HAL
open science

Traitement de la campagne européenne de VLBI mobile 1989

Noamen Rebai

To cite this version:

Noamen Rebai. Traitement de la campagne européenne de VLBI mobile 1989. Astrophysique [astro-ph]. Observatoire de Paris, 1992. Français. NNT : . tel-02095455

HAL Id: tel-02095455

https://hal.science/tel-02095455v1

Submitted on 10 Apr 2019

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

THESE DE DOCTORAT
(OBSERVATOIRE DE PARIS)

EN

ASTRONOMIE FONDAMENTALE,
MECANIQUE CELESTE ET GEODESIE

présentée par:

Noamen REBAI

Sujet de la thèse :

- TRAITEMENT DE LA CAMPAGNE EUROPEENNE DE VLBI MOBILE 1989
- CONTRIBUTION A UN NOUVEAU RESEAU GEODESIQUE DE SURVEILLANCE GEODYNAMIQUE EUROPE-AFRIQUE AU NIVEAU DE LA MEDITERRANEE OCCIDENTALE

Soutenue à l'Institut Géographique National, le 30 Septembre 1992, devant le jury composé de :

Mme. Nicole CAPITAINE Astronome, Observatoire de Paris	Président
M. François BARLIER Astronome, OCA/CERGA	Directeur de Thèse
M. Chedly FEZZANI Conseiller à l'OSS, UNESCO	Rapporteur
M. Michel KASSER Professeur d'Université, CNAM	Rapporteur
Mme. Martine FEISSEL Astronome, Observatoire de Paris	Examinateur
M. Gérard PETIT Physicien, BIPM	Examinateur

OBSERVATOIRE DE PARIS - SECTION DE PARIS
6949

RESUME

Notre étude s'inscrit dans un axe de recherche expérimentale relatif à la surveillance géodynamique Europe-Afrique au niveau de la Méditerranée Occidentale par les techniques de la géodésie spatiale.

Dans une première partie nous avons traité la campagne européenne de VLBI mobile qui concerne six nouvelles stations en Europe de l'Ouest. Nous avons obtenu deux types de solutions:

- Une solution globale standard (VLBIM89). Les résultats obtenus montrent une double cohérence interne et externe, confirmée respectivement par les écart-types sur les coordonnées (inférieurs au cm sur les composantes horizontales et de 1 à 2 cm sur les composantes verticales) et par une étude comparative avec les solutions réalisées par d'autres organismes. Cette solution peut être donc incluse dans la solution ITRF, réalisation du système de référence international de l'IERS.

- Des solutions expérimentales relatives à deux applications : la détermination des paramètres de la rotation de la terre et l'étude de l'effet de charge de marées océaniques.

Dans la deuxième partie nous proposons un nouveau réseau géodésique dans la région de la Méditerranée Occidentale pour une meilleure surveillance des déformations globales (mouvement des plaques) et locales (seismes, volcans, ...). Les contraintes qui surgissent pour avoir le maximum d'information sur les déformations avec un faible coût nous incitent à disposer de deux réseaux :

- Un réseau d'appui à grande maille (300 à 2000 km) utilisant les techniques les plus précises pour ce type de maille : VLBI et SLR. Ce dernier nous permet de mesurer le mouvement relatif des plaques africaine et européenne. Deux stations au minimum sont nécessaires sur chaque plate-forme afin de pouvoir mesurer les rotations. Une itération tous les 2-3 ans serait suffisante vu la faible ampleur du mouvement (0.4 cm à 1 cm au maximum).

- Un réseau de densification utilisant une technique plus souple et à moindre coût comme celui du GPS. Ce réseau nous permet de mesurer les mouvements relatifs des blocs les uns par rapport aux autres. Une maille de 10 à 50 km pourra être envisagée. Un nombre de 30 à 50 stations serait souhaitable pour ce genre d'étude en tenant compte des stations existantes. Les mesures devraient être répétitives sur 2 à 5 ans pour pouvoir quantifier au mieux les déformations considérées importantes localement (en moyenne de 4 cm dans les zones sismiques).

MOTS-CLES : VLBI, système de référence terrestre, troposphère, effet de charge de marées océaniques, techniques de géodésie spatiale, géodynamique, réseau de surveillance, Méditerranée Occidentale

ABSTRACT

Our Study is based on an experimental research relative to the geodynamic surveying Europe-Africa of the Western Mediterranean basin by technics of space geodesy.

In a first part, we have processed the mobile VLBI european campaign which concerns six new stations in Western Europe. We determined two kinds of solutions :

- A global standard solution (VLBIM89) . The results obtained show an internal and external consistency respectively confirmed by the standard deviations of the coordinates (less than one centimeter of the horizontal components and one to two centimeters for the vertical ones) and by a comparative study to solutions found by other organizations. Thus, this solutions can be included in the ITRF solution, realization of the international reference frame of the IERS.

- Experimental solutions relative to two applications : the determination of the earth rotational parameters and the study of the ocean tide loading effects.

In the second part we propose a new geodetic network at the occidental Mediterranean region for a better surveying of global (plate motion) and local (volcanos, earthquakes, ..) deformations. The constraints that appear to get as much information as possible about these deformation with a low cost make us use two networks :

- Fiducial network with long base (300 to 2000 km) using the most precise techniques for this type of base : VLBI and SLR. The latter allows us the measure of the African plates motion with respect to the European plates. At least two stations is required on each plate in order to measure the rotations. One iteration every 2 or 3 years would be sufficient since the amplitude of the motion is low (a maximum of 0.4 to 1 cm).

- A densification network using a technique at lower cost like GPS. This network allows us to measure the relative motion of the blocks with respect to each other. Bases of 10 to 50 km are needed. About 30 to 50 stations are desirable for this kind of study taking into consideration existing stations. Repetitive measurements are required over 2 to 5 years in order to better quantly the deformation considered important locally (on average 4 cm in the seismic zones).

KEY WORDS : VLBI, terrestrial reference frame, troposphere, ocean tide loading effects, space geodesy technics, geodynamique, surveying network, Western Mediterranean basin.

REMERCIEMENTS

Je voudrai exprimer ma profonde gratitude à Monsieur François BARLIER, pour le précieux soutien moral, scientifique et financier qu'il n'a cessé de me prodiguer et pour l'honneur qu'il m'a fait en me dirigeant dans ma thèse.

Mes remerciements vont à Messieurs Michel KASSER, pour ses précieux conseils et Chedly FEZZANI, qui le premier m'a fait découvrir le domaine de la géodésie. Je suis heureux de pouvoir leur témoigner ici ma reconnaissance, pour avoir accepté d'être les rapporteurs de cette thèse.

Je tiens à exprimer ma profonde reconnaissance à Monsieur Gérard PETIT qui a suivi de près ce travail, pour son enthousiasme, sa grande disponibilité et les discussions fort enrichissantes que j'ai eues avec lui.

Je suis très honoré par l'intérêt constant porté à ce travail par Madame Nicole CAPITAINE qui a accepté de siéger dans ce jury.

Je suis très reconnaissant à Madame Martine FEISSEL pour avoir accepté de faire partie de ce jury et pour la confiance dont elle m'a honoré en m'accordant l'accès inconditionnel à l'Observatoire de Paris.

Je remercie également Monsieur Zuheir ALTAMIMI de LAREG et Monsieur Jean Claude RUEGG de l'IPGPpour les nombreux échanges que nous avons eus.

Que les équipes du SGN, Service de Géodésie du Nivellement et du LAREG, Laboratoire de Recherche Géodésique de l'IGN et, plus particulièrement, l'équipe des informaticiens, trouvent ici le témoignage de mes remerciements les plus sincères.

Qu'il me soit permis de remercier le National Geodesic Survey pour les données VLBI qu'il m'a fournies et Messieurs Hans Georg SCHERNECK de UPPSALA University, Patrick VINCENT et Olivier FRANCIS du GRGS Groupe de Recherche de Géodésie Spatiale CNES Toulouse, pour le calcul des composantes de charge océanique qu'ils ont mis à ma disposition.

Je tiens à exprimer ma gratitude à l'IFREMER, Institut Français de Recherche pour l'Exploitation de la MER, pour sa participation, en association avec l'IGN, au financement de la campagne dont ce travail est tributaire. Ma reconnaissance va aussi à l'IGN pour les bonnes conditions financières dont j'ai pu bénéficier.

Enfin, mes remerciememnts vont à tous ceux qui ont contribué scientifiquement, techniquement et moralement à l'aboutissement de ce travail qui n'aurait pu être réalisé sans leur aide, leur compréhension et leur soutien.

A mes parents,

à qui je ne saurai exprimer suffisamment mes sentiments, pour leurs sacrifices, leur soutien et leur patience, je dédie ce travail.

TABLE DES MATIERES

Résumé iii
Abstract iv
Remerciments v
Dédicace vii
Table des matières viii
Liste des tableaux xii
Liste des figures xiv
Sigles et abréviations xvi

INTRODUCTION GENERALE 1

PREMIERE PARTIE : TRAITEMENT DE LA CAMPAGNE EUROPEENNE DE RADIO-INTERFEROMETRIE (VLBI) MOBILE 1989 6

1. PRESENTATION DU VLBI 7

1.1. VLBI : Technique et principe 7
1.2. Les observables et la précision des mesures 7
1.2.1. Les observables 15
1.2.2. La précision des mesures 15
1.3. Systèmes de référence 21

2. LOGICIEL D'ANALYSE VLBI 23

2.1. Les modèles a priori 23
2.1.1. Modèle du retard de synthèse de bande 23
2.1.1.1. Le retard géométrique 24
2.1.1.2. Le retard de l'horloge 27
2.1.1.3. Le retard troposphérique 29
2.1.1.4. Le retard ionosphérique 31
2.1.2. Modèle de la fréquence de franges 32
2.2. Ajustement des paramètres du modèle 33

3. ANALYSE DES OBSERVATIONS DE VLBI MOBILE 37

3.1. Inventaire des sessions d'observations 39
3.1.1. Réseau des stations 39
3.1.2. Les sessions d'observations 41
3.1.3. Les quantités observées 43
3.2. Traitement préliminaire 44
3.2.1. Mode opératoire 44
3.2.1.1. Réception des données 44
3.2.1.2. Passage des données en format MODEST 44
3.2.1.3. MODEST/O-C 46
3.2.1.4. MODEST/SOLVE 47
3.2.1.5. Identifier les sauts d'horloges et les mauvaises observations 48
3.2.1.6. Repondérer les observations 49
3.2.2. Résultats opératoires 49
3.2.3. Résultats géodésiques préliminaires 54

4. SOLUTION GLOBALE STANDARD 64

4.1. Choix des intervalles d'ajustement des paramètres du troposphère.... 64
4.2. Description du modèle et hypothèse de calcul 72
4.3. Résultats 74
4.4. Etude comparative 75
4.5. Conclusion 82

5. SOLUTION GLOBALE EXPERIMENTALE 84

5.1. Détermination des paramètres de la rotation de la terre 84
5.1.1. Hypothèse de calcul 84
5.1.2. Résultats 85
5.2. Solution avec un modèle de charge de marées océaniques 87
5.2.1. Effet de charge de marées océaniques 87
5.2.2. Solution avec un modèle de charge de marées océaniques . 88
5.2.3. Conclusion 89

DEUXIEME PARTIE : CONTRIBUTION A UN NOUVEAU RESEAU GEODESIQUE DE SURVEILLANCE GEODYNAMIQUE EUROPE-AFRIQUE 91

1. INTRODUCTION 92

2. CONTEXTE GEODYNAMIQUE DE LA MEDITERRANEE OCCIDENTALE 96

2.1. Historique 96
2.2. Les Modèles Cinématique des Plaques 98
2.3. La Néotectonique de la Méditerranée Occidentale 100
2.3.1. Déformations Globales 104
2.3.2. Déformations Locales 107
2.3.2.1. La Plaque Eurasie 108
2.3.2.2. La Plaque Africaine 110

3. LES DONNEES GEODESIQUES 116

3.1. Les Techniques de Surveillance 116
3.1.1. Aperçus historique 116
3.1.2. Positionnement spatiale de haute précision 118
3.1.3.1. Positionnement par VLBI 118
3.1.3.2. Positionnement par SLR 119
3.1.3.3. Positionnement par GPS 120
3.2. Travaux Effectués 122
3.3. Extension de Wegener-Medlas 126

4. REALISATION PRATIQUE 127

CONCLUSION GENERALE 129

REFERENCES 137

ANNEXES 146

A. Passage en Format Modest 147
B. Modest/O-C 152
C. Modest/Solve 160

D. Identifier les sauts d'horloges et les mauvaises observations 168
E. Repondérer les observations 172

LISTE DES TABLEAUX

Tableau I.1. Réseau des stations de la campagne VLBI mobile 1989 41

Tableau I.2. Les sessions d'observation de la campagne de VLBI mobile 1989 .. 42

Tableau I.3. Nombre d'observations par session 43

Tableau I.4. Nombre de changements de marches d'horloges par station et par session 50

Tableau I.5. Paramètres du modèle 54

Tableau I.6.a à I.6.i Les déplacements des stations (E,N,V) en mm pour chaque session 58

Tableau I.7. Réproductibilité des solutions d'une session 60

Tableau I.8. Longueur des bases transatlantiques calculées pour une journée 60

Tableau I.9. Paramètres de transformation et écarts-types estimés (ITRF90,VLBIM1) 63

Tableau I.10. a,b Résidus sur les coordonnées (VLBIM1-ITRF90) 63

Tableau I.11. Estimation des intervalles d'ajustement des paramètres troposphériques 66

TAbleau I.12. Les 24 radiosources obsérvées 73

Tableau I.13. Résultats des données du traitement 74

Tableau I.14. Solution globale standard VLBIM89 76

Tableau I.15. Paramètres de transformation et écarts-types estimés (VLBIM89-ITRF90) 79

Tableau I.16. a,b Résidus sur les coordonnées (VLBIM89-ITRF90) 79

Tableau I.17. Paramètres de transformation et écarts-types estimés (NGS-ITRF90) 80

Tableau I.18. a,b Résidus sur les coordonées (NGS-ITRF90) 80

Tableau I.19. Paramètres de transformation et écarts-types estimés (VLBIM89-NGS) 81

Tableau I.20 a,b Résidus sur les coordonnées (VLBIM89-NGS) 81

Tableau I.21. Solution VLBIM89R des paramètres de la rotation de la terre 86

LISTE DES FIGURES

Première Partie

Figure.I.1. VLBI : géométrie et principe 8

Figure I.2. Fonction de corrélation normalisé centrée sur un retard 11

Figure.I.3. Evolution de la phase fr en fonction du temps
(d'après Thomas, 1973) 17

Figure.I.4. Principe de la synthèse de bande 19

Figure.I.5. Réseau de la campagne de VLBI mobile 1989 configuration des lignes
de base par rapport à WETTZELL 40

Figure.I.6. Valeur du bruit ajouté (SIGCON) pour la base (Wettzell-Mojave) 52

Figure.I.7. Valeur du bruit ajouté (SIGCON) pour la base (Wettzell-Noto) 53

Figure.I.8. Corréction atmosphérique en fonction du temps WETTZELL 68

Figure.I.9. Correction atmosphérique en fonction du temps NOTO 69

Figure.I.10. Corréction atmosphérique en fonction du temps HOHEN 70

Figure.I.11. Etude du type de bruit des résidus d'observations par la variance d'Allan modifiée 71

Deuxième Partie

Figure.II.1. Tectonique globale active 102

Figure.II.2 Les grandes structures tectoniques schématiques en méditerranée occidenatale 103

Figure.II.3 Sites d'observation géodésiques en Europe. 106

Figure.II.4 Etude des déformations actuelles en méditérranée occidentale par un réseau géodésique de surveillance 109

Figure.II.5 Modèle de plaques cinématique adapté 111

Annexes

Figure.I.a Organigramme du pasage en format modest 147

Figure.I.b Organigramme de l'étape du calcul des observées - calculées 152

Figure.I.c Organigramme de la solution VLBI 160

SIGLES ET ABREVIATIONS

CDP : Crustal Dynamic Program

GPS : Global Positioning System

GSFC : Goddard Space Flight Center

IAU : International Astronomic Union

IERS : International Earth Rotation Service

IGN : Institut Géographique National

IRIS : International Radio Interferometric Surveying

ITRF : IERS Terrestrial Reference Frame

LAREG : Laboratoire de Recherche Géodésique

LLR : Lune Laser Ranging

MERIT : Monitor Earth Rotatio and Intercompare Techniques

MODEST : Model Estimator, c'est le logiciel du traitement VLBI

NASA : National Aeronautics and Space Administration

NGS : National Geodetic Survey

O-C : Observées moins calculées, Partie de MODEST qui concerne le calcul du modèle

RMS : Root Mean Square

SLR: Satellite Laser Ranging

SOLVE : Partie de MODEST qui concerne Solution du traitement VLBI

SSCMIX : Standard Set of coordinates Mix, c'est un logiciel de combinaison des jeux de coordonnées.

VLBI : Very Long Base Line Interferometry

BIPM : Bureau International des Poids et Mesures

INTRODUCTION

GENERALE

La technique de l'interférométrie radio à longue base (VLBI) est développée depuis 1967 (Broten et al, 1967; Moran et al, 1967; Currie et al, 1974) pour l'étude de la taille et de la structure des radiosources. Depuis, cette technique est utilisée dans plusieurs domaines comme la radio astrométrie (Counselman 1976, Clarck et al 1976, Gubbay et al 1974, Rogers et al 1973, Cohen 1972), où le VLBI a permis d'établir le repère de référence céleste global le plus stable et le plus précis jamais réalisé, repère auquel il faut désormais raccorder au mieux tout autre repère. La géodésie, a été grandement bénéficiaires de cette technique (Rogers et al 1978, Ong et al 1976, Thomas et al 1976, Whitney et al 1976, Coates et al 1975, Shapiro et al 1974, Hinteregger et al 1972). En géodésie, le VLBI a permis l'établissement d'un repère terrestre global avec une précision centimétrique et la détermination des coordonnées des radiotélescopes répartis sur différentes plaques tectoniques. La reproductibilité des mesures permet sur des intervalles de temps réguliers de déterminer précisément les déplacements et les déformations de ces plaques (Robertson, 1975; Gordon et al, 1992). Les premiers résultats de (Ryan et Ma 1987) confirment dans l'ensemble les modèles de prédictions à partir des données géologiques de (Minster et Jordan 1978). Enfin, la mesure de l'orientation de la terre par rapport à un système de référence céleste (IERS, Technical note 8, 1991) a pu être réalisée avec la précision la plus extrême de 0"001. Cette grande précision de la technique VLBI s'accompagne d'un raffinement extrême dans la modélisation en tenant compte des effets très fins, les effets relativistes

Dans le cadre de l'établissement du nouveau réseau géodésique européen (EUREF) basé sur des techniques spatiales existantes (SLR, LLR, GPS, VLBI), une campagne d'observations VLBI mobile s'est déroulée en 1989 afin de

déterminer six points de base. Ces sites s'ajouteront au réseau mondial de VLBI, qui compte environ 40 stations fixes, nombre qui s'accroît régulièrement (futures stations en C.E.I.U, Antarctiques, Inde), (principal investigator's working group, Pasadena, 6-7 Mars 1991). La durée de l'expérience établie est de 26 jours étalés du mois de juin au mois de septembre 1989, en raison de cinq jours d'observations par station. Cette expérience inclut neuf sessions IRIS (International Radio Interferometric Surveying: réseau pour mesurer la rotation de la Terre).

Une fois établi, le réseau servira de référence pour d'autres études (géodynamiques, océanographiques, orientation de la terre), et pour la détermination d'un système de référence terrestre global en le reliant au système de référence céleste extragalactique.

L'IGN a participé à l'organisation des sessions d'observations dans deux sites en France métropolitaine: Brest et Grasse (ce dernier est en collocation avec une station de télémétrie Laser Lune et satellite). Le traitement des données est aussi assuré par l'IGN, il constitue le coeur de notre travail. Le traitement des données VLBI comprend trois étapes : la corrélation des données enregistrées sur bandes aux radiotélescopes, la détermination des retards et des fréquences de franges qui constituent les quantités mesurées et finalement l'ajustement des paramètres géométriques (le vecteur joignant les deux radiotélescopes) à ces mesures.

Les deux premières étapes ont été effectuées par le National Geodetic Survey des Etats Unis (NGS), qui nous a fourni les mesures VLBI. La troisième étape est l'objet de la première partie de ce document; on y utilise le logiciel de traitement VLBI MODEST du "Jet Propulsion Laboratory" version 100.

L'expérience réalisée utilise la station VLBI mobile (MV3) du NGS équipée par les meilleures techniques utilisées actuellement (le système d'acquisition de données MARK3, récepteur double fréquence S et X avec une horloge maser à hydrogène et une antenne de 5 m de type AZEL). Ce système d'interférométrie radio nous permet d'obtenir en une journée d'observations une précision géodésique de quelques centimètres sur les composantes des lignes de base entre radiotélescopes. Ce matériel a le défaut d'être lourd à utiliser, d'où l'étude d'un nouveau système MARK4 entièrement compatible à MARK3 en vue d'augmenter le nombre de mesures par jour (densité de 1 GBITS) et aussi d'utiliser des antennes plus petites (principal investigator's working group, Pasadena, 6-7 Mars 1991).

Le réseau géodésique européen complété par les six sites de VLBI s'intègre dans le cadre d'une étude générale de la Méditerranée occidentale et en particulier de sa géodynamique (mouvement relatif des plaques africaine et européenne). En effet, une large extension régionale du projet Wegener Medlas relative à la Méditerranée Occidentale, favorise la disponibilité d'un large réseau d'appui destiné à fournir de l'information sur la déformation de ce dernier à grande échelle. Cette déformation concerne des déplacements horizontaux et verticaux des sites qui sont en général mal connus et qui sont dus essentiellement aux mouvements relatifs des plaques africaine et européenne.

Le réseau VLBI de base servira par la suite à densifier des régions tectoniquement actives nécessitant ainsi une étude plus détaillée avec des techniques moins lourdes, comme celle de la technique GPS. Les sites proposés constituent un réseau de lignes de base à travers l'Atlas, les Pyrénées, les Appenins et les rattachements intercontinentaux souhaités entre l'Afrique et l'Europe pour une meilleure surveillance des mouvements des blocs tectoniques, qui sont déterminés par des modèles connus du mouvement des plaques.

Après une introduction générale, deux parties sont étudiées. La première partie s'articule sur trois pôles:

1- L'analyse de données VLBI. Cette analyse exige une étude préliminaire de traitement, au cours de laquelle nous estimons les paramètres de l'horloge sur des intervalles déterminés session par session, tout en excluant les mauvaises observations.

2- Présentation de la solution globale standard.

3- Présentation de la solution globale expérimentale.

La deuxième partie est une proposition d'un nouveau réseau géodésique qui peut être établi par différentes techniques de la géodésie spatiale où la précision est relativement bonne pour mesurer les déplacements horizontaux dus au mouvement relatif des plaques africaine et européenne, mais moins bonne pour mesurer les mouvements verticaux.

Le nouveau réseau proposé est défini à deux échelles. Le réseau à grande échelle est basé sur l'étude des zones stables (les plateformes) et mobiles (zones sismotectoniques). Le réseau à petite échelle est fait de manière à étudier plus en détail les mouvements internes à chaque bloc tectoniquement actif.

PREMIERE PARTIE

TRAITEMENT DE LA CAMPAGNE EUROPEENNE DE VLBI MOBILE 1989

1. PRESENTATION DU VLBI

Dans cette partie, nous présentons les notions de base de la technique et le principe du VLBI, de ses observables et de son système de référence. Plus de particularités pour chaque thème sont données dans (Kovalevsky, J., 1990; Thomson, J.M, et al., 1986, Walker, G., 1987, Sovers, O. J., 1991)

1.1. VLBI: Technique et principe

Les stations de radio-interférométrie à longue base comprennent trois éléments essentiels: un radio-télescope avec un récepteur au foyer de grande sensibilité, un oscillateur asservi par une horloge de type maser à hydrogène, d'instabilitée relative de l'ordre de 10^{-15} sur la durée d'un quart d'heure, et enfin un enregistreur (MARK3) qui inscrit sur des bandes magnétiques les données et des informations pour les dater et les calibrer (figure I.1).

Le récepteur VLBI peut recevoir deux fréquences dont la combinaison permet de s'affranchir de l'erreur de réfraction ionosphérique. En géodésie, il fonctionne dans les bandes S (2300 Mhz ou 13 cm) et X (8400 Mhz ou 3,6 cm).

Les émissions reçues par les récepteurs sont à très haute fréquence, de l'ordre de plusieurs Gigahertz (longueur d'onde entre 3 et 21 cm). L'antenne transforme ce rayonnement en courant électrique ayant le même spectre de fréquence. L'information importante est l'évolution de l'amplitude et de la phase .

La technique du superhétérodynage permet de diminuer considérablement la fréquence tout en conservant ces informations. Cette technique est utilisée afin de numériser le signal en un flot de données binaires (1

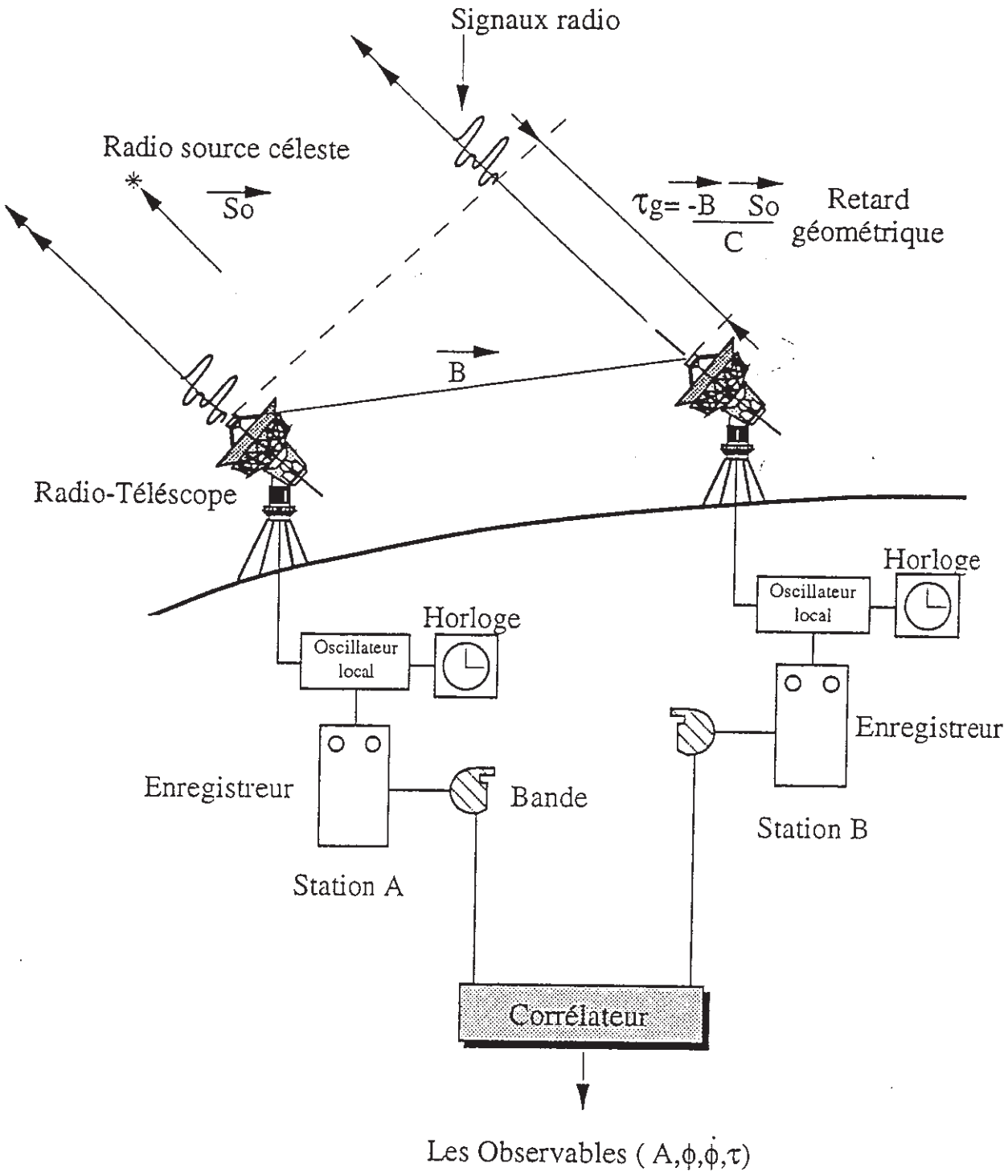


Figure I.1 VLBI : Géométrie et principe

ou -1), qui seront enregistrées, ce qui nécessite de les ramener à des fréquences de quelques Mhz.

Les réductions de fréquence et le mélange des 2 fréquences sont effectuées indépendamment dans les canaux de fréquence des bandes passantes de l'antenne. En géodésie, on utilise que 14 canaux parmi 28 canaux disponibles. La largeur de chaque canal est de 2 Mhz. L'enregistrement se fait sur une bande magnétique à 28 pistes sur lesquelles sont enregistrés simultanément les 28 canaux avec une densité de 13 000 bits par cm. Les informations de temps fournies par l'oscillateur y sont ajoutées afin de dater avec exactitude les événements.

Les bandes magnétiques ainsi recueillies par deux antennes sont envoyées à un calculateur spécialisé appelé corrélateur qui a pour rôle de calculer l'intensité du courant qu'on aurait obtenue si on avait mélangé directement les signaux reçus par les deux antennes. La même onde plane est reçue par l'antenne A et l'antenne B avec un délai τ qui correspond à la différence de chemin optique entre elles. Soient I_A et I_B les intensités recueillies à la sortie des récepteurs. Pour toutes les fréquences reçues par l'antenne à l'intérieur de sa bande passante, on obtient en définitive pour I_A et I_B un courant dont l'intensité est de la forme suivante :

$$I = k\sum a(\omega)\cos((\omega-\omega_o)t+\phi(\omega)) \qquad (1)$$

où a et ϕ sont en principe fonctions de la fréquence et ω_0 une pulsation fixe d'un signal produit par l'oscillateur. Avec la seule différence que si t est le temps relatif à l'antenne A, la même quantité se retrouve en B au temps $t+\tau$ avec en plus un décalage en fréquence dû à la différence de vitesses de A et B

entraînées par la rotation de la terre. Si on calcule alors le produit de corrélation, on aura :

$$P(x) = \int_{t_1}^{t_2} I_A^2(t) I_B^2(t+x)dt \qquad (2)$$

pour toutes les valeurs de x, ce produit atteind son maximum pour $x = \tau$.

Pour des raisons pratiques, on normalise cette fonction en divisant par les valeurs moyennes de I_A et I_B et on obtient la fonction de corrélation normalisée :

$$R(x) = \frac{P(x)}{\sqrt{\int_{t_1}^{t_2} I_A^2 dt \int_{t_1}^{t_2} I_B^2 dt}} \qquad (3)$$

Cette fonction sans dimension est comprise entre 0 et 1.

