicité d'utilisation d'un logiciel commercial tout en bénéficiant des avantages d'un logiciel scientifique.

Après avoir recensé les postes d'erreurs qui ne sont pas pris en compte par les logiciels constructeurs ou alors d'une manière qui n'est pas optimale, nous rappellerons succinctement le fonctionnement du logiciel de Berne et de son module d'automatisation.

Certains paramétrages du logiciel seront testés afin de pouvoir définir la meilleure configuration pour les traitements envisagés. Et enfin, le principe de l'automatisation sera abordé dans la dernière partie.

2. LE GPS

2.1. Généralités

Le système NAVSTAR GPS (Navigation System by Timing And Ranging – Global Positioning System) est un système de positionnement par satellites mis au point par le département de la défense des USA. Les coordonnées d'un point sont déterminés par trilatération. Les distances entre le point à déterminer et les satellites sont obtenues par la mesure du temps de parcours d'une onde électromagnétique. Afin d'avoir un minimum de 4 satellites à toute heure et en tous points de la terre, le système comporte 24 satellites répartis sur 6 plans orbitaux ayant une inclinaison d'environ 55° sur l'équateur. L'altitude des satellites est d'environ 20200 km et leur période de révolution d'approximativement 12 heures.

Chaque satellite génère en permanence deux ondes L1 et L2 de fréquence respective 1575.42 MHz et 1227.60 MHz, modulées en amplitude par deux codes pseudo aléatoires C/A et P. Cette modulation permet aux satellites d'envoyer les messages de navigation.

Il ne s'agit pas dans ce chapitre de revenir sur les principes de la mesure GPS mais de rappeler les limitations qui ont incité le SGN à utiliser un logiciel de traitement scientifique.

2.2. Les sources d'erreurs

2.2.1. Les dégradations volontaires.

Le système GPS étant à l'origine un système militaire, il a par conception deux dégradations affectant la qualité des mesures.

2.2.1.1. L'accès sélectif (SA : Selective Availability)

Les dégradations causées par la SA interviennent à deux niveaux :

- dégradation des éléments d'orbite et d'horloge contenus dans le message de navigation
- dégradation de la fréquence de l'horloge des satellites par ajout d'un déphasage

Ces dégradations permettaient l'utilisation précise du GPS en temps réel aux seules personnes habilitées. Elles n'avaient donc pas d'incidence sur le traitement en temps différé. De plus, la SA est désactivée depuis mai 2000.

2.2.1.2. L'antibrouillage (AS : Anti-Spoofing)

C'est une protection destinée à éviter le brouillage volontaire du système GPS par un utilisateur qui enverrait un signal proche du signal GPS créant ainsi la confusion. L'AS consiste à ajouter au code P, sur les deux fréquences L1 et L2, un code W militairement classifié formant ainsi le code Y. En cas d'AS, l'utilisateur non autorisé ne peut plus a priori faire de mesures sur le code P. Il ne peut donc qu'utiliser le code C/A et est limité à une fréquence. Tous les constructeurs savent aujourd'hui pallier l'antibrouillage en recomposant le code Y. Cependant, la technique diffère d'un constructeur à l'autre et le code Y n'est pas de qualité égale chez les différents constructeurs de récepteurs.

2.2.2. Les multitrajets

Il arrive qu'un objet placé à proximité de l'antenne réfléchisse le signal vers celle-ci, le signal alors mesuré ne correspond pas à la distance directe. Ce phénomène n'est pas modélisable, car il dépend de l'environnement de l'antenne. La durée d'un multitrajet étant a priori courte on peut y remédier en augmentant les durées d'observations. Dans le traitement, les satellites les plus bas étant les plus sensibles aux trajets multiples, il faut éliminer du calcul ou pondérer les observations des satellites ayant un angle d'élévation faible. Certains logiciels scientifiques permettent aussi en traçant les résidus des observations après traitement de reconnaître la signature d'un multitrajet et donc d'éliminer les données contaminées.

2.2.3. Les orbites

La précision sur la ligne de base est directement liée à la précision de la position du satellite. On a en effet : $\frac{dr}{r} = \frac{db}{b}$ où r est la distance entre le centre de la terre et le satellite, dr l'erreur radiale sur la position du satellite, b la longueur de la ligne de base et db l'erreur sur cette longueur.

Des orbites prédites sont contenues dans le message de navigation diffusé par le satellite. Le message contient des informations sur les éphémérides des satellites, des coefficients d'un modèle ionosphérique sommaire, l'état de santé du satellite, les paramètres d'horloge, l'écart entre le temps GPS et l'UTC. Les éphémérides radiodiffusées du satellite ont une précision d'environ 3.0 mètres, on leur préfère lorsque c'est possible les éphémérides précises recalculées, disponibles plus ou moins longtemps après les calculs. Il existe plusieurs types d'éphémérides calculées par l'IGS.

Type d'éphémérides	Précision (m)	Disponibilité
Radiodiffusées	3 m	immédiate
Prédite IGU	25 cm	immédiate
Rapide IGR	5 cm	2 jours
Précise IGS	< 5 cm	15 jours

Tableau 1 : précision et disponibilité des différents types d'éphémérides (source IGS).

Dans le logiciel de Berne, il est possible d'utiliser les éphémérides radiodiffusées au format RINEX, les éphémérides calculées par l'IGS, mais également de calculer ses propres éphémérides.

2.2.4. la modélisation des centres de phase des antennes

Les observations GPS sont modélisées par des équations où apparaît la distance géométrique entre le satellite et le récepteur. Lorsqu'on recherche une grande précision, il est nécessaire de déterminer le point exact à partir duquel est mesurée la distance géométrique entre le satellite et le récepteur. Ce point est appelé centre de phase de l'antenne, il n'est pas matérialisé, c'est un point virtuel.

2.2.4.1. Le centre de phase de l'antenne de réception

En ce qui concerne le récepteur, la position du centre de phase de l'antenne du récepteur varie dans l'espace en fonction de la position de l'émission. Pour faciliter les traitements, elle est décomposée en une position moyenne fixe et une variation dépendant de l'élévation et de l'azimut du satellite. La position du centre de phase dépend de la fréquence du signal.

$$\vec{\delta r}_{ant} = \vec{r}_0 + \delta\Phi(z, \alpha) \cdot \vec{e}_{z, \alpha}$$

avec	α, z	L'azimut et la distance zénithale du satellite
	\vec{r}_0	Décalage moyen du centre de phase
	$\delta\Phi(z, \alpha)$	Variation du centre de phase en fonction de l'élévation et de l'azimut par rapport à la position moyenne du centre de phase
	$\vec{e}_{z, \alpha}$	Vecteur unitaire dans la direction du satellite

Comme la position et la variation du centre de phase dépendent du type d'antenne, ces 2 biais doivent être soigneusement modélisés. L'erreur finale lorsqu'on utilise des antennes de types différents ne dépend pas de la longueur de la ligne de base, elle peut atteindre plusieurs centimètres. Dans le cas où des antennes de même type sont utilisés, l'effet principal est un facteur d'échelle de l'ordre de 0.015 ppm [Beutler et al (2001)]. En effet, pour de longues lignes de base, un même satellite est vu à des angles d'élévations différents.

Si quelques logiciels constructeurs prennent en compte la position moyenne calibrée des positions de centre de phase, peu de logiciels prennent en compte la variation en fonction de l'élévation et de l'azimut. Le Berne prend en compte la position et la variation du centre de phase par rapport au point de référence de l'antenne (ARP). Ces valeurs sont données pour différents types d'antennes dans le fichier PHAS_IGS.01. Le logiciel de Berne permet en plus de calculer la position et la variation du centre de phase des antennes en utilisant les mesures d'une campagne GPS de calibration d'antennes. Cela permet par conséquent d'établir un fichier contenant chaque antenne et non plus simplement le type d'antenne.

2.2.4.2. Le centre de phase de l'antenne d'émission

En ce qui concerne le satellite, on considère que le centre de phase est le même pour L1 et L2 et qu'il reste constant [Beutler et al (2001)]. Cette dernière approximation est faite car on ne dispose pas d'informations sur l'influence de l'écart entre le rayon d'émission et le nadir du satellite. Cependant, compte tenu de la distance entre les satellites et la Terre, l'angle du cône d'émission est aigu et cette influence est donc faible.

La connaissance de la position du centre de phase de l'antenne d'émission par rapport au centre de masse des différents satellites est indispensable car les éphémérides

concernent la position du centre de masse. Le décalage entre le centre de phase du satellite et le centre de masse est fourni dans un fichier nommé SATELLIT.TTT, que nous reverrons au chapitre 3.2.1.2.1.2.

2.2.5. Erreur de propagation dans l'ionosphère

2.2.5.1. généralités

L'ionosphère est la couche de l'atmosphère comprise entre 70 et 1000 km. C'est est un milieu ionisé et dispersif pour la fréquence des signaux GPS. Dans l'ionosphère, la vitesse de propagation dépend de la densité électronique le long du trajet à l'instant de propagation. Le milieu est dispersif donc la correction dépend de la fréquence de l'onde.

En première approximation, le délai ionosphérique peut être exprimé sous la forme :

$$\Delta\rho^{iono} = -\frac{40.3}{f^2} \int Neds \quad \text{avec } \int Neds \text{ le nombre total d'électrons sur le trajet}$$

Le délai total peut varier de 1 à 20 mètres.

2.2.5.2. Effet de l'ionosphère sur la position

Le délai ionosphérique peut être déterminé et éliminé en utilisant les mesures sur les deux fréquences L1 et L2. Dans le cas où on ne dispose que d'une seule fréquence, le biais ionosphérique est une source d'erreur très importante. La réfraction ionosphérique entraîne un facteur d'échelle sur la longueur de la ligne de base. Pour une ligne de base courte, on peut supposer que la correction ionosphérique à appliquer est la même aux deux extrémités de la ligne de base et peut être supprimée par les doubles différences. La longueur de la ligne de base acceptable dépend de l'activité ionosphérique. Cette longueur est en général d'une dizaine de kilomètres sous nos latitudes. Pour des lignes de base plus longues, les doubles différences ne permettent plus d'éliminer le biais dû à l'ionosphère.

2.2.5.3. Modélisation et estimation de l'ionosphère

2.2.5.3.1. Utilisation de données externes

Le message de navigation contient un modèle de réfraction ionosphérique très simple. Des modèles ionosphériques globaux sont calculés par plusieurs centres d'analyse. Ces modèles téléchargeables sur Internet peuvent aider à éliminer le facteur d'échelle et faciliter la résolution des ambiguïtés sur de longues lignes de base.

2.2.5.3.2. Estimation de paramètres ionosphériques

La correction ionosphérique peut être calculée à partir de mesures sur les deux longueurs d'ondes L1 et L2.

$$\Delta\rho^{iono} = \frac{A}{f^2} \quad \text{avec } A = -40.3 \int Neds$$

Soit ρ_1^{iono} et ρ_2^{iono} les distances mesurées pour L1 et L2, et ρ_t la distance théorique. On a :

$$\rho_1^{iono} = \rho_t + \Delta\rho_1^{iono} \quad \text{et} \quad \rho_2^{iono} = \rho_t + \Delta\rho_2^{iono}$$

$$\text{avec } \Delta\rho_1^{iono} = \frac{A}{f_1^2} \quad \text{et} \quad \Delta\rho_2^{iono} = \frac{A}{f_2^2} = \frac{f_1^2}{f_2^2} \Delta\rho_1^{iono}$$

$$\text{Puis } \rho_1 - \rho_2 = \Delta\rho_1^{iono} - \Delta\rho_2^{iono} = \Delta\rho_1^{iono} \left(1 - \frac{f_1^2}{f_2^2} \right)$$

$$\text{Et enfin, on obtient la valeur du délai ionosphérique sur L1 : } \Delta\rho_1^{iono} = \frac{(\rho_1^{iono} - \rho_2^{iono})}{\left(1 - \frac{f_1^2}{f_2^2} \right)}$$

L'utilisation de L3, combinaison linéaire de L1 et L2, permet d'éliminer le délai ionosphérique.

$$L3 = \frac{f_1^2}{f_1^2 - f_2^2} L1 - \frac{f_2^2}{f_1^2 - f_2^2} L2$$

2.2.5.4. Le logiciel de Berne

Ce logiciel offre la possibilité d'intégrer dans le calcul des modèles ionosphériques globaux ou régionaux pour faciliter la résolution des ambiguïtés. Il est possible pour l'utilisateur de calculer ses propres modèles ou d'en récupérer dans les centres d'analyse internationaux. Il est également possible d'utiliser la combinaison linéaire L3 pour traiter les données.

2.2.6. Erreur de propagation dans la troposphère

2.2.6.1. Généralités

La troposphère est la couche basse de l'atmosphère et a une épaisseur variant de 7 à 14 km. La réfraction troposphérique représente le retard du signal GPS lors de la traversée de la troposphère. La troposphère étant non dispersive, l'effet est le même pour les deux fréquences GPS et intervient comme une correction $\Delta\rho^{tropo}$ à apporter à la distance par rapport à un trajet dans le vide. Ce délai est d'environ 2.3 mètres au niveau de la mer.

$$\Delta\rho^{tropo} = \int (n - 1) ds = 10^{-6} \int N^{tropo} ds \quad \text{où} \quad \begin{array}{l} n \text{ l'indice de réfraction} \\ N \text{ le co-indice avec } N^{tropo} = (n-1).10^6 \end{array}$$

L'indice de réfraction de l'air dépend des conditions météorologiques (pression de l'air sec, pression de vapeur d'eau, température).

Le délai troposphérique peut être séparé en délai sec et délai humide. Le délai sec représente 90% du total, ce délai est assez facilement modélisable. Par contre, le délai humide change rapidement dans le temps et dans l'espace, il est donc difficile à modéliser.

Le délai troposphérique dépend du trajet suivi par l'onde dans l'atmosphère et donc de l'élévation du satellite. On peut l'écrire comme le produit du délai troposphérique au zénith et d'une fonction de projection. La fonction de projection traduit la correction pour un satellite à la distance zénithale Z .

$$\Delta\rho^{tropo} = f(z)\Delta\rho^0$$

Par exemple, la fonction $f(z) = 1/\cos Z$ est une fonction de projection couramment utilisée.

2.2.6.2. Effet de la troposphère sur la position

La troposphère est le poste d'erreur résiduel le plus important. On distingue 2 types de biais :

- Les biais troposphériques relatifs sont causés par les erreurs (effets non modélisés) de la réfraction troposphérique à l'une des extrémités de la ligne de base relativement à l'autre. Les biais troposphériques relatifs introduisent une erreur principalement sur les hauteurs des stations, une erreur de 1 cm sur le délai zénithal troposphérique relatif entre 2 stations entraîne une erreur de 3 cm sur la différence de hauteur entre les 2 stations.
- Les biais troposphériques absolus dus aux erreurs communes aux 2 extrémités de la ligne de base. Les biais troposphériques absolus introduisent un facteur d'échelle sur la ligne de base. Un biais de 10 cm sur la valeur absolue du délai zénithal troposphérique entraîne un facteur d'échelle de 0.05 ppm sur la longueur de la ligne de base.

Afin de réduire l'erreur due au délai troposphérique, deux approches sont possibles.

- La modélisation de la réfraction troposphérique sans utiliser les observations GPS.
- L'utilisation des observations GPS pour estimer des paramètres troposphériques.

2.2.6.3. Modélisation de la troposphère

Il existe plusieurs modèles de réfraction troposphérique utilisables. Dans les logiciels scientifiques, il est possible d'utiliser ces différents modèles. Chacun de ces modèles a sa fonction de projection associée.

Dans le logiciel de Berne, les valeurs météorologiques servant à l'estimation du délai troposphérique peuvent être mesurées sur site ou être extrapolées à partir de l'altitude de la station, de modèles standards et de mesures faites au niveau de la mer. La précision requise pour les valeurs météorologiques est si draconienne qu'il est illusoire d'espérer obtenir des précisions suffisantes par la mesure.

La modélisation n'étant pas parfaite surtout pour la composante humide, les logiciels scientifiques permettent de corriger la valeur du délai troposphérique issu du modèle par l'estimation de paramètres troposphériques.

2.2.6.4. Estimation des paramètres

Le modèle de réfraction troposphérique permet de calculer une valeur approchée du délai zénithal troposphérique, puis la correction à apporter au délai zénithal est estimée pour chaque station et pour des intervalles de temps prédéfinis (par exemple : un paramètre

troposphérique estimé par heure). Lorsqu'on estime les paramètres troposphériques, une fonction de projection est associée au modèle de réfraction.

2.2.6.5. Le logiciel de Berne

Le logiciel de Berne propose plusieurs modèles troposphériques (Saastamoinen, Essen Froome, Hopfield) permettant d'utiliser des données météorologiques standards ou mesurées.

On peut également calculer et utiliser un modèle troposphérique local, fonction de l'altitude des stations. Ce modèle est adapté à des réseaux de petite taille présentant de fortes dénivelées. Cette stratégie n'étant supportée ni par le système de Menus, ni par le BPE, elle ne pouvait pas être utilisée pour l'automatisation des calculs et n'a pas fait l'objet d'essais.

Le logiciel de Berne permet d'estimer des paramètres troposphériques zénithaux pour chaque station et pour un intervalle de temps défini. Il est aussi possible d'introduire des paramètres troposphériques pour les stations concernées provenant d'un autre calcul ou d'une source externe.

L'estimation des paramètres troposphériques zénithaux peut se faire en utilisant un modèle a priori et sa fonction de projection associée. Il propose également l'utilisation d'une fonction de projection (Dry Niell) ne nécessitant pas l'utilisation de modèle a priori et permettant de prendre en compte les satellites bas tout en pondérant leurs observations.

Pour des réseaux de petites tailles, la corrélation entre la troposphère aux deux extrémités est si forte que l'estimation des paramètres n'est alors plus significative.

2.3. Autres phénomènes influençant la précision du positionnement

2.3.1. les coordonnées du pôle et ses paramètres de rotation

La meilleure façon de décrire le mouvement des satellites GPS est de donner leurs positions dans le référentiel ICRS (International Celestial Reference System) dont la réalisation est l'ICRF (International Celestial Reference Frame)(epoch J2000.0). Les coordonnées des stations sont données dans le système ITRS (International Terrestrial Reference System) dont la dernière réalisation est l'ITRF2000 (International Terrestrial Reference Frame).

Afin d'accéder à la distance géométrique entre la station et le satellite, les 2 positions doivent être exprimées dans le même référentiel. Soient τ la durée de propagation du signal entre l'instant d'émission et l'instant de réception, c la vitesse de la lumière et ρ_r^s la distance géométrique entre le satellite j à l'instant d'émission $t - \tau$ et le récepteur à l'instant de réception t .

On a : $\rho_r^s = \left| \vec{r}_r(t) - \vec{r}^s(t - \tau) \right|$ avec $\vec{r}_r(t)$ la position du satellite dans le référentiel inertiel

J2000.0 à l'instant de réception t et $\vec{r}^s(t - \tau)$ la position du récepteur dans le référentiel inertiel J2000.0 à l'instant d'émission $t - \tau$.

Les vecteurs position du récepteur et du satellite devant être exprimés dans le même référentiel, il est nécessaire de disposer des paramètres de transformation entre l'ICRF et l'ITRF. Les paramètres d'orientation de la terre (EOP) au nombre de 5, décrivent l'orientation

de l'ITRF dans l'ICRF conjointement avec le modèle conventionnel de précession et de nutation. Les paramètres x_p et y_p donnent les coordonnées du pôle (CEP) dans l'ITRF.

Le logiciel de Berne utilise un fichier contenant les paramètres de rotation de la terre et il permet également de calculer ces paramètres.

2.3.2. La surcharge océanique

Le phénomène de surcharge océanique se traduit par un mouvement principalement vertical de la croûte terrestre sous l'effet de la marée océanique. Ce phénomène est modélisé et il est possible d'intégrer dans les calculs avec le logiciel de Berne un fichier permettant de corriger cet effet.

3. UTILISATION DU LOGICIEL DE BERNE

Dans le cadre de ses activités, le service de Géodésie et de Nivellement de l'IGN (SGN) réalise des campagnes de mesures GPS. Je me suis plus particulièrement intéressée aux traitements des observations GPS dans le cadre de rattachements géodésiques et du nivellement par GPS. Pour ces activités, le SGN cherche à obtenir la plus grande précision et ne se satisfait pas des résultats obtenus avec les logiciels de traitements fournis par les constructeurs de récepteurs. Par exemple, dans le cas du nivellement par GPS, la précision sur la composante verticale est primordiale.

C'est pourquoi, le SGN souhaite traiter ces données avec le logiciel de Berne, logiciel scientifique permettant de prendre en compte de nombreux paramètres pouvant influencer sur le calcul, qui sont laissés de côté par les logiciels constructeurs (paramètres troposphériques, modélisation des antennes, ...). Les traitements devant pouvoir être effectués par un maximum d'opérateurs, il s'agissait de définir au mieux les paramètres des calculs et d'automatiser au maximum le traitement d'une campagne de mesures.

Nous commencerons par la présentation du logiciel de Berne et de son module d'automatisation le BPE, puis nous verrons le déroulement d'un calcul et enfin nous aborderons la définition des options de calcul.

3.1. Présentation du logiciel de Berne

Le logiciel "Bernese GPS Software Version 4.2" est un logiciel scientifique de traitement de données GPS, développé à l'université de Berne en Suisse pour le traitement de réseaux permanents, la détermination d'orbites, l'estimation des paramètres de rotation du pôle, le calcul de modèle ionosphérique ou encore la calibration d'antenne. Développé sous VMS, il est aujourd'hui utilisable sur différentes plates-formes (VMS, Unix, Linux, Windows).

Au SGN, le logiciel de Berne est utilisé à la fois sous Unix et sous Windows dans sa version interactive. En revanche, le module d'automatisation du traitement (BPE) ne fonctionnait que sous UNIX. Le Berne dans son ensemble est écrit pour être compilé avec le Lahey Fortran. Le SGN ne disposant pas de ce compilateur, il a fallu apporter quelques modifications aux sources pour le compiler avec le Fortran Powerstation disponible au SGN.

Le logiciel est structuré en trois parties. Les fonctionnalités de traitement des données proprement dites, les interfaces traitements-utilisateur que sont le système de menu interactif et enfin les modules d'automatisation (BPE).

3.1.1. Les programmes de traitements (Bernese GPS Processing Programs)

Les programmes de la partie "traitements" sont au nombre d'une centaine, écrits en Fortran. Ces unités de programmes sont divisées en 4 parties plus une cinquième de simulation que nous n'évoquerons pas ici. Ces quatre parties ont une logique chronologique durant la phase de traitement :

Transfert : cette partie génère des fichiers au format Berne à partir des fichiers Rinex.

Orbite : cette partie permet de générer des fichiers d'orbites et des fichiers d'horloge au format Berne, elle permet également de vérifier, de comparer et de créer des fichiers d'orbites...

Traitements : Les programmes de cette partie permettent de traiter des mesures de pseudodistances et de phase sur L1 et L2.

Services : la partie services permet d'éditer et de parcourir les fichiers au format Berne, de comparer des jeux de coordonnées, d'extraire des informations des fichiers de sortie...

Ces programmes ne nécessitent aucune interaction durant leur exécution. Leurs options, la liste des fichiers d'observations et des fichiers auxiliaires au traitement sont mises à la disposition des programmes par l'intermédiaire de fichiers appelés Special Input Files.

3.1.2. Le système de menu (Bernese GPS Menu System)

Le système de Menu gère la préparation de ces fichiers d'entrée (Special Input Files) et lance les programmes de traitement proprement dit. Il comprend :

- des menus permettant de choisir le programme à exécuter
- des programmes permettant la préparation des fichiers d'options
- des programmes pour manipuler les fichiers de données, de sortie (output)
- des procédures de commande (commandes DOS) pour :
 - préparer l'environnement de travail
 - assurer le lancement des programmes.

L'interface avec l'utilisateur permettant de sélectionner les programmes, de choisir les différentes options et les fichiers utilisés est constituée de panneaux de saisies. Ces panneaux sont de simples fichiers ASCII. Le système de menu utilise trois types de panneaux différents :

- Les panneaux de programmes (programs panels) permettent de naviguer dans les différents niveaux du système de menus et de sélectionner les programmes à exécuter.
- Les panneaux d'options (data panels) permettent de choisir les options, les noms de fichiers...
- Les panneaux d'aide (help panels) donnent des informations sur les options.

3.1.3. Le BPE (Bernese Processing Engine)

3.1.3.1. Introduction

Le Bernese Processing Engine (BPE) permet d'automatiser les procédures de calcul. La stratégie de calcul étant prédéfinie par l'utilisateur de la transformation des fichiers RINEX jusqu'au résultat final, le BPE lance les différentes tâches les unes après les autres.

Les traitements suivent généralement le même schéma. Par exemple, pour une session, on peut distinguer les étapes suivantes :

- Passage des observations du format RINEX au format Bernese (RXOBV3 et RXNBV3).
- Création des orbites tabulées et des fichiers d'horloges (PRETAB).
- Création des fichiers d'orbites au format standard (ORBGEN).
- Synchronisation des horloges (CODSPP).
- Création des fichiers de simple différence de phase (SNGDIF).
- Nettoyage des données et réparation des sauts de cycles (MAUPRP).
- Estimation des paramètres (GPSEST).

Pour chaque étape, on distingue 2 parties : la préparation des fichiers d'options et l'exécution des programmes correspondants. En mode interactif, ces deux parties sont gérées par le système de menus.

La majorité des options ne varie pas d'un calcul à l'autre. Mais certaines valeurs, comme par exemple le numéro de la session, changent ce qui implique que les noms des fichiers d'observations et des fichiers d'orbites changent. Dans la mesure où aucune décision majeure n'est prise entre les différentes étapes, une automatisation du processus peut être réalisée. Pour cela, il faut pouvoir :

- Préparer les panneaux d'options à l'avance.
- Introduire certaines options en tant que variables. Les options concernées sont par exemple les noms des fichiers, le numéro de la session... Les champs nécessitant des noms qui changent d'une session à l'autre sont remplacés par une variable de même longueur que les valeurs à entrer. Ces champs sont remplacés par la bonne valeur lors du calcul.
- Lancer les programmes de préparation sans interventions de l'utilisateur.
- Définir l'ordre dans lequel les programmes de préparation et les programmes de traitement doivent être lancés.

La mise en route du BPE sous Windows a nécessité la modification de quelques programmes et fichiers.