La forme de cette fonction centrée sur $x = \tau$ est donnée par la (figure I.2)

Cette fonction de "cross-corrélation" est formée par le produit d'un terme sinusoïdal, en l'occurence $\cos(\phi)$ et d'une amplitude A $(\Delta\tau)$ qui est modulée en fonction de $\Delta\tau$ par une fonction sinusoïdale du type sin(x)/x.

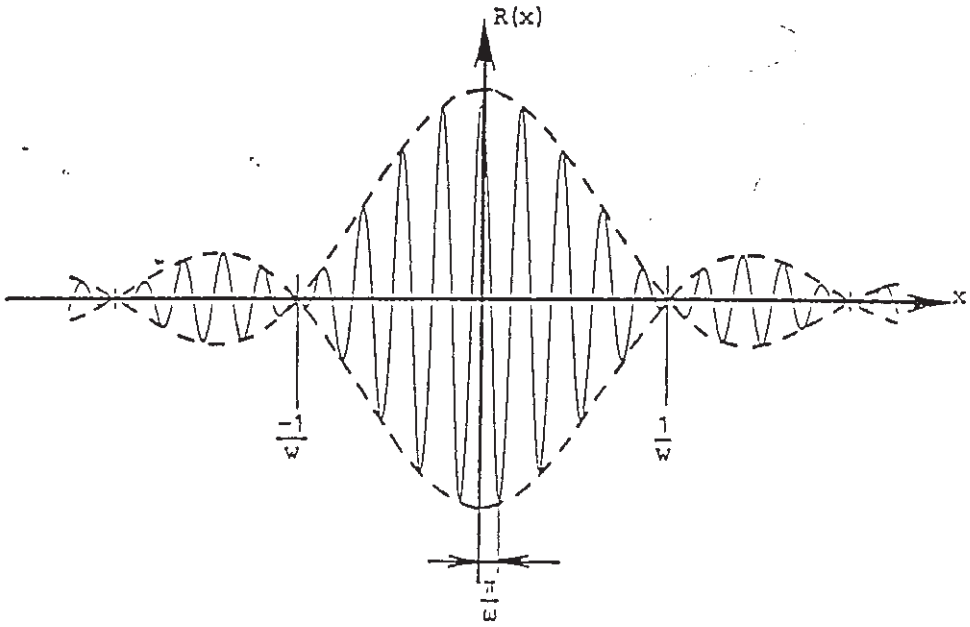


Figure I.2 Fonction de corrélation normalisée centrée sur un retard $\Delta\tau = x - \tau = 0$

En appelant W la largeur de bande commune aux deux enregistrements, on démontre que R(x) centrée s'écrit, en posant $\Delta\tau = \tau - x$

$$R'(x) = V\frac{\sin(\pi w\Delta\tau)\cos\phi(\Delta\tau)}{\pi w\Delta\tau} \qquad (4)$$

où V est la visibilité des franges telle qu'elle a été définie dans les ouvrages d'optique générale (elle est égale à 1 pour des sources ponctuelles), ϕ la phase des franges, $\Delta\tau$ le retard résiduel (différence entre le retard réel des signaux enregistrés aux deux radio-télescopes et le retard du modèle utilisé au corrélateur). On peut écrire encore:

$$R'(\Delta\tau)\cos R'(\Delta\tau) = A(\Delta\tau)\cos\phi(\Delta\tau) \qquad (5)$$

l'amplitude A des franges s'annule pour $\Delta\tau = \pm 1/W$

En pratique, les intégrales de (2) et (3) sont calculées sur un intervalle de temps de l'ordre d'une seconde. On se donne a priori une valeur de x égale à la valeur de τ issue d'un modèle approché de l'observation, et en supposant que les deux horloges sont parfaitement synchrones ou que l'on connaît leur différence (ce qui sera le cas lorsque la première observation d'une série aura été déduite). Ceci permet de réduire l'amplitude de la recherche à effectuer en x et ainsi de réduire le nombre de calculs à faire avant de retrouver le maximum de la fonction R(x). Ce calcul est fait pour chacun des canaux du récepteur.

Le processus tel qu'on vient de le décrire est cependant insuffisant. En effet, pour pouvoir intégrer sur une période de temps court, il faut que la phase de franges demeure uniforme ou varie très peu. Or, par suite de la rotation naturelle de la Terre, la fréquence qui provient de la différence de fréquence f

entre I_A et I_B, varie beaucoup. Cette différence qui peut atteindre 100 Khz dans les cas extrêmes de stations équatoriales très éloignées. On est donc conduit à ralentir les franges. Aussi fait-on un modèle a priori de cette différence f et on corrige (4) par une méthode numérique en faisant battre $R'(\Delta\tau)$ avec une sinusoïde numérisée de fréquence f. Il en résulte que la phase résiduelle des franges ϕ_r, qui est la différence entre la phase des signaux captés par les récepteurs et la phase du modèle du corrélateur change très peu pendant la période d'accumulation des bits.

La phase du modèle x vaut :

$$\phi_X (t) = (\omega_2 - \omega_1) t + \omega_2 \tau_X \qquad (6)$$

Après multiplication par cos ϕ_X , l'expression des franges ralenties est donc :

$$S(t , \tau_X) = R' (t,\tau_X)\cos\phi_X \qquad (7)$$

on calcule l'expression (7) on obtient :

$$S(t , \tau_X) = 1/2a (\cos(\phi - \phi_X) + \cos(\phi+\phi_X)) \qquad (8)$$

dont on ne prend en compte que la partie basse fréquence cherchée qui correspond au premier terme provenant de la différence entre les angles d'observations des radiosources. Le second terme possède une fréquence qui est approximativement le double de la fréquence des franges initiales.

Ces franges sont généralement normalisées. Leur comportement est décrit par l'équation suivante :

$$F\ (t,\tau_x) = a\cos\phi_r \qquad (9)$$

où $\phi_r = \phi - \phi_x = \omega_a\ \Delta\tau + \phi_s + \Psi$;

ϕ_s est la phase due à la structure de la source;

Ψ est une fonction lentement variable du temps, incluant tous les phénomènes instrumentaux;

ω_a est la fréquence centrale de la bande en recouvrement;

ϕ_r est appelée phase résiduelle, et par différenciation, on obtient la fréquence de frange résiduelle :

$$\dot{\phi}_r = \dot{\phi} - \dot{\phi}_x = \omega_a \Delta\dot{\tau} + \dot{\phi}_s + \dot{\Psi} \qquad (10)$$

Cette méthode, qui "ralentit" le déroulement des franges, permet de déterminer l'amplitude $A(\Delta\tau)$, la phase $\phi(\Delta\tau)$, la fréquence de frange $\phi(\Delta\tau)$ et par suite le retard τ recherché.

1.2. Les observables et la précision des mesures

De la fonction de corrélation croisée des deux signaux enregistrés par les deux récepteurs de l'interféromètre, on tire en fait quatre quantités : l'amplitude, la phase de franges, la fréquence de frange et le retard de synthèse de bande. Les deux observables le retard et la fréquence de franges sont utilisés en géodésie. La plus importante car la plus sensible aux paramètres géométriques, est le retard qui est définie par la différence des temps d'arrivée d'un même front d'onde des signaux aux deux radiotélescopes.

1.2.1. Les observables

Nous allons maintenant étudier les différentes étapes de la corrélation qui conduisent à la détermination des observables.

Ces étapes sont : le ralentissement des franges et addition des bits, détection et ajustement des franges et la technique de synthèse de bande.

Le principe de la technique du ralentissement et addition incohérente des "bits" est de réduire la vitesse de défilement de la phase des franges due à la rotation de la terre. Ceci par multiplication du flot de "bits" corrélés par une sinusoïde numérisée dont la fréquence a été calculée par un modèle au corrélateur. Les franges obtenues sont dans la plupart des cas invisibles, d'où la nécessité de les intégrer. Par le moyen de la deuxième technique, les franges invisibles sont intégrées d'une façon cohérente sur plusieurs minutes (< 10 mn), et de cette manière, elles seront détectées. Une fois les franges détectées, la période d'intégration est divisée en plusieurs intervalles de longueur égale (entre 1 et 100 sec). Sur chaque intervalle, on ajuste par la méthode des moindres carrés une fonction de la forme :

$$Fj(A_j(\phi_r)_j,(\phi_r)_j)=A_j e^{((\phi_r)_j t,(\phi_r)_j)_r} \tag{11}$$

Cet ajustement permet de déterminer les meilleurs estimations de l'amplitude, de la fréquence de franges et de la phase résiduelle pour chaque intervalle j. La phase résiduelle qu'on approxime linéairement vaut :

$$\phi_r(t)=\phi_r(t_o)+f_r(t-t_o) \tag{12}$$

$$\phi_r(t_o)=\omega_a\tau_g(t_o) \tag{13}$$

$$fr=\omega_a\tau_g(t_o) \tag{14}$$

Le comportement de la phase résiduelle en fonction du temps est décrit par les formules (8) et (9). Si le modèle est proche de la réalité et si les fréquences sont stables, cette phase résiduelle évolue linéairement pendant toute la période d'intégration. On peut donc ajuster une droite qui passe par les différents valeurs de la phase (figure I.3). La pente de cette droite définit la fréquence de franges résiduelles pour toute la période d'intégration considérée. Cette quantité est celle qu'on adopte comme valeur mesurée de ϕ_r. Pour l'amplitude, la valeur mesurée qu'on adopte est la moyenne des différents A_j. En ajustant une fonction de la forme sinx/x sur les points obtenus, on peut alors déterminer la valeur maximale de cette amplitude ainsi que le retard résiduel qui maximise sinx/x.

Le retard total τ peut être calculé à partir de $\Delta\tau$ (retard résiduel) en restituant le retard du modèle utilisé au corrélateur.

$$\tau = x + \Delta\tau \tag{15}$$

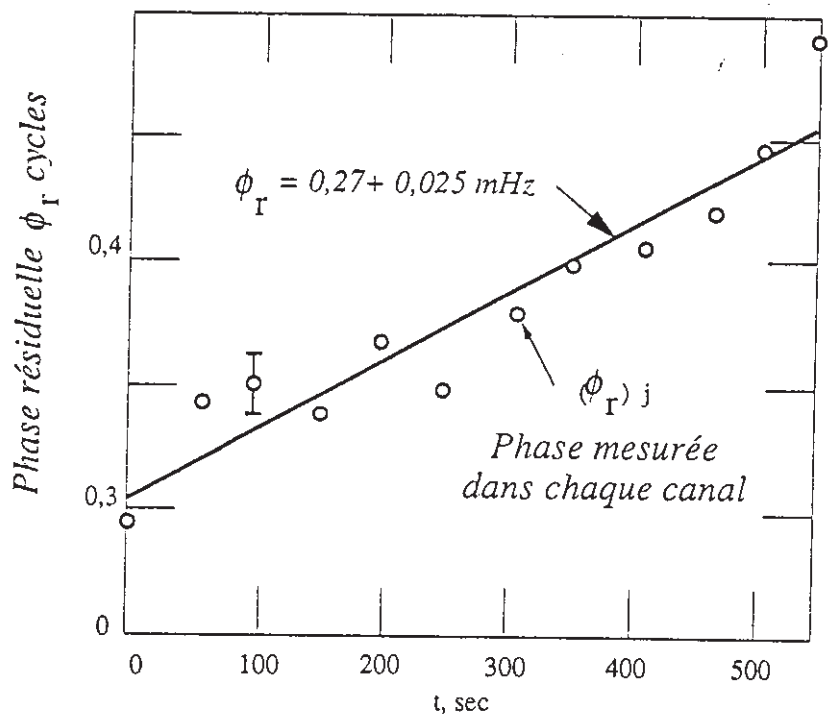


Figure I.3 : Evolution de la phase résiduelle ϕ_r en fonction du temps (d'après Thomas 1973).

on obtient de même, la phase de frange et la fréquence de frange

$$\phi = \phi_x + \phi_r \tag{16}$$

$$\dot{\phi} = \dot{\phi}_x + \dot{\phi}_r \tag{17}$$

Le retard est appelé retard d'alignement ou retard mono-bande noté τ BSA.

La troisième étape et la dernière de la corrélation. est celle qui est employée dans toutes les expériences VLBI à vocation géodésique. Il s'agit de la technique de la synthèse de bande notée BWS a été déterminé par (Rogers, A.E.E, 1970). Le principe de cette technique est de mesurer les phases résiduelles dans plusieurs canaux de 2 Mhz distribués sur une grande largeur de bande puis palier une droite sur ces phases qui sont proportionnelles à la fréquence centrale de bande en recouvrement w_a comme le montre l'équation (13). La représentation de la phase en fonction de la fréquence (figure I.4) est une droite linéaire. La pente de cette droite est le retard résiduel de synthèse de bande qui est alors défini par:

$$\Delta\tau_{bws} = \partial\phi_s/\partial\omega \tag{18}$$

La bonne mesure du retard exige une calibration aussi précise que possible des phases instrumentales ψ dans chaque canal. D'autre part, la variation de la phase de structure en fonction de la fréquence $\partial\phi_s/\partial\omega$, qui peut provoquer un léger décalage du retard résiduel qu'on mesure.

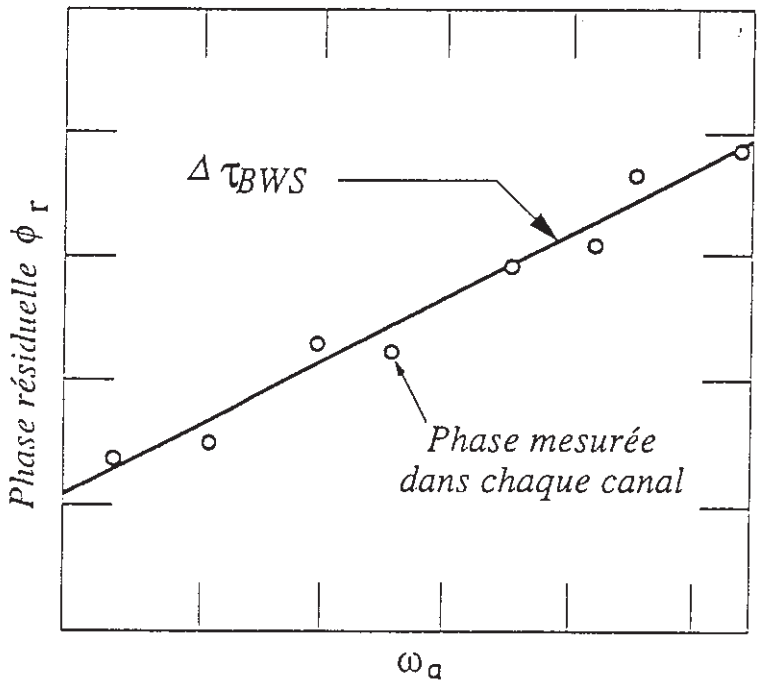


Figure I.4 Principe de la synthèse de bande

1.2.2. La précision des mesures

La précision des mesures du radio-interférométrie à longue base dépend du type de la mesure :

- retard BSA : La mesure est non ambiguë et la précision est de l'ordre de 1/(SNR*B) ou SNR est le rapport signal sur bruit et B la bande passante enregistrée (typiquement 10 ns soit 3m).

- retard de phase : la précision de la mesure est de l'ordre de 1/(SNR*F), où F est la largeur de la bande de fréquence, (typiquement 5 ps soit 1.5 mm). Mais la mesure est ambiguë (de 1/F, 100 ps soit 3 cm) ce qui rend le traitement extrêmement difficile.

- retard de synthèse de bande : la précision de ce retard dépend du nombre et de la plage de fréquence de largeur F des canaux. L'ambiguïté dans le retard de synthèse de bande est définie par l'inverse de la séparation des deux canaux les plus rapprochés. En pratique, pour augmenter la précision, on a intérêt à étaler le plus possible les canaux observés, mais on est alors limité par l'effet dispersif de l'ionosphère sur la phase et par les ambiguïtés impossible à lever lorsque les canaux sont très éloignés. La précision est donc de l'ordre de 1/(SNR*F) (typiquement 30 ps soit 1 cm). La mesure est ambiguë (de l'ordre de 100 ns) ce qui complique le traitement.

Actuellement on utilise le retard de synthèse de bande, de précision centimétrique.

1.3. Systèmes de référence

La technique VLBI se caractérise comme nous venons de le voir par la mesure précise du retard par la technique de synthèse de bande. Ce retard τ est essentiellement de nature géométrique. Si le signal radio est issu d'un objet extragalactique (quasar ou noyau actif d'une Galaxie), le retard géométrique τ dépend uniquement de la position de la radiosource et du vecteur de base joignant les deux radiotélescopes car la direction de l'émission apparaît comme fixe, du fait de la grande distance de l'objet observé. La variation avec le temps de ce retard géométrique est due à la rotation de la terre.

En effectuant des mesures sur plusieurs sources extragalactiques, on peut alors déterminer précisément la position des sources, le vecteur de base et les paramètres d'orientation de la terre (position du pôle X_P, Y_P dans la Terre et dans l'espace, UT1-UTC), (Ma, C., 1978).

La complexité majeure de l'expression du retard géométrique provient des nombreuses transformations nécessaires pour rattacher le système de référence céleste (position des radiosources), au système de référence terestre (localisation des stations).

Ce système céleste implique un système géocentrique équatorial avec l'équateur et l'équinoxe de J2000 comme il a été défini par les conventions IAU de 1976 avec les séries de nutation de 1980. Dans ce cadre équatorial, il faut définir l'origine de l'ascension droite. Par exemple, on fixe l'ascension droite de l'une des sources.

Le système terrestre, en pratique, est réalisé par la définition de la position d'une des stations d'observations interférométriques puis par la mesure des positions des autres stations sous une contrainte. Cette contrainte est que la

détermination des orientations de la terre est en moyenne en accord avec les mesures fournies par l'IERS de l'orientation de la terre sur un intervalle de temps substantiel. Cette procédure, ou son équivalent fonctionnel, est nécessaire puisque l'interférométrie est sensible seulement au vecteur de base tel qu'il est mesuré dans le cadre céleste. La technique VLBI est purement géométrique et n'a pas de point d'origine de préférence directement basé sur la structure de la terre.

La rotation de la terre, cependant, fournit une direction privilégiée dans l'espace, qui peut être indirectement associée avec les caractéristiques majeures de la terre. Plusieurs formulations équivalentes sont possibles pour calculer le retard géométrique.

Pour les données actuelles, les transformations de Lorentz font état des effets relativistes (restreint) qui sont produits par le mouvement relatif des objets impliqués. La relativité générale est requise seulement pour les effets qui sont associés avec la déflexion des rayonnemen électromagnétique par les objets plus massifs du système solaire et les retards associés.

2. LOGICIEL D'ANALYSE VLBI

2.1. Les modèles a priori

Les valeurs observées de retard et de fréquence de frange qui ont été obtenues de plusieurs radiosources doivent être passées simultanément à travers une routine d'estimation du multiparamètre pour faire ressortir les paramètres modèles qui sont signifiants.

Comme l'exactitude de la radio-interférométrie s'est améliorée, des modèles de plus en plus complets, pour le retard et la fréquence de frange, ont été développés.

Le modèle du retard de synthèse de bande utilisé en VLBI est la somme de quatre composantes modèles majeures:

- la géométrie;
- l'horloge;
- la troposphère;
- l'ionosphère.

A partir du modèle retard, on obtient le modèle de fréquence de frange par différenciation.

2.1.1. Modèle du retard de synthèse de bande

On se limite dans ce paragraphe à une présentation succincte des quatre composantes majeures de ce modèle, pour plus de détail voir (Sovers, O.J. 1991).

2.1.1.1. Le retard géométrique

D'une façon générale, ce retard peut être aussi important que 0,02 sec pour les bases fixées sur terre et peut changer rapidement (jusqu'à 1.5 µsec/s) quand la terre tourne. Cet élément de retard est de loin l'élément le plus important du retard observé.

Le retard τ à la date t peut s'exprimer par :

$$\tau (t) = AB.S/c + \Delta\tau (t) \qquad (19)$$

où AB représente la ligne de base entre les deux radiotélescopes;

S le vecteur unitaire de la direction de la source;

c est la vitesse de la lumière;

et $\Delta\tau(t)$ est une somme de termes correctifs concernant :

- la différence des indications des horloges locales en A et B;

- la différence entre les retards instrumentaux dus à la propagation des signaux électriques entre les antennes et l'enregistreur;

- la différence entre les retards entre A et B provoqués par la réfraction sur le temps de parcours de l'onde à travers l'atmosphère;

- la structure de la source.

La quantité $\tau(t)$ est en fait l'information qui nous permet de faire le lien entre les deux repères, céleste exprimé par la source et terrestre présenté par la ligne de base.

En effet l'expression du retard géométrique (τ_g= AB S/c) peut s'écrire sous la forme approchée (Melbourne, 1980) :

$$c.\tau_g(t) = B_Z \sin\delta + Be\cos(\alpha-\theta-\phi) \qquad (20)$$

avec $\quad Be = (B^2{}_X + B^2{}_Y)^{1/2} \quad$ et $\quad tg\,\phi = B_Y / B_X$

où α et δ sont l'ascension droite et la déclinaison de la source, θ est le temps sidéral de Greenwich à la date t et B_X, B_Y, B_Z sont les composantes de la ligne de base dans un repère terrestre, le repère céleste est défini par un catalogue de radiosources du JPL, contenant les coordonnées équatoriales (ascension droite et déclinaison) des sources observées.

Pour appliquer la formule ci dessus, il faut exprimer le vecteur AB dans le même système céleste que les coordonnées des sources. Appelons X1, Y1, Z1 les coordonnées de l'antenne A dans un repère de référence terrestre et X2, Y2, Z2 les coordonnées de l'antenne B dans le même repère . Le vecteur AB qui entre dans le calcul a pour composantes:

$$AB = \begin{matrix} X2 - X1 \\ Y2 - Y1 \\ Z2 - Z1 \end{matrix}$$

Pour passer au système de référence céleste, on appliquera les formules de transformation, pour plus de détail voir (l'IERS standards, 1992). Toutes les transformations envisagées sont des rotations, on aura donc en définitive:

$$AB_S = P\,N\,R3(-T)\,R1(Yp)\,R2(Xp)\,AB \qquad (21)$$

Avec S le vecteur unitaire de la direction de la source defini par :

$$S = \begin{matrix} \cos\delta \cos\alpha \\ \cos\delta.\sin\alpha \\ \sin\delta \end{matrix}$$

où les coordonnées équatoriales alpha et delta sont des coordonnées moyennes au temps d'observation. P, N, R1 R2 R3 sont respectivement les matrices de précession de nutation et de la rotation de la terre. Pour plus de détail sur leur expression voir (Lieske, J., 1967, Kovalevsky, J., 1990).

Le retard est donné par :

$$x = \tau_g + \Delta\tau = AB_S \qquad (23)$$

Un certain nombre, de paramètres entrant, dans l'équation (19) peuvent être supposés connus avec une précision suffisante, les autres étant pris comme inconnus. Le choix des inconnues dépend de l'application que l'on veut faire des observations. Dans la plupart des cas, les paramètres généraux non instrumentaux sont modélisés. En ce qui concerne les autres paramètres, donnons quelques exemples:

- Dans les applications géodésiques, ce sont les composantes de AB qui seront à déterminer.

- Dans les observations relatives à la rotation de la Terre, les inconnues principales seront UTI-UTC, Xp et Yp des matrices R.

- En astrométrie, on prendra essentiellement pour inconnues les coordonnées α et δ du vecteur S.

Les positions des stations ainsi déterminées contribuent beaucoup à la définition d'un repère de référence terrestre alors que les catalogues de position de radiosources extragalactiques constituent des réalisations très précises d'un système de référence céleste cinématique.

2.1..1.2. Le retard de l'horloge

Les horloges sont les instruments de mesure sur lesquels s'appuie toute expérience de VLBI. Il importe donc de connaître le plus exactement possible les caractéristiques principales définissant le temps qu'elles fournissent et dans qu'elles conditions peuvent être employées.

Plus important encore, les horloges montrent souvent des sauts et des instabilités à un niveau qui peut dégrader énormément la précision de l'interféromètre.

Pour rendre compte de ces effets d'horloge, un retard supplémentaire τ_c est incorporé dans le modèle du retard de synthèse de bande. On modélise le comportement de l'horloge entre deux sauts par une variation quadratique. Généralement, nous utilisons seulement la portion linéaire de ce modèle d'horloge qui est donnée par :

$$\tau_c = \text{CEPOCH} + \text{CRATE}t + \text{DCRATE/DT}\, t^2 \qquad (24)$$

Pour la fréquence de frange, le retard est obtenu en dérivant τ_c par rapport au temps, on aura:

$$\tau_c = \text{CRATE} + 2\,\text{CRAT/DT}t \qquad (25)$$

Les deux paramètres importants à ajuster sont le biais (CEPOCH) et la marche (CRATE) qu'on tire à partir des deux expressions ci-dessus.

En plus des effets de désynchronisation des horloges entre les stations, il y a d'autres effets instrumentaux différentiels qui peuvent contribuer au retard observé. En général, il est adéquat d'incorporer ces effets dans la modélisation des horloges. Cependant, les effets instrumentaux sur les retards mesurés utilisant la technique de synthèse de bande à multifréquence (Thomas, J.B, 1981) peuvent être différents de leur effet sur les retards obtenus par les mesures de phase à fréquence unique.

La procédure de la synthèse de bande obtient un retard qui est la dérivée de la phase par rapport à la fréquence ($\tau=\partial\phi/\partial\upsilon$) à travers des segments à fréquence multiple qui couvrent la bande de transition. Ainsi, n'importe quelle contribution à la phase interféromètre mesurée, indépendante de la fréquence n'a aucun effet sur le retard déterminé par la technique de synthèse de bande. Cependant, si un retard est obtenu directement de la mesure de phase (ϕ) à une fréquence donnée (υ) , alors le retard de phase obtenu à cette contribution instrumentale est :

$$\tau_{ph}=\phi/\upsilon \tag{26}$$

A cause de cette différence, il est nécessaire d'ajouter le modèle d'horloge pour les mesures du retard de phase :

$$\tau_{ph}= \tau_c + \tau_{c4}\, t + \tau_{c5}\, t^2/2 \tag{27}$$

où τ_c est le modèle d'horloge pour les observations de synthèse de bande défini précédemment.

Puisque le système actuel mesure aussi bien le retard de synthèse bande et la fréquence de frange, tous les paramètres d'horloge décrits ci-dessus doivent être utilisés. Pour un interféromètre bien calibré ($\tau_{c4} = \tau_{c5} = 0$). Cette implémentation particulière du modèle permet l'utilisation simultanée des retards prise déterminés par la technique de synthèse de bande.

Pour modéliser le retard d'horloge d'interféromètre sur une base donnée, une différence des termes d'horloge de station est formée:

$$\tau_c = \tau_{c2} - \tau_{c1} \tag{28}$$

où τ_{c2} et τ_{c1} sont respectivement les retards de l'horloge pour la station 2 et la station1.

La spécification d'une horloge de référence n'est nécessaire qu'au stade d'ajustement des paramètres et nous n'avons pas besoin de nous en occuper dans la description du modèle.

2.1.1.3. Le retard troposphérique

Pour atteindre chaque radiotélescope, le front de l'onde radio doit passer à travers l'atmosphère de la terre. Cette atmosphère est faite de deux éléments : l'atmosphère neutre et l'ionosphère.

A son tour, l'atmosphère neutre et non dispersive est composée de deux composantes majeures : sèche et humide.

Le retard causé par la composante sèche est relativement bien modélisé. Ses effets peuvent être estimés avec une très grande précision, simplement en mesurant la pression. Typiquement au niveau de la mer dans la direction locale du

Zénith, le retard supplémentaire que le signal subit à cause de la composante sèche est d'à peu près 2m (7ns). En général, un modèle azimuthalement symétrique basé sur des mesures de pression barométrique de surface est considéré adéquat, d'environ 0.05 ns près.

Par contre, la composante humide de l'atmosphère (la vapeur d'eau et l'eau condensée sous forme de nuage) n'est pas modélisé facilement (Resch, G.M, et al., 1983). Elle est non azimuthalement symétrique autour de la verticale locale à un niveau qui peut causer plusieurs centimètres d'erreurs dans une mesure d'une base (environ 1ns).

A partir de mesures à la surface, de la température et de l'humidité relative, la composante humide est déterminée à mieux que 0.2-0.5 ns.

Pour les expériences géodésiques récentes, le retard observé a été corrigé par le retard troposphérique total à chaque station, calculé sur la base des mesures de pression de la surface pour l'élément sec, et des mesures de radiomètres de vapeur d'eau pour les éléments humides.

$$\tau_t = \tau_{t2} - \tau_{t1} \qquad (29)$$

En absence de telles calibrations externes, il a été trouvé que le modèle du retard de Zénith, comme fonction linéaire du temps, améliore la modélisation de la troposphère considérablement. Les paramètres de Zénith secs et humides sont écrits comme suit :

$$\rho_{zs,h} = \rho_{zs,h} + \rho_{zs,h}{}^{t} \qquad (30)$$

Si Ei est l'angle d'élévation géodésique apparent de la source observée à la station i, nous avons :

$$\tau_t = \rho_{zs} R_s(E_i) + \rho_{zh} R_h(E) \qquad (31)$$

où ρ_z est le retard supplémentaire au Zénith local dû à la présence de la troposphère et R, une fonction de projection de l'angle d'élévation.

La fonction qu'on utilise dans le traitement est celle de "Lanyi" (Lanyi, G. E., 1984). Dans sa forme la plus simple, cette fonction emploie des valeurs moyennes de constantes atmosphériques.

Dans l'analyse des données pour lesquelles les paramètres météorologiques ne sont pas disponibles, il convient d'introduire une approximation de la fonction de Lanyi qui implique une estimation d'un paramètre. Ce paramètre p explique la déviation des conditions météorologiques standards. Le retard troposphériques est exprimé comme suit :

$$\tau_t = (\rho_{zs.} + \rho_{zh.})/(\sin E + p\partial\tau_t/\partial p) \qquad (32)$$

2.1.1.4. Le retard ionosphérique

C'est le retard que subit l'onde à la traversée de la partie ionisée de l'atmosphère (effet différentiel entre deux lignes de visée). C'est un effet dispersif, c'est à dire proportionnel à l'inverse du carré de la fréquence. A 8.4 Ghz, sa valeur au Zénith est comprise entre 0.1 et 2 ns, avec un maximum vers 14h locales et un minimum pendant la nuit. Ceci dépend essentiellement de l'agitation magnétique journalière sous l'effet du soleil. Par exemple le retard τ_{ion} est calculé à partir du compteur électronique total de l'ionosphère suivant les deux lignes de visée, mais la précision d'un tel calcul reste limitée car ce paramètre est difficile à déterminer.

Une autre technique, appliquée dans toute les observations VLBI de haute précision, consiste à mesurer le retard de synthèse de bande simultanément

à deux fréquences. On peut alors déduire la contribution de l'ionosphère dans cette observable, par la combinaison suivante:

$$\tau = a\tau_{\upsilon 2} + b\tau_{\upsilon 1} \tag{33}$$

avec $a = (\upsilon_2)^2 / [(\upsilon_2)^2 - (\upsilon_1)^2]$ et $b = -(\upsilon_1)^2 / [(\upsilon_2)^2 - (\upsilon_1)^2]$.

$\tau_{\nu 1}$ et $\tau_{\nu 2}$ sont les retards totaux mesurés aux fréquences ν_1 et ν_2 généralement égales respectivement à 2.3 Ghz et 8.4 Ghz. τ est le retard total déduit de la contribution de l'ionosphère:

$$\tau = \tau_{\upsilon 1} - \tau_{ion1} = \tau_{\upsilon 2} +.\tau_{ion2} \tag{34}$$

2.1.2. Modèle de la fréquence de franges

L'interféromètre est capable de produire plusieurs types de données : le retard de groupe, le retard de phase et la fréquence de frange qui est la variation du retard de phase avec le temps. Les modèles étudiés ci-dessus sont directement applicables soit au retard de phase soit au retard de groupe. Cependant, le modèle de la fréquence de frange doit être construit séparément ou bien être obtenu en formant la différence de temps de deux valeurs de retard de phase comme indiqué ci-dessous. Nous utilisons la dernière solution puisque seuls les modèles de retard sont nécessaires. Les deux valeurs de retard de phase, τ_{pd} ($t \pm \Delta$) utilisées pour représenter le contenu de l'information de mesure de vitesse du retard, sont calculées comme exposé en (§.2.1.1). Utilisant ces deux valeurs de τ_{pd} , la quantité R qui modélise la fréquence de frange est construite comme suit :

$$R = \frac{\tau_{pd}(t+\Delta) - \tau_{pd}(t-\Delta)}{2\Delta} \tag{35}$$

Dans la limite $\Delta \rightarrow 0$ cette expression pour le retard de phase différencié n'est pas loin du taux de temps instantané du changement de retard de phase (fréquence de frange) au moment t. En pratique, Δ doit être assez grand pour éviter les erreurs qui proviennent de la prise de petites différences de grands nombres, mais doit également être assez petit pour permettre à R d'être une approximation assez proche de la fréquence de franges instantanée. Un compromis convenable semble être $\Delta \cong 2s$.

2.2. Ajustement des paramètres du modèle

Les modèles de retard et de fréquence de frange, comme nous l'avons défini précédemment, sont calculés pour tous les couples observables (retard, fréquence de franges).

Le modèle théorique comprend essentiellement le calcul du retard géométrique plus des corrections instrumentales ou physiques dont les principales sont citées dans le (§ 2.1.1.1)

L'ajustement de paramètres du modèle consiste à déterminer les écarts entre Les valeurs observées et les valeurs calculées notée (O-C). Ces écarts sont réduits par la suite par la méthode des moindres carrées tout en ajustant un certains nombre de paramètres du modèle aux mesures.

Certains paramètres entrant dans le calcul du modèle peuvent être supposés connus avec une précision suffisante. Ces paramètres ne seront pas résolus. Les autres seront pris comme inconnus en posant :

$$p_i = p^\circ_i + \Delta p_i$$

où p°_i est la valeur qui leur a été affectée dans le modèle;

Δp_i est un terme correctif du paramètre p_i

On calculera donc le retard à partir de ce modèle et, pour toute observation, nous écrirons en linéarisant par rapport aux Δp_i :

$$\Delta\tau = \Sigma\, (\partial\tau/\partial p_i)\, \Delta p_i$$

où les dérivées partielles sont calculées à partir du modèle lui-même. Nous obtenons des équations similaires pour la fréquence de franges. Avec un nombre N suffisant d'observations nous aurons N équations que nous résolvons généralement par la méthode des moindres carrées.

Le choix des inconnues dépend de l'application que l'on veut faire des observations. Dans notre traitement, nous avons ajusté les composantes des lignes de base dans une première application et les paramètres de la rotation de la terre pour une deuxième application. En ce qui concerne les autres paramètres qui sont ajustés mais dont les résultats n'ont pas de sens physique, nous citons :

- L'écart et la dérive (ou marche), qui sont les deux paramètres d'horloge. Ces deux paramètres doivent toujours être ajustés car ils constituent la principale source d'erreur du modèle. Comme ces retards d'horloges ne peuvent être décelés des retards instrumentaux (voir § 2.1.1.1), c'est plutôt la somme des deux retards qui est ajustée.

- La composante zénithale du retard troposphérique. L'ajustement permet de pallier, au moins partiellement, aux effets de l'inexactitude des modèles utilisés pour calculer le retard troposphérique. L'approche habituellement adoptée consiste à ajuster une valeur du retard par période de un à deux heures par station et par session. Ce type d'ajustement pose un problème de surparamétrisation. Un nombre trop important de paramètres peut biaiser la solution. Nous avons réservé

nombre trop important de paramètres peut biaiser la solution. Nous avons réservé une étude en détail pour le choix des intervalles ou des périodes d'ajustement des paramètres troposphériques.

De plus, les résidus d'une longue série d'observations seront analysés pour obtenir un meilleur modèle des autres paramètres. C'est ainsi qu'il sera possible de :

- Vérifier la fixité des positions des radiosources extragalactiques ou les améliorer.

- Déterminer des corrections aux expressions analytiques standard des matrices de la nutation et de la précession.

- Trouver les variations avec le temps de AB, variations dues au mouvement des plaques tectoniques.

Ces réductions globales pourront servir à améliorer les modèles utilisés et éventuellement à refaire les ajustements. Les positions des stations ainsi déterminées contribuent beaucoup à la définition d'un repère de référence terrestre alors que les catalogues de position de radiosources extragalactiques constituent des réalisations très précises d'un système de référence céleste cinématique.

Les précisions obtenues sont de l'ordre du centimètres pour les positions des radiotélescopes, de 0.1 ms pour UT1-UTC et de 0.001" pour les coordonnées du pôle. L'écart-type des résidus après ajustement est d'environ 80 ps pour les retards et de 0.1ps/s pour la fréquence de franges.

Les expériences VLBI sont essentiellement conduites dans le cadre de réseaux organisés (IRIS ou CDP) dont les sessions, d'une durée d'environ 24

heures, sont régulières (par exemple tous les 5 jours pour IRIS). Au cours de chacune d'elles, 3 à 6 radiotélescopes observent en moyenne une quinzaine de sources extragalactiques.

Plusieurs organismes sont équipés de matériel permettant le traitement des données VLBI. Les principaux sont :

- le National Geodetic Survey (NGS/USA), conduit le projet de mesure de la rotation de la terre depuis 1980. Les mesures collectées font l'objet d'un traitement en temps quasi réel et d'un ajustement global annuel.

- le Goddard Space Flight Center (GSFC/NASA, USA). Ce centre de traitement analyse les données VLBI dans le cadre du projet Crustal Dynamics depuis 1976 et, IRIS depuis 1980. Des ajustements globaux des coordonnées des stations et des sources sont effectués régulièrement.

- le Jet Propulsion Laboratory (JPL/USA), responsable du réseau DSN (Deep Space Network) de la NASA. Ce réseau connu par trois types d'antennes (26, 34 et 70 mètres) en Californie, Espagne et Australie. Un projet conduit par cet organisme TEMPO (Time and Earth Motion Precession Observations), consacré à la mesure de la rotation de la terre. Par ailleurs un catalogue de radisource est produit régulièrement par ajustement global.

Parmi les logiciels qui ont été développés par différents centres de traitement, on peut citer : MODEST (JPL, USA), CALC-SOLVE (Goddard Space Flight Center, USA), BVSS (Université de Bonn, RFA), OCCAM (Institut d'Astronomie et Géodésie, Madrid). GLORIA, en cours de développement (IGN-Observatoire de Paris, France).

3. ANALYSE DES OBSERVATIONS DE VLBI MOBILE

Les expériences géodésiques de VLBI ont pour but, la détermination des coordonnées des stations en s'appuyant sur un système de référence céleste bien établi au préalable (§2.1.1). Dans la réalité, les choses sont moins simples: on détermine généralement tous les paramètres au cours d'un traitement global des observations.

La campagne EUREF de VLBI mobile qui s'est déroulée en Europe en 1989 a eu pour but d'établir un réseau géodésique de haute précision. Une fois établi, le réseau servira de référence pour d'autres études (géodynamique, océanographique, etc.), et pour la détermination d'un système de référence terrestre global en le reliant au système de référence céleste extragalactique. L'expérience réalisée utilise l'équipement habituel des expériences de VLBI géodésique (système d'acquisition de données MARK3, récepteur double fréquence S et X avec une horloge maser à hydrogène). Ce système d'interférométrie radio nous permet d'obtenir en une journée d'observations une précision géodésique de quelques centimètres sur les composantes des lignes de base entre radiotélescopes. La durée de l'expérience est de 26 jours, étalés sur quatre mois en raison de quatre à cinq jours d'observations par station. Cette expérience inclut neuf sessions IRIS.

Les données de cette campagne sont fournies par le National Geodetic Survey (NGS) des Etats Unis. Ce sont les mesures des retards et des fréquences de franges. Le traitement de ces mesures est effectué à l'IGN en utilisant le logiciel MODEST du "Jet Propulsion Laboratoire". La détermination d'une solution

consiste à faire l'ajustement des paramètres géométriques (le vecteur joignant les deux radiotélescopes) à ces mesures.

L'analyse de ces mesures exige une étude préliminaire de traitement, au cours de laquelle nous estimons en premier les paramètres de l'horloge sur des intervalles déterminés session par session, tout en excluant les mauvaises observations. Les seuls paramètres déterminés pour la solution préliminaire ont été, pour chaque station, à l'exception de WETTZELL choisie comme référence, les coordonnées géodésiques avec un retard troposphérique vertical et en moyenne de deux à quatre segments linéaires d'horloge. Tous les autres paramètres des modèles a priori considérés ont été fixés

Une première solution globale standard a été envisagée, résolvant les paramètres suivants : par session et par station deux paramètres réalisant une modélisation linéaire du retard troposphérique vertical, toutes les coordonnées des stations et les mêmes segments d'horloges qui sont déterminés au cours du traitement préliminaire. Les résidus, après ajustement du modèle sur les mesures, ont une distribution normale et une moyenne quadratique de l'ordre de 100 ps pour les retards et de 70 fs/s pour les fréquences de franges. La comparaison des coordonnées déterminées par la solution globale dans le système de référence terrestre avec l'ITRF90, qui est une solution par rapport à un système géocentrique, nous a permis de conclure sur la précision de nos résultats : de l'ordre de 2 cm (1σ) sur les coordonnées des stations.

La solution standard finale a été avec les mêmes paramètres d'horloges qu'au traitement préliminaire, plusieurs paramètres de troposphère par session et par station. La solution des coordonnées des radiotélescopes est comparée avec l'ITRF90 et la solution du NGS (Abell, M.D. et al, 1990). Les résidus ont une

distribution normale et une moyenne quadratique de l'ordre de 80 ps pour les retards et de 70 fs/s pour les fréquences de franges.

A partir de la solution globale standard, nous avons calculé quelques solutions expérimentales ayant pour double objectif :

a- déterminer les paramètres de la rotation de la terre (X, Y et UT1-UTC) tout en fixant les coordonnées des stations munies d'antennes fixes;

b- essai d'amélioration de la précision sur les coordonnées en tenant compte d'un modèle de charge océanique.

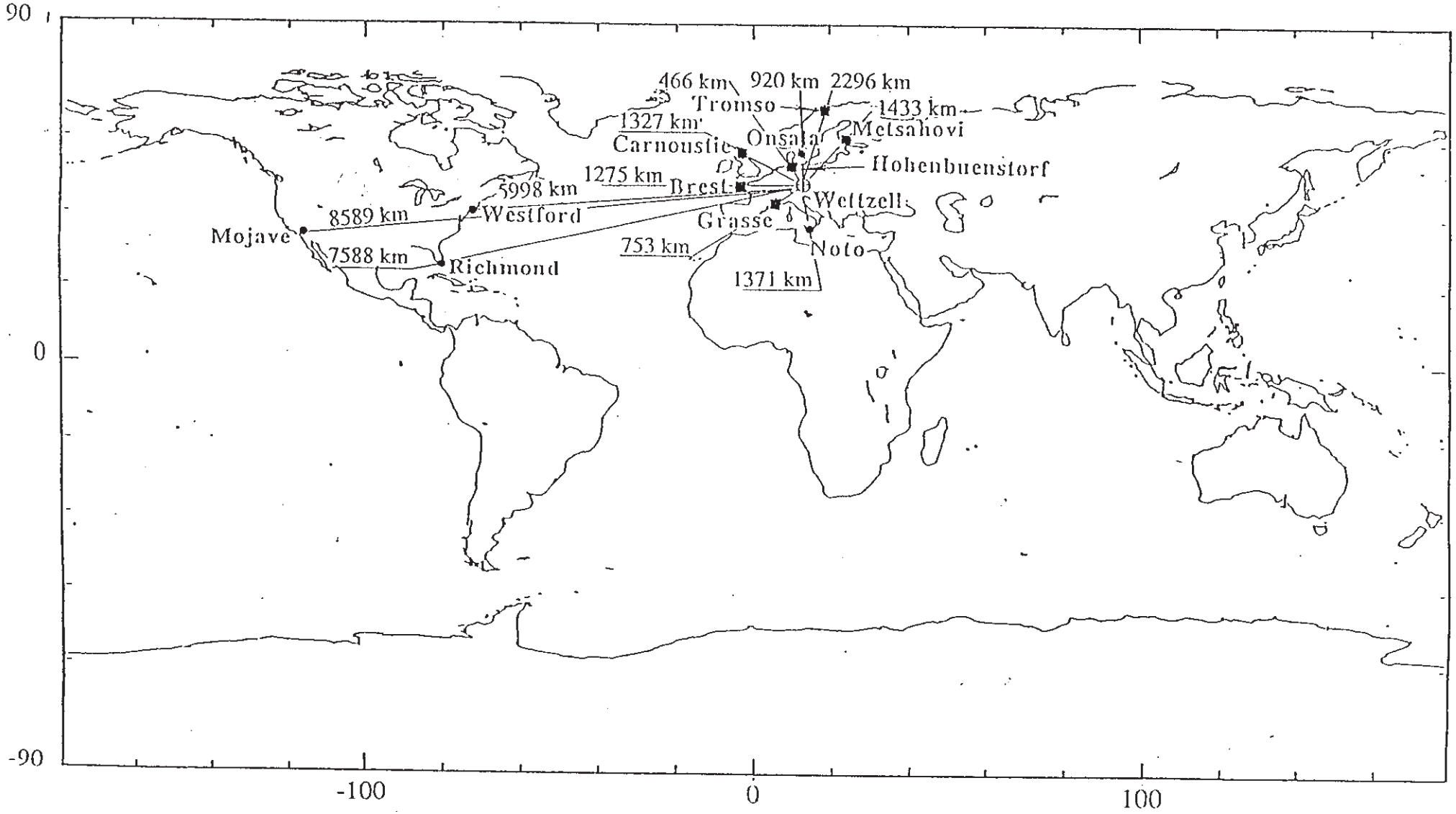
3.1. INVENTAIRE DES SESSIONS D'OBSERVATIONS

3.1.1. Réseau des stations

Le réseau de stations observées pendant la campagne EUREF de VLBI mobile 89 est formé par six stations mobiles européennes et six stations fixes, dont trois européennes et trois américaines. Les longueurs des lignes de base par rapport à WETTZELL, station de référence, varie de 400 km à 9500 km (figure I.5). Avec ce réseau, on dispose d'une répartition de stations sur deux plaques tectoniques : européenne et américaine (Tableau I.1).

Figure I.5 — RESEAU DE LA CAMPAGNE DE VLBI MOBILE 1989

Configuration des lignes de base % WETTZELL



■ Station mobile • Station fixe ⊕ Station de référence

N°	Station	Code	Pays	Plaque tectonique
1	BREST ~	BREST	France	EURA
2	CRANUSTY ~	CARNU	GB	EURA
3	GRASSE ~	GRASS	France	EURA
4	HOHENBUENSTORF ~	HOHEN	Allemagne	EURA
5	METSAHOVI ~	METSH	Finlande	EURA
6	MOJAVE *	MOJAV	USA	NOAM
7	NOTO *	NOTOP	Italie	EURA
8	ONSALA *	ONSAL	Suède	EURA
9	RICHMOND *	RICHM	USA	NOAM
10	TROMSONO ~	TROMS	Norvège	EURA
11	WESTFORD *	WESTF	USA	NOAM
12	WETTZELL **	WETTZ	Allemagne	EURA

~ :station mobile
* :station fixe
** :station de référence

Tableau I.1. réseau des stations de la campagne VLBI mobile 1989

3.1.2. Les sessions d'observations

Une session d'observation ou une expérience a une durée moyenne de 24 heures. Le nombre des stations observées pendant une session varie de 2 à 6 (Tableau I.2) avec:

- quatre sessions de deux stations;
- treize sessions de trois stations;
- sept sessions IRIS de six stations;
- deux sessions IRIS de cinq stations.

Durée		Nombre de stations	MV3 Mobile	Stations Fixes					
Début (Tu)	Fin (Tu)			WETTZ	WESTF	MOJAV	RICHM	ONSAL	NOTOP
21/06 18h	22/06 18h	6	HOHEN	X	X	X	X		X
23/06 07h	24/06 07h	3		X					X
24/06 07h	25/06 07h	3		X					X
25/06 10h	26/06 10h	3		X					X
26/06 18h	27/06 18h	6		X	X	X	X		X
								X	
05/07 07h	06/07 07h	3	METSH	X				X	
06/07 07h	07/07 18h	6		X	X	X	X	X	
08/07 07h	09/07 07	3		X				X	
09/07 07h	10/07 07h	3		X				X	
11/07 18h	12/07 18h	6		X	X	X	X		
								X	
30/07 15h	31/07 15h	3	TROMS	X				X	
31/07 18h	01/08 18h	6		X	X	X	X	X	
01/08 20h	02/08 20h	3		X				X	
02/08 20h	03/08 20h	3		X					
18/08 20h	19/08 20h	2	CARNU	X					
19/08 20h	20/08 07h	2		X					
20/08 18h	21/08 18h	5		X	X	X	X		
22/08 07h	23/08 07h	2		X					
30/08 18h	31/08 18h	6	BREST	X	X	X	X		X
01/09 07h	02/09 07h	3		X					X
02/09 07h	03/09 07h	3		X				X	X
04/09 18h	05/09 18h	6		X	X	X			X
12/09 07h	13/09 07h	3	GRASS	X					X
13/09 07h	14/09 07h	3		X					X
14/09 18h	15/09 18h	5		X	X	X	X		
16/09 07h	17/09 07h	2		X					

Tableau I.2 - Les sessions d'observation de la campagne de VLBI mobile 1989

- Le NGS est l'organisme coordinateur.

3.1.3. Les quantités observées

Le nombre de mesures par session d'observations du retard et de fréquence de frange varie de 68 à 919 et le nombre de sources observées par session varie entre 14 et 16 (Tableau I.3). Les sources observées durant toute la campagne sont au nombre de 24. Les valeurs de déclinaison et de l'ascension droite des sources sont fournies par l'IERS.

Les sessions d'observations	Nombre d'observations (τ,τ)	Nombre d'observations moyennées par base	Nombre de sources observées
21/06	834	56	15
23/06	320	107	16
24/06	316	105	16
25/06	316	105	16
26/06	896	60	15
05/07	291	97	15
06/07	820	55	15
08/07	349	116	15
09/07	311	103	15
11/07	774	52	15
30/07	322	107	15
31/07	279	65	15
01/08	308	103	15
02/08	293	98	15
18/08	068	68	15
19/08	078	78	14
20/08	683	68	15
22/08	154	154	15
30/08	784	52	15
01/09	337	112	15
02/09	297	99	16
04/09	919	61	16
12/09	251	84	16
13/09	304	101	16
14/09	660	66	15
16/09	115	115	16

Tableau I.3 Nombre d'observations par session.

3.2. TRAITEMENT PRELIMINAIRE

3.2.1. Mode opératoire

Ce paragraphe décrit la procédure à suivre pour le traitement jusqu'à l'obtention de solutions correctes session par session. Les données seront ensuite regroupées pour des solutions globales.

Le mode opératoire du traitement comprend cinq étapes :

3.2.1.1 Réception des données.

La bande magnétique des données contient 52 fichiers de nom 89MONDDB.dat

où MON est l'acronyme du mois (JUN, JUL, AUG, SEP);

DD le jour, B la bande (S ou X).

Dans la suite du traitement, nous n'utiliserons que le fichier qui contient les données bifréquence 89MONDDX.DAT. les fichiers sont copiés séquentiellement sur disque.

3.2.1.2 Passage des données en format MODEST

Les données de l'expérience VLBI sont fournies par le NGS en FORMAT dit "NGS cards" où une session d'observation est regroupée dans un fichier ASCII éditable (89MONDDX.DAT, ou 89MONDDS.DAT). Le programme de MODEST "NGS.EXE" permet de créer un format d'entrée pour MODEST à partir des données format "NGS cards". Il utilise en entrée deux fichiers dictionnaires qui représentent les sources et les stations (srcdict.dat et

stndict.dat) fournis par le "Jet Propulsion Laboratory" (JPL) et le fichier de données (89MONDDX.DAT). En sortie, il génère les fichiers suivants :

89MONDDB.CLB :fichier des données en format MODEST;

89MONDDB.MET :fichier des données météo de surface moyenne de la session;

89MONDDB.TRP : fichier des allongements troposphériques zénithaux calculés à partir des données météo de surface avec le modèle de Saastamoinen.

le programme NGS a été modifié pour sortir 89MONDDB.EXC: fichier des scans auxquels la corrélation a décerné une mauvaise note, par le format nécessaire pour les exclure dans MODEST.

Le fichier 89MONDDX.CLB, qui est en format "normal" pour MODEST est transformé en format "minimal" par le programme CLBPRINT avec l'option "copy". Le fichier de sortie en format minimal est 89MONDDX.COPM. Ce fichier qui servira d'entrée à MODEST, se transforme par le programme CLBFIT de la version MODEST qui date de Mai 90, en un fichier d'entrée MODEST adapté aux différents modules de la nouvelle version MODEST. Il prendra le nom 89MONDDX.FIT. A partir de ce fichier, on peut extraire des informations sur l'ordre des lignes de bases, le nombre d'observation, la date des observations et les sources observées.

Un exemple de fichiers relatifs à cette étape est donné en Annexe A.

3.2.1.3 MODEST/O-C

Cette étape correspond à la partie de MODEST qui concerne le calcul du modèle. Au niveau du traitement, Il s'agit dans cette étape de vérifier les assignations et commandes relatives à l'exécution de MODEST.

En entrée on a trois types de fichiers :

- les fichiers généraux relatifs à l'expérience et qui sont VLBIM89X.STA, VLBIM89X.CAT et VLBIM89X.UTPM, qui contiennent respectivement les coordonnées station source, et orientation de la terre. Il pourront être de deux types: X= 'N' pour les données NGS, X= 'I' pour les données IERS. Dans la suite du traitement nous avons utilisé les données de l'IERS.

OCNTDLP.DAT paramètres de charge et de marées océaniques à éditer avec des valeurs nulles à priori.

ATMUTC.DAT "TAI-UTC" les secondes intercalaires.

- les fichiers auxiliaires pour chaque session sont :

89MONDD.clk paramètre d'horloge à éditer avec des valeurs nulles à priori.

89MONDD.MET produit par le NGS.EXE.

89MONDD.TRP produit par le NGS.EXE.

Le fichier des options 89MONDD.IOC est à éditer pour indiquer: un titre ("Archive header") et les numéros d'observations à sélectionner ("observation selection list"). Il importe aussi de choisir toutes les options concernant le modèle à priori (horloge, troposphère, ionosphère et la géométrie).

Nous lançons l'exécution par le fichier de commande VLBIM89.COC avec le paramètre "89MONDD" pour les noms des fichiers auxiliaires et "X" (N ou I) pour les noms de fichiers généraux.

En sortie, un fichier printout 89MONDD.POC est produit ainsi que le fichier binaire 89MONDD.OMC pour la partie SOLVE de MODEST. L'examen du fichier éditable 89MONDD.POC nous assure que toutes les observations voulues ont bien été retenues (une mauvaise option de sélection ayant pu se produire). Un fichier résumé éditable de 89MONDD.OMC peut être obtenu par l'exécution du programme REGDMP.EXE de MODEST.

Un extrait de ces fichiers et un organigramme sont donnés en Annexe B.

3.2.1.4 MODEST/SOLVE

Cette étape correspond à l'ajustement des paramètres modèle par moindres carrés. De même que pour le fichier VLBIM89.COC, on prépare un fichier commande VLBIM89.CSL. L'exécution de ce dernier fait appel au fichier "pose des équations" de MODEST/OMC et au fichier des options 89MONDDY.ISL, où Y est une chaîne de caractères permettant de distinguer différents tests de traitement. La préparation du 89MONDDY.ISL se fait par édition et mise à jour d'un fichier existant de même type. Il faut surtout vérifier les options des parties "REGRESS INPUT PROCESSING INSTRUCTION" qui définissent les observables à retenir et l'hypothèse de traitement (les paramètres fixes et les paramètres à résoudre), les scans "INCLUDE" (numéro des observations), les différents changements de paramètres d'horloge et de troposphère, et les mauvaises observations ("EXCLUDE LIST"). Un exemple des fichiers 89MONDDY.ISL, VLBIM89.CSL et un organigramme relatif à cette étape sont données en Annexe C.

On lance l'exécution par VLBIM89.CSL un fichier printout 89MONDDY.PSL et un fichier binaire 89MONDDY.BIN sont produits. Ce dernier nous permet d'extraire des informations sur les différents paramètres traités: horloge, troposphère, les coordonnées des stations et la rotation de la terre etc.

La partie essentielle est l'étude des résidus qui sont visualisées avant et après l'ajustement pour chacun des types d'observables. A partir de ces résidus nous enlevons les mauvaises observations et nous définissons les changements de paramètres d'horloge dès qu'il y a un changement de marche dans le tracé des résidus.

Les valeurs ajustées des paramètres sont listées d'abord dans la partie "ADJUSTMENT" puis à la fin du listage dans un certains nombre de présentations et unités RMS (retard) et RMS (fréquence de frange). Un exemple de tracé des résidus du fichier 89MONDDY.PSL est donnée en Annexe D.

3.2.1.5 Identifier les sauts d'horloge et les mauvaises observations

Selon le tracé des résidus du fichier 89MONDDY.PSL on fait un choix des changements de paramètres d'horloge marqués par des changements de marches. Une fois que le choix est fait, on modifie le fichier 89MONDDY.ISL en incluant les changements de marches dans les scans. Nous procédons par la suite par itération jusqu'à ce que les résidus aient une distribution normale et arbitraire. Cette opération engendre l'identification des mauvaises observations dont la liste est placée après l'instruction "EXCLUDE LIST". Une étape d'itération du traitement avec les résultats des paramètres d'horloge les RMS du retard et de fréquence de frange d'une session d'observation est présenté en Annexe E

3.2.1.6 Repondérer les observations

Après le choix des changements de marches de l'horloge et l'élimination des mauvaises observations, on passe à la repondération des observations. Cette pondération se fait par la modification de la valeur du SIGCON après chaque itération. L'arrêt des itérations est déterminé par la valeur de l'erreur de l'observation de l'ordre de 1. Théoriquement, pour calculer l'erreur de l'observation (σ_{obs}), on ajoute un terme correctif (SIGCON) qu'on estime. Pour une meilleure estimation de la valeur SIGCON, des itérations seront nécessaires. L'erreur de l'observation est calculée par l'expression algébrique suivante:

$$\sigma_{obs}{}^2 = \sigma_2 + (\mathrm{SIGCON})^2$$

SIGCON permet l'ajustement des erreurs a priori aux résidus a posteriori. Les valeurs de SIGCON sont obtenues par un programme utilitaire "MFSUM.EXE", qui aura en entrée le fichier 89MONDDY.PSL et en sortie le fichier 89MONDDY.SIG

3.2.2. Résultats opératoires

L'analyse des différentes données des observations exige une étude préliminaire de traitement au cours de laquelle nous estimons les paramètres de l'horloge sur des intervalles déterminés base par base, tout en excluant les mauvaises observations. Les seuls paramètres déterminés ont été pour chaque station, à l'exception de WETTZELL choisie comme référence, les coordonnées géodésiques. Tous les autres paramètres des modèles a priori considérés ont été fixés, avec un retard troposphérique vertical et en moyenne de deux à quatre marches linéaires d'horloge (tableau I.4)

	CARNU	HOHEN	METSH	MOJAV	NOTOP	ONSAL	RICHM	TROMS	WESTF
21/06		2		2	3		1		2
23/06		4			4				
24/06		1			4				
25/06		1			2				
26/06		3		2	6		2		3
05/07			3			4			
06/07			2	2		2	2		2
08/07			5			3			
09/07			5			3			
11/07			3	1		3	1		2
30/07						3		2	
31/07				1		3	1	3	2
01/08						3		3	
02/08						2		1	
18/08	1								
19/08	3								

	BREST	CARNU	GRASS	MOJAV	NOTOP	ONSAL	RICHM	TROMS	WESTF
20/08		2		3			2		2
22/08		2							
30/08	2			2	3		2		2
01/09	2				2				
02/09	3				4				
04/09	2			2	3	3			1
12/09			3		1				
13/09			2		2				
14/09			2	2			1		2
16/09			4						

Tableau I.4 Nombre de changements de marches d'horloges par station pour chaque session d'observation

Le pourcentage d'observation exclues pour chaque base et pour chaque session est en moyenne de moins de 25% pour le retard et de moins de 20% pour la fréquence de frange. Cette moyenne est dépassée pour certaines bases où le pourcentage des observations exclues pour le retard est relativement élevé. Nous citons par exemple la base de BREST-MOJAV avec un pourcentage de 84 (voir Annexe E, Tableaux I.4.a à I.4.u). Le pourcentage des observations exclues pour toutes les bases construites avec MOJAVE n'est pas élevé. Il varie entre 13 et 37%, à part celui avec BREST où il est de 84%. Par contre, pour toutes les bases construites avec BREST le pourcentage des observations exclues est toujours assez élevé.

Le résultat de la repondération des observations : traitement décrit dans le mode opératoire (§.3.2.1) est représenté en Annexe E (Tableaux I.4.a à I.4.u).