3.1.3.2. Le principe de fonctionnement

Le BPE est géré par un script nommé PCS.BAT. Ce script lance les différents programmes du Berne utilisés en faisant appel à des panneaux pré-paramétrés. La liste des scripts lancés est donnée par un fichier PCF (Process Control File). Nous verrons, dans un premier temps, les fichiers principaux du BPE, puis nous aborderons le fonctionnement du PCS (Process Control Script).

3.1.3.2.1. Le fichier PCF

Le fichier PCF définit la liste des scripts que le PCS devra lancer. En plus du nom des scripts, il contient des informations sur :

- Le nom du répertoire contenant les panneaux d'options lus par les scripts.
- L'ordre dans lequel les processus doivent être lancés. Cet ordre est défini en donnant le numéro d'identification du script et le numéro d'identification du script précédent dont il faut attendre la fin.
- Des variables qui peuvent éventuellement être définies à cet endroit.

Un exemple de ce fichier est donné dans les annexes.

3.1.3.2.2. Les répertoires d'options OPT

Ce sont les répertoires contenant les panneaux d'options pré-préparés. Il y a deux types de panneaux, des panneaux communs à chaque répertoire et des panneaux correspondant au programme appelé par le script.

3.1.3.2.3. Les scripts

Les scripts sont des fichiers de commande DOS. Certaines tâches sont communes à tous les scripts, il s'agit, par exemple, de la définition des variables utiles au BPE. Ils lancent les programmes de traitement du Berne. Ces scripts ont fait l'objet de modifications afin de permettre l'automatisation du calcul. Celles-ci seront abordées au chapitre 4 concernant l'automatisation.

3.1.3.2.4. Les fichiers de protocole

Les fichiers de protocole sont créés automatiquement pour chaque script exécuté. Ils permettent un contrôle a posteriori du bon déroulement du programme. Ils contiennent un récapitulatif des variables du traitement ainsi, ainsi qu'une information sur le déroulement du script. Ces fichiers servent au contrôle par le PCS de la bonne exécution du script. Les fichiers de protocole contiennent également les éventuels messages d'erreurs et d'avertissements.

3.1.3.2.5. Fonctionnement du PCS

Le Process Control Script (PCS) lance et contrôle tous les processus (scripts) exécutés par le BPE. Ses paramètres sont le nom de la campagne, le nom du PCF, la session et l'année, il peut être lancé via le système de menu ou par une commande DOS.

Voici les sept étapes du PCS :

- (1) Validation des paramètres en entrée. le PCS s'assure que :
 - l'année et la session sont définies,
 - le PCF appelé se trouve dans le répertoire U:\PCF,
 - tous les scripts appelés se trouvent dans le répertoire U:\SCRIPT,
 - tous les répertoires d'options utilisés par les scripts sont dans le répertoire U:\OPT.
- (2) Suppression des fichiers de protocole existants dans le répertoire OUT de la campagne.

- (3) Recherche de messages d'erreurs éventuels dans les fichiers de protocole. Si le PCS trouve un message d'erreur, le PCS se termine.
- (4) Recherche d'un script qui peut être lancé parmi les scripts du PCF. Un tel script répond aux critères suivants :
 - Il ne doit pas avoir déjà été lancé
 - Les scripts dont il attend la fin avant d'être lancé doivent être terminés.Si un script peut être lancé, le programme va à l'étape (6) sinon il va à l'étape (5).
- (5) Le programme fait une pause puis retourne à l'étape (3).
- (6) Le PCS vérifie s'il y a un ordinateur sur lequel le script peut être exécuté. Si oui, le programme va à l'étape (7), sinon il retourne à l'étape (5).
- (7) Le PCS exécute le script et écrit dans le fichier de protocole et retourne à l'étape (3).

3.1.3.2.6. Le panneau des variables DAT151__.PAN

Un certain nombre de variables sont utilisées dans plusieurs panneaux différents. Il s'agit par exemple du nom de la session, de l'année... Certaines variables sont définies automatiquement, d'autres peuvent être définies par l'utilisateur. le panneaux des variables est donné en annexe.

3.2. Déroulement d'un calcul

Que ce soit avec un logiciel constructeur ou avec le logiciel de l'Université de Berne, il est possible de décomposer le déroulement d'un calcul en trois phases : la préparation des données, le traitement, l'analyse des résultats. Nous verrons dans ce chapitre en quoi consistent ces trois étapes dans le cas du logiciel de l'université de Berne.

3.2.1. La préparation d'un calcul

Cette phase est un préalable au traitement qu'il soit automatisé à l'aide du BPE ou en mode interactif.

3.2.1.1. La création de la campagne

Afin de travailler, il est nécessaire de définir une campagne. Cette définition se traduit par la création d'un répertoire et de 8 sous répertoires, à savoir, ATM, DATPAN, OBS, ORB, ORX, OUT, RAW, et STA. Ces répertoires contiennent les fichiers concernant la campagne.

3.2.1.2. Les fichiers nécessaires au traitement

3.2.1.2.1. Les fichiers généraux spécifiques au logiciel de Berne

Les fichiers dit "généraux" sont communs aux différents traitements. Dans le tableau suivant, on trouve les fichiers ayant besoin d'être mis à jour régulièrement et leur fonction :

Données	Nom du fichier
Calibration des antennes	PHAS_IGS.01
Paramètres des satellites	SATELLIT.TTT
Manœuvres des satellites	SAT_YYYY.CRX
Paramètres du pôle	C04_YYYY.ERP
	BULLET_A.ERP
Sauts de seconde irrégulièrement introduits entre le temps GPS et le temps universel	GPSUTC.

Tableau 2 : Fichiers généraux mis à jour régulièrement.

3.2.1.2.1.1. La calibration d'antennes

Le fichier PHAS_IGS.01 contient les informations de localisation des centres de phase d'un certain nombre d'antennes. Le fichier est organisé par couple récepteur/antenne. La première partie du fichier donne pour chaque couple le décalage moyen des centres de phase de l'antenne par rapport au point de référence de l'antenne. Pour les couples dont la partie variable de l'antenne est modélisée, la seconde partie du fichier indique le comportement des centres de phase des antennes en fonction de l'élévation et de l'azimut du satellite.

Comme seul le type d'antenne est important, j'ai simplifié le fichier. Désormais, il ne contient qu'un seul type de récepteur nommé "RCVR". Ce fichier nommé PHAS_ANT.01 est utilisé lors des différents calculs implémentés.

3.2.1.2.1.2. Paramètres des satellites

Le fichier SATELLIT.TTT contient en particulier les informations sur la position du centre de phase de l'antenne du satellite par rapport au centre de masse du satellite. Cette position n'est pas la même pour tous les satellites GPS, or les éphémérides précises sont calculées à partir du centre de masse des satellites.

3.2.1.2.1.3. Manœuvres des satellites

Ce fichier recense les satellites qui ont un problème, c'est à dire des manœuvres, de mauvaises données ou un problème de modélisation. Cela permet d'écarter ces satellites du traitement. Ce fichier doit être mis à jour régulièrement afin de prendre en compte les éventuels problèmes des satellites.

3.2.1.2.1.4. Les informations concernant le pôle

Deux types de fichiers (C04_YYYY.ERP, BULLET_A.ERP) de coordonnées du pôle peuvent être entrés dans le Berne. Ces deux fichiers contiennent les coordonnées et paramètres de rotation du pôle. Le fichier BULLET_A.ERP est moins précis que le fichier C04_YYYY.ERP, mais il est disponible plus rapidement et contient des prédictions de coordonnées utiles pour effectuer des traitements dans un laps de temps très court après les observations. Cependant, s'il est disponible le fichier C04_YYYY.ERP doit être utilisé en priorité.

Tous ces fichiers peuvent être téléchargés sur le site de l'université de Berne ou sur le site du RGP. Afin d'en faciliter la récupération, j'ai développé en Perl un utilitaire permettant de récupérer ces fichiers sur un ordinateur de l'IGN ou ils sont conservés.

3.2.1.2.2. Les fichiers de données

3.2.1.2.2.1. Les fichiers d'observations

Les fichiers d'observations enregistrés au format constructeur, doivent être transformés au format RINEX (format d'échange standard) pour être utilisables par le logiciel de Berne. Ce fichier ne doit contenir aucune erreur et son nom est normalisé. Cette étape de préparation n'est pas incluse dans l'automatisation.

L'en-tête des fichiers RINEX contient diverses informations et des commentaires.

```

2.10      OBSERVATION DATA      G (GPS)      RINEX VERSION / TYPE
teqc 2000Feb29      20020112 00:04:03UTC PGM / RUN BY / DATE
MSWinNT 4.0|PentPro|bcc32 5.0|MSWin95/98/NT|486/DX+      COMMENT
teqc 2000Feb29      SGN-RGP      20020111 01:02:03UTC COMMENT
BIT 2 OF LLI FLAGS DATA COLLECTED UNDER A/S CONDITION      COMMENT
SMNE      MARKER NAME
      IGN      OBSERVER / AGENCY
30064      LEICA CRS1000      4.42      REC # / TYPE / VERS
      LEIAT504      ANT # / TYPE
4201792.2920 177945.2270 4779286.7050      APPROX POSITION XYZ
0.1390      0.0000      0.0000      ANTENNA: DELTA H/E/N
1      1      WAVELENGTH FACT L1/2
4      L1      L2      C1      P2      # / TYPES OF OBSERV
30.0000      INTERVAL
Forced Modulo Decimation to 30 seconds      COMMENT
SNR is mapped to RINEX snr flag value [5-9]      COMMENT
L1 & L2: 48-55 dBHz = 9; 1 + dBHz/6 for < 48 dBHz      COMMENT
2002      1      11      0      0      0.0000000      GPS      TIME OF FIRST OBS
      END OF HEADER

```

En-tête du fichier RINEX de la station permanente de Saint Mandé (SMNE) le 11 janvier 2002.

Seules les informations en rouge sont obligatoires, le nettoyage des fichiers RINEX consiste donc à vérifier :

- que l'information "MARKER NAME" concernant le nom de la station est constituée de 4 caractères correspondant aux premiers caractères du nom du fichier.
- que les informations "REC # / TYPE / VERS", "ANT # / TYPE" et "ANTENNA: DELTA H/E/N" concernant respectivement le type de récepteur, le type d'antenne et la hauteur d'antenne soient valides. Cette dernière est définie comme étant la hauteur entre le repère et le point de référence de l'antenne (ARP).

L'information "APPROX POSITION XYZ" donne les coordonnées approchées de la station. Cette information ne sera utilisée dans la suite que dans le cas où on ne dispose pas de coordonnées approchées plus précises.

3.2.1.2.2.2. Les éphémérides

Le fichier de navigation doit être utilisé si les éphémérides précises ne sont pas disponibles. Le programme d'automatisation des calculs de rattachements et de statique rapide permet de choisir le type d'éphémérides utilisé. Le traitement diffère suivant que l'on utilise les éphémérides radiodiffusées ou les éphémérides précises.

3.2.1.2.3. Les fichiers annexes concernant les stations

Données	Données	Extension du fichier	Répertoire
Informations complémentaires des stations	Correspondance antenne / récepteur entre les fichiers RINEX et le fichier PHAS_IGS.01	TRN	X:\GEN
	Correspondance des noms de stations	STN	STA de la campagne
	Hauteurs d'antennes	HTR	
	Coordonnées	CRD	
	Lignes de base	BSL	
	Fichier contenant les contraintes a priori sur les stations	FIX	
	Fichier concernant l'estimation des paramètres troposphériques	SIG	
	Modèle de surcharge océanique	BLQ	

Tableau 3 : Récapitulatif des fichiers annexes concernant les stations

A l'exception du fichier BLQ, un exemple de chacun des fichiers est présenté en annexe.

3.2.1.2.3.1. *Le fichier de traduction d'antenne/récepteur TRN*

Ce fichier de traduction permet de faire le lien entre le couple antenne/récepteur contenu dans le fichier RINEX et celui du fichier des centres de phase. Il a été modifié afin de prendre en compte la simplification du fichier de calibration d'antennes. Ce fichier est utilisé dans les traitements implémentés et il est le même pour toutes les campagnes.

3.2.1.2.3.2. *Les fichiers spécifiques à la campagne*

Les informations concernant les stations sont contenues dans plusieurs fichiers.

3.2.1.2.3.2.1. Le fichier de coordonnées CRD

Ce fichier contient les coordonnées cartésiennes géocentriques des stations. Il doit être créé avant le début des calculs. Lorsque les coordonnées approchées ne sont pas suffisamment précises, ce fichier doit être mis à jour après chaque étape du traitement.

3.2.1.2.3.2.2. Le fichier de lignes de base BSL

Le fichier de lignes de base contient la liste des lignes de base utilisées pour faire les calculs. Il est utilisé par le programme SNGDIF pour créer les fichiers de simples différences. L'existence de ce fichier permet de prédéfinir les lignes de base à calculer. Il est principalement utilisé pour l'automatisation des calculs avec le BPE.

3.2.1.2.3.2.3. Le fichier FIX

Le fichier FIX contient la liste des stations dont les coordonnées sont soit fixées, soit contraintes par un sigma a priori. Ce fichier est nécessaire dans les procédures de calculs automatiques. Il est utilisé par le programme GPSEST pour fixer les coordonnées des stations ou pour contraindre les coordonnées avec un sigma a priori.

3.2.1.2.3.2.4. Le fichier SIG

Le fichier SIG contient les contraintes absolues et relatives pour l'estimation des paramètres troposphériques zénithaux des stations. De même que le fichier FIX et le fichier de lignes de base, il est principalement destiné à être utilisé en mode automatique.

3.2.1.2.3.2.5. Le fichier BLQ

Ce fichier permet de corriger l'effet de la surcharge océanique. Il peut être créé à la demande sur un site Internet.

3.2.1.2.3.2.6. Le fichier de correspondance des noms de stations et de correction des hauteurs d'antennes

Le logiciel de Berne offre la possibilité de corriger les en-têtes des fichiers RINEX. Cette correction se fait par l'intermédiaire de tables de traductions. Il s'agit des fichiers HTR concernant les hauteurs d'antennes et STN concernant le nom des stations.

L'utilisation de ces fichiers n'est pas possible dans les différents PCF créés pour l'automatisation. Cette possibilité a été écartée pour plusieurs raisons. D'abord, il aurait fallu envisager les cas où ils étaient utilisés et les cas où ils n'étaient pas nécessaires. Si on avait prévu, l'utilisation de HTR seul, l'utilisation de STN seul, l'utilisation des fichiers HTR et STN et enfin l'utilisation d'aucun des deux, le nombre de PCF à créer aurait été multiplié par quatre.

Ensuite, ces fichiers permettent de corriger les données contenue dans les fichiers RINEX lors du passage au format Berne dans RXOBV3, mais ils ne corrigent pas le fichier RINEX. Ils doivent donc impérativement être archivés avec les calculs afin de disposer des vraies hauteurs d'antennes. Il est préférable lors de l'archivage des calculs de disposer des fichiers RINEX nettoyés.

3.2.1.3. Le panneau de session

Il s'agit d'un fichier définissant la session de calcul, c'est à dire la période des observations. Un exemple de ce fichier est situé en annexe.

La création des panneaux de session n'est pas automatisable par le BPE. Elle doit donc être faite avant le lancement du calcul. En effet, le nom de la session correspond au nom des fichiers RINEX, elle doit donc respecter une certaine norme. En général, le nom de la session est composé des 3 chiffres du jour dans l'année suivi d'un zéro ou éventuellement d'une lettre.

3.2.2. Le traitement

Dans ce paragraphe, les différents modules du logiciel de Berne utilisés lors d'un traitement sont décrits sommairement.

RXOBV3

Ce programme transforme les fichiers d'observation RINEX (*.YYO) en fichiers binaires d'observation au format Berne. Il crée les fichiers de zéro différence de code et de phase (*.CZH, *.CZO, *.PZH et *.PZO).

RXNBV3

Ce programme transforme les fichiers de navigation RINEX (*.YYN) en fichiers binaires au format Berne. Il crée les fichiers *.BRD.

PRETAB

Ce programme crée les fichiers d'orbites tabulées à partir des éphémérides précises au format SP3 ou à partir des fichiers *.BRD. Il transforme les orbites exprimées dans un système terrestre en orbites exprimées dans un système céleste. Dans le cas où on traite des éphémérides précises, il crée également un fichier d'horloge.

ORBGEN

Ce programme crée un fichier d'orbites standard *.STD, qui sera utilisé par la suite dans les traitements.

CODSPP

Ce programme permet de synchroniser les horloges des récepteurs et les horloges des satellites au temps GPS. Les corrections d'horloges sont établies à partir d'un calcul de position exploitant les observations de code. Elles sont sauvegardées dans les fichiers de phase.

SNGDIFF

Ce programme crée les fichiers de simple différence. Les lignes de base sont définies à partir de stratégies proposées par le logiciel, manuellement (en mode interactif uniquement) ou à l'aide d'un fichier de ligne de base.

MAUPRP

MAUPRP réalise un pré-traitement des lignes de base. Ce programme élimine les sauts de cycle et les mesures hors normes en se basant sur le calcul des triples différences. Il détecte les sauts de cycles dans les observations, essaye de réparer les mesures et, en cas d'échec, de créer une nouvelle ambiguïté ou marque des observations afin de les écarter du calcul. Cette étape est très importante et dépend de la longueur de la ligne de base. Il existe différentes stratégies en fonction de la longueur de la ligne de base.

GPSEST

Le programme GPSEST est le programme d'estimation des paramètres. Il permet d'estimer de nombreux paramètres différents (ambiguïtés, coordonnées, paramètres troposphériques zénithaux ...). Le programme GPSEST peut être utilisé plusieurs fois en utilisant des paramétrages différents jusqu'à obtenir la solution finale. Le paramétrage des options varie en fonction de la longueur de la ligne de base, de la durée de la session, des paramètres à estimer, des observations disponibles (L1 seul, L1 et L2) ...

HELMERT

Ce programme effectue une transformation d'Helmert à 7 paramètres entre 2 jeux de coordonnées.

COMPAR

Il compare des jeux de coordonnées.

ADDNEQ

Il permet de combiner différentes solutions (par exemple, journalières) pour produire une solution globale.

Les programmes HELMERT, COMPAR et ADDNEQ, contrairement aux autres programmes décrits dans ce chapitre, n'ont pas été implémentés dans les calculs. En effet, ils sont difficilement automatisables pour des calculs autres que ceux de réseaux permanents.

Pour chacun de ces programmes, il est possible de faire varier un nombre important de paramètres. En effet, en fonction du type de calcul (de la longueur de la ligne de base et de la durée des sessions) le paramétrage des panneaux diffère. Les programmes MAUPRP et GPSEST sont les deux programmes les plus sensibles à la durée de la session et à la longueur de la ligne de base. Le choix d'une option ou d'une autre peut influencer sur le résultat de manière non négligeable. Afin de déterminer les options optimales à choisir pour les traitements, des tests ont été réalisés. Ces tests et leurs résultats sont présentés au chapitre 3.3.

3.2.3. L'analyse des résultats

Cette partie est très importante. En effet, il est indispensable d'être critique à l'égard des résultats. On dispose de plusieurs indicateurs permettant de donner une idée de la validité des résultats. Le RMS du calcul (Root Mean Square) ou écart moyen quadratique donne une première indication sur la qualité du calcul. Il ne permet en aucun cas de valider un résultat, mais éventuellement de détecter les fautes. Le pourcentage d'ambiguïtés résolues et la différence entre les coordonnées avant et après fixation des ambiguïtés sont deux critères, qui de même que l'emq (écart moyen quadratique) nous permettent de soupçonner une erreur.

3.3. Les options de calcul

Le logiciel propose pour chaque programme un nombre important de paramètres. Il faut définir une valeur optimale de ces paramètres pour chaque type de calcul. J'ai réalisé différents tests afin d'essayer de paramétrer au mieux les différents types de traitement. Ces tests ont porté principalement sur les paramètres des programmes MAUPRP et GPSEST.

Tous ces tests ont été réalisés sur des lignes de base d'une dizaine de kilomètres pour une durée d'observation de 3 heures. Ces critères ont été définis dans l'optique des traitements pour le nivellement par GPS et des rattachements régionaux des stations du RGP.

Deux lignes de base ont été utilisées, il s'agit de MLVL – SMNE et LYON – SJDV. Elles ont été choisies car elles respectent la longueur de ligne de base recherchée. Ces quatre stations appartenant au RGP (Réseau GPS Permanent), on dispose donc de données sur des périodes suffisamment longues pour obtenir des résultats significatifs.

3.3.1. Les données disponibles

Les fichiers journaliers de chaque station utilisée ont été découpés en fichiers de 3 heures. On obtient donc 8 fichiers indépendants de mesures par jour. De nombreux tests ont été réalisés sur 2 fois 3 jours consécutifs (les 11, 12, 13 janvier 2002 et les 25, 26, 27 janvier 2002). Certains des calculs ont été testés sur des jours répartis régulièrement au cours de l'année 2001 afin de prendre en compte d'éventuels biais atmosphériques ayant une longueur d'onde de plusieurs semaines voire de plusieurs mois.

On étudie pour ces tests l'influence des différents paramètres sur la détermination des points en planimétrie et altimétrie. La référence utilisée est une solution provenant du calcul du RGP. Dans les graphiques présentés par la suite, le zéro correspond à cette référence. Nous ne disposons pas d'une valeur "vraie" de la différence de hauteur ellipsoïdale.

Dans le cas de la ligne de base MLVL – SMNE, les coordonnées de MLVL sont fixées. Pour la ligne de base LYON – SJDV, les coordonnées de LYON sont fixées. Les graphiques représentent pour chaque composante, l'écart entre la valeur calculée et la valeur de référence. Cette valeur est donnée en mètres pour la hauteur ellipsoïdale, la latitude et la longitude.

3.3.2. L'angle de coupure

L'angle de coupure est l'angle d'élévation limite au-dessous duquel les satellites ne sont plus pris en compte dans le calcul. Dans les tests effectués, j'ai dans un premier temps comparé les résultats obtenus avec l'angle de coupure à 10 ou 15 degrés. Constatant, une différence entre les résultats obtenus, j'ai ensuite réalisé des calculs avec un angle de coupure à 20 degrés.

Nous avons vu dans le chapitre 2.2.2 que pour un angle de coupure faible, les observations sont plus sensibles aux multitrajets. Il est à noter qu'en dessous de 15°, les auteurs du logiciel de Berne conseillent de pondérer les observations en fonction de l'angle d'élévation (la pondération proposée est en $\cos^2 Z$ avec Z l'azimut du satellite). Dans les tests, cette pondération a été utilisée quel que soit l'angle de coupure.

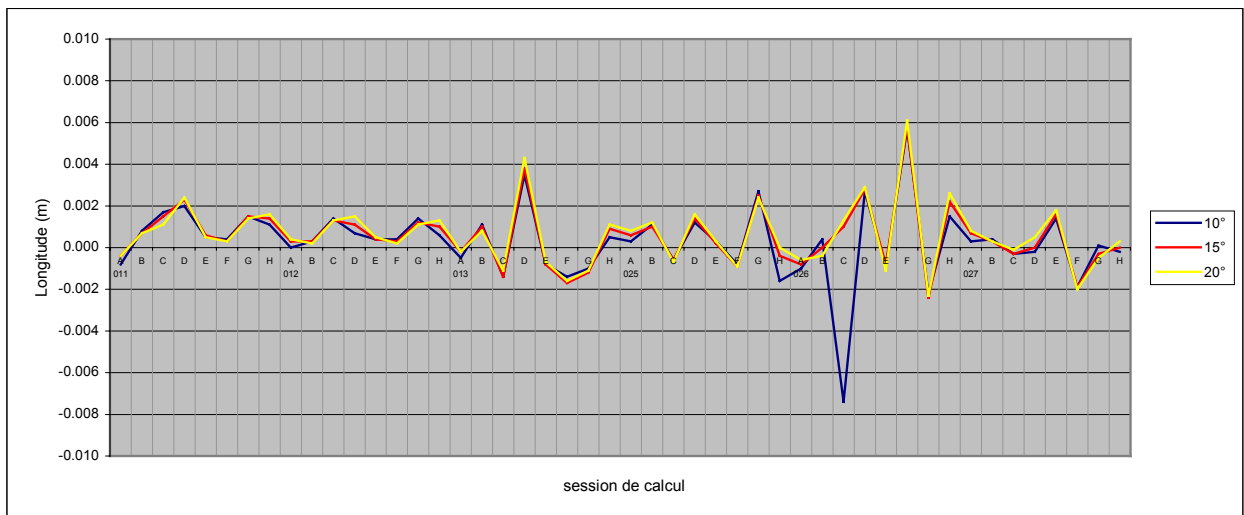
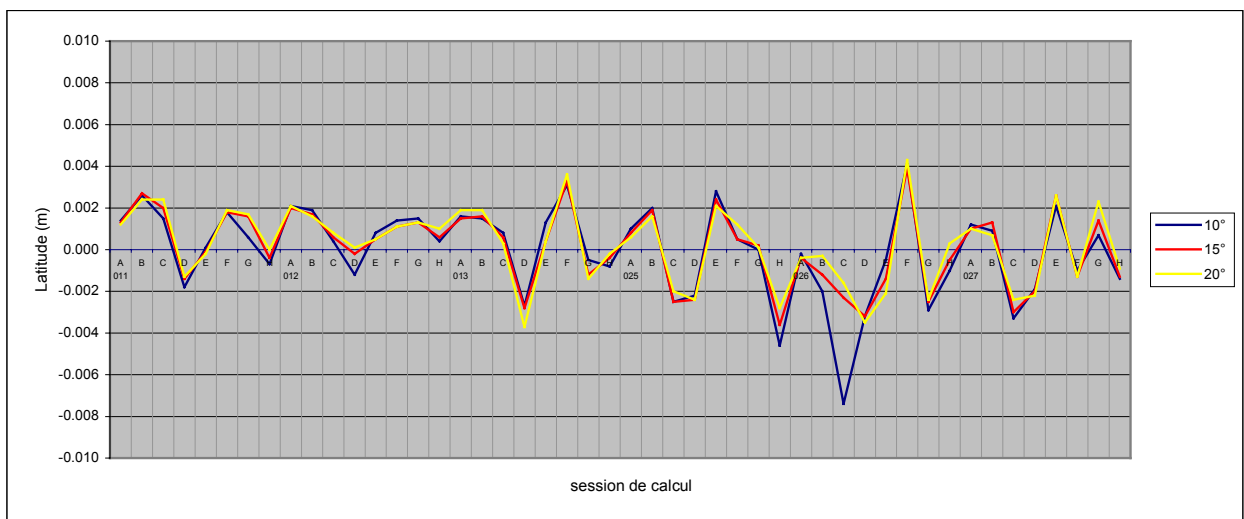
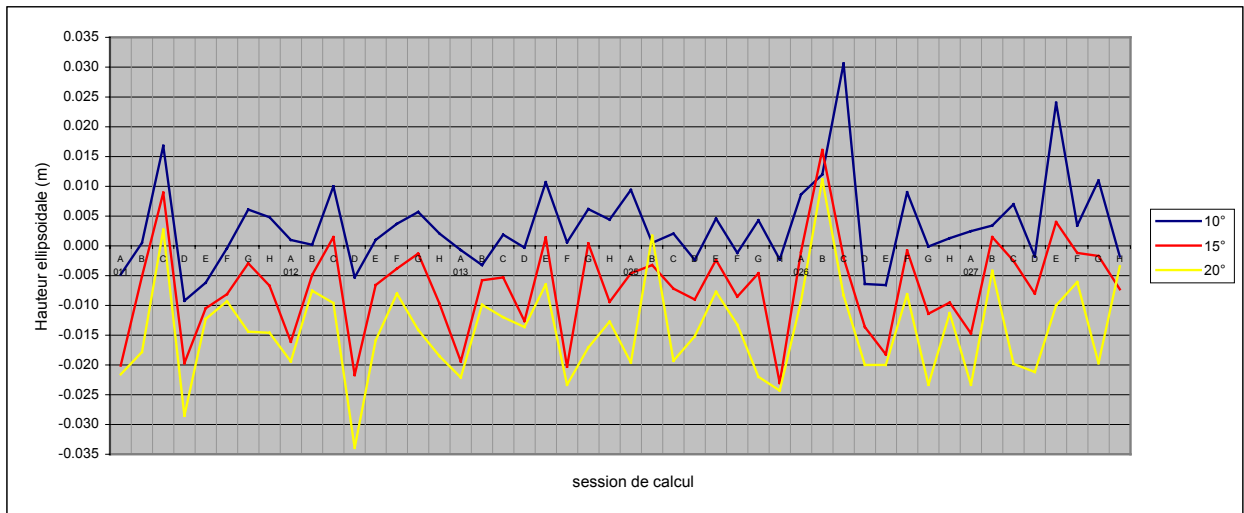


Figure 1 : Différence des coordonnées géographiques entre les calculs et la référence pour des angles de coupe à 10°, 15° et 20° avec estimation d'un paramètre troposphérique par heure et par station en utilisant le modèle troposphérique a priori de Saastamoinen et la fonction de projection $1/\cos Z$ pour la ligne de Base MLVL – SMNE. En haut, hauteur ellipsoïdale, au centre latitude et en bas longitude.