Pour chaque ligne de base, nous avons déterminé le bruit à ajouter (SIGCON) après la détection des sauts d'horloges et les mauvaises observations. Les valeurs obtenues sont en accord à quelques exceptions près, avec la longueur de la base et la sensibilité des antennes de chaque station. Nous pouvons citer comme exemple WETTZ-NOTOP avec un SIGCON assez faible, et WETTZ-MOJAV avec un SIGCON plus grand (figures 6,7)

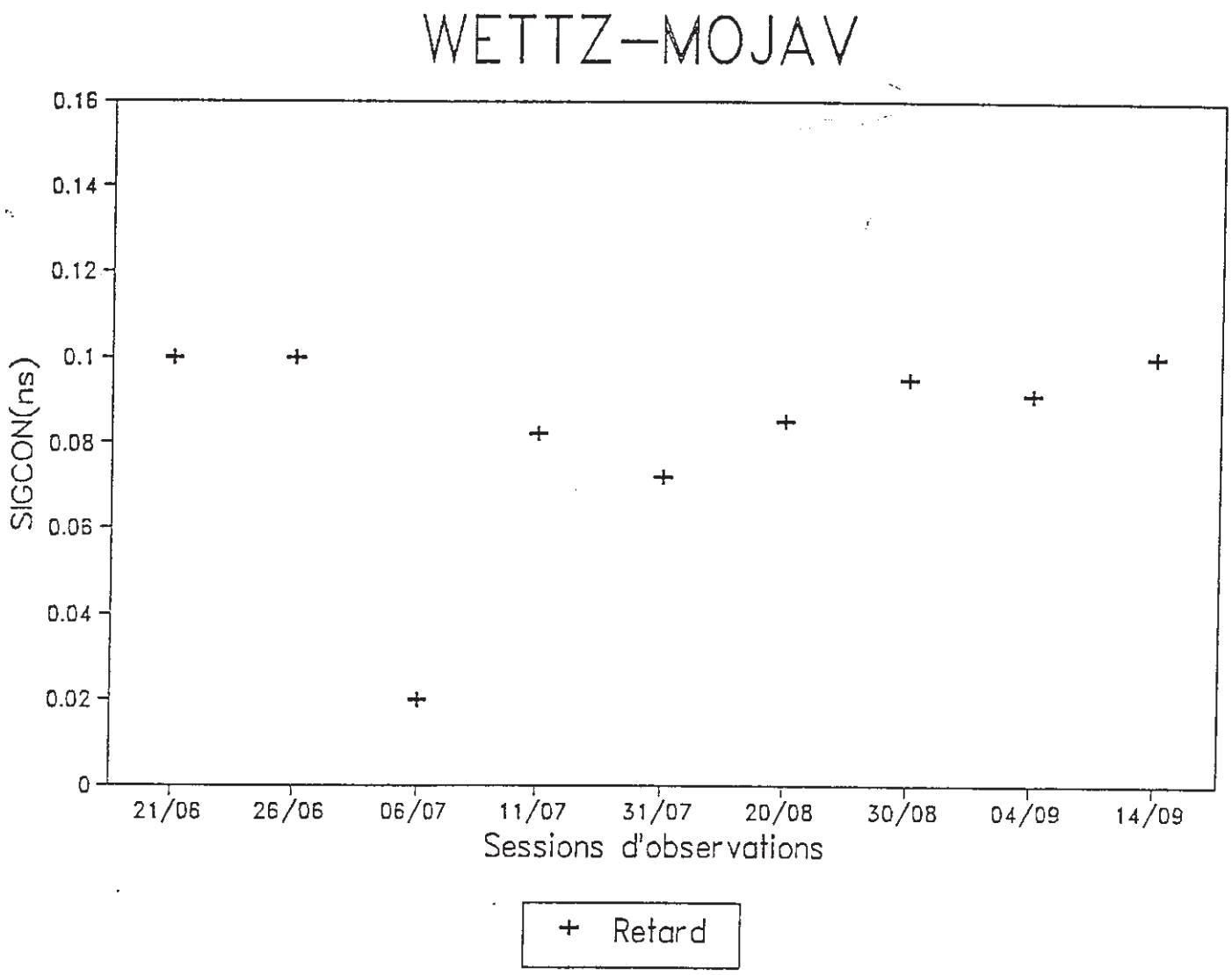


Figure I.6 Valeur du bruit ajouté (SIGCON) pour la base (Wettzell-Mojave)

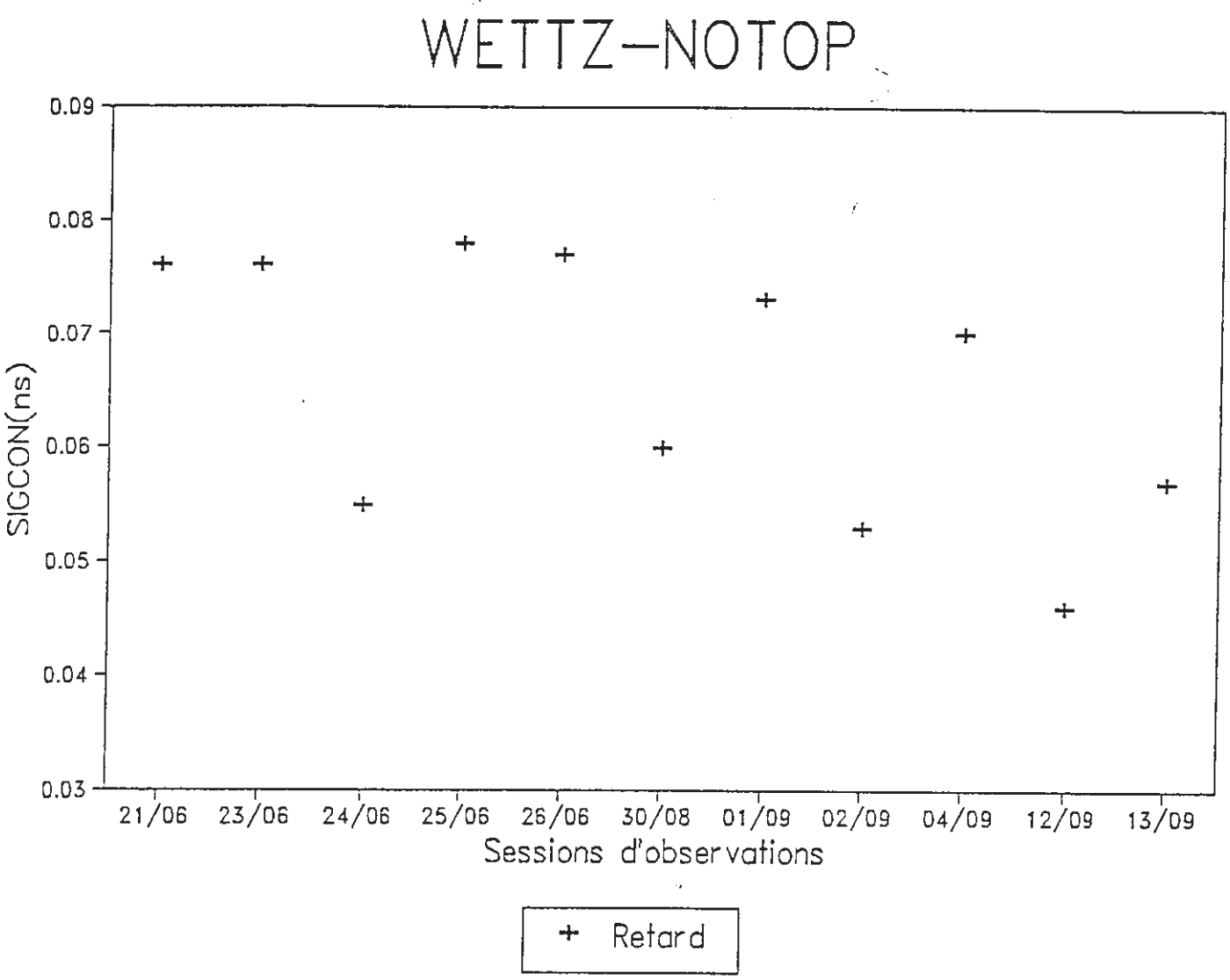


Figure I.7 Valeur du bruit ajouté (SIGCON) pour la base (Wettzell-Noto)

3.2.3. Résultats géodésiques préliminaires

Avant d'aborder le traitement global, une étape préliminaire paraît nécessaire pour s'assurer de la consistance de la reproductibilité des solutions session par session.

Les quantités mesurées par les techniques du VLBI sont conditionnées d'une part par les propriétés physiques des milieux dans lesquels ces mesures sont réalisées et d'autres part par les techniques de mesures (la synchronisation des horloges, l'électronique et la géométrie de l'antenne).

Dans le cadre de la détermination des coordonnées des stations par rapport à la station de référence WETTZELL nous avons choisi les séries des paramètres de ces modèles de manière cohérente avec le traitement (Tableau I.5).

Modèle	Catégorie	Type de modélisation
Horloge	terme de l'horloge (époque, rate, offset)	linéaire
Troposphère	retard vertical	modèle Saastamoinen
	fonction de projection de l'angle de l'élévation	Lanyi
Orientation de la terre	précision, nutation	IAU
	UT1, mouvement polaire variation du pole céleste	IERS 90 C 04
Stations	système des coordonnées	cartésien IRTF90 époque 1989.7
	facteur gamma relativiste	1
	marée de la terre solide	quadripole réponse corrélation K1
Sources	coordonnées	système de référence céleste TI-34 RSC (IERS) 90 C 01

Tableau I.3.5 Paramètres du modèle.

L'ajustement des paramètres de ces modèles contribue à la qualité de la précision des résultats. Principalement, la précision sur les coordonnées des stations est limitée par certains facteurs qui sont:

- les fluctuations de la troposphère avec ces deux composantes humides et sèches qui perturbent la propagation du signal envoyé par la radiosource. Cette fluctuation est de l'ordre de 100 ps, ce qui est équivalent à 3 cm.

Le retard causé par la troposphère est incorporé dans le modèle par la valeur de la composante zénithale à chaque station. Pour la composante sèche, une valeur déduite de la pression atmosphérique mesurée à la station a été utilisée. Pour la composante humide de la troposphère, une valeur de 10 cm a été prise par défaut. La contribution de la troposphère est ramenée à la ligne de visée à l'aide de la fonction de Lanyi. L'erreur globale est estimée entre 1 et 15 cm.

- les sauts de l'horloge et les fluctuations de l'électronique (50-100 ps), (parfois plus)

- phénomènes connus mais négligés: structures des sources (10-100 ps) (Petit, G., et al., 1989; Charlot, P., 1989,), fluctuation mécanique de l'antenne (10-30 ps).

- phénomènes imparfaitement modélisés: orientation de la Terre dans l'espace et réalisation du système céleste. .

Nous voyons donc que le terme principal de l'erreur sur l'observable retard est dû à la contribution du retard troposphérique pouvant causer une erreur de l'ordre de (0.5 ns), les autres sources d'erreurs étant à un niveau inférieur (0.3 ns).

Une modélisation physique a priori adéquate est donc nécessaire afin d'estimer d'une manière rigoureuse les différents paramètres recherchés. Les ordres de grandeurs mentionnés montrent que la précision sur les coordonnées des radiotélescopes dépend essentiellement des paramètres de l'horloge, de la troposphère et les termes de correction de la nutation ($d\Psi$, $d\varepsilon$).

L'ajustement préliminaire consiste donc en l'estimation de ces paramètres. Dans cette étape de traitement préliminaire, nous nous intéressons uniquement à la détermination des coordonnées géodésiques de chaque radiotélescope pour chaque session . Ces coordonnées sont exprimées dans un système de référence qui est défini par l'origine (station de référence WETTZELL), une échelle (modèle de la relativité générale, le choix de c) et l'orientation est fixée comme suit: les positions des sources radio observées au cours des sessions ont été fixées aux valeurs du catalogue de L'IERS (Rapport annuel de 1990), ainsi que les paramètres de mouvement du pôle et de rotation de la terre (Annexe B).

Nous avons ajusté pour cette solution, session par session, un paramètre de retard vertical de la troposphère et en moyenne deux à quatre marches linéaires d'horloges, à l'exception de celle de WETTZELL déterminées dans la solution ligne de base par ligne de base (voir §3.2.2). Les autres paramètres sont fixes.

Les seuls autres paramètres déterminés sont les coordonnées des radiotélescopes hormis WETTZELL qui a été choisie comme station de référence.

Pour déterminer les coordonnées des radiotélescopes dans le système de référence terrestre de l'ITRF90, nous avons adopté les coordonnées de WETTZELL exprimées dans ce système.

Chaque run (une session d'observation) donne lieu à la détermination des coordonnées de chaque station par rapport à WETTZELL.

A partir des valeurs des déplacements (Tableaux I.6.a. à I.6.i.), où les nombres sont pour chaque journée les déplacements (vers l'Est, le Nord, la Verticale) en mm, nous avons calculé l'écart type des 4 ou 5 valeurs pour chaque coordonnée. Plus cet écart est faible, meilleure est la reproductibilité (Tableau I.7). Pour les stations européennes, elle est nominale, 1 cm RMS en horizontal, 4-5 cm RMS en vertical, ce qui est normal compte tenu du fait qu'un paramètre troposphère par jour à cette phase du calcul a été ajusté.

Pour les stations de la plaque américaine, nous avons calculé en plus des déplacements, les longueurs des bases transatlantiques avec leur écart type (Tableau I.8): 54 mm pour Mojave, 49 mm pour Richmond, 54 mm pour WESTFORD, ce qui montre que si les dE, dN, dW varient beaucoup, les longueurs sont bien déterminées. La reproductibilité est donc bonne pour les longueurs (5 cm RMS ce qui est acceptable compte tenu de la projection de la verticale sur la longueur), mais beaucoup moins bonne pour les composantes et présente des systématismes (comme à MOJAVE, RICHMOND et WESTFORD pour un jour donné). Une cause connue de ces rotations est la non prise en compte à ce stade du traitement des termes correctifs de la nutation.

		21/6	26/6	06/7	11/7	31/7	20/8	30/8	04/9	14/9
WESTF	dE	121	139	-49	42	22	60	288	2	76
	dN	140	171	46	-18	61	34	112	38	93
	dV	-126	112	-285	-60	-178	-277	-120	-249	-283
MOJAV	dE	-47	-37	-69	172	98	-16	-10	-10	-31
	dN	25	290	-39	212	131	27	114	-4	6
	dV	-117	-130	-387	-86	-110	-136	-40	-283	-241
RICHM	dE	56	63	-247	193	167	108	14	----	-111
	dN	76	126	-82	15	149	118	93	----	-99
	dV	-158	-101	-545	-45	-118	-150	-92	----	-374

		05/7	06/7	08/7	09/7	11/7	30/7	31/7	01/8	02/8	04/9
ONSAL	dE	-7	14	3	7	-6	2	-5	-3	1	1
	dN	-3	-11	0	-17	-36	3	-1	-13	-13	-18
	dV	8	82	-78	29	-70	-12	47	38	-32	-7

		21/6	23/6	24/6	25/6	26/6	30/8	01/9	02/9	04/9	12/9	13/9
NOTOP	dE	-150	-133	-135	-131	-124	-125	-129	-127	-127	-132	-126
	dN	-71	-66	-59	-64	-43	-63	-51	-49	-41	-63	-49
	dV	30	76	127	117	130	18	62	52	-28	90	69

Tableaux I.6.a à I.6.c Les déplacements des stations (Est, Nord, Verticale) en mm pour chaque session

		Juillet				
		05	06	08	09	11
METSH	dE	-28	-33	-20	-14	-50
	dN	36	38	-4	20	8
	dV	-43	-121	-4	-86	84

		juin				
		21	23	24	25	26
HOHEN	dE	-21	+1	+1	+2	-4
	dN	+6	-6	-2	-4	-6
	dV	-13	+32	+33	+5	+36

		Juillet		Août	
		30	31	1	2
TROMS	dE	64	35	52	36
	dN	12	-12	-34	-24
	dV	-73	-47	-24	36

		Août			
		18	19	20	22
CARNU	dE	1810	1816	1812	1812
	dN	-12	-7	-14	-2
	dV	-45	18	12	-102

		Août	Septembre		
		30	01	02	04
Brest	dE	1836	1832	1867	1846
	dN	83	92	86	91
	dV	-77	-159	+40	-120

		Septembre			
		12	13	14	16
GRASS	dE	-18	-24	-6	-2
	dN	-1	-0	7	12
	dV	-55	-128	-18	-2

Tableaux I.6.d à I.6.i Les déplacements des stations (Est, Nord, Verticale) en mm pour chaque session

Station	Jours	RMS (mm)		
		Est	Nord	Vertical
HOHEN	5	5	5	22
METSH	5	14	18	86
TROMS	4	14	20	47
CARNU	4	3	5	56
BREST	4	16	4	86
GRASS	4	10	6	56
ONSAL	10	6	11	50
NOTOP	11	7	10	46
RICHM	8	137	84	160
MOJAV	9	72	112	103
WESTF	9	55	56	97

Tableau I.7. Reproductibilité des solutions d'une session

	21/06	26/06	06/07	11/07	31/07	20/08	30/08	04/09	14/09
MOJAV	6,396	6,232	6,304	6,256	6,319	6,411	6,417	6,329	6,324
	RMS = 54 mm								
RICHM	8,435	8,435	8,464	8,383	8,355	8,386	8,488	-----	8,501
	RMS = 49 mm								
WESTF	5,232	5,314	5,327	5,404	5,320	5,262	5,315	5,313	5,216
	RMS = 54 mm								

Tableau I.8. Longueur des bases transatlantiques

calculées pour une journée et leur RMS

- seules les valeurs métriques des longueurs sont présentées .

Toutefois, un biais est possible en une station particulière car une rotation résiduelle de petite amplitude (quelques mas) peut affecter la solution globale. Enfin, parmi les causes d'erreur les observations de la station mobile sont un peu plus bruitées que les stations fixes du fait de la taille de l'antenne. Une autre source d'erreur est que les sessions IRIS ne sont pas optimisées pour la Géodésie en Europe de l'Ouest car elles sont optimisées pour des stations aux USA.

La moyenne quadratique des résidus qui est de 80 ps pour le retard et de 70 fs/s pour les fréquences de franges, montre que les différentes parties du modèle physique ont été correctement modélisées. En outre, la cohérence des séries des paramètres avec le traitement est bonne

Après le test de la reproductibilité des calculs, une première solution globale a été envisagée avec toutes les coordonnées des radiotélescopes, un retard de troposphère vertical par session et par station et les mêmes marches d'horloges qu'aux résultats opératoires (§3.2.2).

Les résidus, après ajustement du modèle sur les mesures, ont une distribution normale et une moyenne quadratique de 100 ps pour le retard et de 70 fs/s pour les fréquences de franges. La différence des RMS des résidus entre la solution session par session et la solution globale montre que l'ajustement est moins bon lorsqu'on utilise plusieurs paramètres mais il est plus représentatif de la réalité.

Par le moyen d'un logiciel de combinaison de jeux de coordonnées (SSCMIX de LAREG, Boucher, C., et al., 1988), nous avons comparé la solution globale préliminaire avec celle de l'ITRF90. Dans ce logiciel, nous considérons chaque solution comme un jeu de coordonnées et nous déterminons une solution

ajustée avec laquelle nous comparons chaque solution. La comparaison consiste à déterminer sept paramètres de transformation (trois paramètres de translation, trois paramètres de rotation et un facteur d'échelle) et les résidus.

La comparaison des coordonnées de la solution globale préliminaire (VLBIM1), déterminée dans le système de référence terrestre, avec l'ITRF90, qui est une solution par rapport à un système géocentrique, nous a permis de conclure sur la précision de nos résultats.

L'écart-type estimé entre les deux solutions est de l'ordre de 2 cm (1σ) sur les coordonnées (Tableau I.9). La valeur maximale résiduelle est de 5 cm sur la composante verticale de la station de BREST (Tableau I.10).

La différence d'échelle qui est de -2.2 est due à l'utilisation de l'échelle d'un système de coordonnées barycentriques par le logiciel de traitement MODEST alors que l'ITRF est un système géocentrique. Autrement dit, elle est due au potentiel gravitationnel des masses du système solaire, et vaut 1,5 10^{-8} (Helling, B., et al., 1986). Elle explique la plus grande partie de la valeur de -2,2 10^{-8}. Lors de la solution finale, le logiciel de traitement sera contraint à utiliser l'échelle d'un système géocentrique.

indice	designation	TX sigma TX (m)	TY sigma TY (m)	TZ sigma TZ (m)	D (10^{-6}) sigma D	RX (") sigma RX	RY (") sigma RY	RZ (") sigma RZ
1	VLBIM1	0.124	0.032	0.054	-0.0218	0.0009	0.0001	-0.0018
		0.025	0.018	0.020	0.002	0.0008	0.0001	0.0005

Tableau I.9 : Paramètres de transformation et écart-type estimés (ITRF90, VLBIM1)

a- Pour le jeu VLBIM1

ce jeu contient 12 points, dont 12 sont retenus,

Indice	Designation	Rejet (1)	Residus cartesiens (syst. equatorial, en m) (VX	VY	VZ)	Residus normalises (syst. equatorial) (NX	NY	NZ)	Residus cartesiens (syst. local, en m) (VL	VP	VH)
1	10002M003CERGA GR VLBI	1	0.012	0.000	0.000	1.348	-0.031	0.013	-0.002	-0.008	0.009
2	10004M002BREST VLBI	1	0.000	0.000	0.000	0.039	-0.076	0.020	0.000	0.000	0.000
3	13296M002BUDDON - VLBI	1	-0.019	0.000	-0.026	-1.584	0.003	-1.613	-0.001	0.001	-0.032
4	10302M002TROMSO VLBI	1	0.000	0.000	0.013	0.001	-0.011	1.114	0.000	0.005	0.013
5	10503M002METSAHOV VLBI	1	0.000	0.000	-0.016	-0.038	-0.056	-1.594	0.000	-0.008	-0.014
6	10402S002ONSALA-R VLBI	1	-0.001	0.000	-0.003	-0.335	0.175	-0.535	0.001	0.000	-0.003
7	14202M002HORENBUN VLBI	1	0.000	0.000	0.014	0.060	-0.229	1.784	-0.001	0.008	0.012
8	40405S009GOLDSTON VLBI	1	-0.001	0.001	0.003	-0.242	0.153	0.484	-0.001	0.003	0.002
9	40499S001RICHMOND VLBI	1	0.001	0.003	-0.007	0.164	0.313	-0.994	0.001	-0.005	-0.005
10	12717S001NOTO VLBI	1	0.000	0.000	0.000	0.027	0.049	0.112	0.000	0.000	0.000
11	40440S003WESTFORD VLBI	1	0.001	0.000	0.006	0.304	-0.048	0.884	0.001	0.004	0.005
12	14201S004WETTZELL VLBI	1	-0.001	0.000	-0.003	-0.074	0.044	-0.306	0.001	-0.001	-0.002

b- Pour le jeu ITRF90

Ce jeu contient 12 points, dont 12 sont retenus,

Indice	Designation	Rejet (1)	Residus cartesiens (syst. equatorial, en m) (VX	VY	VZ)	Residus normalises (syst. equatorial) (NX	NY	NZ)	Residus cartesiens (syst. local, en m) (VL	VP	VH)
1	10002M003CERGA GR VLBI	1	-0.007	0.006	-0.008	-1.048	0.309	-0.106	0.007	-0.001	-0.010
2	10004M002BREST VLBI	1	-0.046	0.016	-0.029	-0.475	0.633	-0.273	0.012	0.016	-0.053
3	13296M002BUDDON - VLBI	1	0.016	-0.001	0.023	1.452	-0.033	1.512	0.000	-0.001	0.028
4	10302M002TROMSO VLBI	1	0.000	0.003	-0.018	-0.005	0.104	-1.300	0.003	-0.007	-0.017
5	10503M002METSAHOV VLBI	1	0.023	0.015	0.016	0.379	0.460	1.594	0.004	-0.015	0.027
6	10402S002ONSALA-R VLBI	1	0.007	-0.002	0.015	0.754	-0.438	1.284	-0.004	0.003	0.016
7	14202M002HORENBUN VLBI	1	-0.021	0.000	-0.008	-0.419	0.229	-1.338	0.004	0.011	-0.019
8	40405S009GOLDSTON VLBI	1	0.002	-0.002	-0.004	0.339	-0.204	-0.553	0.003	-0.004	-0.002
9	40499S001RICHMOND VLBI	1	0.000	-0.001	0.001	-0.099	-0.156	0.426	0.000	0.001	0.001
10	12717S001NOTO VLBI	1	-0.052	-0.005	-0.008	-0.586	-0.341	-0.475	0.009	0.024	-0.046
11	40440S003WESTFORD VLBI	1	-0.004	0.000	-0.008	-0.532	0.068	-1.010	-0.003	-0.005	-0.007
12	14201S004WETTZELL VLBI	1	0.001	0.000	0.000	0.074	-0.024	0.102	0.000	0.000	0.001

Tableau I.10 a,b Résidus sur les coordonnées (VLBIM1, ITRF90)

4. SOLUTION GLOBALE STANDARD

4.1. Choix des intervalles d'ajustement des paramètres troposphériques

Malheureusement, la troposphère en entier avec ses deux composantes humide et sèche n'est pas modélisable facilement. La preuve expérimentale est donnée par (Resch, 1983). En outre, les mesures de surface sont très inadéquates dans l'estimation de la composante humide qui, même au zénith, peut atteindre 20 à 30 cm. Idéalement, ce retard troposphérique introduit doit être déterminé de manière expérimentale à chaque site (mesure de la pression, de la température et de l'humidité).

Le traitement habituel, connu dans la littérature, ajuste des paramètres troposphériques sur des intervalles de temps de longueur variable, souvent aussi courts que une heure, comme le cas du traitement fait par le NGS (Abell, M.D. et al, 1990). Dans ce cas, on ajuste sur chaque intervalle soit un biais constant, soit un segment de droite (biais et pente), et on peut introduire des contraintes entre les valeurs des paramètres des intervalles successifs. Ce type d'ajustement peut faire intervenir un nombre important de paramètres, et ceci peut biaiser la solution.

Pour éviter ce genre de problème dans le traitement, nous avons essayé de réduire le nombre de paramètres au minimum tout en conservant un sens physique à la solution. Pour ce faire, nous avons effectué des tests sur le choix des intervalles d'ajustement des paramètres troposphériques.

Pour confirmer l'hypothèse qu'il n'y a pas un modèle adéquat, qui nous permet d'estimer les paramètres troposphériques sur des intervalles bien déterminés, et trouver un traitement plus facile à appliquer tout en conservant la précision de la solution, nous avons estimé les intervalles d'ajustement en temps des paramètres troposphériques à partir du tracé de la composante sèche de la troposphère déterminée à partir du modèle de Saastamoinien (1972).

La composante sèche qui s'exprime par :

$$TP_s = Coeff * Pa$$

$$\text{avec } Coeff = [0.002277*(1+0.0026*\cos(2x\varphi)+0.00028*h)]$$

suit la variation de la pression troposphérique de la station.

A partir du tracé de la composante sèche du modèle Saastamoinien en fonction du temps de la session d'observations du 23 JUIN (prise comme un exemple type), pour chaque station (figures I.8, I.9, I.10), nous avons déterminé les horaires qui correspondent aux changements de pentes et par conséquent les numéros d'observations correspondants. La variation troposphérique significative est de l'ordre de 1 cm.

Les intervalles sur lesquels nous ajustons les paramètres troposphériques varient d'une station à une autre pour le modèle estimé, au contraire du traitement habituel où on ajuste systématiquement les paramètres troposphériques pour chaque station sur des intervalles d'une même durée. Respectivement pour (WETTZELL), (NOTO) et (HOHEN), les changements de pente sont situés aux observations (74, 105), (44,74,89) et (36). Les résidus de la solution sont comparés avec les résidus pour des solutions utilisant un ajustement sur des intervalles de temps réguliers (Tableau I.11.). La durée de la session du 23 JUIN

est de 24 h, et le nombre total d'observations est de 320. On calcule l'estimateur suivant :

$$EST = [NOBS * RMS^2 / (NOBS-NP)]^{1/2}$$

où NOBS: nombre total d'observations;

NP: nombre de paramètres résolus;

RMS : écart quadratique moyen des résidus du retard.

Cet estimateur a la même dimension que le RMS des résidus, mais est un estimateur sans biais de la qualité de l'ajustement : il tient compte du nombre de paramètres ajustés.

Δt	RMS(ps)	NP	NOBS	NIT	EST
12	73,61	38	320	2	78,40
8	71,24	44	320	3	76,71
6	65,57	50	320	4	71,38
4	63,58	62	320	6	70,81
3	59,18	72	320	8	67,22
2	57,32	98	320	12	68,82
Estimée	69,50	48	320	variable	75,38

Tableau I.11. Estimation des intervalles d'ajustement des paramètres troposphériques
NIT: Nombre d'intervalles troposphériques
Δt: Marches troposphériques chaque n heures

Le résultat obtenu montre que la différence du nombre de paramètres entre deux solutions extrêmes avec un ajustement chaque 2 h (98 paramètres) et chaque 12 h (38 paramètres) est plus important que la différence des valeurs de l'estimateur pour ces deux mêmes séries. En effet, le nombre de paramètres de la solution avec un ajustement chaque 2h est d'à peu près deux fois et demi la solution avec un ajustement chaque 12h. Par contre, les valeurs de l'estimateur varient très peu de 67,22 à 78,4. Si on fait un choix intermédiaire, c'est à dire une solution avec un nombre de paramètres moyen par rapport aux extrêmes, soit

donc la série de 50 (6h) et 62 (4h) paramètres . D'après l'estimateur, on a deux valeurs très voisines l'une de l'autre. nous avons choisi donc des intervalles de 6h qui donnent des résultats similaires à ceux de 4h tout en limitant le risque de surparamétrisation. Pour compléter cette étude, nous avons utilisé un deuxième test statistique pour trancher et argumenter notre démarche dans la suite du traitement. Le principe de ce test est d'étudier le type de bruit que représente la série des résidus des observations VLBI, avant introduction des paramètres troposphériques. Si on trouve que sur une certaine durée τ les résidus se comportent comme du bruit blanc, il n'y a pas de sens physique à introduire des intervalles de durée inférieure à τ. Pour déterminer le type de bruit de la série des résidus, nous utilisons la variance "d'Allan" modifiée (Allan, D.W., et al. 1981). Ayant des séries de résidus de 24 heures, il est possible d'estimer la variance d'Allan modifiée pour des durées allant jusqu'à 6 heures environ; et nous pouvons constater que les séries des résidus se comportent alors comme du bruit blanc de phase. En effet la variance d'Allan modifiée varie comme la puissance -3/2 de la durée de moyennage (figure I.11). Elle conforte donc le choix de la durée des intervalles d'ajustement des paramètres troposphériques à 6h.

Figure I.8 : CORRECTION TROPOSPHERIQUE EN FONCTION DU TEMPS

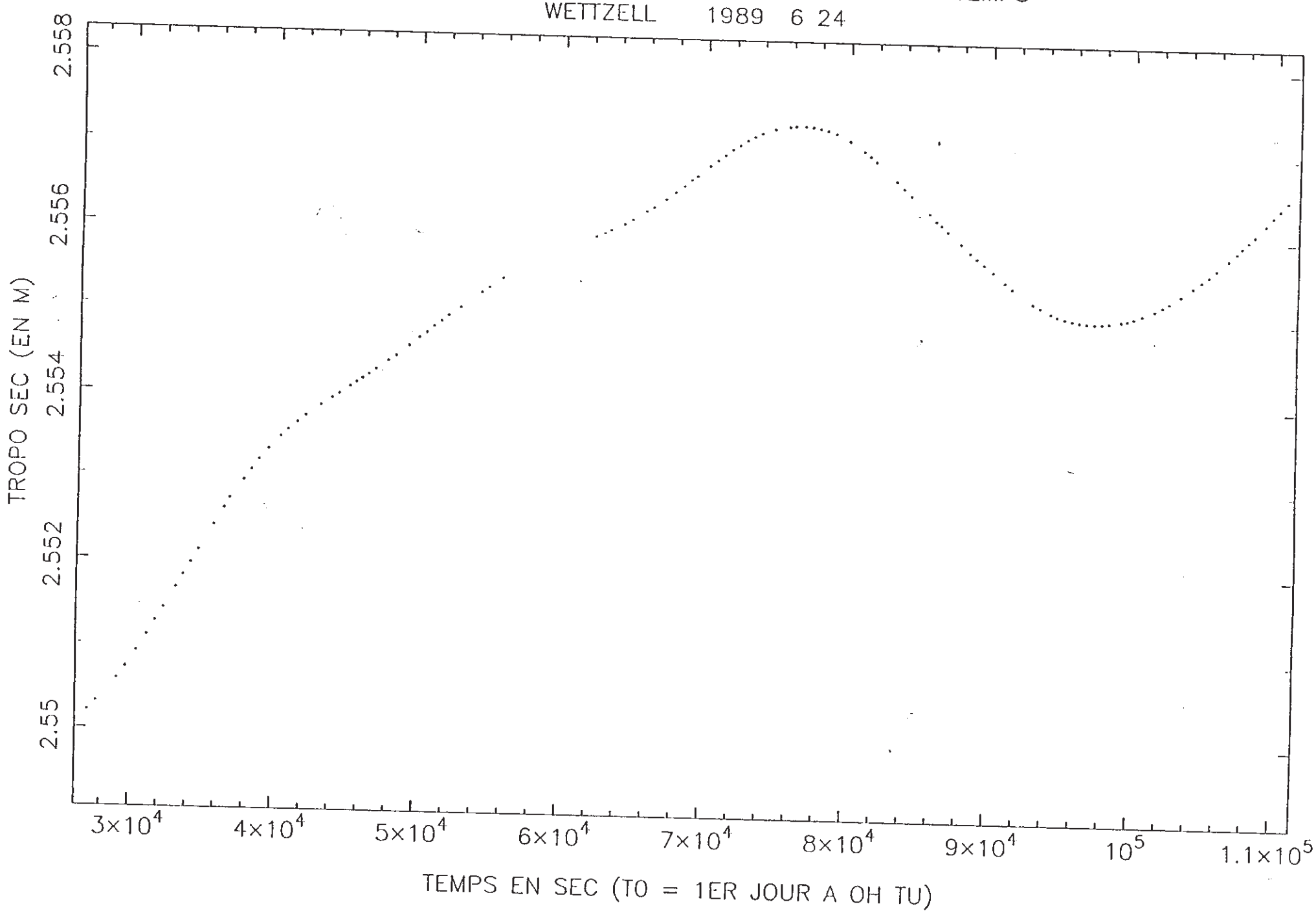


Figure I.9 : CORRECTION TROPOSPHERIQUE EN FONCTION DU TEMPS

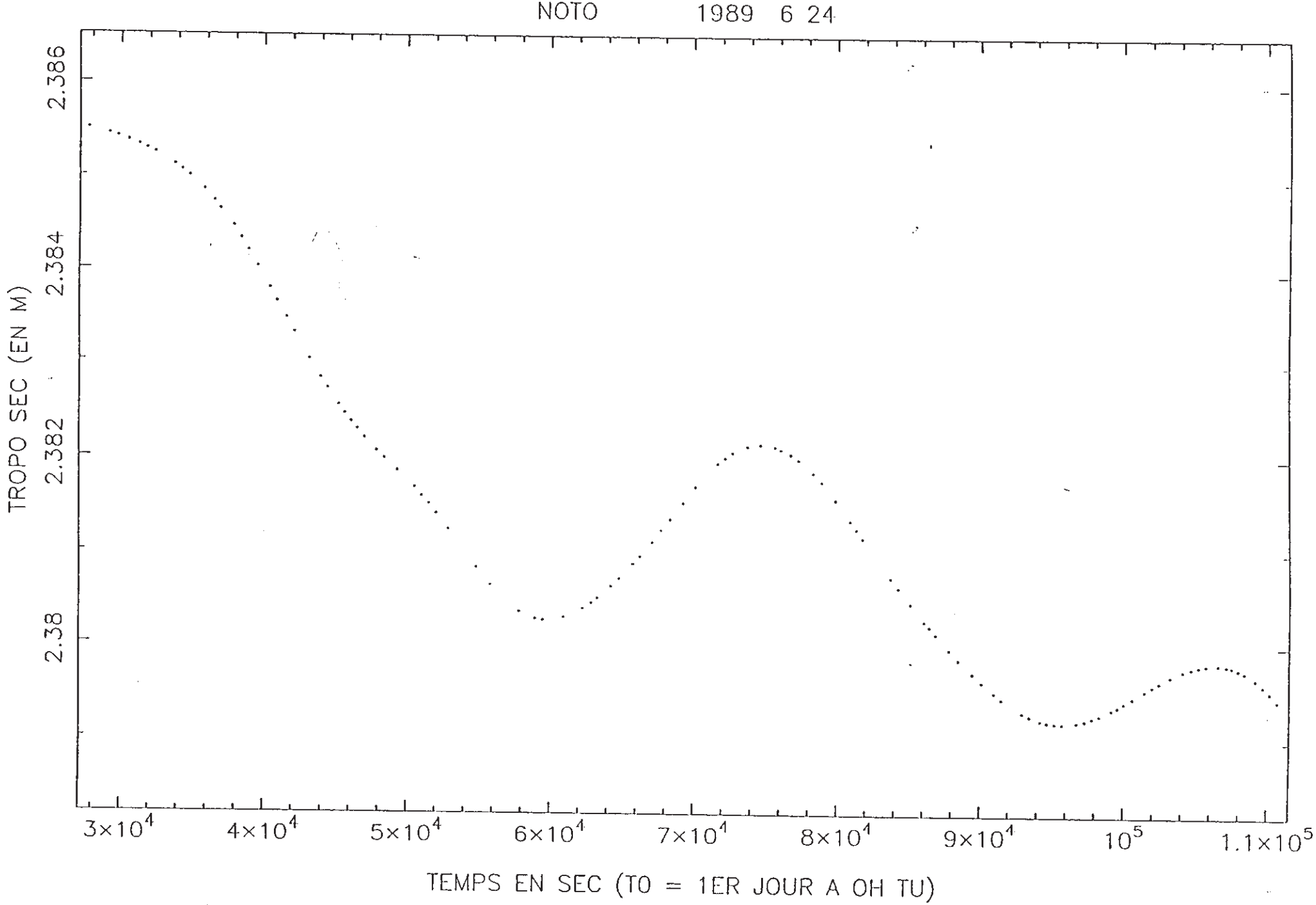


Figure I.10 : CORRECTION TROPOSPHERIQUE EN FONCTION DU TEMPS

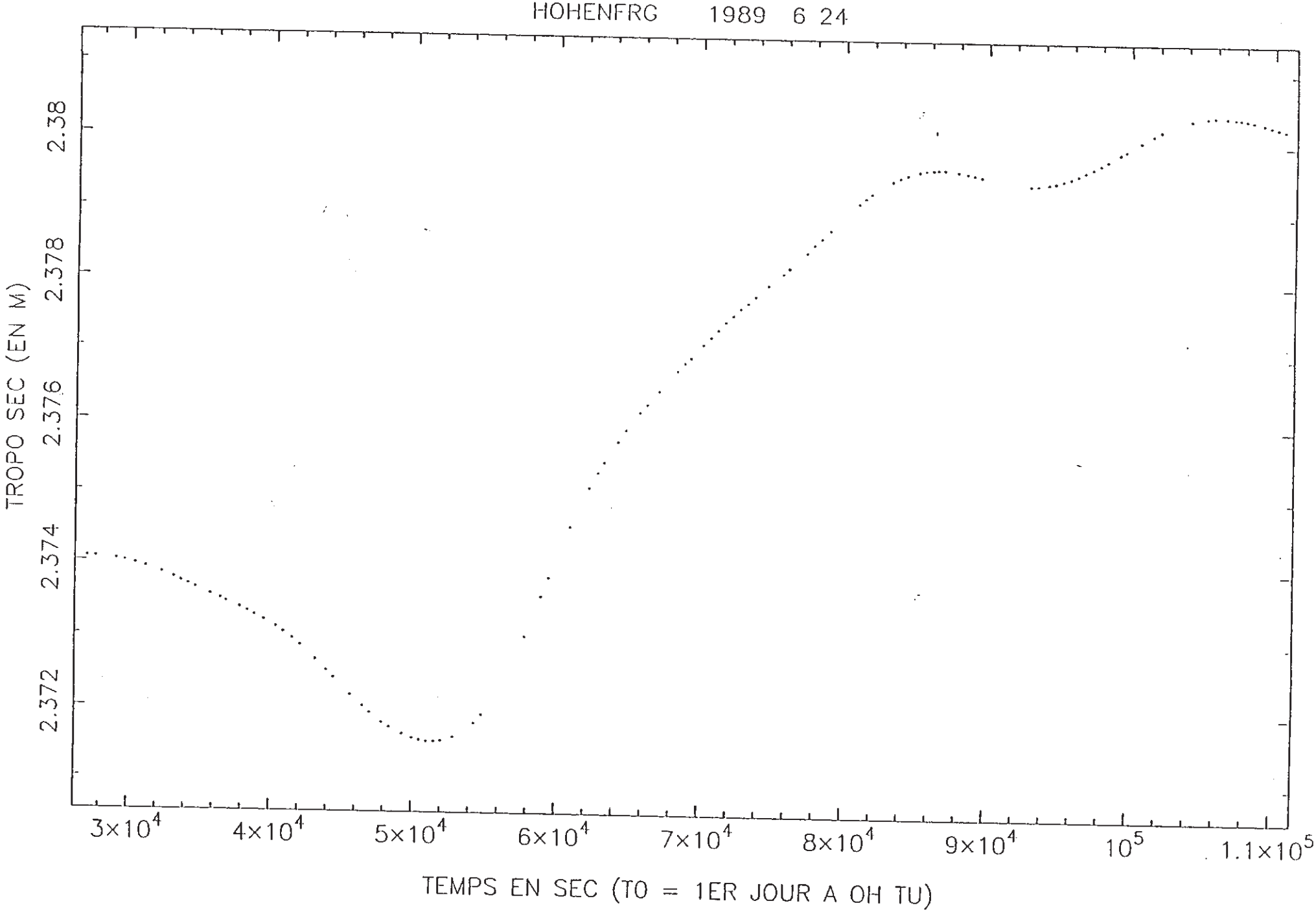
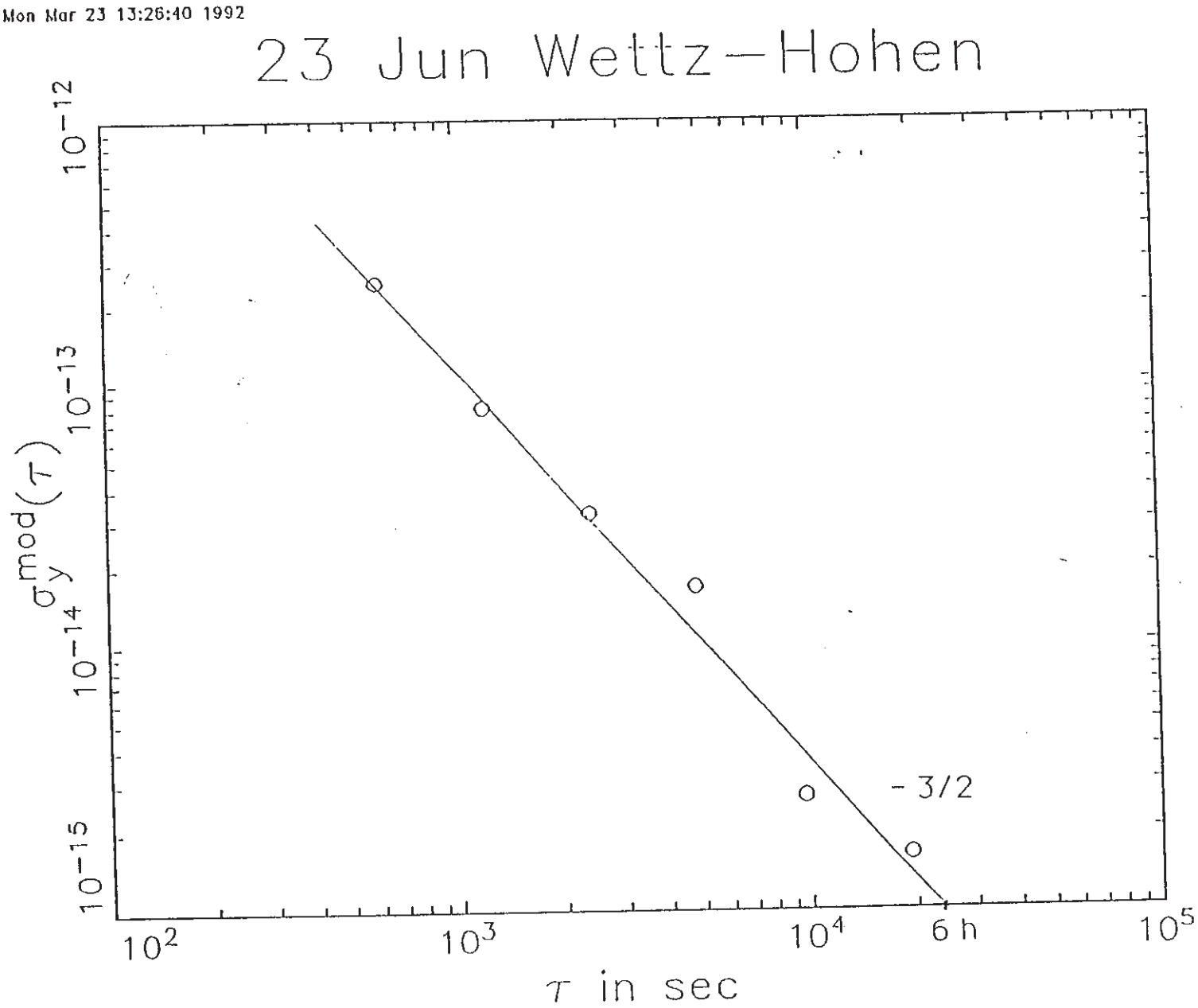


Figure I.11 : Etude du type de bruit des résidus des observations par la variance "d'Allan" modifiée



4.2. Description du modèle et hypothèse de calcul

L'ajustement final de la campagne européenne de VLBI mobile 1989 est basée sur 11778 couples de retards et de fréquences de franges, qui sont obtenus par l'observation de 24 sources radio (Tableau I.12). Les valeurs de déclinaison (δ) et de l'ascension droite (α) des sources sont fournies par l'IERS pour 1989.

Sont déterminés dans cette solution globale standard , les coordonnées des stations, les paramètres d'horloges et les paramètres troposphériques; les autres paramètres étant fixes.

Les paramètres d'horloges qui sont ajustés sont identiques au traitement préliminaire avec deux à quatre marches d'horloges par station et par session, sauf WETTZELL choisie comme référence.

Les coordonnées a priori des stations sont obtenues de la solution de l'ITRF90 à l'époque (1989.7). Dans notre solution, les coordonnées des radiotélescopes sont exprimées dans un système de référence terrestre défini comme suit :

- l'origine est définie par l'adoption des coordonnées de la station de WETTZELL. Cette station est choisie arbitrairement et fixée dans l'ajustement global, comme il a été procédé pour la solution préliminaire;

- l'échelle est celle du Système International d'unité SI, par le choix de la modélisation relativiste dans un système géocentrique (voir §3.2.3);

- l'orientation est fixée par l'adoption du système céleste et les paramètres de rotation de la terre de l'IERS. Ces valeurs sont les mêmes que celles prises dans la solution préliminaire (§3.2.3).

Les paramètres troposphériques (un biais et une pente) sont ajustés par station et par session . Le choix des intervalles d'ajustement de ces paramètres est déterminé par l'étude du (§4.1). Ces intervalles sont de 6h.

Les corrections du modèle de la nutation sont celles publiées par l'IERS (voir annexe B fichier : VLBIM89I.UTPM).

source	ascension droite (α)		déclinaison (δ)	
0Q208	$14^h\ 07^{mn}$	$00^s.394191$	28° 27'	14".688402
0552+398	05 55	30 .805640	39 48	49 .165402
1741-038	17 43	58 .855851	-03 50	04 .610000
4C39.25	09 27	03 .013751	39 02	20 .850502
0420-014	04 23	15 .800590	-01 20	33 .062700
VR422201	22 02	43 .291211	42 16	39 .983703
1055+018	10 58	29 .604961	01 33	58 .827700
0229+131	02 31	45 .893920	13 22	54 .720601
0J287	08 54	48 .874860	20 06	30 .639001
0528+134	05 30	56 .416650	13 31	55 .148401
1633+38	16 35	15 .492731	38 08	04 .502102
2121+053	21 23	44 .517271	05 35	22 .097100
1803+784	18 00	45 .683641	78 28	04 .020605
0212+735	02 17	30 .813390	73 49	32 .623304
0106+013	01 08	38 .771040	01 35	00 .323200
3C454.3	22 53	57 .747861	16 08	53 .565501
0234+285	02 37	52 .405700	28 48	08 .991602
0727-115	07 30	19 .112970	-11 41	12 .613801
NRA0150	03 59	29 .747330	50 57	50 .163003
3C273B	12 29	06 .699701	02 03	08 .595800
3C345	16 42	58 .809671	39 48	36 .995702
1334-127	13 37	39 .782781	-12 57	24 .700401
0742+103	07 45	33 .059570	10 11	12 .689100
2234+282	22 36	22 .471001	28 28	57 .420001

Tableau I.12. les 24 radiosources observées.

4.3. Résultats

Les résultats des données du traitement se résument dans le tableau suivant :

Données de la solution globale standard	Résultats	
	τ (ps)	τ (fs/s)
Nombre de paramètres ajustés	1305	1305
Pourcentage des observations exclues	27.7	19
Ecart quadratique des résidus (RMS)	89.8	78.4
Estimateur du facteur unitaire de variance	0.92	1.6

Tableau I.13 Résultats des données du traitement.

Le pourcentage des observations exclues est relativement élevé pour les retards et les fréquences de franges, mais est essentiellement dû aux lignes de bases transatlantiques des sessions IRIS incluant les stations mobiles. Les pourcentages concernant les sessions dédiées au VLBI mobile sont beaucoup plus faibles, ce qui reflète la bonne qualité des mesures.

Les résidus après ajustement du modèle sur les mesures ont une distribution normale et une moyenne quadratique de 89.8 ps pour les retards et de 78.4 fs/s pour les fréquences de franges. Les résidus sur les retards équivalent à

une valeur de 2.5 cm en moyenne, dont l'importance est due essentiellement à la modélisation de la troposphère. Les résidus sur les fréquences de franges sont aussi dominés par la contribution de la troposphère. Les résidus ont permis d'atteindre l'exactitude centimétrique, traduite dans les écarts-types, sur les coordonnées des radiotélescopes (Tableau I.14). Les écarts varient très peu, de l'ordre du cm. En plus des coordonnées et leurs écarts-types, ont présentés les déplacements, leurs écarts-types et les corrélations.

L'estimateur unitaire de variance χ^2, représente le degré de vraisemblance des hypothèses de calculs. A l'aide des résidus des retards et des fréquences de franges, nous calculons le χ^2. Si cet estimateur calculé est voisin de l'unité, ceci prouve que les erreurs a priori et les écarts-types des coordonnées sont bien estimés. Pour les retards, qui sont l'observable principale, la valeur de l'estimateur est voisine de 1, mais moins proche de 1 pour les fréquences de franges.

4.4. Etude comparative

Le NGS a déterminé une solution de la campagne de VLBI mobile 1989. Les solutions de l'ITRF utilisent dans le cadre de la réalisation d'un système de référence international différentes solutions basées sur des techniques spatiales, comme le VLBI.

Dans l'objectif, de comparer notre solution avec celles de l'ITRF90 et du NGS, nous avons utilisé le logiciel de combinaison de jeux de coordonnées SSCMIX afin de valider et d'évaluer nos résultats.

En reprenant la même démarche de comparaison qu'au (§3.2.3), nous obtenons les sept paramètres de transformations et leurs écarts-types estimés. Ces

Tableau I.14 Solution globale standard VLBIM89

```
VLBI MASTERFIT vlbim89.bin: Station coordinates, reference time  85/ 1/ 1

Station                                                  Avg. obs. time     Nob
            x (mm)                  y (mm)                   z (mm)
              <XY>                    <YZ>                     <XZ>
   Shifts:  E (mm)                  N (mm)                   V (mm)
              <EN>                    <NV>                     <EV>

GRASSE      EURA                                         89/ 9/14 10:18     570   648
 4581700837.1 +-  8.7   556126026.6 +-  2.4  4389354392.2 +-  8.5
              0.38390                0.40547                 0.90342
          0.8 +-  2.2          96.4 +-  2.6        4353.2 +- 11.9
              0.08482                0.01929               -0.00041

BREST       EURA                                         89/ 9/ 2 16: 5     678   790
 4228879976.5 +-  7.3  -333104531.9 +-  2.4  4747184051.2 +-  8.0
             -0.05468               -0.06137                 0.88458
        -23.0 +-  2.5          21.1 +-  2.6        4205.4 +- 10.5
             -0.02306               -0.01857                 0.15370

CARNUSTY    EURA                                         89/ 8/21  2:44     353   398
 3526418934.7 +- 11.3  -171421280.0 +-  4.0  5294102445.8 +- 15.0
             -0.02647               -0.10996                 0.92533
         40.6 +-  4.0          -3.9 +-  3.6        4415.3 +- 18.5
             -0.20748               -0.25737                 0.04470

TROMSONO    EURA                                         89/ 8/ 1 16: 8     660   686
 2102905608.5 +-  5.7   721602939.1 +-  2.8  5958205225.1 +- 12.1
              0.43026                0.47364                 0.77891
          1.4 +-  2.5          -5.7 +-  3.3        4237.2 +- 13.0
              0.14731               -0.13102                -0.08833

METSHOVI    EURA                                         89/ 7/ 8 16:10     682   890
 2890654802.3 +-  6.2  1310296107.9 +-  3.5  5513962290.9 +-  9.9
              0.70313                0.76542                 0.88248
         -2.4 +-  2.3          -8.1 +-  2.5        4251.5 +- 11.7
              0.10919               -0.25540                 0.07883

ONSALA60    EURA                                         89/ 7/26  2:51    1902  2150
 3370606166.1 +-  3.7   711917405.5 +-  1.5  5349830662.0 +-  4.9
              0.47426                0.41765                 0.85439
         -3.3 +-  1.3          11.0 +-  1.7          23.8 +-  5.9
             -0.08682               -0.23477                -0.01394

HOHENFRG    EURA                                         89/ 6/24 20:40     917  1009
 3778217548.9 +-  6.7   698645165.2 +-  2.2  5074056947.9 +-  8.4
              0.56220                0.54110                 0.91691
         11.9 +-  1.8         -10.0 +-  2.2        4309.4 +- 10.6
             -0.04963               -0.14054                 0.03737


MOJAVE12    NOAM                                         89/ 8/ 2 12:43    1579  1919
-2356170989.0 +-  4.7 -4646755829.0 +-  6.0  3668470573.6 +-  7.1
```

```
                0.30728                -0.69454                 0.21920
         -85.5 +-  4.3           -6.2 +-  5.0          -40.5 +-  8.1
                0.74884                0.29608                 0.34686

RICHMOND     NOAM                                     89/ 7/28  8:51     1352  1494
  961258080.2 +-  4.5 -5674090005.5 +-  7.9  2740533734.8 +-  6.9
               -0.38411               -0.59456                 0.70191
         -63.9 +-  4.1           -2.4 +-  4.9          -46.4 +-  9.5
                0.60159                0.33804                 0.31578

NOTOP        EURA                                     89/ 8/ 1  2:10     1805  1979
 4934563309.9 +-  3.9  1321201151.5 +-  1.4  3806484366.4 +-  3.7
                0.69709                0.62711                 0.86843
         -18.9 +-  1.0           14.0 +-  1.5           23.6 +-  5.3
               -0.05269                0.28049                 0.01635

WESTFORD     NOAM                                     89/ 8/ 2 11:36     1887  2247
 1492206679.3 +-  4.3 -4458130468.2 +-  4.8  4296015461.6 +-  6.6
               -0.43214               -0.67057                 0.79519
         -50.1 +-  3.7            5.9 +-  3.0          -55.7 +-  7.9
                0.61600                0.41779                 0.48744
```

paramètres de transformations sont présentés dans le (tableau I.15.). Trois résultats importants sont à signaler dans ces tableaux :

- le facteur d'échelle est faible et, à l'inverse de la solution globale préliminaire, il semble bien cohérent avec la solution de l'ITRF90. Ceci montre que nous avons bien utilisé la modélisation relativiste dans un système géocentrique (voir §3.2.3).

- nous trouvons une rotation sur Z de 2.3 mas. Cette rotation correspond à l'incohérence entre les paramètres de la rotation (UT1) et les systèmes céleste et terrestre. Ceci est explicité dans le rapport annuel de l'IERS pour 1989 (Table.II-3, p.II-5).

- le troisième résultat, concerne les résidus sur les coordonnées qui sont données dans les (tableaux I.16.a,b). Nous remarquons, excepté la différence en altitude de 7.7 cm sur BREST, que les autres résidus sont plus faibles, de l'ordre de 1 à 3 cm. Cette différence peut être portée soit par la solution de l'ITRF90 soit par la solution de la campagne VLBI mobile 1989 notée (VLBIM89), vu qu'elles sont comparées par rapport à une solution ajustée des deux.

Ce systématisme sur la station de BREST et la rotation sur Z, nous a amené à réaliser deux tests :

- le premier test consiste à comparer les deux solutions indiquées ci-dessus avec celle du NGS établie par (Abell, M.D., 1990) pour s'assurer que ce systématisme sur BREST est général et qu'il n'est pas lié seulement à notre solution. Le résultat de ces deux comparaisons, l'ITRF90 avec le NGS (Tableau I.17, Tableaux I.18.a,b) et NGS avec le VLBIM89 (Tableau 19 et Tableaux 20.a,b), montre toujours une différence importante sur la composante verticale de BREST. Cette différence est de 3 cm entre les solutions ITRF90 et NGS et de 5 cm entre les solutions du VLBIM89 et le NGS (Tableaux I.20.a,b). Ces résultats, tableau ci dessous, confirme notre hypothèse, concernant le systématisme sur la composante verticale de BREST, qui est apparent pour ces trois solutions.

indice	designation	TX sigma TX (m)	TY sigma TY (m)	TZ sigma TZ (m)	D (10^{-6}) sigma D	RX (") sigma RX	RY (") sigma RY	RZ (") sigma RZ
1	VLBIM89	0.002 2 0.012	0.060 2 0.009	-0.009 2 0.010	0.0006 2 0.0009	0.0008 2 0.0004	-0.0006 2 0.0005	-0.0023 2 0.0002

Tableau I.15 Paramètres de transformations et écart-types estimés (VLBIM89, ITRF90)

a- Pour le VLBIM89

Ce jeu contient 12 points, dont 12 sont retenus,

Indice	Designation	Rejet (1)	Residus cartesiens (syst. equatorial, en m) (VX	VY	VZ)	Residus normalises (syst. equatorial) (NX	NY	NZ)	Residus cartesiens (syst. local, en m) (VL	VP	VH)
1	10002M003CERGA GR VLBI	1	0.002	0.000	-0.010	0.268	0.159	-1.068	0.000	-0.009	-0.005
2	10004M002BREST VLBI	1	0.009	0.000	0.007	1.114	-0.121	0.881	0.000	-0.002	0.011
3	13296M002BUDDON - VLBI	1	-0.002	0.000	-0.001	-0.171	-0.073	-0.049	0.000	0.001	-0.002
4	10302M002TROMSO VLBI	1	0.001	0.000	0.010	0.203	-0.088	0.812	-0.001	0.002	0.009
5	10503M002METSAHOV VLBI	1	-0.002	-0.002	-0.004	-0.363	-0.494	-0.363	-0.001	0.001	-0.005
6	10402S002ONSALA-R VLBI	1	-0.001	0.000	-0.003	-0.280	0.110	-0.532	0.000	-0.001	-0.003
7	14202M002HOHENBUN VLBI	1	0.000	0.000	0.000	-0.016	-0.024	0.020	0.000	0.000	0.000
8	40405S009GOLDSTON VLBI	1	0.000	0.002	-0.002	-0.041	0.289	-0.333	-0.001	-0.001	-0.003
9	40499S001RICHMOND VLBI	1	0.000	0.003	-0.001	-0.070	0.381	-0.214	0.000	0.000	-0.003
10	12717S001NOTO VLBI	1	0.000	0.000	0.000	-0.106	0.115	-0.117	0.000	0.000	-0.001
11	40440S003WESTFORD VLBI	1	0.000	-0.001	0.006	0.003	-0.259	0.881	0.000	0.004	0.005
12	14201S004WETTZELL VLBI	1	-0.001	-0.001	0.005	-0.057	-0.107	0.592	-0.001	0.004	0.004

b- Pour le jeu ITRF90

Ce jeu contient 12 points, dont 12 sont retenus,

Indice	Designation	Rejet (1)	Residus cartesiens (syst. equatorial, en m) (VX	VY	VZ)	Residus normalises (syst. equatorial) (NX	NY	NZ)	Residus cartesiens (syst. local, en m) (VL	VP	VH)
1	10002M003CERGA GR VLBI	1	-0.003	-0.006	0.012	-0.298	-0.716	1.187	-0.006	0.011	0.005
2	10004M002BREST VLBI	1	-0.050	0.005	-0.058	-2.647	0.443	-2.534	0.001	-0.001	-0.077
3	13296M002BUDDON - VLBI	1	0.008	0.003	0.003	0.358	0.238	0.101	0.003	-0.005	0.007
4	10302M002TROMSO VLBI	1	-0.007	0.004	-0.030	-0.473	0.354	-1.421	0.006	-0.006	-0.030
5	10503M002METSAHOV VLBI	1	0.020	0.024	0.026	1.089	1.731	0.980	0.014	-0.011	0.037
6	10402S002ONSALA-R VLBI	1	0.008	-0.005	0.015	0.771	-0.548	1.277	-0.007	0.002	0.017
7	14202M002HOHENBUN VLBI	1	0.001	0.002	-0.001	0.035	0.146	-0.047	0.002	-0.001	0.000
8	40405S009GOLDSTON VLBI	1	0.000	-0.002	0.002	0.057	-0.337	0.333	0.001	0.001	0.003
9	40499S001RICHMOND VLBI	1	0.001	-0.003	0.002	0.097	-0.381	0.275	0.000	0.001	0.004
10	12717S001NOTO VLBI	1	0.008	-0.008	0.009	0.452	-0.691	0.524	-0.010	0.004	0.010
11	40440S003WESTFORD VLBI	1	0.000	0.003	-0.008	-0.005	0.363	-1.007	0.001	-0.004	-0.007
12	14201S004WETTZELL VLBI	1	0.001	0.001	-0.005	0.057	0.107	-0.592	0.001	-0.004	-0.004