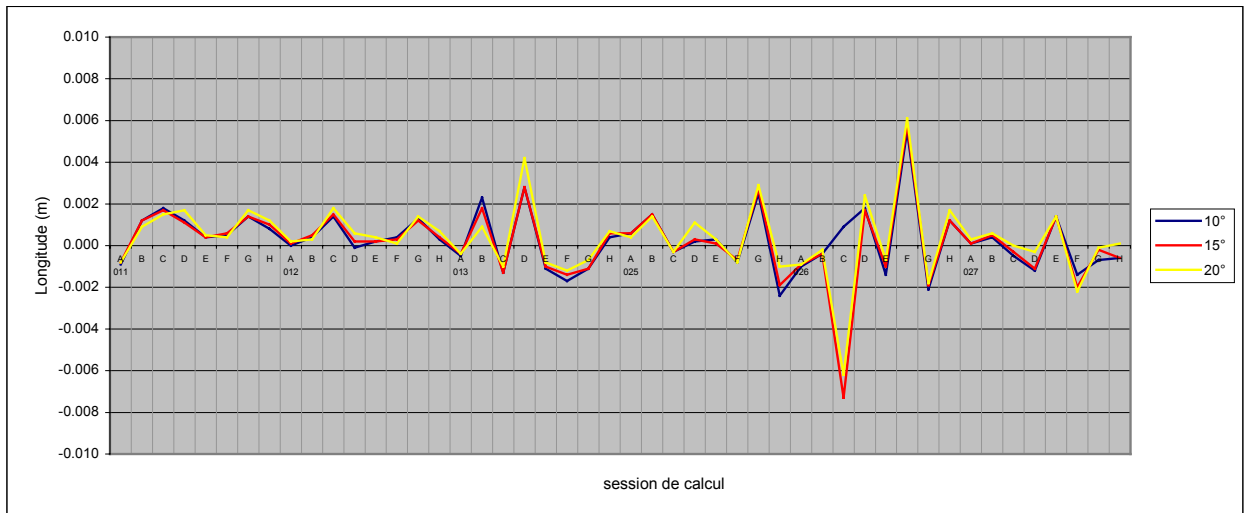
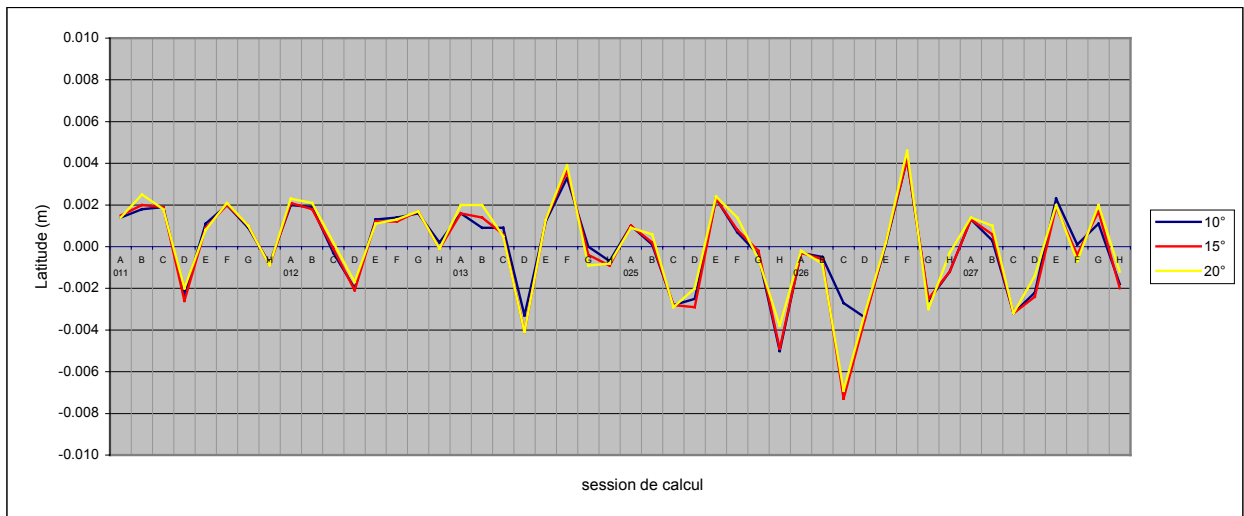
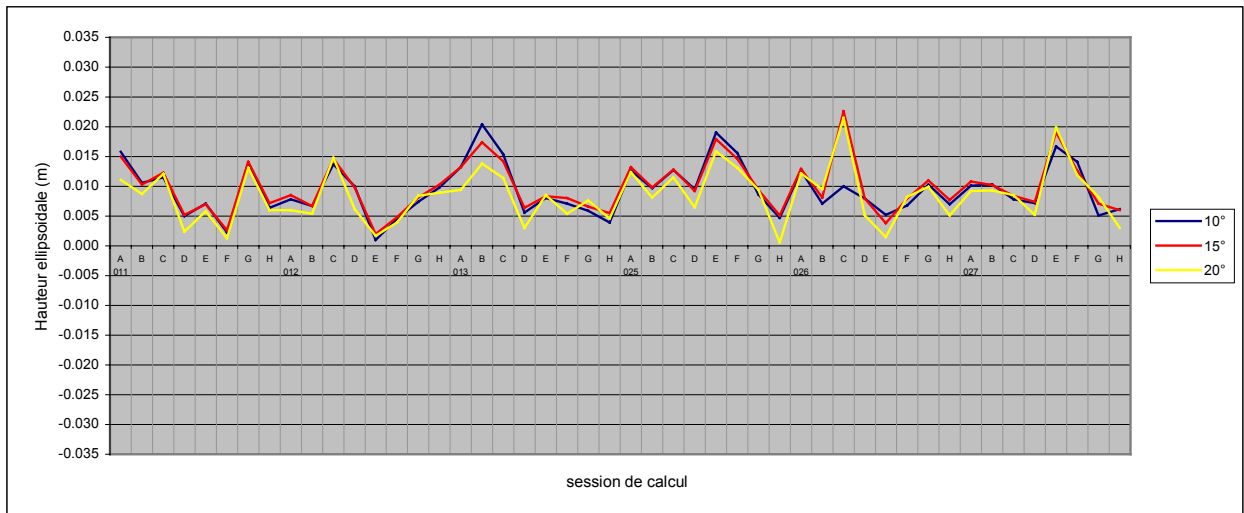


Figure 2 : Différence des coordonnées géographiques entre les calculs et la référence pour des angles de coupe à 10°, 15° et 20° en utilisant le modèle de Saastamoinen mais sans estimation de paramètres pour la ligne de Base MLVL – SMNE. En haut, hauteur ellipsoïdale, au centre latitude et en bas longitude.

Au vu des graphiques obtenus, on remarque que pour les valeurs des angles de coupures testées, il n'y a pas d'influence notable sur la planimétrie. En revanche, pour l'altimétrie, on peut distinguer deux cas :

- Lorsqu'on utilise le modèle de Saastamoinen, sans estimer les paramètres troposphériques, l'angle de coupure n'a pas d'influence sur les résultats.
- Lorsque les paramètres troposphériques sont estimés, la hauteur ellipsoïdale varie en fonction de l'angle de coupure. Pour la ligne de base MLVL – SMNE, plus l'angle de coupure est élevé, plus la différence de hauteur ellipsoïdale estimée est faible. L'angle de coupure de 10° donne la différence de hauteur ellipsoïdale la plus proche de la référence utilisée. Ce dernier résultat est cohérent dans la mesure où le calcul du RGP se fait avec un angle de coupure de 10° ce qui ne signifie pas pour autant que ce soit le plus exact.

3.3.2.1. Utilisation d'une seule ou des deux fréquences

Un calcul peut être réalisé en utilisant une seule des deux fréquences (en général, L1) ou les deux fréquences. Ce choix dépend dans un premier temps de la disponibilité de la fréquence L2. Nous avons vu dans le paragraphe 2.2.5. que l'utilisation de la combinaison linéaire L3 permettait de s'affranchir de l'effet de l'ionosphère. Pour de très courtes lignes de base dont la longueur est difficile à identifier précisément, l'utilisation de la seule fréquence L1 donne a priori de meilleurs résultats car la combinaison L3 est plus bruitée que L1. Cependant, comme le but est d'automatiser les traitements et qu'il est impossible de quantifier exactement la limite d'utilisation de la fréquence L1 seule, il a été choisi de toujours utiliser les deux fréquences dans les tests effectués.

Le choix de l'utilisation de L1 ou de L1 et L2 intervient à la fois dans MAUPRP et GPSEST. Dans MAUPRP, lors de l'utilisation des deux fréquences, deux façons de détecter les sauts de cycles sont possibles, il s'agit de COMBINED ou BOTH. L'utilisation de COMBINED est recommandée pour des lignes de base supérieures à 10 kilomètres par les auteurs du Berne. Lorsqu'on utilise COMBINED, la détection des sauts de cycle se fait en utilisant la combinaison linéaire L3. Lors de l'utilisation de BOTH, les deux fréquences sont traitées indépendamment. Dans les tests réalisés sur MLVL – SMNE, la solution avec COMBINED a donné de meilleurs résultats. Cependant, pour des lignes de base plus courtes, cette solution n'est plus appropriée et il est nécessaire de changer la stratégie employée dans MAUPRP. Le paramétrage à utiliser en fonction de la longueur des lignes de base est assez bien définie dans le "Cours d'Introduction au Logiciel "Bernese GPS Software Version 4.2"" [Garayt, Gattacceca] (le tableau des différents cas est en annexe). Cependant, il pourrait être intéressant de réduire le nombre de cas proposés.

3.3.3. Choix de la stratégie de résolution des ambiguïtés

Il existe quatre algorithmes de résolution des ambiguïtés implémentés dans le logiciel de Berne (ROUND, SEARCH, SIGMA, QIF) Nous ne présenterons pas ici la stratégie ROUND qui consiste à fixer brutalement les ambiguïtés réelles à la valeur entière la plus proche

3.3.3.1. Positionnement rapide statique

Dans le cas du positionnement rapide statique, le temps d'occupation du site est court (quelques minutes), la stratégie recommandée est appelée SEARCH, elle permet de résoudre les ambiguïtés sur L1&L2. Elle correspond à la résolution d'ambiguïtés FARA

développée par Frei et Beutler [1990]. Aucun test n'a été réalisé concernant le paramétrage de la stratégie SEARCH. Le traitement implémenté respecte les recommandations des auteurs du Berne.

3.3.3.2. Positionnement statique bifréquence

Dans le cas du positionnement statique classique, les deux stratégies les mieux adaptées pour la résolution des ambiguïtés sont SIGMA et QIF. Il ne s'agit pas ici de détailler le principe de ces résolutions mais d'en rappeler les grandes lignes.

La stratégie QIF (Quasi Ionosphere Free) a été développée pour traiter de longues lignes de bases sans utiliser de mesures de code lorsque l'AS a été systématiquement activé en 1994. Cette stratégie itérative utilise la combinaison linéaire L3 et permet la fixation des ambiguïtés sur L1 et sur L2. La valeur des ambiguïtés réelles a priori étant très mauvaise du fait de l'activité ionosphérique, cette stratégie nécessite le calcul intermédiaire de paramètres ionosphériques stochastiques.

La stratégie itérative SIGMA fixe les ambiguïtés en étudiant les résidus moyens quadratiques a posteriori pondérés par les éléments de la matrice variance covariance.

Les stratégies SIGMA et QIF ont été testées. Les résultats obtenus avec SIGMA pour certaines tranches horaires sont erronés sans pouvoir en identifier l'origine. Pour ces mêmes périodes, la stratégie QIF donne des résultats satisfaisants.. La stratégie QIF n'ayant jamais posé de problèmes, elle a été systématiquement choisie dans tous les calculs de ce type.

3.3.4. Détermination de paramètres troposphériques

3.3.4.1.1. L'utilisation de modèles et de fonctions de projection

Le logiciel de Berne permet d'estimer des paramètres troposphériques. Ces paramètres sont en général estimés pour chaque station et pour un intervalle de temps défini.

Trois types généraux de calculs ont été testés :

- L'utilisation du modèle troposphérique de Saastamoinen seul sans estimer de paramètres troposphériques. Ce test a été effectué car il s'agit de la solution équivalente à celle utilisée dans les logiciels constructeurs.
- L'estimation de paramètres troposphériques avec le modèle troposphérique a priori de Saastamoinen et la fonction de projection $1/\cos Z$.
- L'estimation de paramètres troposphériques sans modèle troposphérique a priori en utilisant la fonction de projection Dry Niell. Cette stratégie est celle recommandée par les centres d'analyses ou de calculs des grands réseaux internationaux.

La figure 1 représentant les résultats du calcul utilisant uniquement le modèle de Saastamoinen montre l'existence d'un biais par rapport à la valeur de référence. En revanche, la détermination de paramètres troposphériques recentre les courbes au voisinage de la valeur de référence (figure 2).

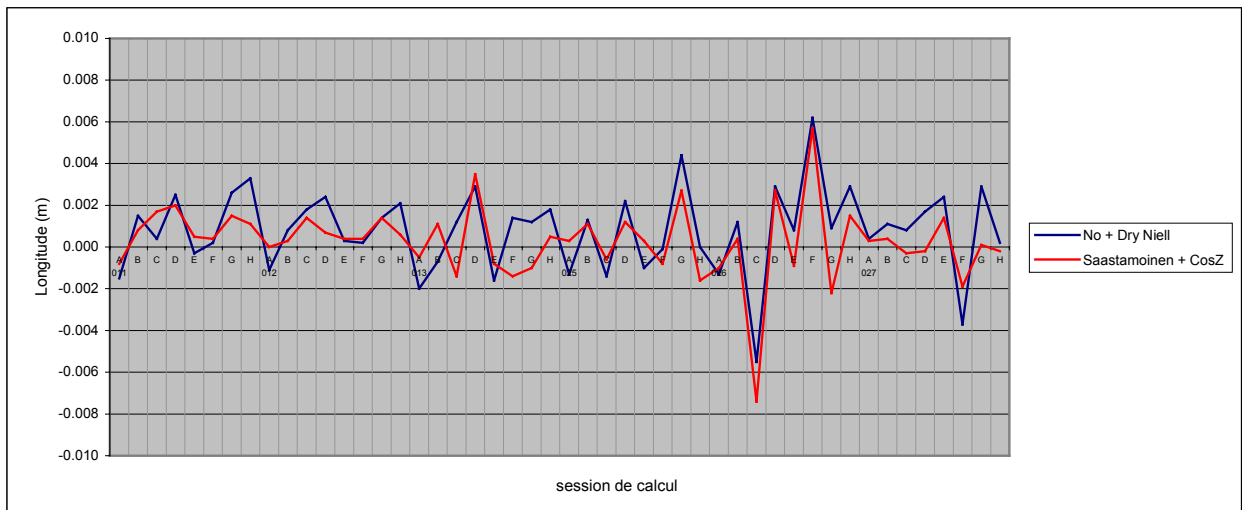
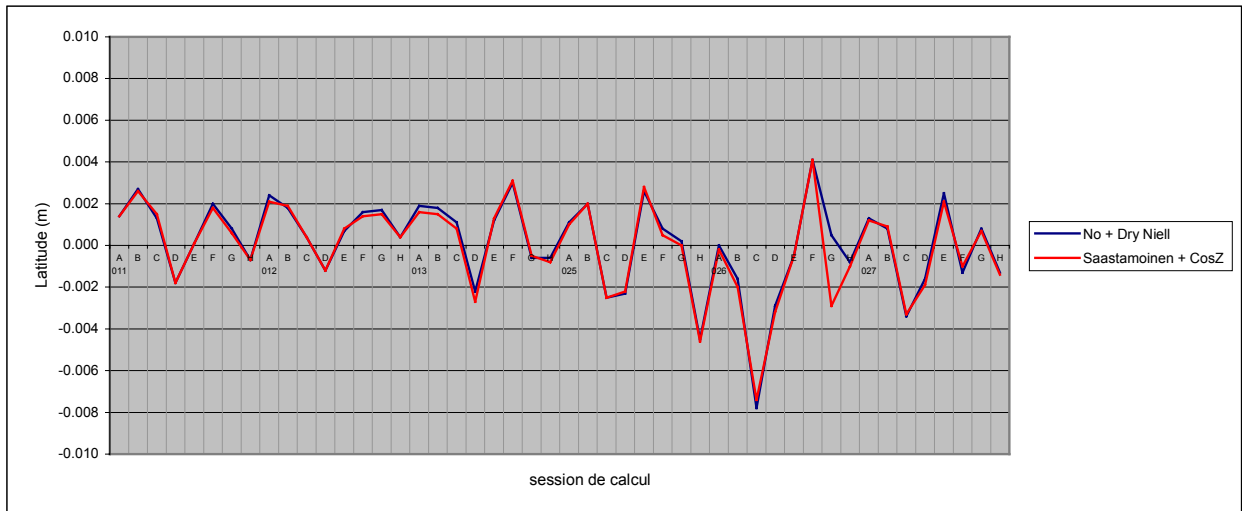
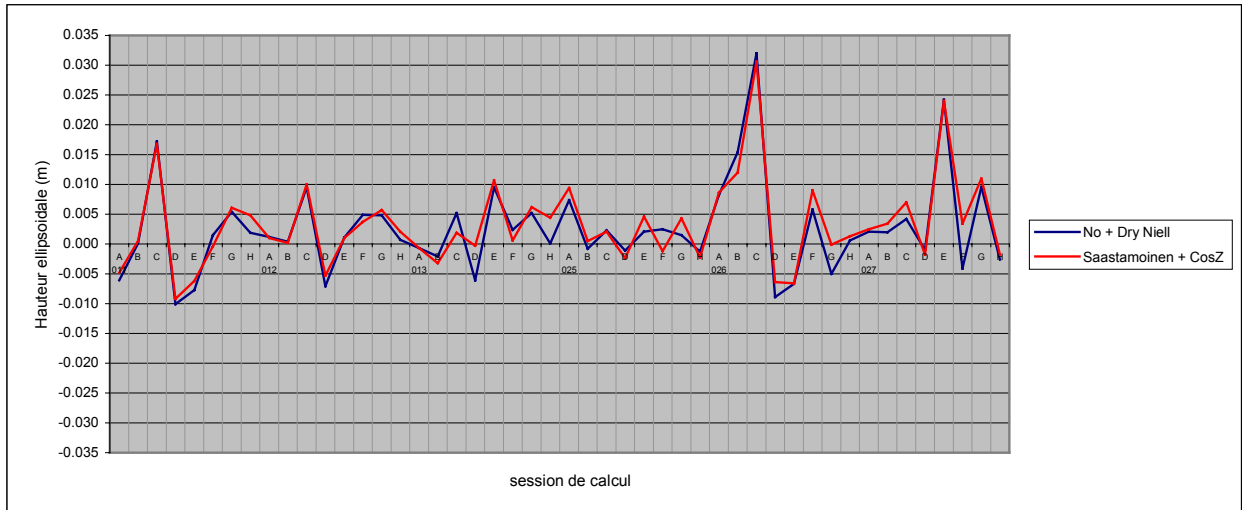


Figure 3 : Différence des coordonnées géographiques entre les calculs et la référence à 10° en déterminant des paramètres troposphériques. En rouge utilisation de Saastamoinen et sa fonction de projection associée 1/CosZ. En Bleu pas de modèle a priori mais Dry Niell comme fonction de projection. En haut, hauteur ellipsoïdale, au centre latitude et en bas longitude.

La figure 3 permet de comparer les résultats obtenus avec le modèle de Saastamoinen associé à sa fonction de projection $1/\cos Z$ et ceux obtenus sans modèle troposphérique mais avec la fonction de projection Dry Niell. Pour un même angle de coupure, ces deux traitements ne présentent pas de différences majeures.

3.3.4.1.2. Les paramètres troposphériques estimés

Il est possible de faire varier le nombre de paramètres troposphériques estimés par station. Des tests ont été réalisés en estimant un paramètre par heure et un paramètre pour 3 heures. Les résultats ne montrent pas de différences notables. Les tests ont été faits avec des fichiers découpés à heures rondes. Il serait intéressant de tester le comportement lorsque le début et la fin des observations ne correspondent plus avec les intervalles d'estimation des paramètres troposphériques.

Dans le cas de petits réseaux (inférieurs à 100 km), il existe une forte corrélation entre les angles zénithaux des sites. Il est donc recommandé par les auteurs du Berne d'estimer les paramètres troposphériques relatifs et non plus absolus des stations par rapport à une station qui sert de référence. Dans ce cas, les valeurs de ces paramètres sont biaisées mais l'erreur introduite dans la détermination des coordonnées est un facteur d'échelle (cf chapitre 1.1.1.1) et donc peu influente pour des bases relativement courtes.

Pour chaque paramètre troposphérique, l'écart moyen quadratique (emq), s'il ne permet pas d'affirmer l'exactitude du résultat, donne tout de même une idée de sa valeur. Dans le cas des $N - 1$ stations, les écarts moyens quadratiques des paramètres troposphériques obtenus sont plus faible que pour les N stations. Pour les N stations, l'emq sur les paramètres a une valeur plus forte que la correction apportée au modèle, il semblerait donc que les paramètres estimés dans ce cas ne soient pas significatifs. Cependant, lorsqu'on compare les coordonnées géographiques obtenues avec les N stations ou avec les $N - 1$ stations (figure 4) à l'aide de la série de graphique suivante, on se rend compte qu'elles sont très proches. Il semblerait donc que cette option n'influe pas sur le calcul.