Tableaux I.16.a,b Résidus sur les coordonnées (ITRF90, VLBIM89)

indice	designation	TX sigma TX (m)	TY sigma TY (m)	TZ sigma TZ (m)	D (10^{-6}) sigma D	RX (") sigma RX	RY (") sigma RY	RZ (") sigma RZ
1	NGS	-0.017 2 0.014	0.069 2 0.010	-0.044 2 0.011	0.0185 2 0.0011	-0.0029 2 0.0004	0.0113 2 0.0006	0.0001 2 0.0003

Tableau I.17 Paramètres de transformations et écart-types estimés: (NGS, ITRF90)

a- Pour le jeu NGS

Ce jeu contient 12 points, dont 12 sont retenus,

Indice	Designation	Rejet (1)	Residus cartesiens (syst. equatorial, en m) (VX	VY	VZ)	Residus normalises (syst. equatorial) (NX	NY	NZ)	Residus cartesiens (syst. local, en m) (VL	VP	VH)
1	10002M003CERGA GR VLBI	1	-0.003	0.011	-0.035	-0.487	0.542	-0.494	0.011	-0.024	-0.026
2	10004M002BREST VLBI	1	0.016	0.008	0.027	0.162	0.319	0.249	0.009	0.007	0.030
3	13296M002BUDDON - VLBI	1	0.006	-0.005	0.008	0.513	-0.120	0.510	-0.004	-0.001	0.010
4	10302M002TROMSO VLBI	1	0.013	-0.002	0.002	0.244	-0.056	0.158	-0.006	-0.010	0.006
5	10503M002METSAHOV VLBI	1	0.006	-0.009	0.000	0.104	-0.281	-0.009	-0.011	-0.002	0.001
6	10402S002ONSALA-R VLBI	1	0.002	0.001	-0.002	0.179	0.118	-0.153	0.000	-0.002	-0.001
7	14202M002HOHENBUN VLBI	1	-0.015	0.000	-0.002	-0.310	-0.014	-0.393	0.003	0.010	-0.011
8	40405S009GOLDSTON VLBI	1	0.002	0.000	-0.003	0.268	-0.024	-0.365	0.002	-0.002	-0.002
9	40499S001RICHMOND VLBI	1	0.000	0.000	0.000	-0.125	0.065	0.130	0.000	0.000	0.000
10	12717S001NOTO VLBI	1	-0.055	0.003	-0.013	-0.628	0.207	-0.746	0.017	0.021	-0.050
11	40440S003WESTFORD VLBI	1	-0.001	-0.002	0.000	-0.123	-0.336	-0.059	-0.002	-0.002	0.001
12	14201S004WETTZELL VLBI	1	0.002	-0.001	0.001	0.264	-0.115	0.276	-0.001	-0.001	0.002

b- Pour le jeu ITRF90

Ce jeu contient 12 points, dont 12 sont retenus,

Indice	Designation	Rejet (1)	Residus cartesiens (syst. equatorial, en m) (VX	VY	VZ)	Residus normalises (syst. equatorial) (NX	NY	NZ)	Residus cartesiens (syst. local, en m) (VL	VP	VH)
1	10002M003CERGA GR VLBI	1	0.007	-0.002	0.001	0.695	-0.244	0.070	-0.003	-0.004	0.005
2	10004M002BREST VLBI	1	-0.001	-0.002	-0.001	-0.032	-0.140	-0.054	-0.002	0.000	-0.001
3	13296M002BUDDON - VLBI	1	-0.025	0.001	-0.033	-1.073	0.041	-1.055	-0.001	0.002	-0.041
4	10302M002TROMSO VLBI	1	-0.001	0.000	-0.005	-0.063	0.023	-0.236	0.001	-0.001	-0.005
5	10503M002METSAHOV VLBI	1	-0.001	0.002	0.001	-0.031	0.119	0.025	0.002	0.000	0.001
6	10402S002ONSALA-R VLBI	1	-0.002	-0.002	0.002	-0.218	-0.235	0.153	-0.002	0.003	0.000
7	14202M002HOHENBUN VLBI	1	0.001	0.001	0.024	0.095	0.082	1.244	0.001	0.013	0.020
8	40405S009GOLDSTON VLBI	1	-0.002	0.000	0.002	-0.268	0.021	0.319	-0.002	0.001	0.002
9	40499S001RICHMOND VLBI	1	0.002	-0.001	-0.004	0.291	-0.130	-0.389	0.002	-0.004	0.000
10	12717S001NOTO VLBI	1	0.002	-0.002	0.014	0.121	-0.178	0.790	-0.003	0.011	0.010
11	40440S003WESTFORD VLBI	1	0.001	0.002	0.000	0.123	0.336	0.059	0.002	0.002	-0.001
12	14201S004WETTZELL VLBI	1	-0.002	0.002	-0.007	-0.264	0.207	-0.829	0.002	-0.003	-0.007

Tableau I.18.a,b Résidus sur les coordonnées (NGS , ITRF90)

indice	designation	TX sigma TX (m)	TY sigma TY (m)	TZ sigma TZ (m)	D (10^{-6}) sigma D	RX (") sigma RX	RY (") sigma RY	RZ (") sigma RZ
1	MCO	0.012 2 0.013	-0.009 2 0.008	0.038 2 0.010	-0.0176 2 0.0008	0.0038 2 0.0004	-0.0115 2 0.0005	-0.0024 2 0.0002

Tableau I.19 Paramètres de transformations et écart-types estimés: (VLBIM89, NGS)

a- Pour le jeu VLBIM89

Ce jeu contient 12 points, dont 12 sont retenus,

Indice	Designation	Rejet (1)	Residus cartesiens (syst. equatorial, en m) (VX	VY	VZ)	Residus normalises (syst. equatorial) (NX	NY	NZ)	Residus cartesiens (syst. local, en m) (VL	VP	VH)
1	10002M003CERGA GR VLBI	1	0.012	0.000	0.000	1.380	-0.030	0.014	-0.002	-0.008	0.009
2	10004M002BREST VLBI	1	0.000	0.000	0.000	0.041	-0.051	0.021	0.000	0.000	0.001
3	13296M002BUDDON - VLBI	1	-0.018	0.000	-0.025	-1.602	0.003	-1.642	-0.001	0.001	-0.030
4	10302M002TROMSO VLBI	1	0.000	0.000	0.014	0.002	-0.008	1.132	0.000	0.005	0.013
5	10503M002METSAHOV VLBI	1	0.000	0.000	-0.016	-0.037	-0.056	-1.573	0.000	-0.008	-0.014
6	10402S002ONSALA-R VLBI	1	-0.001	0.000	-0.003	-0.308	0.172	-0.555	0.001	-0.001	-0.003
7	14202M002HOHENBUN VLBI	1	0.000	0.000	0.014	0.062	-0.226	1.803	-0.001	0.008	0.012
8	40405S009GOLDSTON VLBI	1	-0.001	0.001	0.003	-0.237	0.133	0.484	-0.001	0.003	0.002
9	40499S001RICHMOND VLBI	1	0.001	0.003	-0.007	0.151	0.321	-0.949	0.001	-0.005	-0.005
10	12717S001NOTO VLBI	1	0.000	0.000	0.001	0.027	0.051	0.126	0.000	0.000	0.000
11	40440S003WESTFORD VLBI	1	0.001	0.000	0.006	0.307	-0.049	0.842	0.001	0.004	0.004
12	14201S004WETTZELL VLBI	1	0.000	0.000	-0.003	-0.045	0.048	-0.284	0.001	-0.001	-0.002

b- Pour le jeu NGS

Ce jeu contient 12 points, dont 12 sont retenus,

Indice	Designation	Rejet (1)	Residus cartesiens (syst. equatorial, en m) (VX	VY	VZ)	Residus normalises (syst. equatorial) (NX	NY	NZ)	Residus cartesiens (syst. local, en m) (VL	VP	VH)
1	10002M003CERGA GR VLBI	1	-0.008	0.006	-0.008	-1.073	0.301	-0.107	0.007	-0.001	-0.010
2	10004M002BREST VLBI	1	-0.048	0.016	-0.030	-0.492	0.634	-0.284	0.012	0.016	-0.055
3	13296M002BUDDON - VLBI	1	0.018	-0.001	0.025	1.602	-0.033	1.642	0.000	-0.001	0.030
4	10302M002TROMSO VLBI	1	-0.001	0.002	-0.018	-0.019	0.077	-1.321	0.002	-0.006	-0.017
5	10503M002METSAHOV VLBI	1	0.022	0.015	0.016	0.368	0.464	1.573	0.005	-0.015	0.027
6	10402S002ONSALA-R VLBI	1	0.006	-0.002	0.016	0.693	-0.430	1.333	-0.003	0.004	0.017
7	14202M002HOHENBUN VLBI	1	-0.021	0.000	-0.008	-0.431	0.226	-1.353	0.004	0.012	-0.019
8	40405S009GOLDSTON VLBI	1	0.002	-0.001	-0.004	0.332	-0.177	-0.553	0.003	-0.004	-0.002
9	40499S001RICHMOND VLBI	1	0.000	-0.001	0.001	-0.091	-0.160	0.407	0.000	0.001	0.001
10	12717S001NOTO VLBI	1	-0.052	-0.005	-0.009	-0.589	-0.354	-0.537	0.009	0.023	-0.047
11	40440S003WESTFORD VLBI	1	-0.004	0.000	-0.008	-0.537	0.068	-0.962	-0.003	-0.005	-0.006
12	14201S004WETTZELL VLBI	1	0.000	0.000	0.000	0.045	-0.027	0.095	0.000	0.000	0.000

Tableau I.20.a,b Résidus sur les coordonnées (VLBIM89, NGS)

Les solutions comparées	Résidus en altitude sur BREST
VLBIM89-ITRF90	7.7 cm
NGS-ITRF90	3 cm
VLBIM89-NGS	5 cm

- le deuxième test consiste à calculer une solution en fixant les coordonnées munies d'antennes fixes.

Les résidus après ajustement de la solution "VLBIM89F" est de 98 ps pour le retard et de 78 fs/s pour la fréquence de frange. Ces résidus sont moins bons que ceux de la solution VLBIM89.

Cela s'explique par l'introduction d'un effet de systématisme sur l'ajustement global dû à l'inhibition de la rotation des stations fixes, qui est absorbée par l'ajustement. Il est donc intéressant de calculer une solution en résolvant les paramètres de la rotation de la terre, pour vérifier la cohérence avec les valeurs de l'IERS. Ce calcul est le sujet de la section suivante.

4.5. Conclusion

La solution géodésique standard telle qu'elle est déterminée, et les études comparatives qui ont été faites nous conduisent à deux conclusions :

- l'existence d'une cohérence interne, qui est exprimée par une distribution normale des résidus.

- Notre solution est aussi consistante que les solutions du NGS et de l'ITRF90, d'où une cohérence externe. Il reste à résoudre le problème de la station

de BREST qui nécessite d'autres mesures supplémentaires. Deux causes peuvent être à l'origine de ce systématisme sur BREST : soit des mauvaises mesures des observations, comme nous l'avons signalé dans le résultat opératoire (§3.3), soit un mauvais ajustement des paramètres troposphériques.

5. SOLUTION GLOBALE EXPERIMENTALE

Deux causes nous incitent à effectuer cette étude expérimentale.

- Pour vérifier la cohérence interne de notre solution avec l'IERS. Il s'agit donc d'une étude complémentaire à l'étude précédente. Pour cela, nous calculons une solution où nous déterminons les paramètres de la rotation de la terre.

- la plupart des stations de la campagne sont côtières. L'effet de marée semble susceptible de causer des déplacements importants. Le calcul d'une solution avec un modèle de charge de marées océaniques paraît donc utile pour estimer cet effet.

5.1. Détermination des paramètres de la rotation de la terre

5.1.1. Hypothèses de calcul

Les paramètres de la rotation de la terre (EOP), comme ils sont définis dans le rapport annuel de l'IERS (1989), sont les paramètres qui décrivent la rotation du système de référence terrestre (ITRF) au système de référence céleste (ICRF), en conjonction avec le modèle conventionnel de la précession-nutation. Ces paramètres sont la partie imprévisible de la rotation de la terre.

Les paramètres à déterminer sont les positions du pôle (X,Y) dans le système céleste et, (UT1-UTC). Pour notre cas, il suffit de déterminer en particulier les variations sur UT1 pour vérifier la cohérence de la solution globale standard avec l'IERS.

Les hypothèses de traitement utilisées pour cette solution notée "VLBIM89R", sont identiques à la solution VLBIM89. Toutefois, les stations sont fixes. En d'autres termes le système terrestre ne subi pas la rotation.

Cette détermination inclut uniquement les sessions IRIS. Le réseau IRIS renferme des stations européennes et américaines, et par conséquent, nous aurons des bases transatlantiques. Ce réseau est utilisé en particulier pour la détermination des paramètres de la rotation de la terre. En ce qui concerne les autres sessions, le réseau est formé par des courtes bases, par conséquent la résolution des paramètres de la rotation de la terre, dans ce cas n'est pas physiquement significative.

5.1.2. Résultats

Les résidus après ajustement sont de 89.9 ps sur le retard et de 79 fs/s pour la fréquence de frange. Ils sont très voisins des résidus de VLBIM89.

Les résultats obtenus des paramètres de la rotation de la terre sont illustrés dans le (Tableau I.21). Les variations sur UT1 sont de l'ordre de 2.5 marcs. Cette variation est très proche de la rotation entre VLBIM89 et ITRF90. On retrouve une cohérence avec la valeur a priori définie par l'IERS qui est de l'ordre de 2.1 mas (Rapport annuel pour 1989). Cette valeur traduit l'incohérence entre les paramètres de la rotation de la terre et les systèmes céleste et terrestre.

VLBI MASTERFIT vlbim89R.bin

Earth model : JPL EM1986-1

DATE	JD	X Pole m arcsec	Y Pole m arcsec	UT1-UTC m sec
1989/ 6/22	2447699.758	221.5+/- 0.5	391.7+/- 0.5	-376.42+/-0.03
		1.1	0.4	-0.20
1989/ 6/27	2447704.759	230.8+/- 0.5	375.9+/- 0.5	-383.83+/-0.02
		0.2	-2.1	-0.23
1989/ 7/ 7	2447714.731	247.2+/- 0.5	347.0+/- 0.5	-390.29+/-0.02
		0.3	-2.3	-0.17
1989/ 7/12	2447719.777	251.9+/- 0.5	333.3+/- 0.5	-395.63+/-0.02
		-1.6	-1.8	0.05
1989/ 8/ 1	2447739.742	260.2+/- 0.4	272.3+/- 0.4	-415.83+/-0.01
		0.5	-1.3	-0.14
1989/ 8/21	2447759.778	253.8+/- 0.5	210.6+/- 0.5	-439.09+/-0.02
		-0.3	-1.4	-0.11
1989/ 8/31	2447769.781	245.6+/- 0.3	183.1+/- 0.4	-449.18+/-0.02
		-0.5	0.8	-0.13
1989/ 9/ 5	2447774.755	235.9+/- 0.5	165.8+/- 0.4	-455.96+/-0.02
		-0.6	-0.9	-0.12
1989/ 9/15	2447784.718	212.6+/- 0.6	138.6+/- 0.6	-466.58+/-0.03
		0.5	-2.3	-0.16

Tableau I.21 Solution VLBIM89R des Parmètres de la rotation de la terre

5.2. Solution avec un modèle de charge de marées océaniques

5.2.1. Effet de charge de marées océaniques

Les marées océanique et terrestre sont les conséquences directes de l'effet des forces gravitationnelle des objets célestes dont les plus importantes sont celles de la lune et du soleil. L'effet de l'attraction lunaire est deux fois plus important que celui du soleil.

L'attraction lunaire ne s'exerce pas uniformément sur tous les points de la terre car ils ne sont pas à un instant donné à la même distance de la lune. Cette hétérogénéité provoque des variations dans la force gravitationnelle terrestre et, par conséquent, elle déforme la croûte océanique et continentale. Pour mesurer ces déformations dues à la force d'attraction luni-solaire, cette force est traduite en termes de potentiel luni-solaire ayant un développement en harmoniques sphériques (Farell, 1972). Ce dernier varie en fonction du temps étant donné que les positions de la lune et du soleil varient aussi avec le temps.

Des corrections de potentiel doivent être introduites dans les modèles de potentiel utilisés par les centres de calcul des différentes techniques et plus particulièrement le télémétrie laser sur satellite. Ces modèles correctionnels peuvent être exprimés sous une forme de variations de coefficients de potentiel et qui sont fortement conditionnés par la connaissance des valeurs de nombres de Love (voir les Standards IERS).

L'effet des marées de la terre solide étant introduit dans les modèles, nous nous intéressons ici à l'effet de charge induite par les marées océaniques qui produit des variations verticales de l'ordre de quelques centimètres (Scherneck, H. -G., 1991; Spiros, D., et al., 1990). Les variations tangentielles sont extrêmement faibles. Les Standards de l'IERS fournissent des tables contenant les valeurs des

amplitudes et des phases de 11 composantes de coefficients de potentiel des marées océaniques (Schwiderski, S.D., 1980). Ces composantes sont calculées pour des stations de télémétrie laser et VLBI, d'après (Goad, 1980). Ces valeurs permettent de calculer, pour chaque station, le déplacement vertical, considéré comme une variation d'altitude, en fonction du temps. Ainsi, pour chacune des 11 composantes : [4 terme semi diurnes (M_2, S_2, N_2, K_2), 4 terme diurnes (M_1, O_1, P_1, Q_1), un bimensuel (M_f), un mensuel (M_m) , un semi-annuel (S_{sa})],

$$\Delta h = amp(i).cos(arg(i,t)-phase(i))$$

où arg(i,t) est l'argument angulaire de la composante i à la date t en fonction des positions de la lune et du soleil.

Les valeurs de l'amplitude et de la phase radiale et tangentielle des 11 composantes sont calculées par différents auteurs en utilisant en général des modèles améliorés localement dans les régions côtières. Les résultats des déplacements des stations publiés sont en accord de 10 à 20%.

5.2.2. Solution avec un modèle de charge de marées océaniques

Les effets de charges ne sont utilisés dans le traitement en VLBI qu'à partir de 1988 par (Carter, W. E., 1988). Ces effets sont importants quand il y a intervention des stations côtières (Suchuh, H., et al., 1989).

Concernant l'analyse des données du VLBI, le MERIT Standard sur lequel les programmes des logiciels d'analyses actuels sont basés les déplacements de site de charge de marées océanique compilés accordés à Goad (1980) ,ce sont les déplacements de l'altitude de la charge de marées océaniques des stations observées due aux onze principales composantes de marées océaniques.

Dans notre traitement, nous utilisons les mêmes hypothèses que le VLBIM89 avec pour différence l'ajustement des observables par un modèle de charge océanique. Le modèle de la version du logiciel MODEST utilisée est celui de Pagiatakis (Pagiatakis, S. D., 1982). Ce modèle nécessite en entrée les valeurs des composantes de charge de marées océaniques. Le calcul de ces composantes d'effet de charge de marées océaniques est effectué par (H.-G. Sherneck et O.Francis), qui nous ont fourni les résultats. A partir de ces deux calculs, nous avons déterminé deux solutions. Le résultat montre qu'il n'y a pas de différence notable entre les deux. Les valeurs adoptées en définitive sont présentées en annexe B (fichier OCNTDLP.DAT). Seule les premières composantes sont physiquement significatives pour l'ajustement porté sur la durée d'une session de 24h.

Les stations côtières de la campagne sont éparpillées entre l'atlantique et la Méditerranée. Un effet négligeable de charge de marées océanique sur ces stations est à relever. Il est de l'ordre d'un cm au maximum sur BREST.

L'écart quadratique des résidus du retard et de la fréquence de franges est respectivement de 90.1 ps et 78.3 fs/s. Nous constatons que le calcul, en tenant compte de la correction de charge de marées océaniques appliquée aux données VLBIM89, n'a pas amélioré la solution. Deux constatations sont possibles. D'une part, le fait que les amplitudes sont très faibles. D'autre part, l'ajustement peut être porté par la troposphère qui a un même effet vertical que la charge de marées océaniques.

5.2.3. Conclusion

Appliquer l'effet de charge de marées océaniques aux solutions VLBI et chercher systématiquement son influence sur le résultat, apparaît inutile au

moment où il y a résolution des paramètres troposphériques pour une technique utilisant des ondes radio. Enfin, l'effet de charge de marées océaniques peut être significatif pour des stations avec une amplitude importante (cas des stations sur les côtes pacifique, ou pour les îles).

DEUXIEME PARTIE

CONTRIBUTION A UN NOUVEAU RESEAU GEODESIQUE DE SURVEILLANCE GEODYNAMIQUE EUROPE-AFRIQUE

1. INTRODUCTION

Depuis plus d'un siècle, des réseaux de triangulation de premier ordre et de nivellement ont été réalisés dans tous les pays limitrophes de la Méditerranée Occidentale. Ces réseaux incluent des liaisons entre l'Europe et l'Afrique du Nord, à la fois à travers le détroit de Gibraltar et celui de la Sicile : Italie-Tunisie en 1876, Espagne-Algérie en 1879, Espagne-Maroc 1924 (Levallois, 1989). Certaines îles comme les Baléares, la Corse et la Sardaigne ont aussi été rattachées. Les observations et les résultats sont valables pour toutes ces données.

Au début des années 70 cette région a connu l'essor de la technique spatiale, avec une succession de campagnes Doppler (1975). Ces campagnes utilisent une dizaine de stations au sud de l'Europe occidentale (ex. ALGEDOP) et, quelques stations en Afrique du Nord (ADOS). Le résultat de ces campagnes est présenté dans le (quatrième symposium de la géodésie africaine, Tunis 1990). Il est avec des précisions de quelques décimètres.

En 1986-87 une campagne GPS de surveillance de marégraphe est établi au sud de l'Europe occidentale (Willis, P. et Boucher, 1987). A la suite de cette campagne, une nouvelle compensation a été validé dans le cadre de la sous-commission RETRIG de l'AIG, c'est "European datum" (ED87) (Poder et Hornick, 1989). Grâce aux techniques de géodésie spatiale (SLR, VLBI, Doppler et quelques GPS), qui ont été inclus dans cette compensation, les distorsions résiduelles ne devraient pas dépasser le niveau du mètre. Cette compensation a permis le rattachement au système de référence mondial géocentrique, internationalement reconnu, et maintenu par le BIH (et depuis par l'IERS).

Les réseaux de nivellement européens ont été recompensés dans un même système dans le cadre de la sous-commission UELN de l'AIG. Dans cete compensation, les réseaux Nord Afrcains étaient aussi pris en compte. Néamoins, d'importantes erreurs systématiques pourraient encore subsister car aucune liaison de précision entre l'Europe et l'Afrique du Nord n'était disponible jusqu'à présent.

L'amélioration continue des techniques de géodésie spatiale, à la fois en précision et en opérationnalité, a encouragé la communauté internationale a poursuivre cet effort. De cette manière, l'AIG a désigné comme successeur de RETRIG à Vancouver (1987), la sous-commission EUREF.

Le premier résultat concret de EUREF a été la réalisation en 1989 d'une campagne GPS européenne et d'une campagne de VLBI mobile (Seeger, H., et al. , 1989).

Récemment plusieurs campagnes utilisant les techniques GPS, VLBI et SLR sont réalisées : la campagne européenne de VLBI mobile 1992 qui vient d'être achevée,les campagnes GPS (GIG 91 et IGS 92) et, les observations laser (SLR) qui ont été réalisées dans le cadre d'un important projet international (Wegener Medlas). Les campagnes de mesures Wegener-Medlas mettaient en jeu 10 sites SLR permanents et quelques 17 autres sites qui étaient occupés de manière occasionnelle, environ tous les deux ans par les stations Laser mobiles disponibles pour le projet (MTLRS-1, MTLRS-2 et TLRS-1).

Les réseaux géodésiques existants planifiés et étendus dans la région de la Méditerranée occidentale sont généralement classés sous deux catégories :

- Réseaux globaux ou continentaux : IRIS, établi pour la mesure de la rotation de la terre avec une seule station en Europe (WETTZELL), le réseau mondial WGS84, le réseau CIGNET (Cooperative International GPS Network).

CDP et Wegener Medlas : réseaux pour mesurer essentiellement les déformations de la terre et des réseaux plus récentes de (VLBI, Laser, GPS, etc.) : VLBI mobile 89, 92, EUREF89, IGS92 et autres.

- Réseaux nationaux et locaux, qui sont relatifs à chaque pays. Ces réseaux sont destinés à la détermination d'un système de référence local et à l'étude spécifique des phénomènes physiques locaux (séisme, volcan,...).

Les réseaux de géodésie terrestre ou spatiale élaborés sur plusieurs années subissent au cours du temps des déformations. Ces déformations ne sont pas uniformes au cours du temps. Elles peuvent être classées en deux types :

- les déformations globales sont dues essentiellement aux deux principaux phénomènes physiques, qui sont : l'effet des marées terrestres et océaniques et le mouvement relatif des plaques tectoniques;

- les déformations locales sont dues au mouvement propre de chaque station en fonction de la nature géologique et géophysique de la région (nature des terrains, séismes, les volcans ...).

Les réseaux établis et qui sont définis précédemment ne sont pas forcément liés avec les deux types de déformations. Pour apprécier à une échelle convenable les déformations provenant soit du mouvement relatif des plaques, soit des séismes ou d'autres phénomènes, nous devrons disposer d'un réseau spécifique à chaque étude.

Les contraintes qui surgissent pour avoir le maximum d'information sur les déformations avec un faible coût nous incitent à présenter :

- d'une part les zones tectoniquement stables et instables dans la région de la Méditerranée Occidentale

- et d'autres part les caractéristiques des techniques de positionnement de haute précision

2. CONTEXTE GEODYNAMIQUE DE LA MEDITERRANEE OCCIDENTALE

2.1 Historique

La géodynamique de la Méditerranée occidentale est issue du mouvement relatif des plaques EURASIE-AFRIQUE depuis une 100 de millions d'années. L'extension de la limite des plaques est mal comprise et, elle varie de l'Est à l'Ouest.

- Le point triple des Açores : Les îles Açores sont localisées au point de jonction des plaques de l'Amérique du Nord de l'Eurasie et de l'Afrique (figure II.). Ces îles d'origine volcanique sont en relation à l'extension des plaques à cet endroit. Le rift atlantique divise ces îles en une portion ouest sismique composée de deux îles et une portion Est sismique qui comprend les autres 7 îles. Cette région présente quelques aspects géodynamiques particuliers et différents modèles ont été proposés ( ) qui essaient d'expliquer le fonctionnement du système compliqué de failles qui traversent les îles et les mouvements associés avec eux (fig.4). Il n'est pas clair si cesystèe de faille identifie la continuité de la faille Gloria. La section ouest de la portion Açore-Gibraltar de la limite de plaque Afrique-Eurasie, ou la limite réelle de la plaque est située au sud des îles. Quelques auteurs supportent l'idée de l'existance d'une microplaque Açores. Un déplacement horizontal et vertical significatif (varie de quelques mm à plusieurs cm/an) sont détectés, mais dues aux manques de données de mesures géodésiques précises, aucun model tectonique définitif n'est formulé.

La section de la limite de plaque Açore-Gibraltar définie la limite ouest de la chaîne Alpine. Pour le développement d'un modèle adéquat dans cette région de l'atlantique il est nécessaire d'étudier la dynamique de la totalité de la région incluant l'évolution géodynamique du territoire Portugais et les îles (Canerie, Madeira) connues par des activitées seimiques et volcaniques importantes, et puisque ces régions sont toujours influencées par la limite des plaques.

Au détroit de Gibraltar le mouvement de coulissement caractéristique le long de la limite des plaques vers l'ouest varie peu à peu au compression, il y a aussi une évidence que la limite traverse la péninsule Ibérienne vers le Nord du détroit (fig.2)

Limite de plaque du MAROC au TUNISIE

La section principale de la plaque du Maroc à la Tunisie est caractérisé par une croûte raccourcit. A l'est du Méridien Greenwich ceci change à l'extension. Ces caractéristiques sismiques de la Tunisie à la libye, qui sépare la zone de collision méditerranéenne Est-Ouest.

La zone d'extension est étendu le long de l'axe Nord ouest-sud est avec une largeur de 150 km et une longueur de 1000 km. Comparé avec la province Est méditerranéen où une convergence atteignant 10 mm/an le long de l'axe N30° E est observé, la convergence dans la province ouest est au maximum de 1 cm/an dans une direction prédominante N10° W. Spécialement, la vitesse de convergence entre le Nord Afrique sud de l'Espagne et le Nord de la Sicile augmente de 0 de Gibraltar à au maximum 8mm/an dans le Nordest de l'Algérie et la Tunisie, et diminue vers l'Est à zéro entre la Tunisie et le Nord Est de la sicile ou la)plaque Africaine semble changer sa direction et son mouvement vers le N-E ( ). Malgré la faible moyenne de convergence de 0.4 cm/an qui est observé dans la section Maroc-Tunisie la région a souffert périodiquement des

catastrophes des seismes, mais le raccourcissement co-sismique dans le Nord ouest de l'Afrique est responsable uniquement par une fraction du raccourcissement total, les valeurs entre 15% et 40% sont à discuter avec le reste absorber par les déformations asismiques.

particularités géodynamique futurs et plusieurs modèles sont proposés (Forjaz, 1988; Madeira et al, 1990) lesquels essaient d'expliquer l'articulation du système complexe de failles à tarvers les îles et les mouvements associés

- Limite de plaque du Maroc au libye :

2.2. Les modèles cinématiques des plaques tectoniques

La théorie des plaques tectoniques suppose la division de la litosphère en plusieurs plaques tectoniques, principalement 11 plaques importantes (figure II.7), plus quelques unes de dimensions plus réduites. De nombreux recherches ont été entreprises afin d'étudier leur mouvements relatifs, de comprendre le mécanisme de ceux-ci, et de délimiter leurs contours exacts. L'origine de ces mouvements est attribuée au processus de convection thermique dans l'asthénosphère. Le déplacement relatif entre plaques dépasse dans certains cas la vitesse de 5 cm par an (typiquement quelques centimètres par an).

Les variations des coordonnées des stations dues à ces mouvements peuvent être estimées (si l'on dispose suffisamment d'observation sur une longue période) ou calculées par un modèle.

Le modèle le plus généralement accepté est celui de (Minster et Jordan 1978), appelé RM2, basé sur un ensemble de données géologiques et géophysiques décrivant les mouvements sur quelques dizaines de millions d'années. Ces données contiennent des vitesses d'expansion à partir des dorsales

océaniques dérivées de profils d'anomalies magnétiques, de directions de failles et des données relatives aux séismes.

Un nouveau modèle de même type que RM2, baptisé NUVEL-1 est réalisé récemment par (Demets et al, 1989). Ce modèle prédit une pôle de rotation dans l'océan Atlantique de latitude de 21.0° N et de longitude de 20.6 E avec un déplacement de 0.6 cm/an dans la direction Nord-Sud.

Le modèle RM2 décrit d'une manière globale le mouvement relatif des plaques les unes par rapport aux autres. Les déplacements dépendent de chaque plaque pour laquelle nous définissons un vecteur de rotation , exprimé dans un système terrestre. Ainsi, pour un point de coordonnées X, sur une plaque p, on définit une vitesse X telle que : $X = \Omega_p \wedge X$

Signalons que les variations des coordonnées des stations estimées par ces modèles jouent uniquement sur les composantes horizontales. Il reste néamoins un élément important, à savoir les déformations verticales dont il faut également tenir compte. Ces déformations séculaires peuvent être très significatives et sont essentiellemnt dues au rebond post-glaciaire.

Les modèles globaux de mouvements de plaques sont, en général, basés sur des données géologiques à l'échelle de millions d'années, fournissant une estimation globale de déformations pour des plaques de grandes dimensions. Certaines déformations, relatives par exemple aux marges des plaques et à des zones complexes et très actives, ne sont pas induites dans ces modèles. Des améliorations locales peuvent être faites par les nouvelles techniques de géodésie spatiale (Jordan et Minster, 1988, et autres)

Il faut cependant attendre quelques années encore pour que la géodésie spatiale apporte des améliorations significatives aux modèles existants. Ceci est

dû au fait que le réseau de stations VLBI et laser n'est pas encore assez dense pour un contrôle global de mouvements de plaques. D'autres part, les déformations internes à chaque plaque sont de très longues périodes et de faible amplitude. Afin de détecter ce type de déformations, les mesures géodésiques de ligne de base sur une même plaque doivent avoir une précision meilleur que 1 mm par an (Jordan et Minster, 1988).

A partir du modèle RM2 quatre modèles de mouvement absolu ont été déduite, et ceci adoptent implicitement un repère de référence fixe par rapport à la position du manteau. Ce dernier est spposé rigide ou ayant des mouvements internes très inférieures à ceux des plaques.

Parmi les quatre modèles dérivés de RM2, deux sont généralement utilisées lors de taritement géodésiques :

- le AM0-2, qui est un modèle déduit par une condition de non rotation globale de la lithosphère, considérablement les masses des plaques et leurs contours. Ce modèle est recommandé par les Standards IERS et il est le plus utilisé.

- AM1-2, qui minimise le mouvement d'un ensemble de "points chauds" (9 points en tout répartis sur 4 plaques).

2.3. La néotectonique de la Méditerranée Occidentale

En Méditerranée occidentale, la zone étudiée s'étend de Gibraltar à la Sicile.

- Les déformations importantes se produisent au sein de la lithosphère continentale. L'origine de ce comportement mécanique particulier est attribuée au

contexte tectonique de collision continentale. En effet, le mouvement relatif convergent de l'Afrique et de l'Europe est de direction approximative Nord-Sud et d'ampleur croissante Ouest-Est, au rythme d'environ 0.4-0.6 cm/an au méridien d'Alger et de près de 0.8-1.2 cm/an au méridien de la Sicile selon le modèle envisagé (Minster et Jordan, 1972; Chase, 1978).

- La tectonique globale active est connue par des plis, des failles et de grands accidents, normaux, décrochants et chevauchants. Ces accidents se situent comme le montre la (figure II.1), dans les zones orogéniques (Maghrébides, Pyrénées, Apennins, Alpes.), dans le canal tuniso-sicilien et au niveau de Gibraltar entre les Bétiques et le Rif .

- La sismicité est diffuse (Mckenzie, 1972; Armijo, R., 1985; Suhadolc, 1989) de sorte qu'il est particulièrement difficile de délimiter les véritables frontières de plaques. Tout au plus peut-on y isoler : (figure II.2)

* les plateformes nord-européenne et africaine.

* les blocs relativement stables : (la Méseta ibérique, l'ensemble Corse-Sardaigne, les Baléares, le Maroc central, l'Apulie adriatique et la Sicile).

* les zones mobiles où les déformations sont évolutives : les Apennins, l'Atlas et les Alpes.

Cette subdivision tectonique en zones stables, relativement stables et mobiles, nous incite à l'étude de la déformation à deux échelles : les déformations globales (grande échelle) et les déformations locales.

OBSERVATOIRE DE PARIS

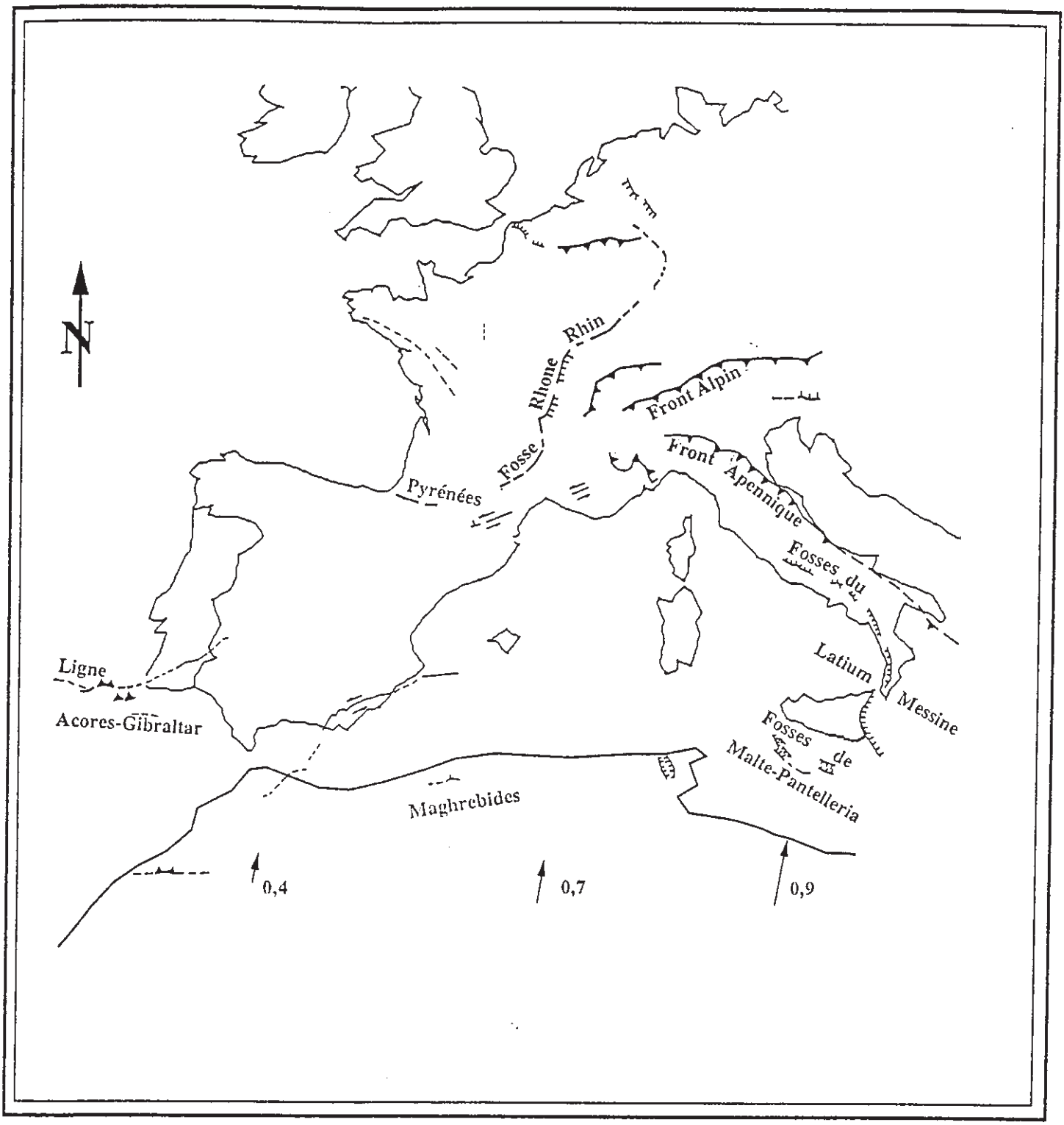
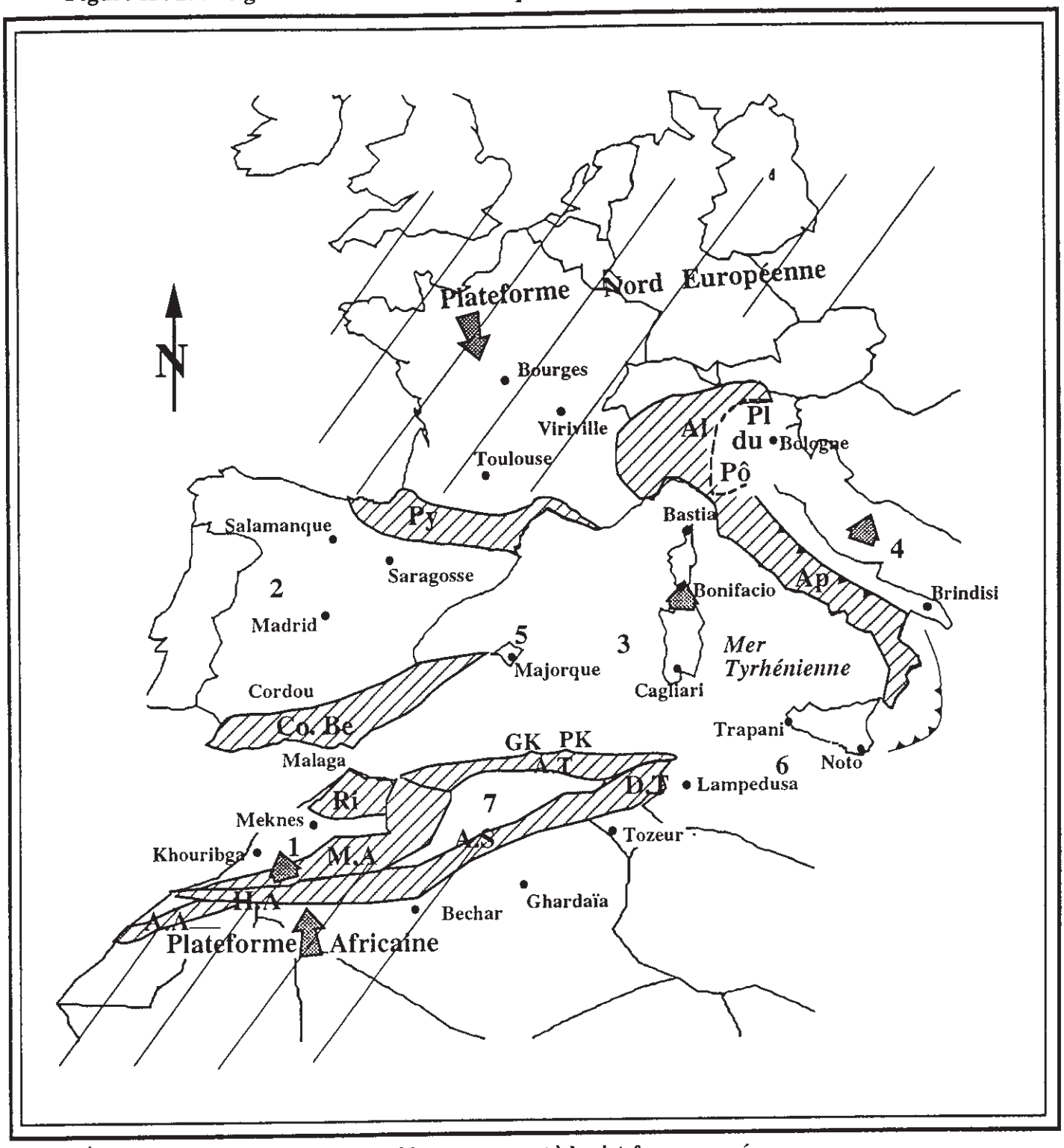


Figure II . 1 : Tectonique globale active

	Faille	Grand accident
Faille supposée		
Décrochement		
Faille normale		
Chevauchement		
Vitesses instantanées locales (cm/an) par rapport à l'Europe		

Figure II . 2: Les grandes structures tectoniques schématiques en Méditerranée occidentale



Mouvements relatifs des blocs par rapport à la plateforme européenne

Les blocs continentaux :

(1 - Maroc Central ; 2 - Ibérique ;3 - Corsesardaigne ; 4 - apulie ;
5 - Baléares ; 6 - Sicile ; 7 - Haut plateau Algérien

Les zones de déformations majeures :

Co.Be : cordillère Bétique ; Py: Pyrénées ;
AL : Alpes ; Ap : Appenins ; Ri :Rif ; H.A. : Haut Atlas ; A.A. : Anti Atlas ;
M.A : Moyen Atlas ; A.S. : Atlas Saharien ; G.K. : Grande Kabylie ; P.K. :
Petit Kabylie ; A.T. Atlas Tellien ; D.T. : Dorsale Tunisien

Sites géodésiques fixes de surveillance des déformations globales

2.3.1 Déformations globales

A grande échelle, on mesure :

- les mouvements relatifs des plateformes africaine et européenne.

- le mouvement relatif avec possibilité de rotation des blocs plus ou moins stables par rapport aux plateformes et de ces blocs les uns par rapport aux autres (figure II.2).

Les exigences scientifiques dictées par l'étude des déformations à grande échelle impliquent la mesure de la déformation dans sa totalité et la prise en compte de l'influence des déformations locales.

Il s'agit donc de mesurer les déformations totales dûes aux mouvements relatifs des différents blocs et d'implanter un réseau de surveillance à plusieurs sites de référence (figure.II.2). Ces sites doivent être sur les plateformes et les zones relativement stables, de part et d'autres des zones mobiles et des zones de déformations actuelles. Le choix des sites étant vaste, on propose :

- pour la plateforme européenne, [Bourges (France)];

- pour la plateforme africaine le choix est double, soit deux sites implantés au sud de l'accident Sud-Atlasique, permettant une bonne symétrie par rapport au réseau européen existant, à [Béchar (Algérie)] et à [Matmata (Tunisie)], soit un seul site plus central, à [Ghardaïa (Algérie)];

- pour chaque bloc relativement stable, il faut au moins deux sites afin de pouvoir évaluer les mouvements de rotation éventuels et ils devraient être aussi éloignés l'un de l'autre que possible pour mieux déterminer la rotation :

* Madrid, Saragosse sur le bloc ibérique;

* Majorque, Palma sur les Baléares;

* Bonifacio, Cagliari sur le bloc corso-sardaigne;

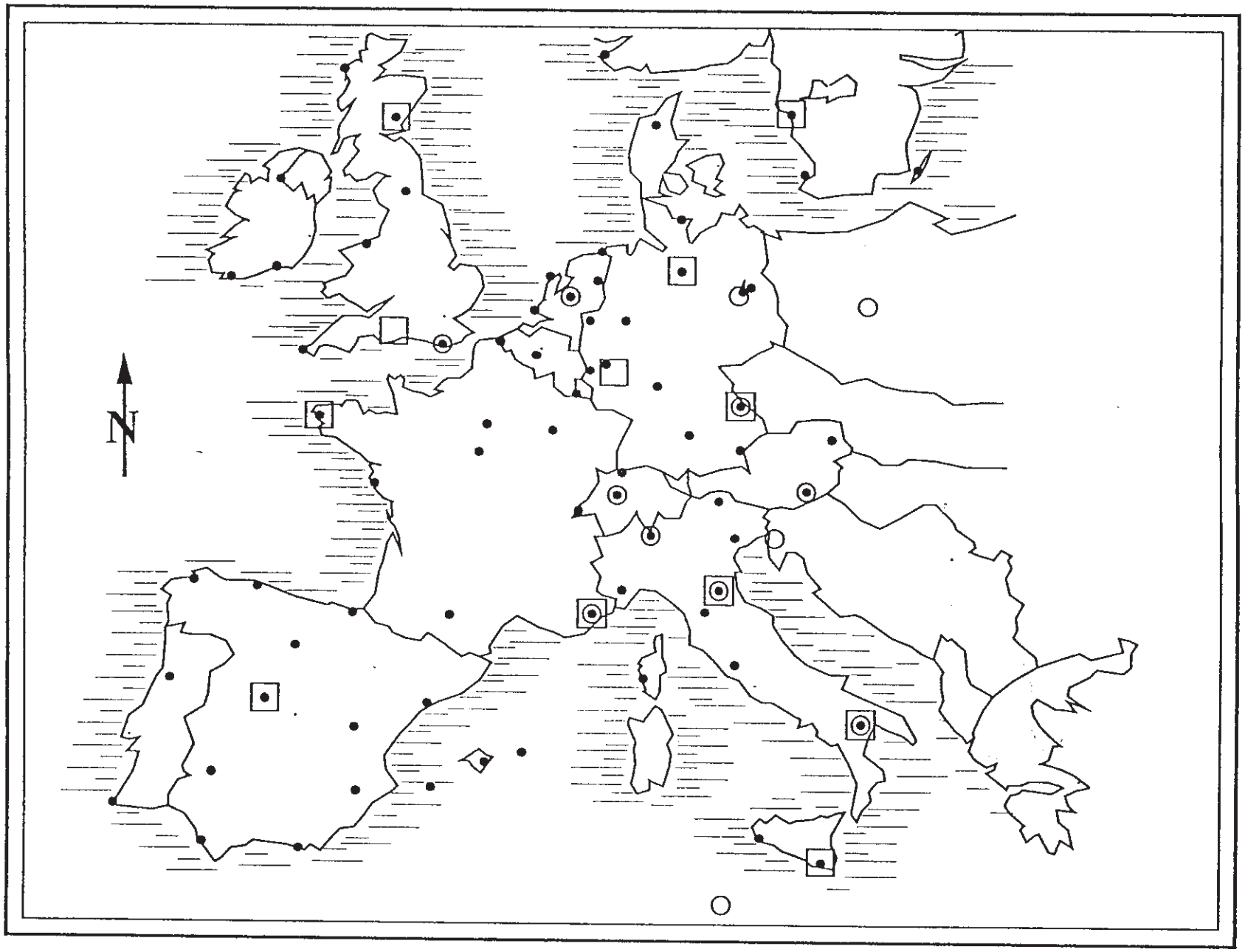
* Bologne, Brindisi ou Bari sur la plaque apulienne;

* Khouribga, Meknès sur le bloc Maroc central;

* Trapani, Noto en Sicile.

Il faut rappeler que des stations fixes ou mobiles existent déjà en Europe occidentale (figure.II.3) et peuvent être intégrées dans cette étude.

Figure II 3 : Sites d'observations géodésiques en Europe



○ SLR □ VLBI • GPS

2.3.2. Déformations locales

Des études antérieures, ayant le même objectif géodynamique ont été réalisées localement :

- en Algérie pour l'étude des déformations co- ou a-sismique liées à la faille del Asnam (Ruegg et al 1982; Assamer et Telmat, 1989) par les moyens de géodésie terrestre. Dans la même région une étude en cours, entrepris par une équipe du Centre de Recherche Astronomique et Géodynamique algérienne CRAGG et une autre de l'Institut Physique du Globe de Paris (IPGP) sur : mécanisme sismique et modélisation en utilisant des techniques de nivellemnt;

- à Djibouti pour l'étude du phénomène de "Rifting" en utilisant des techniques de géodésie : terrestre et spatiale avec des lignes de bases de 10 et, 30 à 50 km respectivement (Ruegg et al, 1987);

- ou récemment en Californie pour l'analyse géodésique et tectonique le long de la limite de plaque active par un réseau de 150 km de 11 stations par la technique Laser (Ortlieb et al; 1989).

Ces mêmes études ont montré que l'analyse fine des déformations actuellement observées ainsi que la modélisation de ces déformations exigent d'élargir le réseau de part et d'autre des accidents tectoniques dans la zone active, afin de suivre la cinématique des déformations. Donc l'implantation du réseau de surveillance dans le bassin de la Méditerranée occidentale et dans les pays limitrophes exige à priori une bonne connaissance des zones tectoniquement actives sur les deux plaques.

2.3.2.1. La plaque Eurasie

Dans sa partie Europe de l'ouest, cette plaque est brisée par différentes bandes de déformation qui sont :

- à l'Ouest du bloc corso-Sardaigne, la chaîne Pyrénéenne en France, la Meseta ibérique et les Bétiques en Espagne. Plus au Sud, il y a entre les Bétiques et le Rif au Maroc une compression Nord/Nord-Ouest avec une composante dextre qui augmente vers la ligne Açores-Gibraltar, et un jeu sénestre le long du système de failles de Carbonéras-Alménias (Bousquet et Montenat, 1974; Bousquet et Philip, 1976) au bloc d'Alboran qui se prolonge au sud par la ride d'Alboran et la faille du Nékor (figure II.4).

- à l'Est du bloc corso-sardaigne, la Sicile et la Calabre marquées par des séismes superficiels connaissent une situation différente de celle qu'impliquerait le fonctionnement de l'Arc Tyrrhénien. Il existe en Sicile centrale des failles inverses (de direction sensiblement Est-Ouest) ainsi que des décrochements (Mckenzie, 1972; Rinscetti et R. Schick, 1975).

En revanche, au front de l'Arc (détroit de Messine et Calabre Méridionale) il existe des failles normales Nord-Sud actives (Rinscetti et Schick, 1975). Au sud de l'Italie, l'ancienne zone de subduction thyrénienne dont les traces existent encore dans la sismicité profonde, est maintenant coupée par des failles normales de direction approximativement Nord-Sud, disposées plus au moins en échelon à la fois au Sud-Ouest, vers le fossé de Malte et la Tunisie (échelon dextre) et au Nord-Est, vers le détroit de Messine et la Calabre (échelon sénestre) (Armijo, R., 1985).

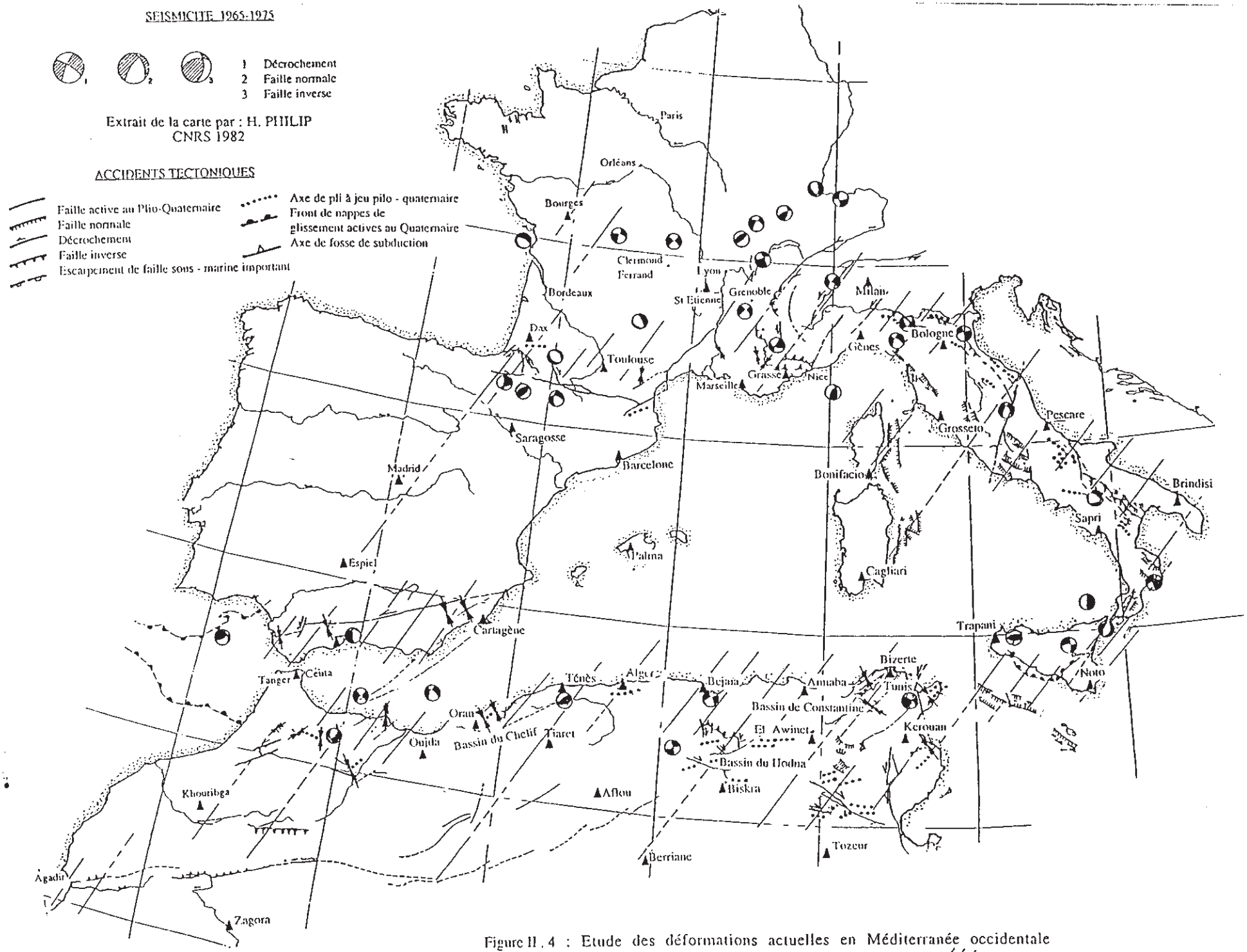


Figure II . 4 : Etude des déformations actuelles en Méditerranée occidentale par un réseau géodésique de surveillance ///

La géométrie de l'Apennin toscan (Arc de vergence NE) dont les chevauchements sont encore actifs (Karnik, 1971) et qui peut s'interpréter comme étant le résultat de la collision entre le bloc corso-sarde et l'Italie, s'explique simplement par un raccourcissement Nord-Est/Sud-Ouest.

Les mécanismes au foyer des séismes des Alpes carniques impliquent une direction de compression Est-Ouest, mais correspondent en partie à des mouvements à composante sénestre le long de failles Nord-Est/Sud-Ouest. Dans une telle interprétation le bloc Italo-Dinarique qui coulisserait vers le Nord-Est par rapport à l'Europe transalpine et l'Adriatique (comme la plaine Padane) ne serait qu'un vaste synclinirium, bordé de failles inverses Nord-Ouest/Sud-Est (Mckenzie, 1972). Les Alpes occidentales quant à elles sont marquées par un taux de soulèvement important et constant au niveau de l'axe de la chaine.

2.3.2.2 La plaque Africaine

Elle comporte aussi un élément autonome septentrional formé par le couloir de déformation de l'Atlas saharien qui en constitue la limite sud. Cette plaque se trouve, elle même, divisée par les couloirs mobiles Sud-Ouest du Moyen-Atlas marocain, de l'Atlas tellien en Algérie et par la Dorsale tunisienne; ainsi s'explique la distinction des bassins externes rifain, tellien et sicilien dans l'ensemble Maghrébide. Dans L'Atlas-tellien les mécanismes au foyer indiquent des failles inverses d'orientation Est-Ouest (Mckenzie, 1978), donc un raccourcissement Nord-Sud.

Du Maroc à la Tunisie, la limite des plaques n'a pas de caractère bien défini (figure II.5) les séismes répartis sur une large ceinture longeant les côtes nord-africaines sont toujours superficiels (inférieur à 15 km) et ne peuvent donc être associés à une zone de Benioff.

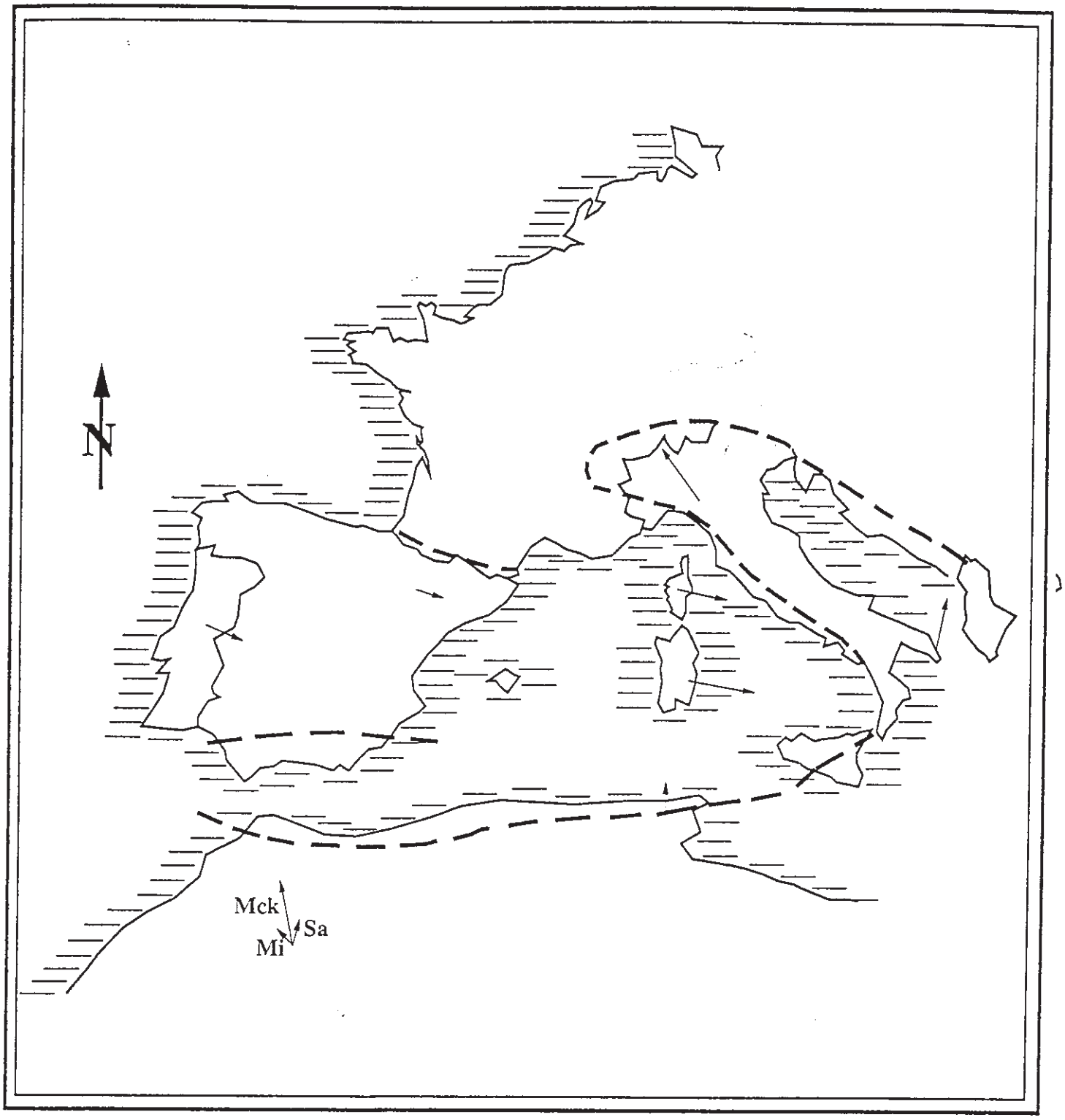


Figure II 5 : Modèle cinématique de plaques adapté
(Mck = McKenzie 1972, Mi = Minster/Jordan 1978, So =Solomon et al. 1975)

⟶ Vitesse de déplacement 1 cm par an

Limite de plaques diffuses

Les observations et mesures néotectoniques effectuées en Afrique du Nord montrent que ces chaînes sont le siège d'une orogenèse active liée à des phénomènes compressifs (figure II.4).