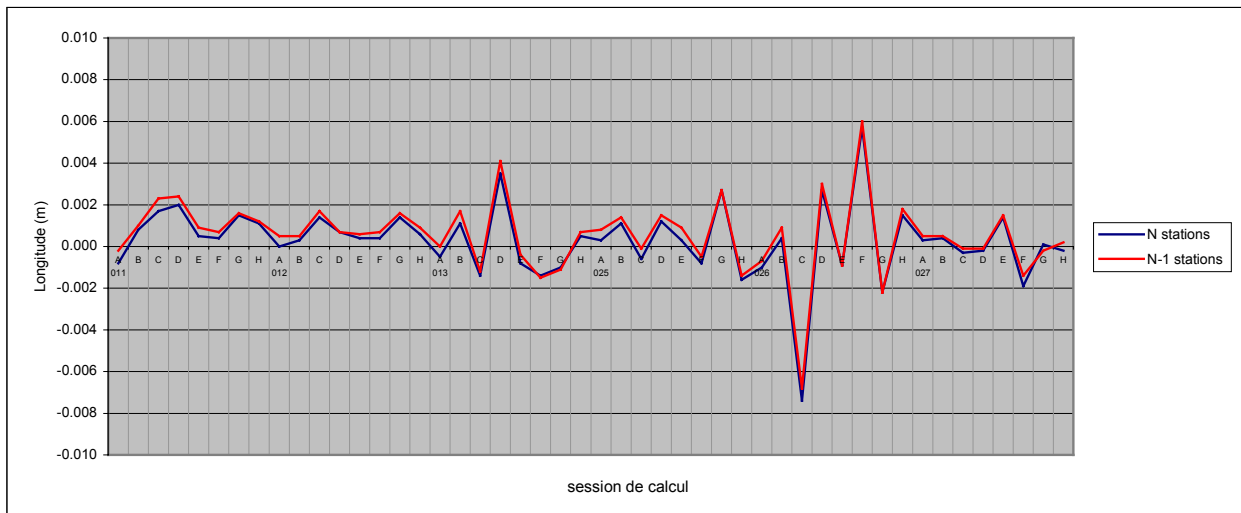
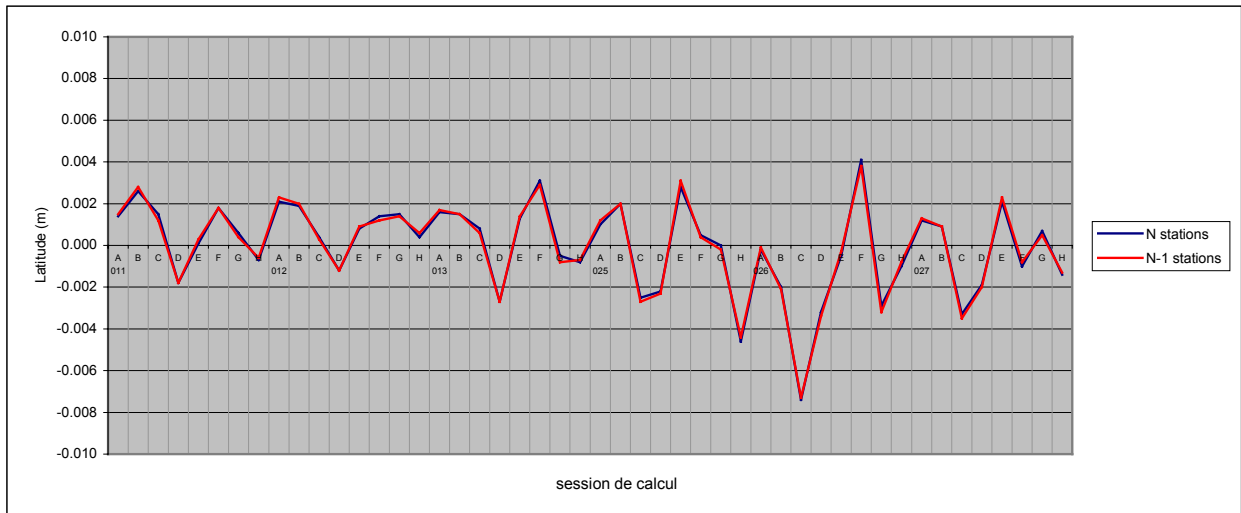
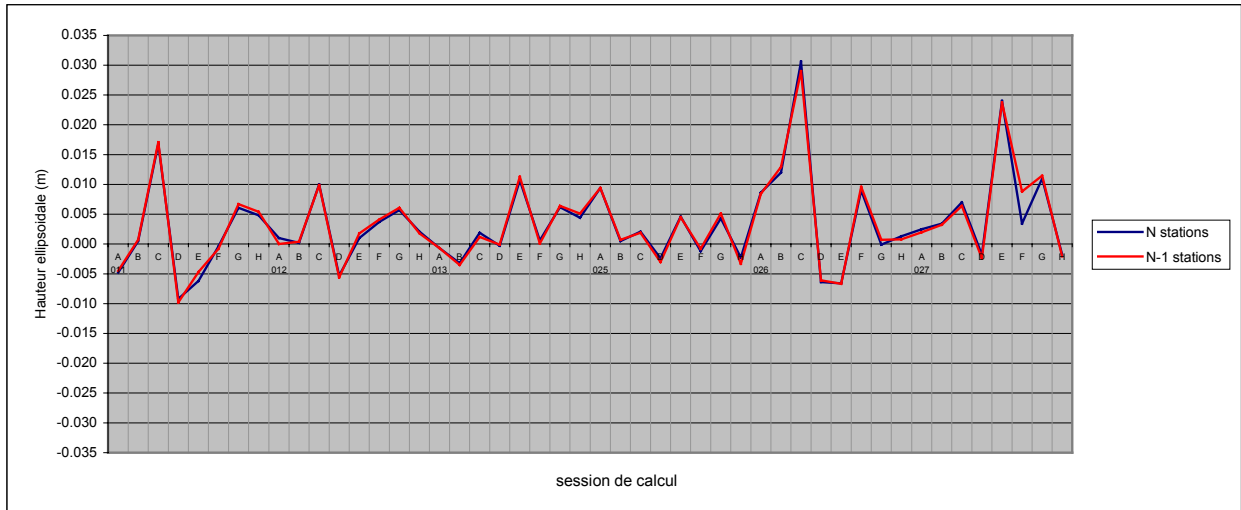


Figure 4 : Différence des coordonnées géographiques entre les calculs et la référence pour 2 stratégies, les deux stratégies utilisent un modèle troposphérique a priori de Saastamoinen et de la fonction de projection $1/\cos Z$, la courbe rouge correspond aux résultats obtenus en estimant les paramètres troposphériques pour les N stations, la courbe bleue ceux obtenus en estimant les paramètres troposphériques pour N-1 stations pour la ligne de Base MLVL – SMNE. En haut, hauteur ellipsoïdale, au centre latitude et en bas longitude.

Afin d'améliorer l'estimation des paramètres troposphériques, des stations du RGP ont été introduites dans le calcul de la ligne de base. En introduisant des stations lointaines dans le calcul, le but est de décorrélérer les paramètres troposphériques estimés. Deux façons d'introduire des stations lointaines ont été testées :

La première solution consistait à estimer des paramètres troposphériques sur une des extrémités de la ligne de base à partir de stations du RGP relativement lointaines.

La deuxième solution testée consistait à lancer deux PCF différents. Dans le calcul du premier PCF, les deux extrémités de la ligne de base sont calculées à partir de plusieurs stations RGP. Lors de ce calcul, les ambiguïtés sont résolues, les paramètres troposphériques sont estimés pour toutes les stations, un fichier contenant les paramètres troposphériques est édité. Dans le calcul du deuxième PCF, seule la ligne de base est calculée, les paramètres troposphériques estimés précédemment sont introduits et les ambiguïtés sont fixées.

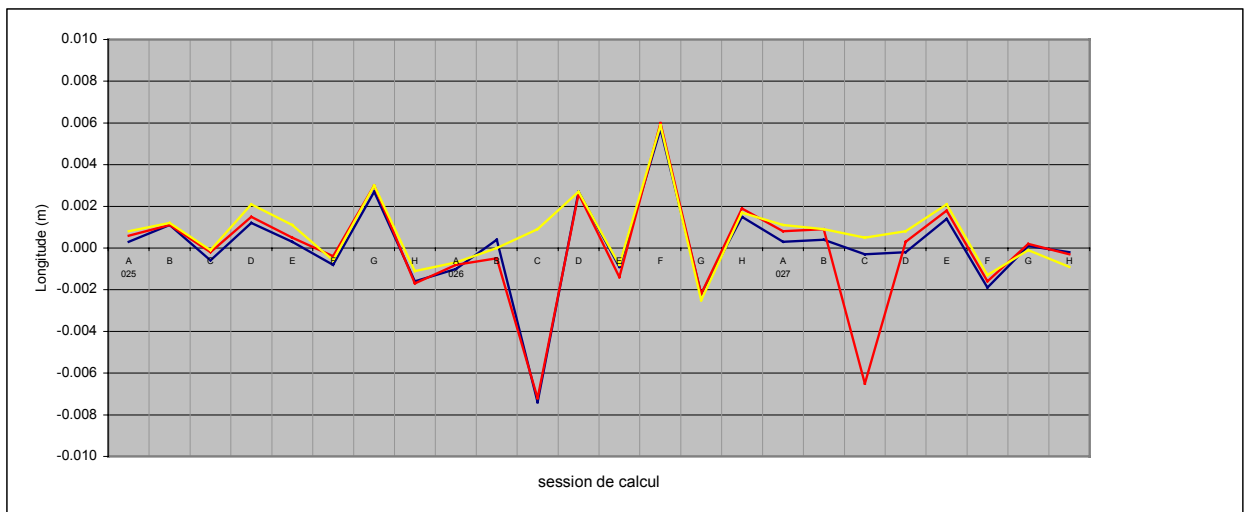
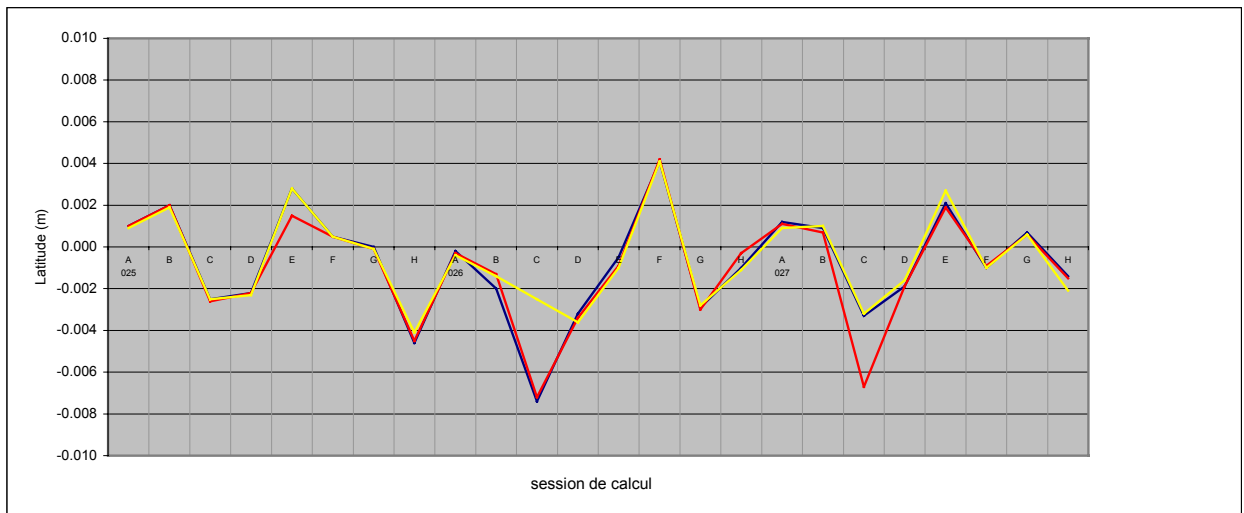
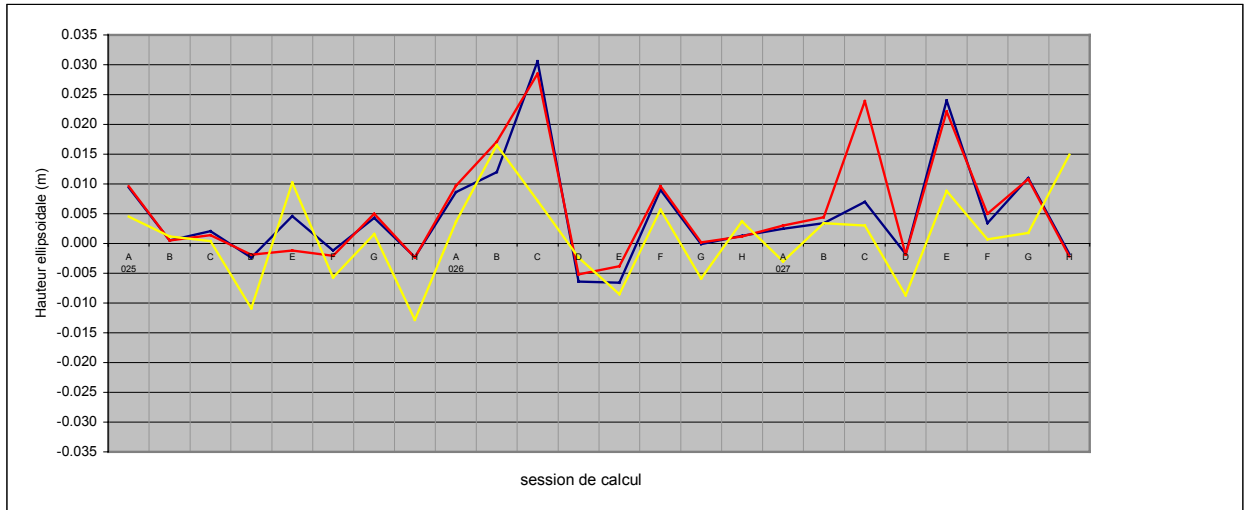


Figure 5 : Différence des coordonnées géographiques entre les calculs et la référence pour 3 stratégies, les deux stratégies utilisent un modèle troposphérique a priori de Saastamoinen et la fonction de projection $1/\cos Z$, la courbe bleue correspond à une solution pour laquelle seule la ligne de base est calculée, la courbe rouge correspond à l'estimation des paramètres troposphériques à une extrémité de la ligne de base à l'aide de l'intégration de stations du RGP, la courbe jaune à l'estimation des paramètres troposphériques aux deux extrémités de la

ligne de base à l'aide de l'intégration de stations du RGP. En haut, hauteur ellipsoïdale, au centre, latitude et en bas, longitude.

On remarque que l'estimation des paramètres troposphériques aux deux extrémités de la ligne de base à l'aide de l'intégration de stations du RGP permet de diminuer certains pics dans les coordonnées. Cette méthode a également l'avantage de réduire le RMS sur les paramètres troposphériques. Il s'agit d'une méthode intéressante, mais malheureusement trop compliquée pour être automatisée. L'idée a été retenue et aménagée pour le nivellement par GPS. En effet, pour les calculs du nivellement par GPS, des stations du RGP distantes de plus d'une centaine de kilomètres sont introduites dans le calcul afin de décorréler les paramètres troposphériques.

3.3.5. Le nombre d'étapes lors de l'estimation des paramètres

L'estimation de paramètres peut se faire en plusieurs étapes, elle nécessite alors plusieurs passages dans GPSEST. L'influence du nombre d'étapes sur le calcul a été testée.

3.3.5.1. Présentation des stratégies

3.3.5.1.1. Stratégie 1 : 3 GPSEST + résidus

Dans un premier passage, les lignes de base sont calculées ligne de base par ligne de base, les ambiguïtés ne sont pas résolues, un fichier de résidus est sorti, ce fichier permet de nettoyer les données par les résidus. Les observations ayant des résidus trop forts sont alors marquées et écartées du calcul. Des paramètres troposphériques sont estimés pour chaque station.

Dans un second passage, les lignes de base sont calculées ligne de base par ligne de base. Les ambiguïtés sont résolues avec une stratégie de résolution qui peut varier d'une méthode à l'autre. Les paramètres troposphériques calculés au passage précédent sont introduits.

Dans le dernier passage, les ambiguïtés résolues au 2^{ème} passage sont introduites, les paramètres troposphériques sont estimés, toutes les lignes de base sont calculées dans un même passage, on obtient ainsi une solution finale globale.

3.3.5.1.2. Stratégie 2 : 3 GPSEST

Le nettoyage des observations par les résidus au premier passage dans GPSEST n'est plus effectué, le reste du traitement reste identique à la stratégie 1.

3.3.5.1.3. Stratégie 3 : 2 GPSEST

Le premier passage et le nettoyage des observations par les résidus ne sont plus effectués. La résolution des ambiguïtés et l'estimation des paramètres troposphériques sont donc réalisées dans le premier GPSEST. Le troisième passage des stratégies 3 GPSEST +résidus et 3 GPSEST reste identique.

3.3.5.1.4. Stratégie 4 : 1 GPSEST

Toutes les lignes de base sont calculées dans un seul passage, durant lequel, on résout les ambiguïtés et on estime les paramètres troposphériques.

3.3.5.2. Résultats

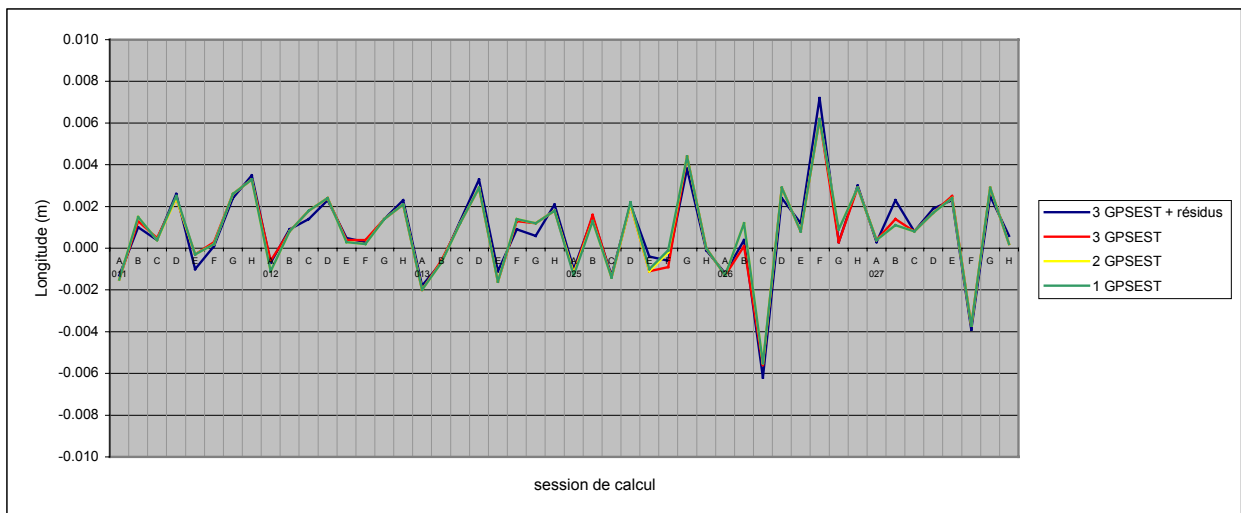
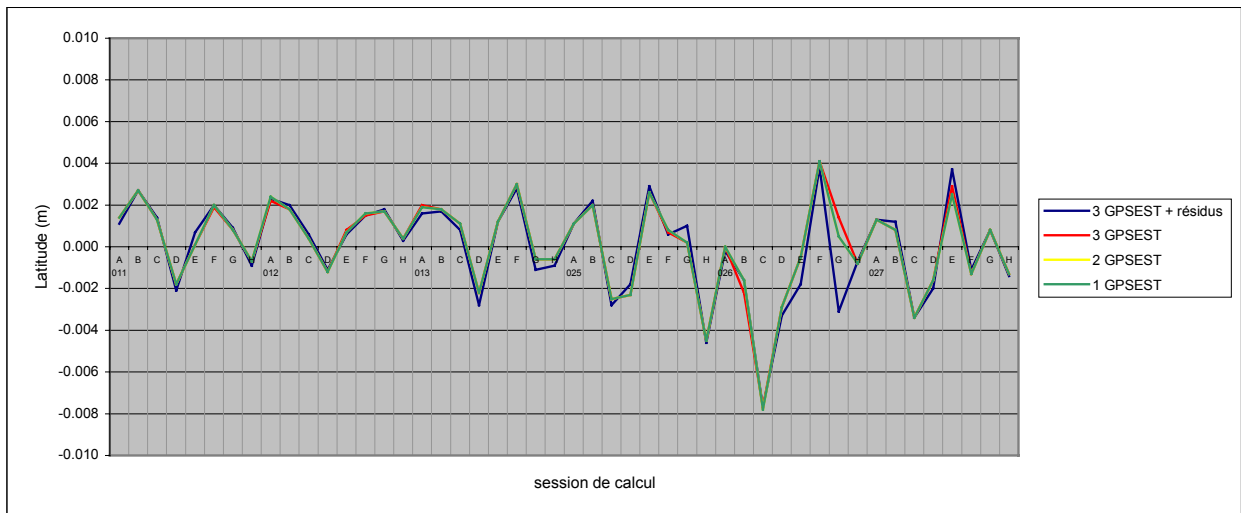
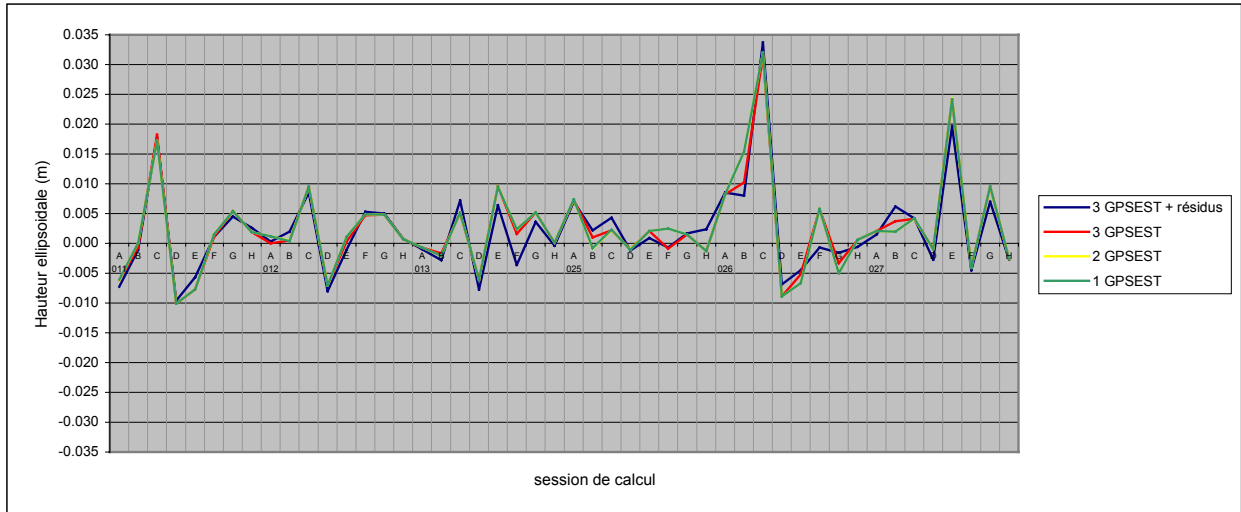


Figure 6 : Différence des coordonnées géographiques entre les calculs et la référence pour les 4 stratégies 3 GPSEST + résidus, 3 GPSEST, 2 GPSEST et 1 GPSEST présentées plus haut, pour la

ligne de Base MLVL – SMNE. En haut, hauteur ellipsoïdale, au centre latitude et en bas longitude.

On remarque que le nettoyage des observations par les résidus n'est pas nécessaire. En effet, ceci ne donne pas de meilleurs résultats que la stratégie 2 pour laquelle aucun nettoyage n'est réalisé. Il semblerait même que le nettoyage donne des résultats moins bons. Des tests visant à faire varier les paramètres du nettoyage ont été réalisés sur des sessions à problèmes et sur des sessions donnant de bons résultats. Cette voie nécessiterait d'être approfondie, mais tous les essais réalisés donnent de moins bons résultats lorsque le nettoyage est réalisé. Le nettoyage par les résidus est long, il est donc particulièrement intéressant de pouvoir éliminer cette étape du traitement.

On remarque également que la stratégie 4 (1 GPSEST) donne les mêmes résultats que les autres stratégies, cette méthode est donc intéressante car elle réduit le nombre de GPSEST à effectuer à un seul. Cette méthode n'a cependant pas été retenue pour l'automatisation car pour un grand nombre de lignes de bases, le nombre de paramètres à calculer (coordonnées, paramètres troposphériques, paramètres ionosphériques, ambiguïtés) est trop important, et le logiciel ne peut pas faire le calcul. Dans l'automatisation des calculs, le nombre des GPSEST est de trois. Le premier passage permet d'obtenir des coordonnées approchées pour les stations dont la position n'est pas connue a priori. Dans un deuxième passage, les ambiguïtés sont résolues. Le dernier GPSEST donne une solution finale globale.

3.3.6. Recherche d'un indicateur de validité des calculs

Afin de déterminer si un calcul peut être validé, on dispose de plusieurs indicateurs, le pourcentage d'ambiguïtés résolues, l'écart moyen quadratique (RMS) et la différence entre les coordonnées avant résolution des ambiguïtés et après résolution. Nous nous intéressons dans la suite au pourcentage d'ambiguïtés résolues et au RMS du calcul. Le but est de trouver une valeur limite permettant de déterminer si un calcul est "bon ou mauvais". Cela pourrait éventuellement permettre de pousser l'automatisation jusqu'à l'analyse des résultats afin d'éviter à l'utilisateur d'avoir à regarder les fichiers de sortie.

Les deux séries de graphiques suivantes permettent de comparer le pourcentage d'ambiguïtés résolues et le RMS aux coordonnées.

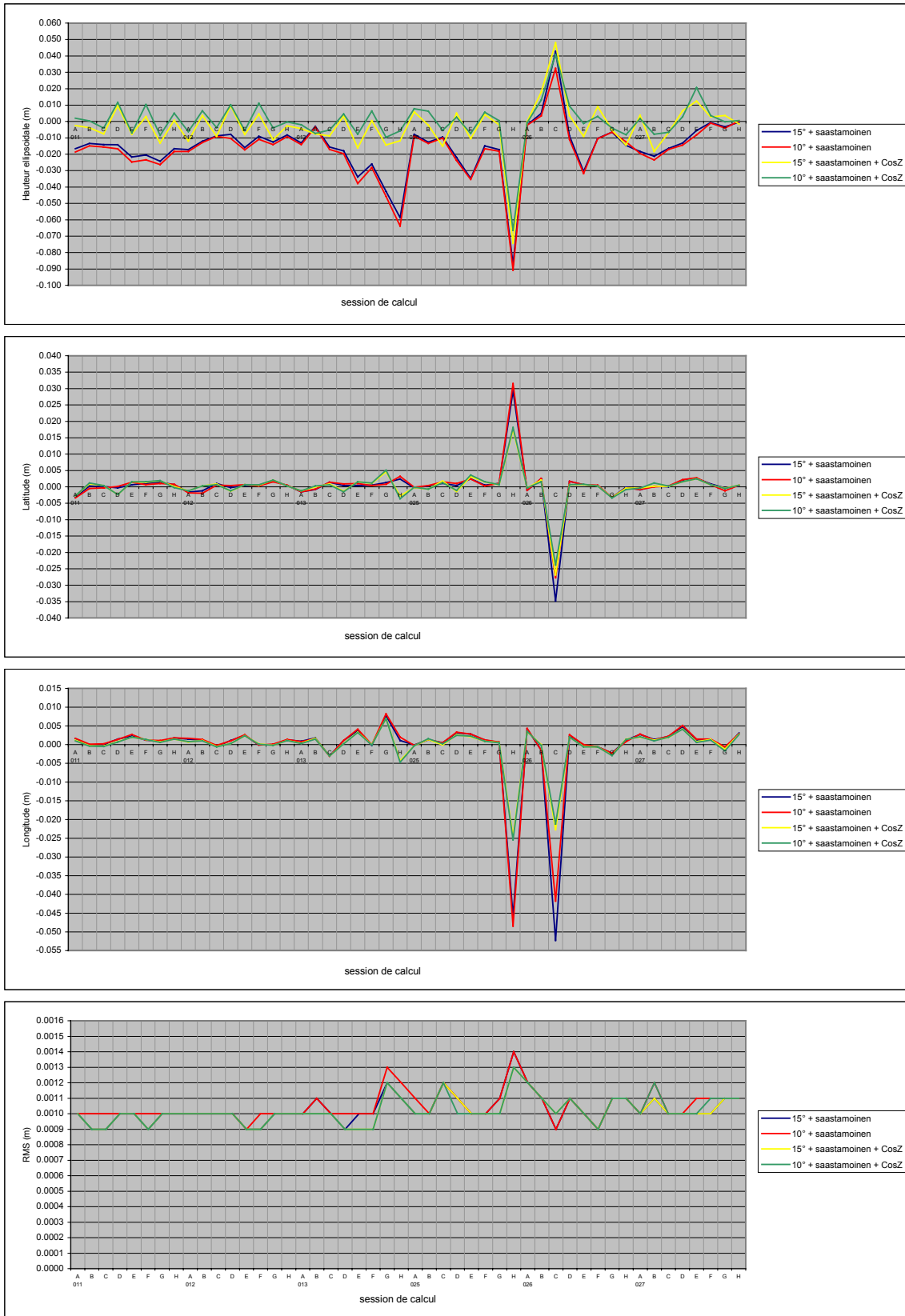


Figure 7 : Différence des coordonnées géographiques entre les calculs et la référence et RMS du calcul pour 4 stratégies :

- en bleu, un angle de coupe à 15° et le modèle de saastamoinen,
- en rouge, un angle de coupe à 10° et le modèle de saastamoinen,

- en jaune, un angle de coupure à 15°, le modèle de Saastamoinen et la fonction de projection $1/\cos Z$,
- en vert, un angle de coupure à 10°, le modèle de Saastamoinen et la fonction de projection $1/\cos Z$, pour la ligne de Base LYON - SJDV.

De haut en bas, hauteur ellipsoïdale, latitude, longitude et RMS du calcul.

L'écart moyen quadratique donne a priori une idée de la valeur du calcul. Sur cette première série de graphique, aucune valeur des RMS obtenus ne permet de douter des résultats. Cependant, au vu des coordonnées, on remarque que certains calculs ne donnent pas de résultats satisfaisants. La série de données permet de voir que pour les sessions posant problème, le RMS est souvent plus fort que pour les sessions donnant un résultat correct. Cela ne suffit pas, car dans la pratique on ne dispose pas de plusieurs sessions permettant d'identifier une valeur limite.

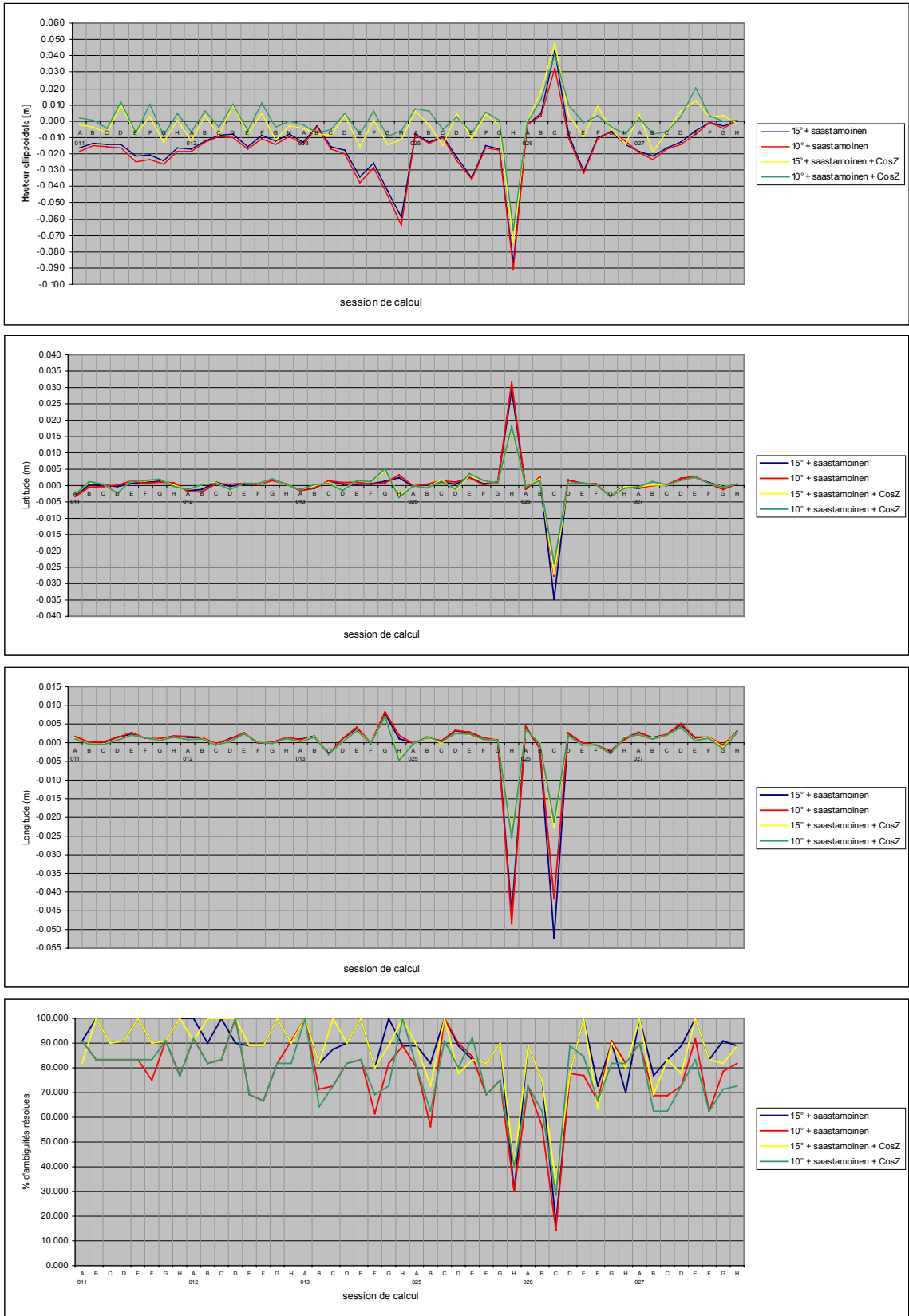


Figure 8 : Différence des coordonnées géographiques entre les calculs et la référence et pourcentage d'ambiguïtés résolues pour 4 stratégies :

- en bleu un angle de coupure à 15° et le modèle de saastamoinen,
- en rouge un angle de coupure à 10° et le modèle de saastamoinen,

- en jaune un angle de coupure à 15°, le modèle de Saastamoinen et la fonction de projection $1/\cos Z$,
- en vert un angle de coupure à 10°, le modèle de Saastamoinen et la fonction de projection $1/\cos Z$, pour la ligne de base LYON - SJDV.

De haut en bas, hauteur ellipsoïdale, latitude, longitude et pourcentage d'ambiguïtés résolues.

Les deux gros pics obtenus sur les coordonnées sont bien identifiés sur le graphique du pourcentage d'ambiguïtés résolues. Cependant, certains pics plus petits visibles sur la composante altimétrique ne présentent pas un pourcentage d'ambiguïtés résolues laissant supposer qu'il y aurait un problème.

En conclusion, la définition de limites précises permettant de savoir si un calcul est "bon ou mauvais" dépend de la ligne de base calculée. Lorsqu'on dispose d'une série de sessions, il est possible de définir des critères adaptés à la ligne de base concernée. Mais, ces critères ne seront pas forcément valables pour une autre ligne de base.

3.3.7. Les pistes à explorer

3.3.7.1. La stratégie de création des fichiers de simples différences

Plusieurs stratégies de création automatique des fichiers de simple de différence sont possibles. Pour N stations, ces différentes stratégies créent N - 1 lignes de base indépendantes. Ces stratégies créent, par exemple, les lignes de bases les plus courtes ou celles présentant le plus d'observations en commun. Les lignes de base à créer peuvent être définies par l'utilisateur, par l'intermédiaire du fichier de ligne de base évoqué plus haut. Aucun test n'a été effectué pour voir l'influence du choix des lignes de base sur les calculs. Cependant, cette piste pourrait être intéressante à explorer. Notamment, lorsque des stations lointaines sont intégrées dans le calcul afin de décorréler les paramètres troposphériques.

3.3.7.2. Utilisation d'un modèle ionosphérique

Il est possible d'utiliser un modèle ionosphérique global ou régional. L'utilisation d'un modèle ionosphérique est préconisée lors de l'utilisation de la fréquence L1 seule lorsque la réfraction ionosphérique ne peut plus être éliminée par les simples différences. Pour de très grandes lignes de bases, un modèle ionosphérique peut également être utilisé avec le logiciel de Berne lorsqu'on utilise les deux fréquences, afin de faciliter la résolution des ambiguïtés.

Dans le cadre du nivellement par GPS et dans les calculs automatisés des stratégies utilisant des modèles ionosphériques globaux ont été implémentées.

3.3.8. Conclusions

Les différentes stratégies testées ont permis de déterminer les grandes lignes des options de calculs.

Dans toutes les méthodes de calcul implémentées pour les traitements statiques bifréquences, les ambiguïtés sont résolues en utilisant la stratégie QIF. L'angle de coupure a été fixé à 10° de manière à être cohérent avec les calculs du RGP. Les paramètres troposphériques sont déterminés pour toutes les stations calculées en utilisant Dry Niell

comme fonction de projection sans introduire de modèle a priori. La solution consistant à estimer les paramètres troposphériques relativement à une station n'a pas été retenue par manque de temps. Elle devra pourtant être ajoutée ultérieurement dans les traitements proposés.

L'introduction de stations lointaines dans le calcul a été retenue pour le nivellement par GPS sous une forme un peu différente de celles testées, mais n'a pas été utilisée dans les autres calculs automatisés car le bénéfice retiré était faible au regard de la complexité du traitement.

La stratégie de trois passages avec le programme GPSEST exposée au chapitre 3.3.5.2. a été retenue dans tous les cas.

Aucun des indicateurs potentiels de validité n'est suffisamment fiable pour garantir l'exactitude des résultats. En conséquence, l'analyse des résultats n'as pas été incluse dans l'automatisation.

4. LES AUTOMATISMES DE TRAITEMENTS IMPLEMENTES **ET LES UTILITAIRES ASSOCIES**

L'objectif du stage était de se rapprocher dans la mesure du possible de la simplicité d'utilisation d'un logiciel commercial en incorporant les avantages d'un logiciel scientifique. Si la partie traitement proprement dite était relativement bien traitée par l'utilisation du BPE, toute la partie de préparation du calcul ainsi que l'exploitation des résultats n'est absolument pas gérée automatiquement par le logiciel de Berne.

La préparation du calcul a été automatisée au maximum en utilisant des utilitaires écrits en Perl. Des modifications ont été apportées aux scripts BPE pour tenir compte des spécificités des traitements souhaités au SGN et quelques utilitaires ont été développés pour faciliter l'exploitation des résultats.

4.1. Les utilitaires développés pour les tests de calculs

Dans le cadre des tests réalisés afin de déterminer une stratégie de calcul optimale en fonction du type de calcul, de nombreux utilitaires ont été écrits. Ces outils concernent la préparation des traitements, le lancement des calculs, l'archivage des résultats ainsi que leur exploitation. Ces outils ont été développés en Perl. Tous ces utilitaires ont évolué en fonction des besoins. Ces outils ont servi de base lors de l'écriture des programmes permettant de traiter les données GPS.

4.1.1. Le lancement automatique des calculs et l'archivage des données

Pour avoir des résultats significatifs les mêmes traitements étaient effectués sur de nombreux jeux de données. Pour faciliter la réalisation de ces tests, des utilitaires ont été développés pour :

- Copier les fichiers de 3 heures des stations nécessaires au traitement. Les fichiers de 3 heures des stations sont copiés d'un répertoire de stockage dans le répertoire RAW de la campagne.
- Préparer le panneau de session.
- Lancer le traitement.
- Archiver les données et nettoyer certains répertoires à la fin du traitement.

Lors des tests, les fichiers spécifiques à la campagne (fichier de lignes de base, fichier de coordonnées) ne changeaient pas d'une session à l'autre, il était donc inutile de les créer à chaque calcul lancé et d'automatiser leur création.

4.1.2. L'exploitation des résultats

Un fichier récapitulatif est édité à l'issue de chaque phase du traitement. Pour un calcul automatique, le nombre de fichiers de sortie est important. Il a fallu extraire les informations prioritaires de ces fichiers. Parmi ces informations, on citera les coordonnées a priori, avant résolution des ambiguïtés et après résolution des ambiguïtés, le RMS du calcul et le pourcentage d'ambiguïtés résolues. Ces extractions se font grâce à des outils écrits en Perl. L'exploitation ultérieure des résultats à l'aide de quelques macros en Visual Basic Application sous Excel s'est révélée indispensable pour les tests de calculs. Tous les utilitaires développés ont pu être réutilisés par la suite.

4.2. Les programmes d'automatisation des calculs

4.2.1. Le principe de l'automatisation

Afin d'expliquer le principe des programmes d'automatisation, nous commencerons par revoir les étapes du traitement des observations GPS avec le BPE puis nous verrons de quelle manière ces différentes étapes sont abordées lors de l'automatisation.

Une fois que les différentes stratégies de calcul ont été définies et créées, pour traiter des données GPS avec le BPE, il faut :

- 1) Créer la campagne,
- 2) Récupérer les fichiers généraux,
- 3) Récupérer les fichiers de navigation ou les éphémérides précises,
- 4) Récupérer les modèles ionosphériques et les fichiers de surcharge océanique (facultatif),
- 5) Récupérer et vérifier les fichiers d'observations,
- 6) Créer les fichiers concernant les stations. Parmi ces fichiers, certains sont obligatoires quel que soit le type de traitement (le fichier de coordonnées et le fichier de traduction d'antenne / récepteur), d'autres sont nécessaires avec certaines stratégies (fichier de lignes de base).
- 7) Préparer le panneau de sessions,
- 8) Lancer le calcul de la campagne avec le PCF correspondant au traitement à réaliser pour la session concernée.

L'automatisation comporte deux parties distinctes :

Le BPE, cette étape est un début d'automatisation, elle permet d'éviter à l'utilisateur de saisir les options ce qui permet de gagner du temps et d'éviter les erreurs de saisie. Cela permet également à un utilisateur ne connaissant pas le paramétrage des différents programmes de réaliser un calcul.

L'autre partie de l'automatisation est constituée d'outils facilitant la préparation des fichiers concernant les stations et du panneau de session, d'une interface sommaire permettant de choisir un type de calcul plus expressif qu'un nom de PCF limité à 8 caractères et de programmes facilitant le traitement.

4.2.1.1. Les difficultés rencontrées

Plusieurs problèmes se sont posés lors de l'automatisation.

4.2.1.1.1. La récupération des fichiers nécessaires au traitement.

La récupération des fichiers nécessaires au traitement est longue et nécessite de connaître la date des observations dans plusieurs formats : année, jour dans l'année pour récupérer les observations GPS de stations du RGP et semaine, jour dans la semaine pour les éphémérides. Il est nécessaire de choisir le fichier des paramètres du pôle, le nom de ce fichier est donné dans le panneau DAT031___.PAN. en mode interactif, il suffit de changer le nom avant de commencer le traitement. Avec le BPE, le nom du fichier doit être changé dans tous les répertoires d'options du PCF concerné.

4.2.1.1.2. Le nom de la campagne et sa création

Pour chaque programme de traitement, le premier champ à remplir est le nom de la campagne. Dans le cas où le traitement est associé au nom d'une campagne, ce champ peut être rempli lors de l'édition des panneaux. Par contre, lorsque l'on veut utiliser un traitement quelle que soit la campagne, il est nécessaire de remplir le champ avant chaque traitement.

En mode interactif, la création de la campagne est la première étape du traitement avec le Berne.

4.2.1.1.3. La création des fichiers concernant les stations

La création des différents fichiers concernant les stations nécessite de respecter un formatage particulier pour chaque fichier. Le non-respect de ce formatage entraîne de nombreuses erreurs dans le traitement, il constitue même un des principaux cas d'échec du traitement. De plus, cette étape est assez lourde et fastidieuse. Dans le cas où la configuration du réseau est prédéterminée, elle peut être automatisée.

4.2.1.1.4. La mise à jour des coordonnées

Le BPE a été conçu pour réaliser le traitement de réseaux permanents. En mode automatique, la mise à jour des coordonnées à l'issue de chaque traitement est soit réalisée pour toutes les stations, soit pour aucune. Dans le cas où l'on dispose de coordonnées approchées suffisamment bonnes, le traitement ne pose aucun problème. Par contre, lorsque l'on veut mettre à jour les coordonnées d'une partie des stations, cela nécessite quelques adaptations.

4.2.1.1.5. La création des fichiers au format Berne

Le programme RXOBV3 transforme tous les fichiers au format RINEX contenus dans le répertoire RAW de la campagne en fichiers au format Berne. Il est courant de placer dans le répertoire RAW tous les fichiers à calculer. Dans le cas où on traite ces fichiers en plusieurs fois, certains fichiers sont dans le répertoire RAW alors qu'ils ne doivent être pas utilisés dans le traitement. Afin de ne pas traiter des fichiers inutilement, il serait préférable de ne traiter que les fichiers des stations concernées par le calcul.

4.2.1.1.6. Le programme MAUPRP

Dans le programme MAUPRP, un champ permet de fixer les coordonnées d'un point connu, le programme peut se charger de fixer ce point automatiquement. Cependant, lorsqu'on ne dispose pas de coordonnées approchées suffisamment bonnes pour tous les points, il est préférable de choisir le point fixé. Or le nom du point change d'un calcul à l'autre, il ne peut donc être choisi définitivement.

4.2.1.1.7. Le panneau de session

Le panneau de session n'est pas créé automatiquement par le BPE. il doit être édité à la main avant le calcul.

4.2.1.2. Les solutions apportées

4.2.1.2.1. Récupération des fichiers nécessaires au traitement

Afin de faciliter la récupération des différents fichiers nécessaires au traitement, plusieurs outils ont été développés afin de récupérer les fichiers généraux du Berne, les éphémérides, les observations des stations du RGP, les fichiers de navigation par ftp sur un serveur de l'IGN où ils sont stockés et de les décompresser si nécessaire. La présentation de l'interface est présentée en annexe.

Afin de pouvoir utiliser indifféremment le fichier BULLETA_ERP ou le fichier C04_2002.ERP, le nom du fichier choisi dans les calculs est POLE.ERP et le fichier du pôle que l'on désire utiliser doit être renommé.

4.2.1.2.2. La campagne

Afin de pouvoir changer de nom de campagne, dans chaque script, le nom de la campagne est affecté à une variable de trois caractères du panneau DAT151__.PAN. Dans chaque panneau où le nom de la campagne est utilisé, on emploie cette variable. L'utilisation de cette variable si elle permet de changer le nom de la campagne, limite ce dernier à 3 caractères.

La création d'une nouvelle campagne nécessite d'utiliser le Berne en mode interactif, cette étape n'a pas pu être automatisée.

4.2.1.2.3. Automatisation de la création des fichiers concernant les stations

L'automatisation des calculs nécessite la création d'un fichier texte, que l'on appellera dorénavant fichier de la campagne, contenant les stations, un marqueur (une lettre) permettant de définir le type de la station et les coordonnées des points lorsqu'il sont connus. Le type de la station indique si la station est connue en coordonnées et si elle est fixée lors du calcul. Un code différent a été utilisé pour le nivellement par GPS et pour les autres calculs. Ces codes seront présentés ultérieurement. Ce fichier est utilisé pour créer les différents fichiers concernant les stations. Il permet également de définir quelle sont les stations dont les coordonnées doivent être mises à jour à l'issue des différents programmes de traitement. Il permet d'avoir la liste des stations dont les fichiers doivent être traités dans RXOBV3 et de choisir la station qui sera fixée dans MAUPRP.

A partir du fichier de la campagne, plusieurs fichiers sont créés :

- Deux fichiers de coordonnées (*.crd) respectant le format du Berne : un fichier de coordonnées mis à jour au long du traitement et un fichier contenant les coordonnées initiales de la campagne.
- Un fichier contenant la liste des stations du fichier de la campagne. Son extension est *.rxo. Ce fichier est utilisé par le script, qui lance le programme RXOBV3, pour chaque station du fichier de la campagne, le programme vérifie que le fichier d'observation au format RINEX est bien situé dans le dossier RAW de la campagne et lance le programme RXOBV3 pour ce fichier. Ce fichier n'est pas un fichier du Berne, il a été créé pour les besoins de l'automatisation.
- Un fichier contenant la première station dont les coordonnées ont été fixées pour le traitement. Cette station est la première du fichier ayant un marqueur indiquant que cette station est fixée pour le calcul. Ce fichier, dont l'extension est *.mau, sert à définir dans MAUPRP la station dont on fixe les coordonnées pour le programme. De même, que le fichier *.rxo, ce fichier a été créé pour l'automatisation.
- Un fichier contenant les lignes de base. La définition des lignes de base dépend des marqueurs des stations dans le fichier de la campagne. Ce fichier est un fichier Berne, il est créé automatiquement à partir du fichier de la campagne et du type de traitement choisi.
- Un fichier *.fix. Ce fichier de même que le fichier *.bsl est créé automatiquement à partir du fichier de la campagne et du type de traitement choisi.
- Un fichier utilisé par le programme permettant de mettre à jour les coordonnées après chaque calcul. Ce fichier nommé majcrd.txt donne la liste des stations pour lesquelles on dispose de coordonnées a priori et celle pour lesquelles on ne dispose pas de coordonnées approchées.

4.2.1.2.4. Mise à jour des coordonnées

Nous l'avons vu les coordonnées peuvent être mises à jour par plusieurs programmes de traitement. Cependant, cette mise à jour est faite pour toutes les coordonnées, or seules les coordonnées des stations dont nous ne connaissons pas de valeurs approchées doivent être mises à jour. Pour pallier à ce problème, un programme a été développé, il permet à partir d'un fichier de coordonnées initial, d'un fichier de coordonnées mis à jour par les programmes de traitement et du fichier nommé majcrd.txt de créer un nouveau fichier de coordonnées.

Lorsqu'on dispose de coordonnées approchées, le fichier de coordonnées n'a pas besoin et ne doit pas être mis à jour. Dans ce cas, les coordonnées contenues dans le nouveau fichier proviennent du fichier de coordonnées initial. Par contre, lorsqu'on ne dispose pas de coordonnées a priori, il est nécessaire de mettre à jour les coordonnées lors des traitements afin d'en améliorer la précision. Dans ce cas, les coordonnées contenues dans le nouveau fichier sont lues dans le fichier de coordonnées mis à jour lors de traitement.

Le programme de mise à jour des coordonnées est appelé à la fin des scripts des programmes RXOBV3, CODSPP, MAUPRP et GPSEST. Le fichier de coordonnées mis à jour tout au long du traitement est remplacé par le nouveau fichier issu du programme de mise à jour.

4.2.1.2.5. La création du panneau de session

La préparation du panneau de session est réalisée par l'automatisme juste avant le lancement du calcul.

Dans le cadre de l'automatisation, une session dure une journée (0h – 24h TU) et son nom est composé du jour dans l'année suivi d'un zéro. La définition des sessions de cette manière peut éventuellement poser un problème pour des observations de courte durée à cheval sur 2 jours et lorsque des fichiers horaires du RGP sont utilisés. En effet, pour les fichiers horaires du RGP, le zéro qui suit le jour dans l'année est remplacé par une lettre correspondant à la tranche horaire concernée. Pour l'instant, afin d'utiliser ces fichiers il est nécessaire de les renommer.

4.2.1.3. Les points à améliorer

La création automatique de la campagne, sans avoir à utiliser le système de Menu, est un premier point à améliorer. Je ne me suis pas attardé à ce problème car il n'est pas vital pour l'automatisation des calculs.

La vérification de l'en-tête des fichiers RINEX avec la possibilité de modifier les valeurs erronées à l'aide d'un programme serait très utile.

4.2.2. Les calculs de rattachement et le statique rapide

Afin de répondre aux besoins, différents traitements ont été définis, ils sont présentés dans le schéma suivant :

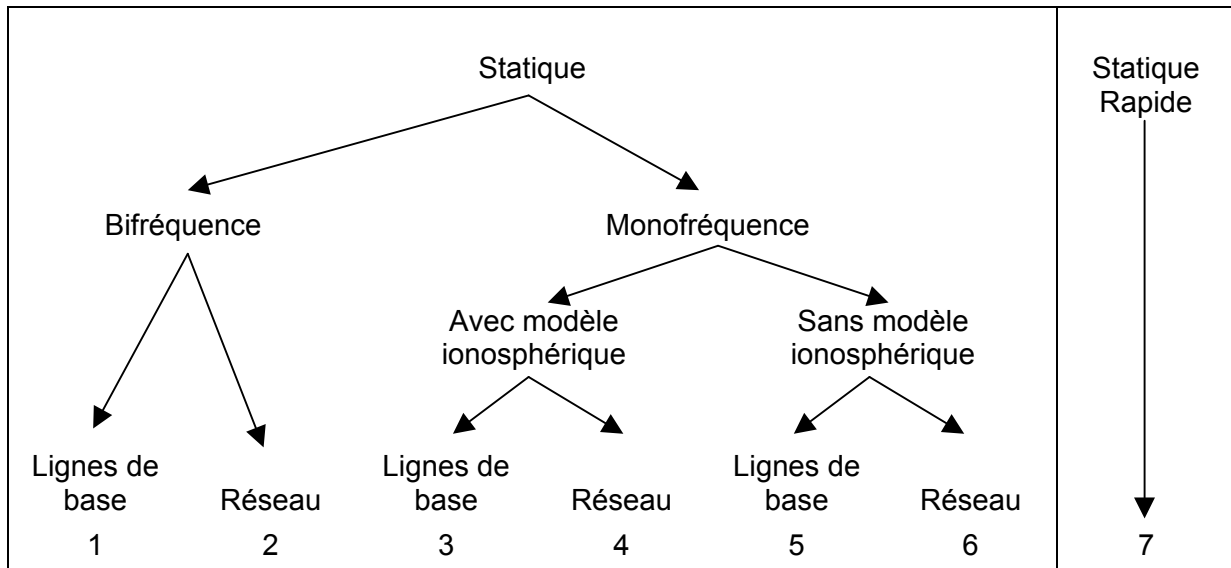


Schéma récapitulatif des traitements implémentés

On obtient donc 7 traitements différents. Pour chacun de ces traitements, il est possible d'utiliser des éphémérides précises ou des éphémérides radiodiffusées, le nombre de PCF à préparer afin d'automatiser ces traitements est de 14. Les traitements définis seront certainement amenés à évoluer. On s'est limité à ces traitements afin de ne pas trop compliquer les choix.

4.2.2.1. Le fichier de la campagne

Nous avons déjà vu ce fichier plus haut, les marqueurs employés dans le cas des calculs de rattachement et de statique rapide sont F, C et I.

- Les stations marquées d'un F (Fixes) sont les stations fixées dont les coordonnées sont connues précisément.
- Les stations marquées d'un C (Connues) sont les stations que l'on cherche à calculer et pour lesquelles on dispose de coordonnées approchées assez bonnes.
- Les stations marquées d'un I (Inconnues) sont les stations que l'on cherche à calculer mais pour lesquelles on ne dispose pas de coordonnées approchées.

Le fichier contient une ligne par station. Pour chaque station, on trouve le nom de la station (4 lettres) suivi d'un espace, puis la lettre (F, I ou C) suivie d'un espace, puis les coordonnées géocentriques X suivie d'un espace, puis Y suivie d'un espace et enfin Z.

```
MLVL F 4201577.2221 189859.8600 4779064.5809
STA1 C 4201792.2946 177945.2411 4779286.6840
STA2 I
STA3 I
```

Exemple de fichier de la campagne :

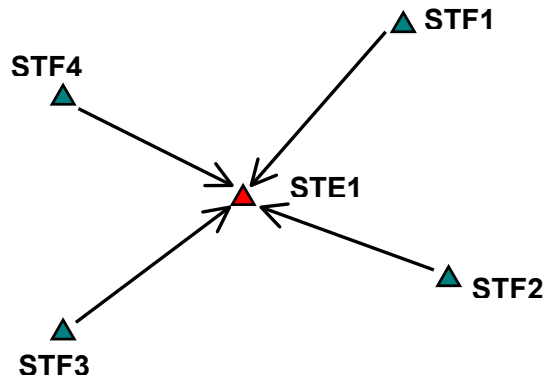
4.2.2.2. Les différentes configurations choisies

4.2.2.2.1. Calcul en réseau

L'option "calcul en réseau" permet de calculer un réseau de points. Les coordonnées des points F sont fortement contraintes dans le calcul. Les points I et C sont estimés lors du calcul. Les lignes de bases sont définies par le logiciel de Berne suivant la stratégie automatique de création des lignes de base "SHORTEST". Dans cette stratégie, pour N stations, les N-1 lignes de base indépendantes les plus courtes sont créées.

4.2.2.2.2. Lignes de base

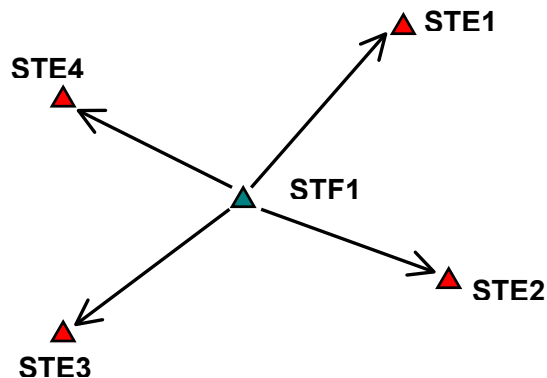
Le calcul "lignes de base" permet de calculer un point inconnu à partir de plusieurs points connus. Les coordonnées des points F sont fortement contraintes dans le calcul. Les points I et C sont estimés lors du calcul. Les lignes de bases calculées partent des points connus vers le point inconnu. Un fichier de lignes de base est créé, ce fichier contient les lignes de base utilisées pour le calcul. La définition des lignes de base ne tient compte que des stations du fichier de la campagne. Le programme ne vérifie pas s'il y a bien des observations en commun entre les 2 stations d'une ligne de base.



STE1 est une station dont il faut estimer les coordonnées (I ou C) et STF1, STF2, STF3 et STF4 sont des stations dont les coordonnées sont fortement contraintes lors du calcul (F).

4.2.2.2.3. Statique Rapide

Le calcul "statique rapide" permet de calculer plusieurs points inconnus à partir d'un point connu. Les coordonnées des points F sont fixées dans le calcul. Les points I et C sont estimés lors du calcul. Les lignes de bases calculées partent du point connu vers les points inconnus.



STF1 est une station dont les coordonnées sont fixées lors du calcul (F). STE1, STE2, STE3 et STE4 sont des stations dont les coordonnées sont estimées lors du calcul (C ou I).

4.2.3. Le nivellement par GPS

Dans le cadre du nivellement par GPS, on cherche à obtenir une bonne précision sur la composante verticale. En conséquence, l'utilisation du logiciel de Berne pour les calculs GPS et son automatisation offre un grand intérêt pour réaliser ces traitements.

4.2.3.1. Principe du nivellement par GPS

Depuis 1996, l'implantation du réseau de nivellement de la France est considérée comme achevée. Il faut désormais l'entretenir. Cette tâche incombe au département des réseaux de nivellement du SGN. Il a été décidé de mettre au point une nouvelle politique pour y parvenir, en utilisant des mesures GPS associées à du nivellement direct. Ainsi, le N.G.F.(Nivellement Général de la France) sera mis à disposition et maintenu sous forme

d'un groupement de trois repères de nivellement (RN) situés dans les agglomérations permettant d'assurer une couverture suffisante en terme de surface et de population. Désormais, un utilisateur pourra déterminer une altitude soit en mesurant une différence de hauteur ellipsoïdale entre un récepteur GPS pivot rattaché au NGF et un autre récepteur GPS stationné sur le point dont il cherche l'altitude après correction via la grille RAF 98, soit de manière plus traditionnelle en se rattachant à un RN par nivellement direct. [De Marolles, 2001]

La grille RAF 98 (Référence d'altitude Française Duquenne H.1998) permet de passer d'une hauteur ellipsoïdale RGF93 à une altitude NGF-IGN69.

4.2.3.1.1. Les observations

La technique utilisée est le GPS en mode statique géodésique. Un point pivot situé à proximité de plusieurs villages à équiper est rattaché à un point du RBF (Réseau de Base Français). Les points situés à l'intérieur des villages appelés points village sont rattachés au pivot. Enfin dans chaque village, le point village est rattaché par nivellement direct aux RN. Les observations de trois stations RGP situées à plus d'une centaine de kilomètres du pivot sont également utilisées pour le calcul (cf figure d'observation d'un pivot).

Les conditions d'observations sont récapitulées dans le tableau suivant.

Observations		Durée d'observation	Longueur de la base
entre	et		
Les points du RGP	Le Pivot	1 à 3 jours	Plus d'une centaine de kilomètres
Un point du RBF	Le Pivot	2 heures	Jusqu'à 3 km
Le Pivot	le point situé à proximité d'un groupement de RN	2 heures	Jusqu'à 15 km

Tableau : Durée des sessions et longueurs des lignes de base des différents rattachements.

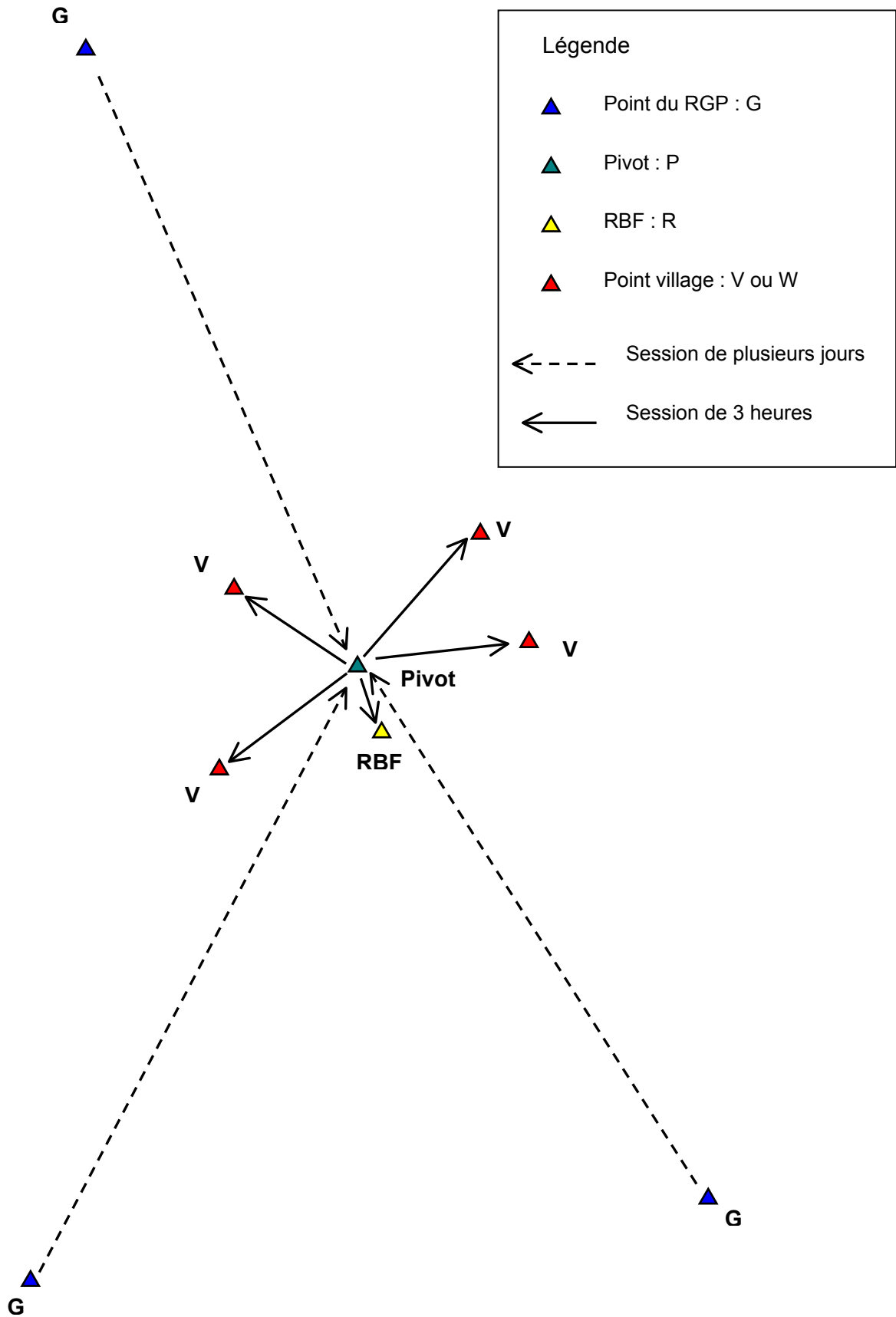
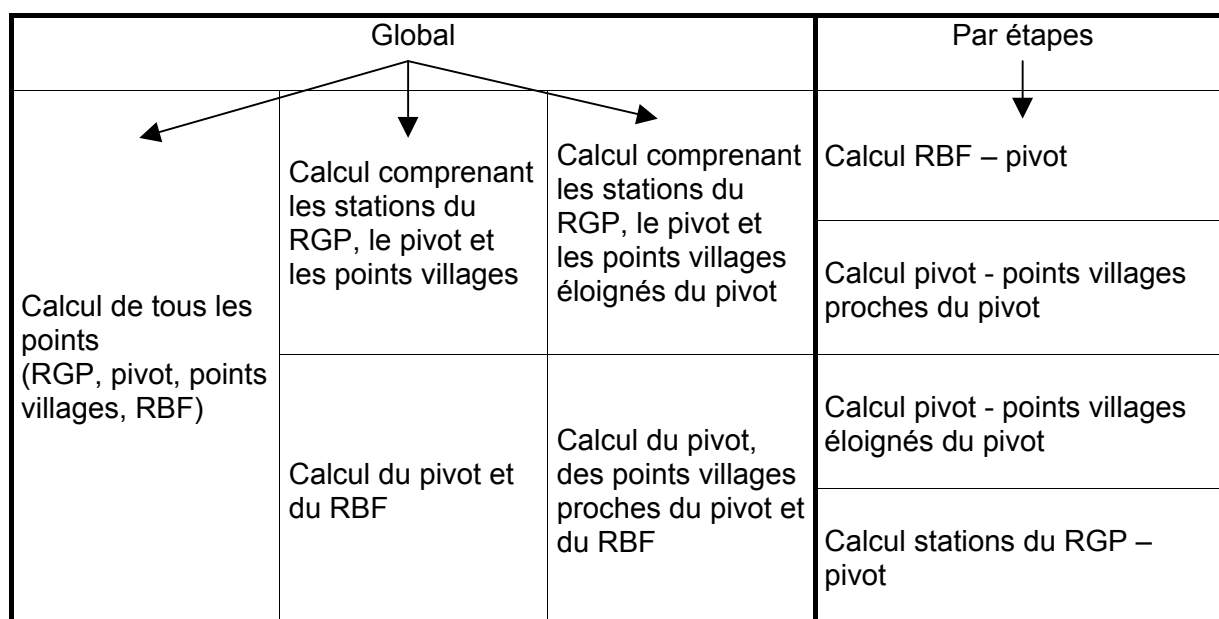


Figure d'observation d'un pivot

4.2.3.1.2. La méthode de calcul

La méthode de calcul des observations GPS n'est pas encore définitivement arrêtée. Différentes stratégies sont envisagées. Deux pistes se dégagent, l'une à partir d'un calcul global de l'ensemble des points, l'autre en séparant le traitement de chaque type de points. Autour de ces 2 stratégies, différentes variantes ont été implémentées pour comparer les résultats obtenus. Ces différentes stratégies peuvent se résumer par le schéma suivant.



4.2.3.2. Implémentation des calculs

Deux programmes différents ont été implémentés. Dans un premier programme, l'idée est de calculer tous les points (RGP, RBF, pivot, points villages) dans un même passage. Dans le deuxième programme, on calcule le pivot à partir du RBF, puis les points villages sont calculés à partir du pivot et enfin les coordonnées du pivot sont contrôlées à partir du RBF.

4.2.3.2.1. Le fichier de la campagne

De même, que pour les autres calculs automatisés, le programme concernant le nivellement par GPS utilise un fichier contenant le nom des stations, un marqueur et éventuellement les coordonnées. Les marqueurs utilisés sont propre au nivellement par GPS.

Voici un tableau récapitulant pour chaque type de points le marqueur utilisé :

Le type de point	La lettre du fichier Nom_Projet.txt
Stations permanentes RGP	G
RBF	R
Pivot	P
Points villages éloignés du pivot	V
Points villages proches du pivot	W

A partir de ce fichier, les fichiers concernant les stations sont créés automatiquement en fonction du calcul.

4.2.3.2.2. Calcul par étape d'une mission

Le programme propose les types de calculs suivant :

```
choix du type de calcul

    rbf --> pivot                               : 1
    pivot --> points villages proches du pivot  : 2
    pivot --> points villages éloignés du pivot : 3
    rgp --> pivot                               : 4

choix :
```

Le premier calcul concerne la ligne de base RBF – pivot, les coordonnées du RBF sont fixées et sont en RGF93.

On obtient à la suite de ce calcul des coordonnées en RGF93 pour le pivot. On peut alors calculer les lignes de base entre le pivot et les points villages. Enfin, le pivot est recalculé à partir des stations du RGP.

4.2.3.2.3. Calcul global d'une mission

Le programme propose les types de calculs suivants :

```
choix du type de calcul

    calcul global RGP - pivot - RBF - points villages : 1
    calcul global RGP - pivot - points villages       : 2
    calcul global RGP - pivot - points villages loin  : 3

    calcul pivot - RBF                               : 4
    calcul pivot - RBF - points villages proches     : 5

choix :
```

Le premier calcul donne un résultat global qui intègre dans un même calcul les points du RGP situés à plus d'une centaine de kilomètres, le point RBF, le point pivot et les points villages. Dans ce cas, un point du RGP est fortement contraint et les coordonnées des autres points sont estimés. Les coordonnées des points sont en ITRF2000 afin de bénéficier de la précision des éphémérides précises.

Afin de vérifier si la ligne de base entre le pivot et le RBF, qui est très courte (moins de 3 km), influe sur le résultat final, les calculs 2 et 4 ont été implémentés, ils permettent de calculer la ligne de base pivot RBF à part et avec une stratégie de calcul plus adaptée à la longueur de la ligne de base. Pour la même raison, dans le cas où les points villages sont très proches du pivot, les calculs 3 et 5 ont été implémentés afin de pouvoir calculer le RBF et les points villages proches du pivot à partir du pivot.

4.2.3.2.4. Conclusion

Afin de passer de la hauteur ellipsoïdale à l'altitude du point (hauteur au-dessus du géoïde), on utilise la grille RAF 98. Cette grille est donnée en RGF93. Il est donc nécessaire de connaître les points village en RGF93 afin d'accéder à leur altitude et ensuite à l'altitude des RN. Cependant, si on veut bénéficier de la précision des éphémérides précises, le calcul doit être fait en ITRF2000. C'est pourquoi la méthode par étape n'est pas satisfaisante. En effet, dans ce cas, les calculs sont réalisés en coordonnées RGF93. Dans la méthode "global", tous les calculs sont faits en ITRF2000 et les coordonnées sont transformées à la fin en RGF93 afin de pouvoir appliquer la grille RAF98.

Les calculs de la méthode "global" présentent également l'avantage d'intégrer de longues lignes de base dans le calcul, ce qui permet de décorréler les paramètres troposphériques estimés.

Le problème de cette méthode est quelle mélange des lignes de base qui ne devrait pas être traitées de la même façon, hors l'adaptation du type de calcul à la longueur de la ligne de base n'est pas possible (pour l'instant) avec le BPE. C'est pourquoi la méthode "global" a fait l'objet de trois variantes afin d'adapter le traitement à la longueur de la ligne de base.

5. CONCLUSIONS

Désormais, le BPE fonctionne sous Windows et deux programmes permettent de traiter plusieurs types de calculs. Un premier programme permet de réaliser les traitements de rattachement et de statique rapide. Le deuxième programme concerne le nivellement par GPS, il s'agit en réalité de deux programmes.

Ces programmes ne sont pas définitifs et sont amenés à être finalisés et à évoluer afin de répondre à de nouveaux besoins en matière de traitement. Ils pourront aussi servir de base pour le développement d'autres types de traitements.

Plusieurs points peuvent être améliorés :

- ❑ La récupération des fichiers RINEX et de leur vérification peuvent être intégrée à l'automatisation.
- ❑ Certaines stratégies abandonnées par manque de temps ou pour simplifier l'interface utilisateur devront probablement être ajoutées.
- ❑ Pour le calcul de longues lignes de base, l'utilisation d'un fichier de modélisation de la surcharge océanique sera nécessaire et des PCF devront être créés afin de répondre à ce besoin.

Enfin, d'un point de vue personnel, ce stage a été très enrichissant.

- ❑ Afin d'automatiser les calculs, j'ai étudié à la fois les différentes options de calcul proposés par le logiciel de Berne et le fonctionnement du logiciel. Cela m'a permis d'appréhender la complexité d'un tel logiciel et de me familiariser avec un langage de programmation tel que le FORTRAN.
- ❑ Le développement des outils a été fait en Perl. Ce langage de programmation que je ne connaissais pas offre de nombreuses possibilités et sa souplesse en fait un outil précieux.
- ❑ Ce stage m'a également permis d'approfondir mes connaissances sur le GPS en particulier et la géodésie en général.

Bibliographie

Beutler G., Brockmann E., Dach R., Fridez P., Gurtner W., Hugentobler U., Johnson J., Mervart L., Rothacher M., Schaer S., Springer T., Weber R. (Fevrier 2001) "Bernese GPS Software version 4.2" (Astronomical Institute University of Berne)

Bock Y. (1996) "Reference system" in Lecture Notes in Earth Sciences 60. Ed. Kleusberg A. Teunissen P. p. 3-36

Botton S., Duquenne F., Egels Y., Even M., Willis P. (1996) "GPS Localisation et Navigation", HERMES

De Marolles L. (2001) "Entretien du Nivellement Général de la France par GPS". (Mémoire présenté en vue d'obtenir le diplôme d'ingénieur ESGT)

Duquenne F., Duquenne H., (2000-2001) Géodésie géométrique, Géodésie physique, Techniques terrestres de la géodésie, Techniques spatiales de la géodésie, Système de référence et de coordonnées. (Cours dispensés à l'E.S.G.T.).

Frei E., Beutler G (1990), Rapid Static Positioning based on the Fast Ambiguity Resolution Approach "FARA" : Theory and First Results, Manuscripta Geodaetica

Garayt B., Gattacceca T. (2001) "Cours d'Introduction au Logiciel "Bernese GPS Software Version 4.2""

Gurtner W. (2002) RINEX : "The Receiver Independent Exchange Format Version 2.1", disponible sur le site <ftp://ftp.unibe.ch/aiub/papers/rinex210.txt>

Mervart L. (1995) "Ambiguity Resolution Techniques in Geodetic and Geodynamic Applications of the Global Positioning System" PhD Thesis, disponible sur le site <ftp://ftp.unibe.ch/aiub/papers/lmdiss.pdf>

Nicolon P. (Aout 2001) « Mise en place d'un réseau GPS permanent. Description des outils de gestion du réseau développés dans le cadre de l'expérience pilote RGP. » Mémoire d'examen professionnel pour l'accès au grade d'ITGCE.

Rothacher, Springer, Schaer, Beutler (1997) "Processing Strategies for Regional GPS Networks", Paper presented at IAG General Assembly, Rio, BR, 1997, disponible sur le site <ftp://ftp.unibe.ch/aiub/papers/riopap97.ps>

Rothacher, Schaer, Mervart, Beutler (1995) "Determination of Antenna Phase Center Variations using GPS Data", disponible sur le site <ftp://ftp.unibe.ch/aiub/papers/antpap95.ps>

Rothacher (1999) "Basics of GPS Data Processing", GPS Tutorial presented at the International Symposium on GPS, Oct. 1999, Tsukuba, Japan, disponible sur le site <ftp://ftp.unibe.ch/aiub/papers/gpstut99.ps>

Schaer S. (Mars 1999) "Mapping and Predicting the Earth's Ionosphere Using the Global Positioning System" Ph.D. Thesis, March 1999, disponible sur le site <ftp://ftp.unibe.ch/aiub/papers/ionodiss.pdf>

Panneaux d'aide du logiciel "Bernese GPS Software version 4.2" (Astronomical Institute University of Berne)

Sites web :

<ftp://ftp.unibe.ch/aiub/papers/>

<http://hpiers.obspm.fr>

<http://igscb.jpl.nasa.gov/>

<http://lareq.ensg.ign.fr>

<http://maia.usno.navy.mil>

<http://www.aiub.unibe.ch>

<http://www.esqt.cnam.fr>

<http://www.iers.org>

<http://www.ign.fr>

<http://www.ngs.noaa.gov/ANTCAL/>

Résumé

Dans le cadre de ses activités, le Service de Géodésie et de Nivellement (SGN) de l'Institut Géographique National (IGN) traite des campagnes de mesures GPS de grandes précisions.

Les logiciels des constructeurs négligent certains postes d'erreurs résiduels ce qui limite la précision des résultats. Ces erreurs sont en revanche correctement prises en compte par les logiciels scientifiques. En contrepartie, l'utilisation de ces derniers n'est pas aisée.

Le SGN utilise déjà couramment le logiciel scientifique de l'université de Berne "Bernese GPS Software Version 4.2" pour la réalisation de la référence nationale au travers du Réseau GPS Permanent (RGP) et souhaite bénéficier de ses avantages pour les travaux de production courante.

Le logiciel de l'université de Berne a été développé pour le traitement de réseaux permanents, la détermination d'orbites, l'estimation des paramètres de rotation du pôle, le calcul de modèle ionosphérique ou encore la calibration d'antennes et ses larges possibilités en font un logiciel complexe à utiliser.

Le traitement d'une campagne GPS est constitué de plusieurs phases correspondant chacune à un programme du logiciel. Chacun de ces programmes propose un grand nombre d'options. En effet, en fonction du type de calcul (longueur de la ligne de base, durée des observations...), le paramétrage des panneaux diffère. Le choix d'une option ou d'une autre peut influencer sur le résultat de manière non négligeable.

La difficulté d'emploi du logiciel a contraint le SGN à vouloir automatiser au maximum son utilisation. Pour cela, on dispose du Bernese Processing Engine (BPE) qui permet d'automatiser les procédures de calcul. La stratégie de calcul étant prédéfinie par l'utilisateur, de la transformation des fichiers RINEX jusqu'au résultat final, le BPE lance les différentes tâches les unes après les autres.

L'objet du stage est l'automatisation du logiciel de Berne en s'appuyant sur le BPE afin de se rapprocher dans la mesure du possible de la simplicité d'utilisation d'un logiciel commercial tout en bénéficiant des avantages d'un logiciel scientifique.

Afin d'automatiser les calculs, il est nécessaire définir les différents traitements à réaliser et de les préparer. Une première partie de mon stage a consisté au choix des options de calculs. Afin, de déterminer les stratégies de traitement optimales, des tests ont

été réalisés, en faisant varier certaines des options et en comparant les résultats obtenus, j'ai cherché à définir les stratégies de calculs les plus sûres et donnant les meilleurs résultats. Ils concernaient tout particulièrement la valeur de l'angle de coupure, la stratégie de résolution des ambiguïtés, la façon d'estimer l'effet de la réfraction troposphérique et le nombre d'étapes lors de l'estimation des différents paramètres (coordonnées, ambiguïtés,...).

Une fois les stratégies de calcul définies, afin d'améliorer l'automatisation apportée par le BPE, il a fallu développer :

- Des outils facilitant la préparation de fichiers tels que le fichier de coordonnées ou le fichier permettant de créer les lignes de base.
- Une interface permettant de choisir le type de traitement.
- Des outils permettant de pallier à certains manques du BPE.

Finalement, on aboutit à trois programmes permettant d'automatiser les calculs.

Un premier programme concerne des calculs de rattachement en statique et des calculs en statique rapide, il est destiné à répondre aux besoins du travail topographique courant. Voici un schéma récapitulatif, des différents types de traitement qu'il propose.

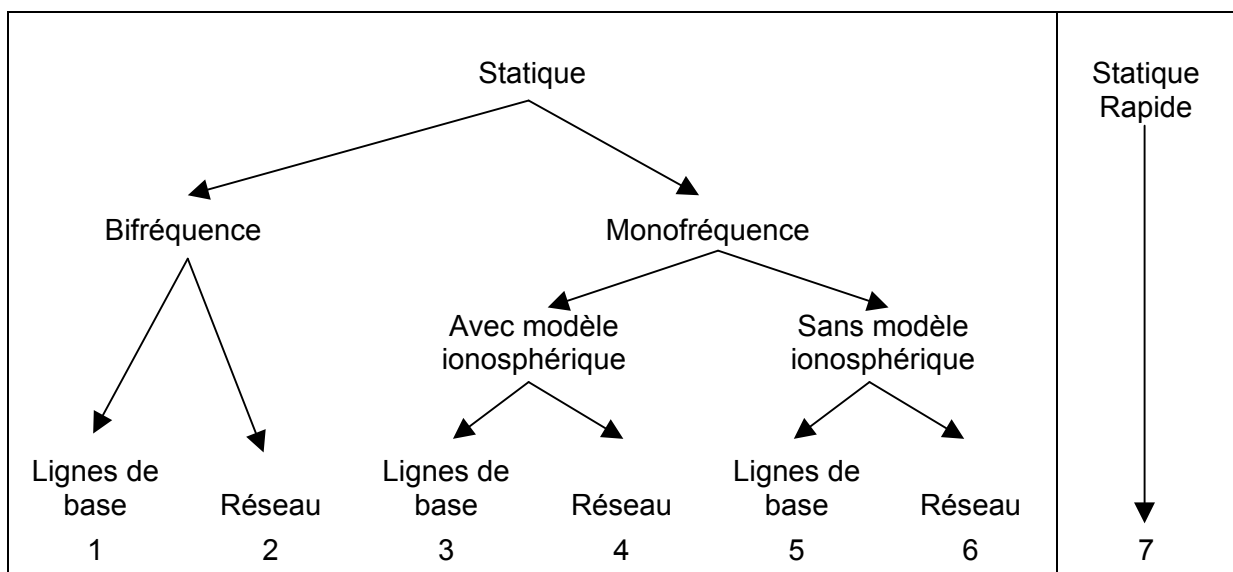


Schéma récapitulatif des traitements implémentés

Les deux autres programmes sont destinés au nivellement par GPS. Le nivellement par GPS est une méthode associant des mesures GPS à du nivellement direct utilisée désormais pour entretenir le réseau de nivellement de la France. La stratégie de calculs des observations GPS n'étant pas encore complètement arrêtée, deux grandes pistes se dégagent. Autour de ces deux stratégies, différentes variantes ont été implémentées afin d'en comparer les résultats et de choisir la stratégie définitive.

Ces programmes sont actuellement en phase de recette afin d'être mis en production au sein du SGN.

Annexes

Annexe 1 : Le panneau des variables DAT151__.PAN et le panneau de session DAT132__.PAN

Annexe 2 : Présentation de différents fichiers Berne

Annexe 3 : Présentation de différents fichiers du BPE

Annexe 4 : Interface du programme d'importation des données et de fichiers du Berne

Annexe 5 : Interface du programme des calculs de rattachement et rapide statique

Annexe 6 : Interface du programme de calcul du nivellement par GPS "Global"

Annexe 7 : Interface du programme de calcul du nivellement par GPS "par étapes"

Annexe 8 : Les fichiers créés par les programmes d'exploitation des résultats

Annexe 2

Présentation de différents fichiers Berne

Extrait du fichier TRN utilisé dans les traitements

RECEIVER AND ANTENNA TYPE TRANS. TABLE		COMPLET		29-MAY-02 18:03	
OLD RECEIV. TYPE	OLD ANTENNA TYPE	NEW RECEIV. TYPE	NEW ANTENNA TYPE		
*	SLR	RCVR	SLR		
*	TR GEOD L1/L2 GP	RCVR	TR GEOD L1/L2 GP		
*	M-PULSE L1/L2 SU	RCVR	M-PULSE L1/L2 SU		
*	L1/L2 PERMANENT	RCVR	L1/L2 PERMANENT		
*	DORNE MARGOLIN T	RCVR	DORNE MARGOLIN T		
*	EXT L1/L2 KIN (S	RCVR	EXT L1/L2 KIN (S		
*	4000SLD L1/L2	RCVR	4000SLD L1/L2		
*	DORNE MARGOLIN T	RCVR	DORNE MARGOLIN T		
*	DORNE MARGOLIN B	RCVR	DORNE MARGOLIN B		
*	GEODETIC L1/L2 L	RCVR	GEODETIC L1/L2 L		
*	700228	RCVR	700228		
*	700228 NOTCH	RCVR	700228 NOTCH		
*	700228 RINGS	RCVR	700228 RINGS		
*	700578	RCVR	700578		
*	700718	RCVR	700718		
*	ASH700718B_M	RCVR	ASH700718B_M		

Exemple de fichier de coordonnées *.CRD.

1350: SOLUTION FINALE		17-JUL-02 14:24			
LOCAL GEODETIC DATUM: WGS - 84		EPOCH: 2002-05-15 7:45:15			
NUM	STATION NAME	X (M)	Y (M)	Z (M)	FLAG
1	LYON	4440101.9973	378033.7834	4548283.8927	P
2	VFCH	4331862.4317	130055.4028	4664121.8083	P
3	BSCN	4314139.2923	452626.2213	4660703.9910	
4	TRYS	4241041.8960	297441.4250	4738832.1189	P
6	PSEM	4358791.0590	294270.1291	4632084.5363	P
7	VILA	4351706.7958	301326.6770	4638282.5462	
8	LARO	4357477.6123	305053.7782	4632643.3203	
9	REMI	4362939.1326	291031.6416	4628182.8309	
10	LIMA	4349316.6983	284223.6439	4641320.1854	P
11	MTAR	4357838.3399	285736.1768	4633260.0156	P

Exemple de fichier de lignes de base BSL

```
PSEM      LYON
PSEM      VFCH
PSEM      BSCN
PSEM      TRYS
PSEM      RSEM
PSEM      VILA
PSEM      LARO
PSEM      REMI
PSEM      LIMA
PSEM      MTAR
```

Exemple de fichier FIX

```
1 LYON      0.0001 0.0001 0.0001
2 VFCH
```

Dans ce fichier, les coordonnées de la station de LYON sont fortement contraintes avec un sigma a priori de 0.0001 m et les coordonnées de la station VFCH sont fixées.

Le fichier SIG

Il respecte le format du fichier FIX.

Exemple de fichier HTR

```
CODE: ANTENNA HEIGHT TRANSLATION TABLE                                9-APR-92
-----
STATION NAME      RINEX FILE      BERNESE      (99.9999: TAKE VALUE FROM FILE)
*****
*****          ** .****          ** .****
HERS 13212M007      0.0000          0.2005
KOSG 13504M003      0.1050          0.1050
MADR 13407S011      0.0000          0.0000
MATE 12734M007      0.1350          0.2820
TROM 10302M003      2.4734          2.4734
WETT 14201M010      0.0000          0.0000
```

Exemple de fichier STN

CODE: SITE NAME TRANSLATION TABLE		6-APR-93 12:12

NUM	OLD STATION NAME	NEW STATION NAME
111	*NALL*	NYAL 10317M001
111	*NY*	NYAL 10317M001
121	*BRU*	BRUS 13101M004
122	*MAS1*	MASP 31303M001B
123	*BOR1*	BOR1 12205M002
151	*GRAZ*	GRAZ 11001M002
152	*HERS*	HERS 13212M007
153	*KOSG*	KOSG 13504M003
153	*KOOT*	KOSG 13504M003
154	*DSS60*	MADR 13407S012

Annexe 3

Présentation de différents fichiers du BPE

Exemple de PCF : PCF de la stratégie 1 du programme de nivellement par GPS "Global"

```
#
# Procedure Control File (PCF)
# All comment lines start with a #
# Comments: Example PCF to be used to process the example campaign DOCU42_1
#
#
#
PID SCRIPT    OPT_DIR  CAMPAIGN CPU      P WAIT FOR....
3** 8***** 8***** 8***** 8***** 1 3** 3** 3** 3** 3** 3** 3** 3** 3**
001 RXOBV3mj  GLOB0101      any      1
003 PRETAB   GLOB0103      any      1 001
004 ORBGEN   GLOB0104      any      1 003
005 CODSPpmj GLOB0105      any      1 004
006 SNGDIF   GLOB0106      any      1 005
007 MAUPRpmj GLOB0107      any      1 006
010 GPSESTmj GLOB0110      any      1 007
020 GPSESTB  GLOB0120      any      1 010
030 GPSESTT  GLOB0130      any      1 020
#
# additional parameters required for PID's
#
PID USER      PASSWORD PARAM1  PARAM2  PARAM3  PARAM4  PARAM5  PARAM6
3** 12***** 8***** 8***** 8***** 8***** 8***** 8*****
#
# That's it
#
VARIABLE DESCRIPTION                                DEFAULT          LENGTH
8***** 40***** 16***** 2*
```

Exemple du script GPSESTmj permettant de lancer le programme de traitement GPSEST et de mettre à jour les coordonnées à l'issue du traitement. (Ce script est utilisé dans le PCF ci-dessus.)

```
rem
rem GPSEST: + mise à jour des coordonnées
rem
@echo off
set EXIT_W_ERR=false
rem DOS batch file written by bds
rem -----
rem
rem Shell Variables: (set when running the header file)
rem -----
rem
rem YEAR      : Year of the session to be processed (2 digit)
rem SESSION  : Session number (4 characters)
rem CAMPAIGN : Campaign name
rem CAMP_PTH : Campaign path
rem CAMP_DRV : Drive letter for campain (i.e. P)
rem OPT_DIR  : Directory for panels
rem PID      : Process identification number (3 digits)
rem SUB_PID  : Subprocess id (3 digits)
rem PRT_FILE : Protocol file name including path
rem SCRIPT   : Name of script
rem TASKID   : Task id of script, usually 00
rem PRIORITY : Priority of the script
rem CPU      : CPU the script is running on
rem DAYYEAR  : Julian day of the year
```

```

rem DAY      : Day of the Month
rem MONTH    : Month, 1=JAN, 12=DEC
rem GPSWEEK  : GPS week
rem DAYWEEK  : Day of the week, 0=SUN, 6=SAT
rem V_X      : X Variable in DAT151__.PAN
rem V_O      : O Variable in DAT151__.PAN
rem V_Z      : Z Variable in DAT151__.PAN
rem V_PLUS   : Plus variable in DAT151__.PAN
rem V_MINUS  : Minus variable in DAT151__.PAN
rem V_x      : User variable
rem PARAMx   : Script specific parameter, x is 1 thru 9
rem U        : Directory path to U:
rem
rem Execute BPE Header File (passed as first parameter)
rem -----
rem
rem   call %1 %2 %3 %4 %5 %6 %7 %8
rem   set ERRSTAT=OK
rem   if errorlevel 1 set ERRSTAT=ERR
rem
rem Start Menu System in Non-Interactive Mode
rem -----
rem   call X:\SCRIPT\BEG_MENU %1 %2 %3 %4 %5 %6 %7 %8
rem   set ERRSTAT=OK
rem   if errorlevel 1 set ERRSTAT=ERR
rem
rem Set Variables in DAT151__.PAN
rem -----
rem   call X:\SCRIPT\SET_SESS %1 %2 %3 %4 %5 %6 %7 %8
rem   set ERRSTAT=OK
rem   if errorlevel 1 set ERRSTAT=ERR
rem
rem Nom de la campagne
rem -----
rem   set pp1=U:\PAN\DAT151__.PAN
rem   set pp2=SESSION3
rem   set pp3=%CAMPAIGN%
rem   call X:\SCRIPT\PUTKEYWE
rem   set ERRSTAT=OK
rem   if errorlevel 1 set ERRSTAT=ERR
rem
rem
rem Run Program GPSEST
rem -----
rem   set PGMNAM=GPSEST
rem   call X:\SCRIPT\RUN_PGMS %1 %2 %3 %4 %5 %6 %7 %8
rem   set ERRSTAT=OK
rem   if errorlevel 1 set ERRSTAT=ERR
rem
rem
rem mise à jour des coordonnées
rem -----
rem   perl %cheminbern%\outils\prog\calcul\majcrd.pl -c %CAMPAIGN% -f majcrd.txt
rem
rem
rem Clean up Menu Files (Delete IAMODE File)
rem -----
rem   call X:\SCRIPT\END_MENU %1 %2 %3 %4 %5 %6 %7 %8
rem   set ERRSTAT=OK
rem   if errorlevel 1 set ERRSTAT=ERR
rem
rem Execute BPE Tail File
rem -----
rem   call X:\SCRIPT\DO_TAIL %1 %2 %3 %4 %5 %6 %7 %8
rem   set ERRSTAT=OK
rem   if errorlevel 1 set ERRSTAT=ERR
rem
rem
rem end of batch file
:lbl9999

```

Exemple de fichier de protocole

```
PROTOCOL FILE FOR BPE SCRIPT
-----
SCRIPT NAME       : MAUPRPMJ
YEAR             : 02
SESSION          : 1340
CAMPAIGN         : SEM
CAMPAIGN PATH    : P:\
OPTION DIRECTORY : GLOB0207
PROCESS ID       : 007
SUB PROCESS ID   : 007
CPU              : CPU1
PATH TO WORK AREA : C:\BERN42\BPETEMP\AUTO0001

DATE      TIME      STA PROGRAM MESSAGE
-----
17-JUL-02 13:59:29 MSG MAUPRPMJ PROCESS STARTED

OBSERVATION FILE LIST : P:\SEM\DATPAN\OBSLIST.PHS
NUMBER OF FILES ADDED : 7
NUMBER OF FILES REMOVED: 0

17-JUL-02 13:59:30 WAR AUTO_UPD MENU PROGRAM ENDED : WITH WARNING MESSAGE
17-JUL-02 13:59:33 MSG MAUPRP  PROGRAM STARTED

### SR UPDTRP: EPOCH,SVN,SVNREF,O-C TOO BIG:    12 23 22          29.654
### SR UPDTRP: EPOCH,SVN,SVNREF,O-C TOO BIG:    13 23 22          29.693

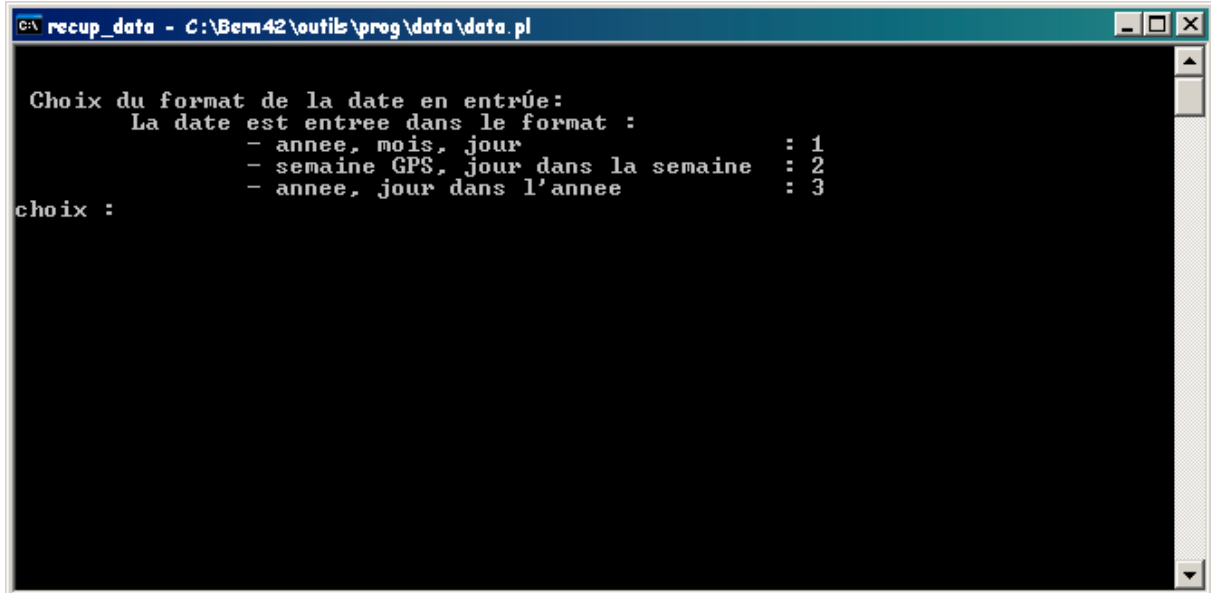
17-JUL-02 14:00:11 WAR MAUPRP  PROGRAM ENDED - WITH WARNING MESSAGE
17-JUL-02 14:00:13 MSG MPRXTR  PROGRAM STARTED
17-JUL-02 14:00:15 MSG MPRXTR  PROGRAM ENDED
17-JUL-02 14:00:18 MSG MAUPRPMJ PROCESS ENDED
-----
```

Ce fichier de protocole concerne le script MAUPRPMJ utilisé dans le PCF présenté ci-dessus.

Annexe 4

Interface du programme d'importation des données et de fichiers du Berne

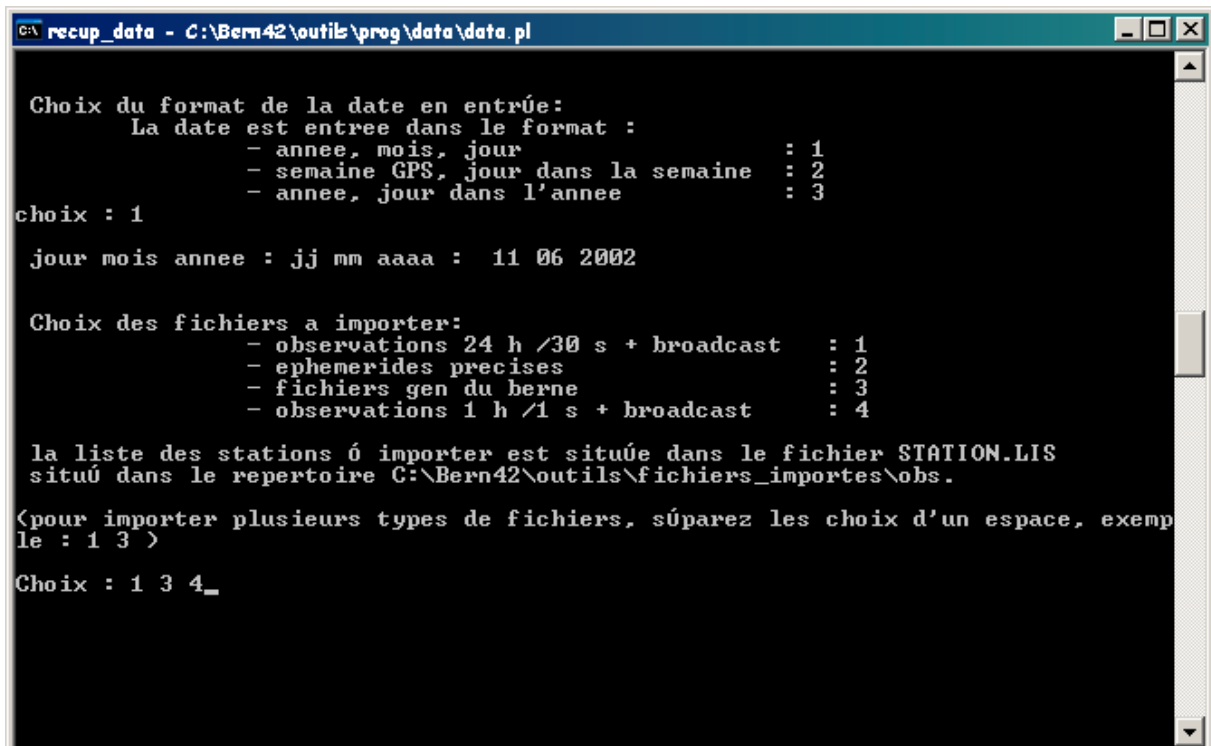
Le programme offre la possibilité d'entrer la date de plusieurs façons :



```
CA\ recup_data - C:\Bern42\outils\prog\data\data.pl

Choix du format de la date en entrée:
  La date est entrée dans le format :
    - annee, mois, jour           : 1
    - semaine GPS, jour dans la semaine : 2
    - annee, jour dans l'année     : 3
choix :
```

Une fois la date entrée, il propose d'importer différents fichiers, il est possible d'importer plusieurs types de fichiers en même temps :



```
CA\ recup_data - C:\Bern42\outils\prog\data\data.pl

Choix du format de la date en entrée:
  La date est entrée dans le format :
    - annee, mois, jour           : 1
    - semaine GPS, jour dans la semaine : 2
    - annee, jour dans l'année     : 3
choix : 1

jour mois annee : jj mm aaaa : 11 06 2002

Choix des fichiers à importer:
  - observations 24 h /30 s + broadcast : 1
  - ephemerides precises                : 2
  - fichiers gen du berne                : 3
  - observations 1 h /1 s + broadcast    : 4

la liste des stations à importer est située dans le fichier STATION.LIS
situé dans le repertoire C:\Bern42\outils\fichiers_importes\obs.

(pour importer plusieurs types de fichiers, séparez les choix d'un espace, exemp
le : 1 3 )
Choix : 1 3 4_
```

Lorsqu'on importe des fichiers d'observations horaires des stations du RGP, il faut choisir les heures à récupérer.

```
C:\recup_data - C:\Bern42\outils\prog\data\data.pl

Choix de l'heure des observations:
  Observation de :
    - 00h a 01h      : a
    - 01h a 02h      : b
    - 02h a 03h      : c
    - 03h a 04h      : d
    - 04h a 05h      : e
    - 05h a 06h      : f
    - 06h a 07h      : g
    - 07h a 08h      : h
    - 08h a 09h      : i
    - 09h a 10h      : j
    - 10h a 11h      : k
    - 11h a 12h      : l
    - 12h a 13h      : m
    - 13h a 14h      : n
    - 14h a 15h      : o
    - 15h a 16h      : p
    - 16h a 17h      : q
    - 17h a 18h      : r
    - 18h a 19h      : s
    - 19h a 20h      : t
    - 20h a 21h      : u
    - 21h a 22h      : v
    - 22h a 23h      : w
    - 23h a 24h      : x
<pour importer plusieurs fichiers, súparez les choix d'un espace, exemple : b c
e >
choix : A B C_
```

Et enfin, un message d'avertissement indique les répertoires dans lesquels les fichiers ont été copiés.

```
C:\recup_data - C:\Bern42\outils\prog\data\data.pl

- 23h a 24h      : x
<pour importer plusieurs fichiers, súparez les choix d'un espace, exemple : b c
e >
choix : A B C

  les fichiers d'observations importes sont situes
dans le repertoire C:\Bern42\outils\fichiers_importes\obs

  les ephemerides precises importees sont situees
dans le repertoire C:\Bern42\outils\fichiers_importes\eph

  les fichiers GEN importes sont situes
dans le repertoire C:\Bern42\outils\fichiers_importes\gen

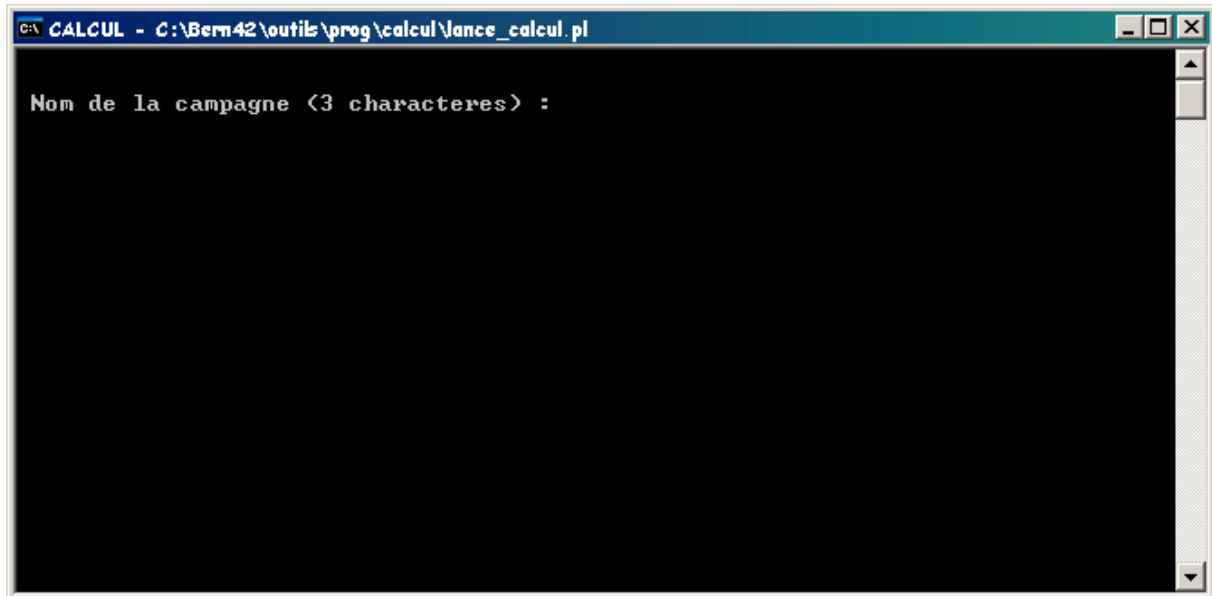
  recommencer un autre calcul:
    - oui      : 1
    - non      : 2
choix : _
```

Un programme permet de décompresser les fichiers importés automatiquement dans le repertoire où ils ont été copiés.

Annexe 5

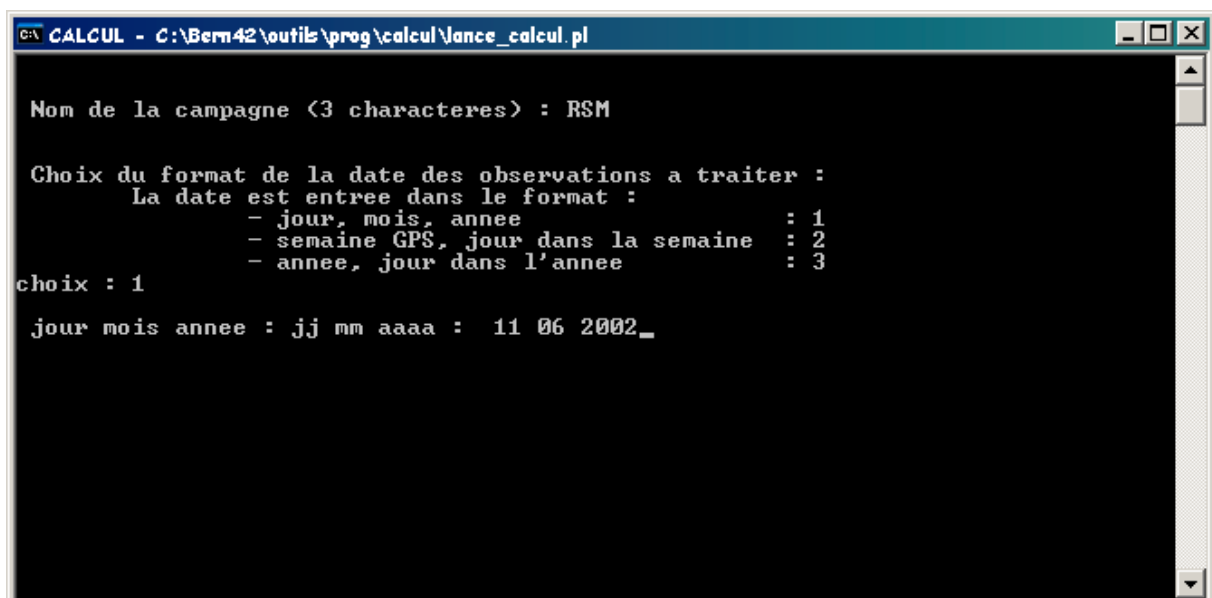
Interface du programme des calculs de rattachement et rapide statique

Le programme commence par demander le nom de la campagne à traiter. Tous les fichiers nécessaires au traitement doivent être à leur place dans les différents répertoires.



```
GA\ CALCUL - C:\Bern42\outils\prog\calcul\ance_calcul.pl
Nom de la campagne <3 caracteres> :
```

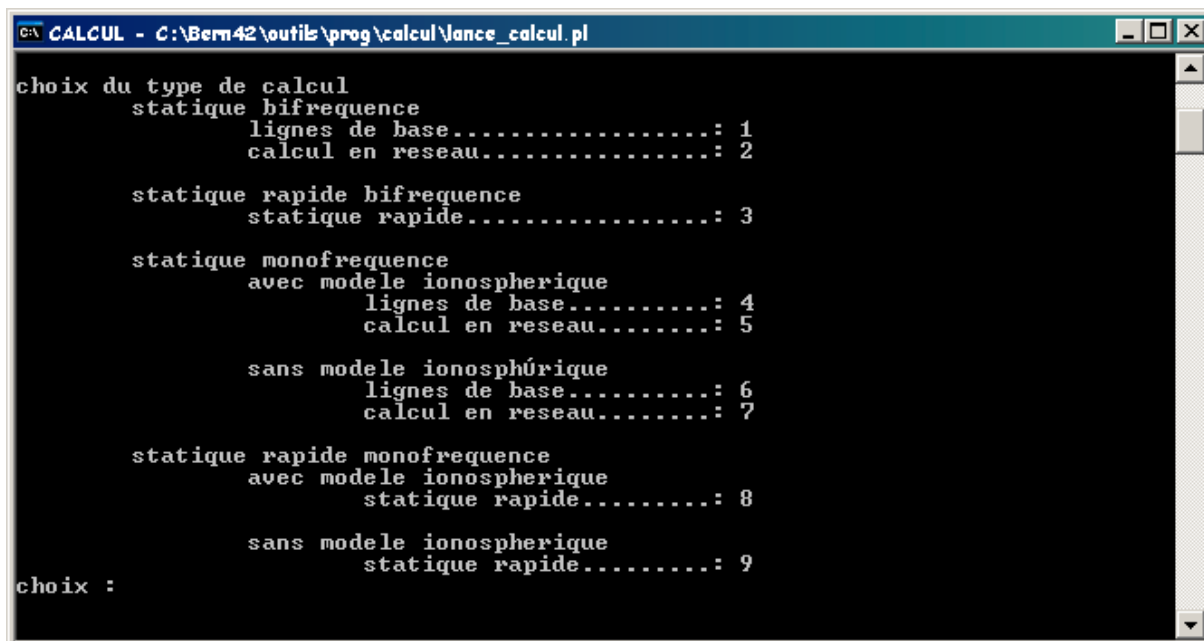
La date peut être entrée dans différents formats.



```
GA\ CALCUL - C:\Bern42\outils\prog\calcul\ance_calcul.pl
Nom de la campagne <3 caracteres> : RSM

Choix du format de la date des observations a traiter :
  La date est entree dans le format :
    - jour, mois, annee           : 1
    - semaine GPS, jour dans la semaine : 2
    - annee, jour dans l'annee     : 3
choix : 1
jour mois annee : jj mm aaaa : 11 06 2002_
```

L'étape suivante concerne le choix du traitement :



```
C:\ Bern42\outils\prog\calcul\ance_calcul.pl
choix du type de calcul
  statique bifrequence
    lignes de base.....: 1
    calcul en reseau.....: 2

  statique rapide bifrequence
    statique rapide.....: 3

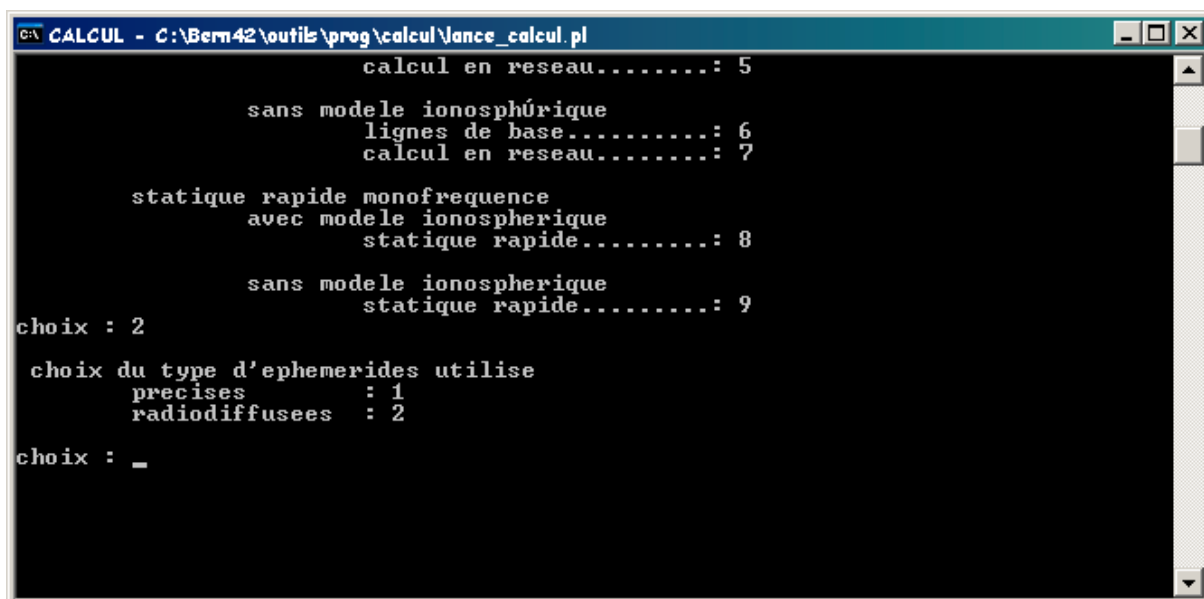
  statique monofrequence
    avec modele ionospherique
      lignes de base.....: 4
      calcul en reseau.....: 5

    sans modele ionosphérique
      lignes de base.....: 6
      calcul en reseau.....: 7

  statique rapide monofrequence
    avec modele ionospherique
      statique rapide.....: 8

    sans modele ionospherique
      statique rapide.....: 9
choix :
```

et enfin, il faut choisir le type d'éphémérides employé.



```
C:\ Bern42\outils\prog\calcul\ance_calcul.pl
    calcul en reseau.....: 5

  sans modele ionosphérique
    lignes de base.....: 6
    calcul en reseau.....: 7

  statique rapide monofrequence
    avec modele ionospherique
      statique rapide.....: 8

    sans modele ionospherique
      statique rapide.....: 9
choix : 2

  choix du type d'ephemerides utilise
    precises      : 1
    radiodiffusees : 2
choix : _
```

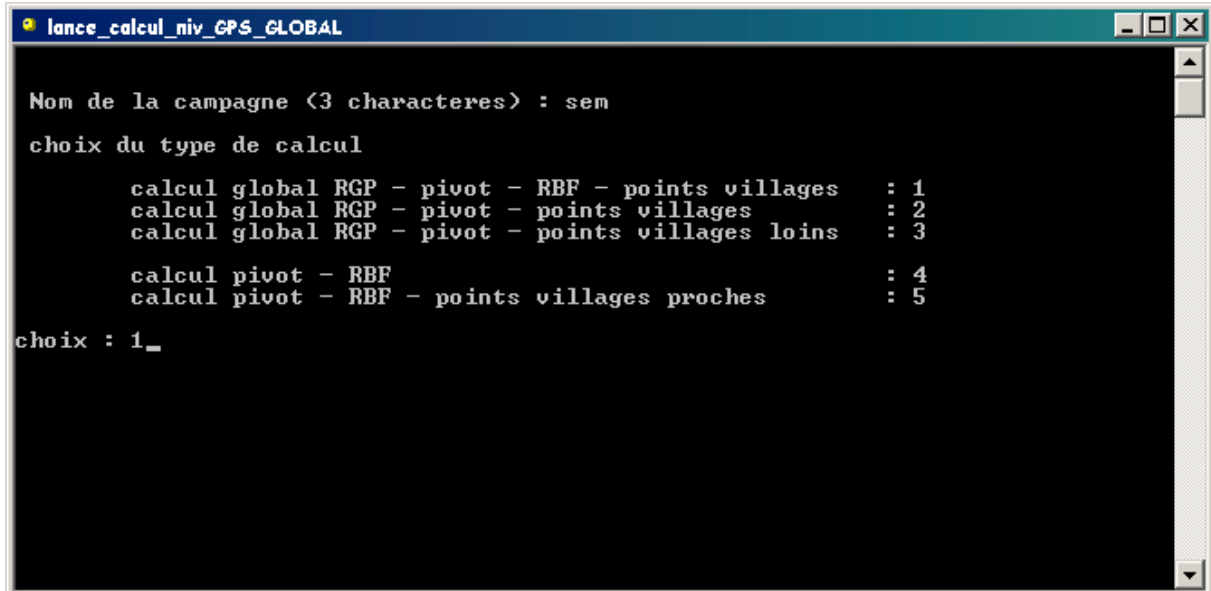
Lorsque tous ces choix ont été faits, le programme crée les différents fichiers concernant les stations et lance le calcul.

Un mauvais remplissage du fichier de la campagne contenant les stations, leur marqueur et éventuellement leurs coordonnées entraîne un message d'erreur.

Annexe 6

Interface du programme de calcul du nivellement par GPS "Global"

Il faut commencer par choisir la campagne, puis le type de calcul.



```
lance_calcul_niv_GPS_GLOBAL

Nom de la campagne <3 caracteres> : sem

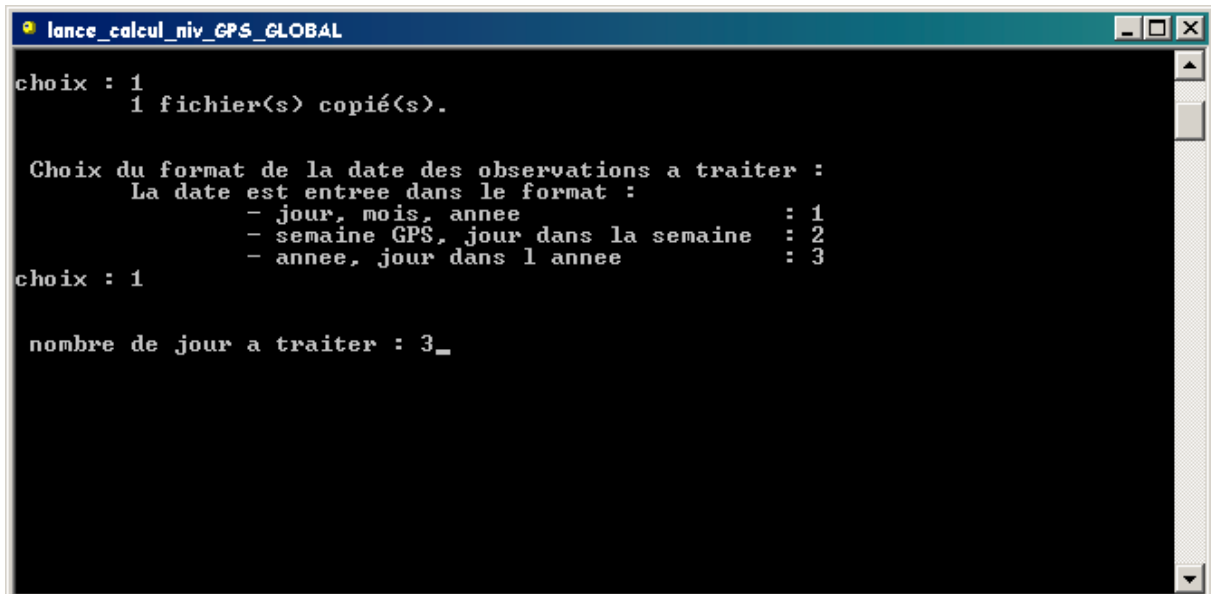
choix du type de calcul

calcul global RGP - pivot - RBF - points villages : 1
calcul global RGP - pivot - points villages       : 2
calcul global RGP - pivot - points villages loins  : 3

calcul pivot - RBF                                : 4
calcul pivot - RBF - points villages proches      : 5

choix : 1_
```

Ensuite vient le choix du format de la date et le nombre de jours à traiter.



```
lance_calcul_niv_GPS_GLOBAL

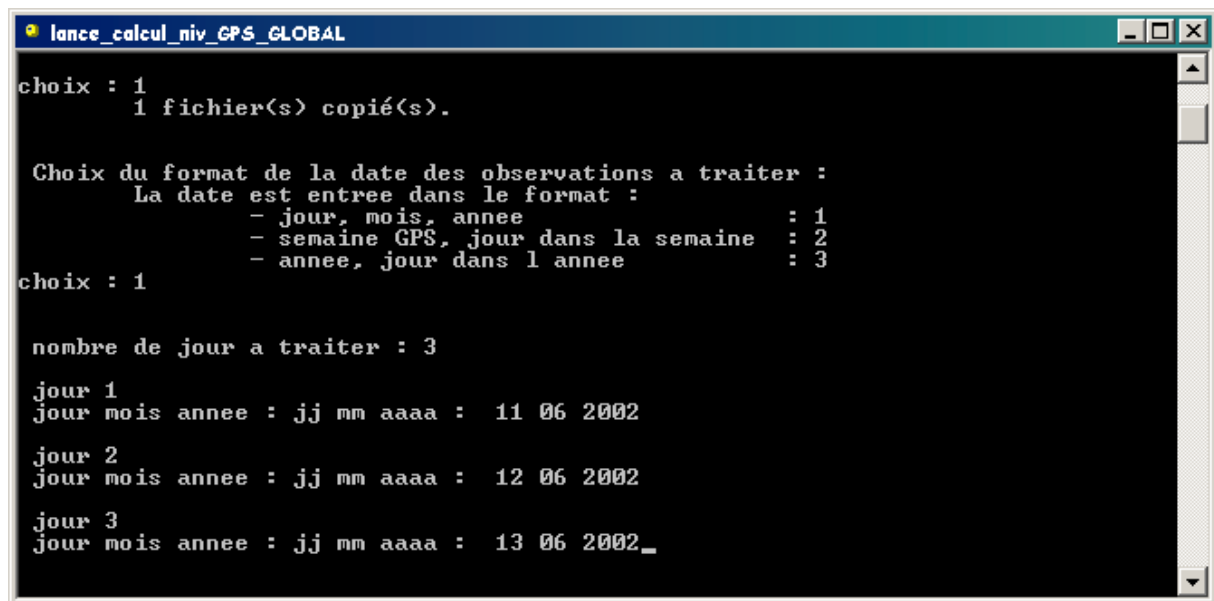
choix : 1
1 fichier(s) copié(s).

Choix du format de la date des observations a traiter :
La date est entree dans le format :
- jour, mois, annee : 1
- semaine GPS, jour dans la semaine : 2
- annee, jour dans 1 annee : 3

choix : 1

nombre de jour a traiter : 3_
```

Enfin, il faut entrer la date des jours à calculer.



```
lance_calcul_niv_GPS_GLOBAL
choix : 1
    1 fichier(s) copié(s).

Choix du format de la date des observations a traiter :
    La date est entree dans le format :
        - jour, mois, annee           : 1
        - semaine GPS, jour dans la semaine : 2
        - annee, jour dans 1 annee     : 3
choix : 1

nombre de jour a traiter : 3

jour 1
jour mois annee : jj mm aaaa : 11 06 2002

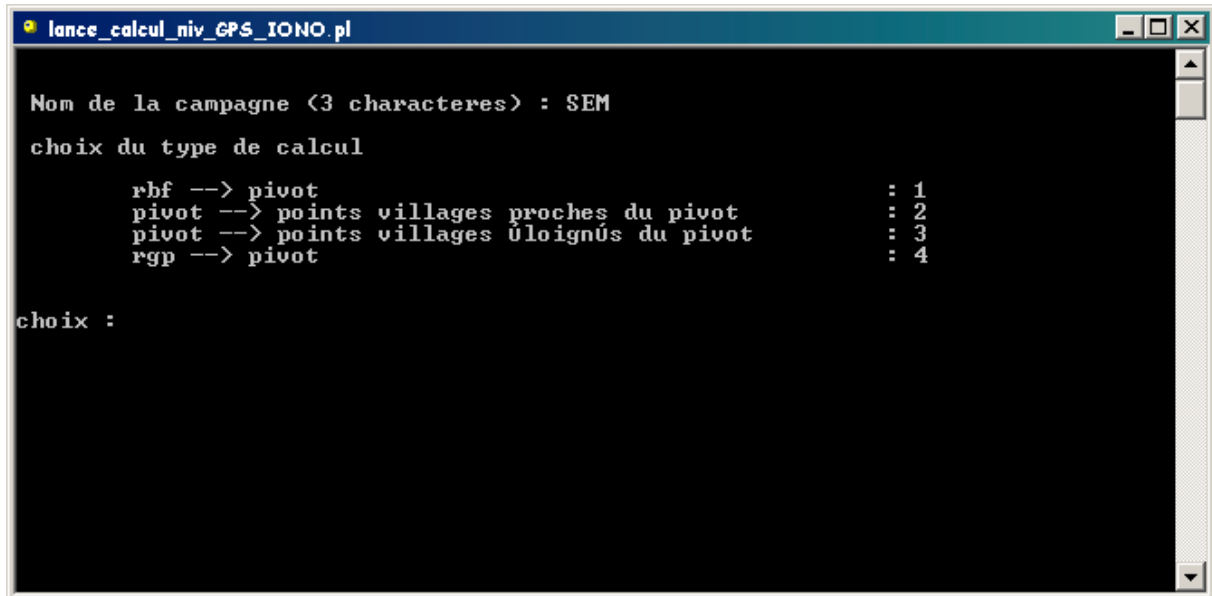
jour 2
jour mois annee : jj mm aaaa : 12 06 2002

jour 3
jour mois annee : jj mm aaaa : 13 06 2002_
```

Annexe 7

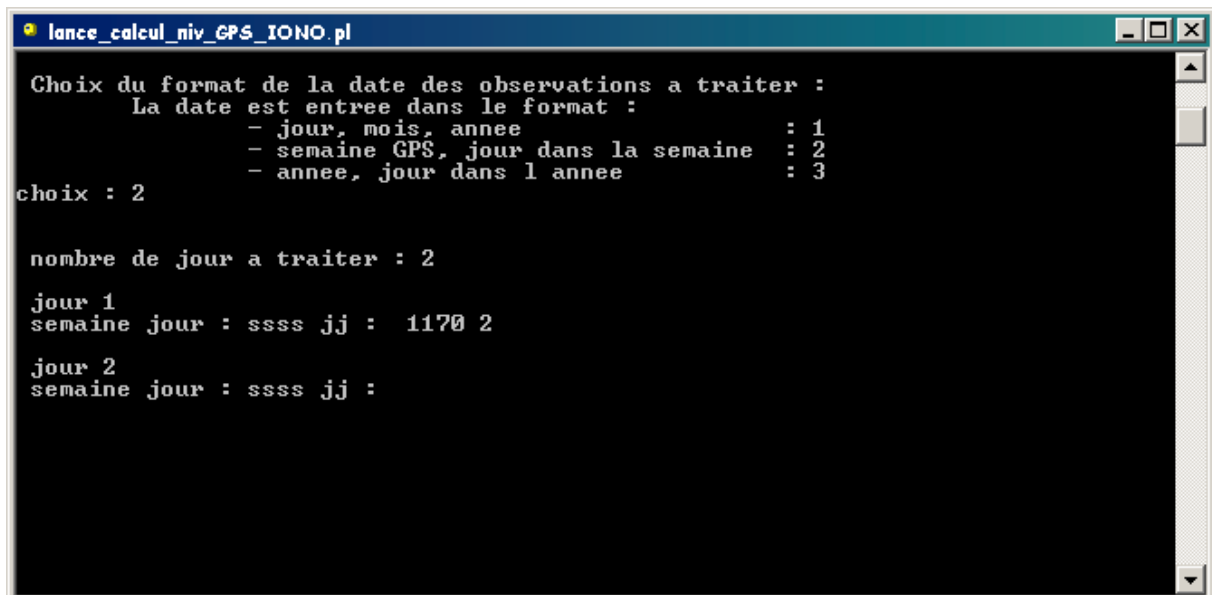
Interface du programme de calcul du nivellement par GPS "par étapes"

Le programme commence par le choix de la campagne puis le type de calcul.



```
lance_calcul_niv_GPS_IONO.pl
Nom de la campagne <3 caracteres> : SEM
choix du type de calcul
    rbf --> pivot : 1
    pivot --> points villages proches du pivot : 2
    pivot --> points villages éloignés du pivot : 3
    rgp --> pivot : 4
choix :
```

De même que pour les autres programmes, il faut choisir le format de la date, le nombre de jours concernés par le calcul, et la date de tous les jours. Ici, la date est entrée sous la forme semaine GPS et jour dans la semaine.



```
lance_calcul_niv_GPS_IONO.pl
Choix du format de la date des observations a traiter :
    La date est entree dans le format :
        - jour, mois, annee : 1
        - semaine GPS, jour dans la semaine : 2
        - annee, jour dans 1 annee : 3
choix : 2

nombre de jour a traiter : 2

jour 1
semaine jour : ssss jj : 1170 2

jour 2
semaine jour : ssss jj :
```

Annexe 8

Les fichiers créés par les programmes d'exploitation des résultats

Fichier contenant les RMS des parties 1 et 2, le nombre d'ambiguïtés avant et après résolution et le pourcentage d'ambiguïtés résolues. Ce fichier contient les résultats extraits pour trois fichiers de sortie de GPSEST.

	RMS		Ambiguïtés		
	PART1	PART2	PART1	PART2	%resolues
PRSM_RBF.OUT	0.0016				
RMPSI1750.OUT	0.0010	0.0010	9	0	100.0
RSFSI1750.OUT	0.0020	0.0020	15	1	93.3

Fichier contenant les coordonnées cartésiennes et géographiques et la différence entre les coordonnées a priori et les coordonnées après calcul. La colonne Part indique la provenance des coordonnées, c'est à dire si les coordonnées viennent de la partie 1 (1) ou de la partie 2 (2) ou si elles ont été fixées (F).

	station	Part	X	Y	Z	H	LA	LO
PRSM_RBF.OUT	RSM1	1	4305239.9829	326612.1712	4679266.1001	331.0930	47 29 37.200599	4 20 18.130042
PRSM_RBF.OUT	RSM2	1	4306063.0251	326804.9818	4678542.6379	362.2197	47 29 1.436303	4 20 24.339218
PRSM_RBF.OUT	PSMR	1	4306139.6831	326937.9832	4678465.4357	363.7763	47 28 57.682564	4 20 30.396423
RMPSI1750.OUT	RSM2	F	4306063.0250	326804.9820	4678542.6380	362.2197	47 29 1.436306	4 20 24.339227
RMPSI1750.OUT	PSMR	2	4306139.6841	326937.9836	4678465.4372	363.7780	47 28 57.682571	4 20 30.396441
RSFSI1750.OUT	RSM1	F	4305239.9830	326612.1710	4679266.1000	331.0930	47 29 37.200595	4 20 18.130033
RSFSI1750.OUT	PSMR	2	4306139.6822	326937.9828	4678465.4344	363.7747	47 28 57.682557	4 20 30.396408

Pour des raisons de mise en page, le fichier a été coupé, en voici la suite :

dx	dY	dZ	dH	dLA	dLO
-0.0001	0.0002	0.0001	0.0000	0.0001	0.0002
0.0001	-0.0002	-0.0001	0.0000	-0.0001	-0.0002
-0.0009	-0.0001	-0.0010	-0.0013	0.0000	-0.0001
0.0001	0.0003	0.0005	0.0004	0.0003	0.0003
-0.0018	-0.0005	-0.0023	-0.0029	-0.0002	-0.0004

RESUME

Dans le cadre de ses activités, le Service de Géodésie et de Nivellement de l'Institut Géographique National effectue des campagnes de mesures GPS de grandes précisions. Les calculs effectués avec les logiciels des constructeurs n'étant pas satisfaisants, le SGN souhaite traiter ces données avec le logiciel scientifique de l'université de Berne "Bernese GPS Software 4.2". Ce logiciel complexe nécessite la définition d'un nombre important de paramètres. Afin de le rendre accessible à un maximum d'utilisateurs, il était nécessaire d'automatiser le processus de traitement en s'appuyant sur le module d'automatisation BPE (Bernese Processing Engine) du logiciel et de développer des outils annexes au logiciel.

Mots-clés : GPS, Bernese GPS Software 4.2, automatisation

ABSTRACT

As part of its activities, the Service de Géodésie et de Nivellement of the Institut Géographique National carries out high-accuracy GPS surveys. As the computations made with the manufacturers' softwares are far from being satisfactory, the SGN aims to process these data using the scientific software from Berne University "Bernese GPS Software 4.2". Yet, because of its complexity a large number of parameters are to be defined so as to make it easier for users. It was therefore necessary to automate processing using the software automation unit (BPE), and to develop accessory tools.

Key-word : GPS, Bernese GPS Software 4.2, automation