Ce régime compressif qui caractérise cette région semble depuis au moins le crétacé supérieur être continu et conserver des caractères identiques sauf pour le Rif (Morel, 1988;). Cette distinction nécessite une surveillance plus dense dans cette région.

A partir des données de la néotectonique, de la sismotectonique et des résultats des différentes campagnes de microsismicités, ont été mis en relief les zones actives de la Tunisie au Maroc :

En Tunisie, on distingue deux zones sismotectoniques :

- Une zone en compression correspondant au domaine alpin de la Tunisie septentrionale. On peut rattacher à ce domaine les bassins molassiques de la Moyenne et de la Basse Medjerda. Dans cette province dominent les déformations compressives mais de brefs épisodes de failles normales peuvent apparaître.

- Une zone en distension correspondant au domaine de l'Atlas tunisien et à la plateforme pélagienne dans lesquels cette distension semble être le phénomène dominant.

La répartition principale des séismes en Tunisie (figure.II.4), intéresse en fait cinq zones (Ben Ayed., 1986; Hfaeidh et al, 1985) :

* la Moyenne Medjerda (région de Ghardimaou).

* la base Vallée de la Medjerda:

(les régions de Ghar el Melh et Chouat).

* la région de Tunis et le Cap Bon.

* la région du Fahs et de Zaghouan.

* le Golfe de Hammamet.

En plus de ces zones, trois autres régions ont connu des séismes de fréquence et d'intensité faibles:

* la région de Monastir-Moknine

* la région de Sidi Bouzid (R'gueb)

* la région de Gafsa.

En Algérie, l'Atlas tellien appartient à la branche sud de la chaîne alpine du pourtour de la Méditerranée Occidentale. Sa néotectonique et celles des régions avoisinantes est dominée par des phases de déformations extensives Est-Ouest, et compressives avec un raccourcissement de direction moyenne Nord-Sud (Groupe de Recherche Néotectonique de l'Arc de Gibraltar, 1977; Bousquet et Philip, 1986; Philip., 1983).

La tectonique récente compressive la plus significative au sein de la chaîne tellienne se trouve dans la zone du pli-faille d'El Asnam (Bassin du Chélif). Le mécanisme du séisme d'El Asnam du 10 Octobre 1980 (Ms=7.3, vecteur de déplacement= 8m) est compatible avec la convergence des plaques Afrique-Europe (Ouyed et al, 1981). Des structures compressives comparables à celle d'El Asnam (Meghraoui, M.,1982, 1988; Philip, H., et al., 1983) sont

visibles le long de la chaîne tellienne du Nord Algérien (figure.II.4), particulièrement dans les bassins post-nappes néogènes et quaternaires :

* Bassin du Chélif

* Bassin du Mitidja

* Structure plissée du Murdjadjo

* Bassin du Hodna.

Toutes ces régions ont accusé de nombreux séismes de forte intensité. Cette activité sismique importante dans le Tell ne se limite pas à la région d'El Asnam. En effet à l'Est de l'Algérie, dans la région de Constantine, un séisme a été enregistré le 27 Octobre 1985 (Bounif et al, 1987) ce qui a généré trois zones de rupture de surfaces (Meghraoui., M., 1988):

* entre Kef Tassenga et Koudiat: mouvement vertical de 4 cm, mouvement latéral de 10 cm.

* a proximité du village Beni Yacoub: déplacement latéral de 16 cm et vertical de 28 cm.

* au Nord des deux zones précédentes : mouvement vertical de 1 m.

Par conséquent, les déformations de la croûte continentale dans le Nord de l'Algérie s'exerçent relativement et uniformément suivant une bande étroite Est-Ouest au niveau de l'Atlas tellien.

Au Maroc, le blocage entre les plaques Europe et Afrique du Bloc Alboran provoque l'entrée en activité de la ligne de fracture Nékor-Agadir. Cette ligne se manifeste par une sismicité diffuse. Une étude de microseismisité développé en 1976 (Hatzfeld., D., 1978), et l'analyse tectonique récente de

l'orogenèse rifain menée par J.L. Morel (1988) mettent en relief les zones actives, qui sont (figure.II.4) :

* la région de la faille Nékor limitée par Jobha à l'Ouest, Mader à l'Est et au Sud par la ligne Borne-Saka;

* la région d'Agadir;

* le front Nord du Haut Atlas de Midet (Morel., J.L., et al., 1989) les plis de Midet sont considérés comme un relais compressif entre les systèmes décrochants qui limitent le Nord de cette localité. Le régime tectonique de ces plis remonte au Miocène et il semble qu'il se poursuive au cours du quaternaire, mais ne soit localisé qu'au front Nord du Haut Atlas de Midet.

3. LES DONNEES GEODESIQUES

3.1. Les techniques de surveillance

3.1.1. Aperçus historique

L'étude des mouvements récentes de l'écorce terrestre par géodésie est une idée qui date déjà de près d'un siècle. L'exemple le plus ancien est sans doute celui du Japon où un grand programme d'étude des déformations du sol a été mis en oeuvre dans les années 1880 pour étudier les séismes particulièrement destructeurs dans ce pays.

En effet, dès 1882, des réseaux de triangulation de premier et second ordre ainsi que, peu après, des lignes de nivellement ont été installés dans le district de Kanto et régulièrement réitirés après le séisme de 1923 (Muto 1932; Fuji et Nakane 1983 in Lambeck 1988).

La géodésie utilisait jusqu'aux années 1960 deux méthodes :

- Le nivellment pour la détection des mouvements verticaux.

- La triangulation pour la détection des mouvements horizontaux.

Le lecteur intéressé par l'historique de ces méthodes peut se référer à l'ouvrage de Levallois (1989).

Jusqu'à cette époque, seul le nivellement avait, en général la précision suffisante pour des déformations sur quelques années.

En effet, la précision des nivellements est bonne depuis très longtemps, 1 à 5 mm/(km)$^{1/2}$ alors que celle de la triangulation ne permettait, en général, pas mieux que des déterminations à quelques dizaines de centimètres près (Briole, 1990).

C'est l'apparition des appareils de mesure de distance, depuis les années 1960-1970, qui a permis d'améliorer d'au moins un facteur 10 la précision des mesures horizontales. En raison de l'évolution de la précision, les études actuelles n'utilisent pratiquement plus les anciennes données. Toutefois, dans les régions à fort taux de déformations, il a été vérifié que les données anciennes étaient encore intéressantes comme le montrent certains travaux entrepris dans ce sens : En Grèce (Billiris et al 1989).

Dans le cas de l'Egée, sur la région entourant la zone de convergence Europe-Afrique, Assamer (1990) a mis en évidence la quantité de mouvement relatif durant une période de 50 ans avec les données anciennes et une réitération .

Si nous supposons, comme cela est suggéré dans la plupart des modèles (§2.2), que la convergence Afrique-Europe au niveau de la Crête est de l'ordre de 10 cm par an et si, par exemple, les données anciennes dataient d'un siècle, le déplacement enregistré ne serait pas loin de 10 m. Il est possible de mettre en évidence un tel déplacement.

Il sera donc nécessaire pour mesurer les déformations de connaître si la précision des techniques avec laquelle ces déformations ont été déterminés est assez bonne pour que la convergence Europe-Afrique puisse être mise en évidence et qu'elle puisse également être précisément quantifiée.

Pour cela, nous allons faire un bilan des techniques de la géodésie spatiale potentiellement en usage dans la région de la Méditerranée Occidentale

3.1.2. Positionnement spatial de haute précision

Actuellement plusieurs techniques de positionnement participent activement dans le réseau mondial. Cette couverture reste encore déficiente sur le globe et, en particulier dans l'hémisphère sud.

Récemment, une nouvelle technique de positionnement DORIS (Doppler Orbit Determination and Radiopositioning Integrated by Satellite) a été développée par le CNES (Centre National des Etudes Spatiales). Ce système est de même ordre de précision que les autres techniques spatiales les plus anciennes.(Willis, P., et al., 1991) La couverture mondiale par ce technique ne compte que quelques sites, dont une application géodynamique ne peut être envisagée par ce système jusqu'à présent.

Dans notre étude nous citons trois techniques, en usage depuis de nombreuses années (VLBI, GPS, SLR)

3.1.2.1. Positionnement par VLBI

La technique de VLBI repose sur la réception simultanée, par au moins deux antennes (radiotélescopes), des émissions d'un signal radio-électrique provenant d'une même source naturelle extragalactique (quasar), galactique (radio-étoile) ou artificielle (sonde) dans les mêmes bandes de fréquence radio. Ce dernier détermine, pour chaque paire d'antennes les deux observables : la fréquence de franges et le retard entre les dates d'arrivée d'une même front d'onde aux deux antennes. Les sessions d'observations sont de 24 heures. La précision relative en horizontal est de l'ordre de 10^{-9} et moins bonne en vertical.

La solution du traitement de la campagne VLBI mobile 1989 présentée dans la première partie de ce document nous donne une précision inférieur au

centimètre pour les composantes horizontales et de un à deux centimètres pour la composante verticale.

En Europe Occidentale il existe un réseau opérationnel de trois stations fixes qui participent régulièrement aux différents programmes de mesures. En 1989 six nouvelles stations mobiles ont été observé (voir première partie § 3.1). Récemment au cours de la campagne de VLBI mobile 1992 une nouvelle station mobile en France (Toulouse) s'ajoute au réseau précédent. Ces mesures peuvent être exploiter après des itérations pour l'étude de la déformation de l'écorce terrestre (Campbell, J., 1988, Petit, G. et al ,1986)

Nous remarquons que les stations dans la partie Sud de la région de la Méditerranée Occidentale sont particulièrement abscentes.

3.1.2.3. Positionnement par SLR

Le principe de ce système Laser Satellite est la mesure d'un temps de propagation aller-retour d'une impulsion Laser entre un point au sol et un ensemble de rétro-reflecteurs placés sur un satellite artificiel.

Au cours d'un passage du satellite, une centaine de mesures en moyenne sont obtenues après traitement. Ces mesures sont datées par l'horloge de la station

Il existe un réseau mondial de stations d'observations comportant d'une part une vingtaine de stations munies de systèmes de télémétrie fixes et d'autres part, plus d'une soixantaine de stations font l'objet d'observations plus ou moins régulières en utilisant des systèmes de télémétrie mobiles.

Le SLR est similaire au VLBI en qualité de précision, il complète la couverture du réseau VLBI dans les régions qui ne sont pas occupées.

Le SLR a le défaut qu'il n'est pas un système à tout climat et il est sensible aux conditions climatiques locales (Chris, R. et al, 1983).

La précision est d'environ 5 cm en positionnement absolu (XX general assembly of the IUGG, Vienna, Austria, 1991).

3.1.2.2. Positionnement par GPS

Le système GPS comme il était défini par plusieurs auteurs est un système de navigation par satellites. Il permet l'acquisition rapide d'information de positions et de vitesses tridimentionnelles (Wells et al, 1986). Dès 1978, les premiers satellites du GPS ont été lancés sur orbite et utilisés. La constallation finale comprend 21 satellites placés sur six plans d'orbite quasi circulaire et d'altitude de 20 000 km. A tout moment, au minimum 5 satellites peuvent être visibles en tout point de la terre et à tout instant.

Les satellites GPS génèrent deux ondes radio-électriques sur des fréquences ultra-stables (L1 = 1.575 Ghz, L2 = 1.242 Ghz), sur lesquelles sont modulés des codes. Les récepteurs GPS bifréquences génèrent deux fréquences proches de L1 et L2. Deux types de mesures sont possibles (Willis, 1989) :

- la mesure de pseudo-distance, définie par la différence entre la date d'émission du signal (dans l'échelle de temps satellite) et la date de réception du signal (dans l'échelle de temps récepteur) et ceci après corrélation de deux signaux. On en déduit ainsi le temps de propagation puis la distance. Une mesure simultanée sur quatre satellites permet alors le relècvement dans l'espace et de déterminer la position. Utilisant des éphémérides précises ou opérationnelles, la précision de cette méthode varie de quelques décimètres à quelques mètres, dépendant du nombre de satellites, de la durée d'observations et de la qualité des éphémérides;

- la mesure de phase : deux stations mesurent directement la phase du signal reçu. La différence de phase entre les deux récepteurs permet alors d'obtenir la différence de distance entre le satellite et les deux stations. Ceci doit être également combiné avec plusieurs satellites sous une forme de double différence. Un réseau de stations peut être déterminé par cette méthode avec une précision relative allant de 10^{-6} à 10^{-8} .

Parmi les nombreux types de localisations, nous nous intéressons principalement aux localisations :

- géodésiques précises, c'est à dire les localisations relatives utilisant deux récepteurs enregistrant la phase GPS et en modélisant correctement les mesures de phases. Dans les conditions courantes elles permettent d'atteindre avec des modèles simples, une précision relative de quelques 10^{-6} . Ces modèles utilisent en particulier, les orbites radiodiffusées, et les coefficients d'un modèle mondial à 8 paramètres, pour corriger les erreurs de propagation dans l'ionosphère. Par l'utilisation de récepteurs bi-fréquences et un léger calcul d'orbite, il est possible de porter la précision de quelques 10^{-7} à 10^{-8} .

GPS ultra-précis : positionnement relatif nécessitant des récepteurs bi-fréquences afin d'améliorer la correction ionosphérique. Il faut d'autre part disposer d'une orbite précise. Pour cela, on dispose sur des sites d'un réseau de référence (Fiducial network), possèdant des coordonnées précises, issues des techniques comme le VLBI ou Laser satellite, des récepteurs bi-fréquences qui vont servir à calculer l'orbite des satellites GPS. On placera ensuite des récepteurs sur d'autres points à déterminer. La précision est de l'ordre de 10^{-8}, obtenue récemment par le MIT et le JPL, (Bock et al, 1986, Blewit, 1989).

L'utilisation de la technique GPS dans différentes campagnes est de plus en plus répandue dans le monde. De nombreuses expériences réalisées mettent en

évidence ses capacités (il fourni plusieurs types de localisations, ...) et performances en terme de précision il est comparable aux VLBI et SLR.(0.4 ppm sur une base de 500 km (M'bra (1991)) et relativement moins coûteux que le VLBI et le SLR.

Le positionnement GPS relatif permet, lui, d'atteindre la précision requise pour la géodynamique (< 5 cm) (Briole 1990).

Les limtations de la précision de ce système est l'atmosphère, la stabilité des sites, comme il est pour le VLBI et le SLR et, l'effet de multitrajet.du essentiellement aux caractéristiques de la réflexion et la durée d'observations (James, L., et al, 1989).

3.2. Travaux effectués

WEGENER est un acronyme pour "Working-group of european Geo-scientists for the Establishment of Networks for Earthquake Research" (Groupe de travail des scientifiques Européens des Sciences de la Terre pour l'établissement de réseaux concernant la détection des tremblements de terre). Les activités de WEGENER ont commencé au début des années 1980 en réponse à l'intérêt international pour le projet "Crustal Dynamics" (Dynamique de la croûte terrestre). Cet intérêt très général qui depuis, a été élargi pour couvrir les aspects importants de la géodésie, géodynamique et de l'océanographie. De plus, des mesures géodésiques sont nécessaires pour répondre aux questions de chacune de ces trois communautés scientifiques.

Le signal recherché est extraimement faible, typiquement de l'ordre de quelques centimètres par an (voire moins) pour la composante horizontale et de quelques millimètres pour la composante verticale. Il faut donc que les observations (qui sont habituellement réalisées entre des points très distants)

soient faites avec la plus grande exactitude possible (d'où la prédominance des techniques spaciles).

Dans un premier temps, c'est la partie Centrale et Orientale de la Méditerranée qui a été choisie comme première étude régionale intensive de ce type à l'extérieur de l'Amérique du Nord. Ce choix s'explique par l'activité néotectonique existant dans cette région ainsi que par l'ordre de grandeur des signaux à détecter.

Depuis 1985, des observations ont été réalisées en Méditerranée Centrale et Orientale afin de pouvoir répondre à une partie des objectifs géodynamiques. Comme ces activités sont par essence régionale, les observations ont été réalisées principalement par SLR, GPS en liaison avec des stations VLBI européennes permanentes disposant déjà d'une longue histoire d'observations. Des densifications locales ainsi que des recherches particulières plus détaillées ont été réalisées par GPS. De plus, à cause de la signature temporelle des phénomènes observés, les mesures sont répétées sur plusieurs années (Gend, G., 1991).

Le succes de ces mesures dans cette région au cours des cinq dernières années démontre la faisabilité d'étendre ces mesures, dans un proche avenir, pour l'ensemble du bassin Méditerranéen et des pays limitrophes. Bien que les mouvements néotectoniques de la partie Occidentale de la Méditerranée sont très probablement beaucoup plus faibles (environ 0.4 à 1 cm/an au maximum) que ceux mis en jeu dans la partie Centrale et Orientale, cette région est néanmoins sujette à d'importants tremblements de terre (les seismes d'El Asnam, 1950, 1980). Des études récentes sont en cours dans cette région de l'Algérie , mais malheureusement n'utilisant que les techniques de nivellement.

Dore et déjà, les pays limitrophes ont pris part dans cette effort allant dans cette direction dans le cadre de certains groupes de travail de l'AIG comme

EUREF et UELN. Il est donc nécessaire d'étendre cette activité aux autres pays imitrophes.

Un autre aspect de cette proposition est la validation régionale d'altimètres radar embarqués sur certains satellites (SALT, ERS-1, TOPEX-POSEIDON, ...). Il existe dans cette région , un réseau géodésique relativement dense de stations de poursuite de satellites (stations de poursuite de satellites laser ou aussi stations de poursuite de systèmes radioélectriques comme les systèmes TRANET, GPS, DORIS ou PRARE). De cette manière, en s'appuyant sur des systèmes techniques d'arc court, il est possible d'obtenir un orbite régionale de très grande précision. En outre, les effets océanographiques sont relativement faibles et peuvent être parfaitement modifiés de telle sorte que la surface moyenne de la mer peut être déterminée très précisement à condition qu'un réseau de marégraphes soient rattaché à un même réseau géodésique de précision. Enfin, dans cette région, on peut déterminer une orbite précise, une topographie précise de la surface de la mer et, par voie de conséquence, une calibration précise de l'altimètre radar dans le cas où les campagnes géodésiques, proposés ici, sont menés à bien.

Des réseaux de surveillance de déformations horizontales et verticales existent déjà dans tous les pays limitrophes du bassin Méditerranéen Occidental (pouvant mettre en jeu plusieurs pays différents). De plus en plus, le besoin de relier ces réseaux entre eux, d'améliorer leur exactitude interne, et de pouvoir convertir les coordonnées d'un point d'un de ces réseaux dans un système de référence global se fait sentir à la fois pour des raisons purement scientifiques et pour des raisons techniques (amélioration des poins de contrôle pour la cartographie, pour le cadastre, pour les travaux offshor, le rattachement des Détroits comme Gibraltar, une meilleure utilisation des techniques comme GPS pour les travaux de géodésie, ...). Dore et déjà, l'Espagne, l'Italie et la France ont

pris part dans cette effort européen allant dans cette direction dans le cadre de certains groupes de tarvail de l'AIG comme EUREF et UELN. Il est donc nécessaire d'étendre cette activité aux autres pays limitrophes (Wegener Consortium, 1990, 1991).

3.3. Extension régionale de Wegener-Medlas

Une large extension régionale du projet WEGENER-MEDLAS relative à la méditerranée occidentale favorise la disponibilité d'un large réseau d'appui destiné à fournir de l'information sur les déformations dans cette région et ainsi fournir une référence d'appui servant à densifier des zones plus petites à étudier plus particulièrement.

Une proposition présentée dans le cadre de l'extension du projet Wegener Medlas par deux groupes de l'IGN (France) et IFAG (Allemagne) dans le quatrième symposium de la géodésie Africaine (21-27 Mai, 1990). Ce projet prenant en compte un certain nombre d'études de détail indique qu'en plus du point de référence de de Robledo, il est nécessaire que d'autres stations soient observées aux alentours de Cadiz, La Coruna et Pampelune en Espagne, Lisbonne au Portugal, Toulouse en France, Biskra et Bechar en Algérie ainsi que Marrakech au Maroc. Un pointd'appui supplémentaire situé sur les îles Canaries et/ou à Madère fournirait enfin le rattachemententre le continent Africain et l'Europe ainsi que l'activité des "points chauds" dans l'Atlantique Est.

4. REALISATION PRATIQUE

Pour chaque zone active, un réseau de surveillance sera implanté. Ce réseau constitue une densification du réseau de référence à grande maille proposé dans la (figure II.3) Et pour complèter les objectifs géodynamiques dans cette région qui consistent à mesurer :

- mesure du mouvement de la plateforme africaine par rapport à celle de l'Europe évalué de 0.5 à 0.8 cm/an de Gibraltar à la Sicile (Mckenzie,1972)

- mesure du mouvement relatif de la plaque apulienne par rapport à celle de l'Afrique et de l'Europe avec la possibilité d'une rotation. Deux points au minimum sont nécessaires sur chaque bloc pour évaluer le mouvement

- évaluation de la déformation interne dans les zones orogéniques avec possibilité de rotation des petits blocs tels que le Rif, l'ensemble Corse-Sardaigne et les Baléares. Ceci nécessite un réseau plus dense.

il est nécesaire :

- d'une part de rattacher le réseau de l'Europe Occidentale à celui de l'Afrique du Nord par le détroit de Gibraltar et le Canal Tunisie-Sicile à travers Lampadusa (figure II.3). Remarquons qu'il existe déjà un rattachement entre l'Afrique et l'Europe au niveau du détroit de Gibraltar par un réseau géodésique terrestre de haute précision (Catula et al, 1989)

- et d'autre part d'étendre le réseau de surveillance jusqu'aux plateformes de l'Afrique et de l'Europe.

Pour mesurer au cours des prochaines années ces déplacements (de l'ordre du mm/an pour les mouvements verticaux et du cm/an pour le mouvements horizontaux) les techniques de la géodésie spatiale (VLBI: Radio-Interférométrie à très Longue Base, GPS: Système de Positionnement Global, SLR: Distance-Laser sur Satellite) sont les mieux adaptées. Ainsi dans les études portant sur de grandes échelles la distance entre les différentes sites peût être inter-coentinentale et ne constiute nullement un facteur limitatif.

Le choix des sites proposés reste sujet à discussion. La sélection d'un nombre de sites plus restreint peût être envisagée tant que les caractéristiques principales du réseau sont respectées. Il faut également avoir à l'esprit que des stations fixes ou mobiles existent déjà en Italie, en R.F.A , en France et en Espagne et peuvent de ce fait être utilisées dans cette étude.

Il reste à signaler que les mouvements verticaux sont trop faibles au niveau du mm. L'estimation de ces déplacements verticaux ne pourra se faire rigoureusement que si la connection des niveaux moyens des mers est faite et l'estimation par les mesures géodésiques spatiales de la composante verticale est de l'ordre du mm.

Etude de la convergence Afrique-Europe Arc Hélénique mise en place d'expérience de géodésie spatiale (Technique GPS). Projet prévu pour Octobre 1993. Ce projet entre dans le cadre d'une coopération multinationale (France, Grèce, Egypte, Turquie), avce possibilité d'extension du réseau en Tunisie et la lybie. Le réseau envisagé compte environ une dizaines de sites.

CONCLUSION

GENERALE

Les résultats du traitement de la campagne européenne de VLBI mobile 1989 peuvent être conclus en deux dimensions différentes. Une première dimension qui s'arrête au niveau de la cohérence interne et externe de la solution, et une deuxième qui s'étend aux caractéristiques relatives de la campagne (technique VLBI, coût, ..) par rapport aux campagnes réalisées aussi en Méditerranée occidentale utilisant des techniques divers (en particulier : GPS, SLR).

La solution globale standard VLBIM89 de la campagne européenne de VLBI mobile 1989 est obtenue en fait après une procédure de trois étapes :

- le traitement base par base, qui est effectué afin de déterminer essentiellement les changements de marches d'horloges par station et pour chaque session d'observations. Cette étape est considéré la plus longue des trois;

- le traitement session par session. A cette étape nous avons démontré la consistance de la reproductibilité des solutions obtenues. L'écart-type calculé sur les déplacements (Est, Nord, Verticale), montre que pour les stations européennes, la reproductibilité est meilleure en horizontal qu'en vertical. Ceci est dû au fait qu'à ce stade du traitement nous n'avons utilisé qu'un seul paramètre troposphère par jour. Pour les stations américaines, la reproductibilité est bonne pour les longueurs et moins bonne pour les composantes. Elle présente par ailleurs des systématismes . Une cause connue de ces rotations est la non prise en compte à ce stade du traitement des termes correctifs de la nutation;

- la dernière étape consiste à regrouper toutes les données pour les solutions globales y compris les solutions expérimentales Une étude comparative de notre solution soit préliminaire ou standard avec d'autres solutions nous

conduit à conclure sur la précision de nos résultats et la cohérence interne et externe de la solution globale standard.

En effet la comparaison de notre solution géodésique préliminaire VLBIM1 avec celle de l'ITRF90, nous a permis d'apprécier la précision de nos résultats : L'écart-type sur les translations est de l'ordre de 2 cm (1σ) et la valeur maximale résiduelle est de 5 cm sur la composante verticale de BREST.

Une fois la solution géodésique préliminaire est obtenue, nous avons développé une étude détaillée pour le choix des intervalles d'ajustement des paramètres troposphériques (un biais et une pente) Cette étude est décisive pour le traitement de la solution globale standard. Ceci étant pour éviter le systématisme qui peut résulter de l'effet de surparamétrisation. Cette analyse est basée sur le calcul de deux estimateurs. Il s'agit de l'estimateur de la variance d'Allan et un estimateur de statistique courant. Le résultat de ces tests nous a permis de choisir une durée d'ajustement des paramètres troposphériques de 6 heures, ce qui n'est pas le cas dans les traitements habituelles, souvent n'excédant une heure. L'intérêt majeur de ce choix est donc de réduire au minimum le nombre de paramètres, dont un nombre trop important peut biaiser la solution.

La solution globale standard a des résidus de 89.8 ps pour les retards et de 78.4 fs/s pour les fréquences de franges. Les résidus sur les retards équivalent à un déplacement de 2.5 cm en moyenne, dont l'importance est due essentiellement à la modélisation troposphérique. Les écart-types sur les coordonnées varient très peu, de l'ordre du centimètre. L'estimateur unitaire de variance est voisin de 1 pour les retards qui sont l'observable principale. Ces résultats impliquent une cohérence interne de la solution globale standard.

Les résultats des paramètres de la rotation de la terre obtenus de la solution VLBIM89R montrent des variations sur UT1 de l'ordre de 2.5 mas. Ces variations sont voisines de la rotation trouvée sur Z qui est obtenue par comparaison entre VLBIM89 et ITRF90 Cette valeur exprime bien l'incohérence entre les paramètres de la rotation (UT1) et les systèmes céleste et terrestre. Ceci est explicité dans le rapport annuel de l'IERS pour 1989, et par conséquent une deuxième cohérence interne qui s'ajoute

Les différents résultats obtenus par comparaison du VLBIM89 avec le NGS et l'ITRF90 confirme qu'il y a un systématisme généralisé pour toutes les solutions sur la composante verticale de Brest. Ce systématisme peut être expliqué par, soit un mauvais ajustement des paramètres troposphériques, soit par un nombre insuffisant d'observations. Il est donc souhaitable de faire d'autres mesures pour mieux comprendre la cause principale de ce systématisme. Les résidus sur les autres stations sont faibles et en parfaite cohérence pour toutes les solutions. Cette cohérence externe nous permet de conclure que notre solution globale standard est aussi bonne que les solutions du NGS et de l'ITRF90.

Appliquer l'effet de charge océanique aux solutions VLBI et chercher systématiquement son influence sur le résultat, apparaît inutile au moment où nous résolvons les paramètres troposphériques par une technique utilisant les ondes radio. Cet effet peut être significatif pour des stations ayant une amplitude importante (cas des stations sur les côtes pacifique, ou pour les îles), ce qui n'est pas le cas pour nos stations.

Cette cohérence interne et externe peut permettre l'intégration de notre solution VLBIM89 dans la solution de l'ITRF90, dans le cadre de la réalisation d'un système de référence terrestre international.

En plus de la campagne de VLBI mobile en 89 et celle de 92 qui vienne d'être achevée, d'autres campagne européenne ont été réalisées utilisant les techniques GPS (EURE89 89, GIG 1991 et IGS92) et SLR (WEGENER-MEDLAS). Ces campagnes contribuent à la détermination d'un réseau géodésique européen de haute précision.

En plus de l'objectif géodésique (extension et densification du réseau existant) divers objectifs scientifiques sont envisagés (océanographie, géodynamique, gravimétrie, etc.).

En fonction des caractéristiques de chaque technique (avantages et inconvénients), nous pouvons adopter une technique ou une autre pour une application donnée, ou plusieurs techniques pour une même application.

Ces caractéristiques sont essentiellement regroupées en quatre éléments : utilisation, limitation, performance et coût. Un résumé synthétique de ces éléments avec quelques ordres de grandeurs est présenté dans le tableau suivant :

		VLBI	GPS	SLR
Utilisation	- définition et maintenance d'un système inertiel [1]	oui	non	non
	- orbitographie	non	oui	oui
	- precession-nutation	oui	non	oui
	- rotation de la terre	oui	oui	oui
	- réalisation d'un système terrestre et déformations globales	oui	oui	oui
	- champ de gravité	non	difficile	possible
Performance (H/V) [2]	10 km	2/3 mm	2/3 mm	2/3 mm
	1000 km	2/4 mm	3/10 mm	5/10 mm
	5000 km	3/10 mm	5/40 mm	10/20 mm
	>5 000 km	10/20 mm	?	15/30 mm
Limitation	les limites fondamentales de la précision pour ces deux techniques sont :	- atmosphère	- atmosphère	- atmosphère
		- grande structure de l'antenne	- multi-trajet	- nombre de satellites
		- stabilité du site	- stabilité du site	- stabilité du site
Coût [2],[3]	- instrument	- télescope $200 k-$5M - récepteur $200 k - logiciel et données = $750 K -horloge mase = $300 k	-récepteur =$10-50 k - il n'y a pas de partie mobile	- télescope = $100 k-$1 M - Laser + électronique = $100-$500k - horloge césium =$25k
	- opération	- un à deux personnes	-automatique	- un à deux personnes
		-bande d'enregistrement 10^{11} à 10^{13} bits par session et par station	- faible volume envoyé par réseau ou messagerie électronique	- similaire au GPS
	- procédure des données	- traitement des données = $1-3 M	- les données sont collectées par des centres, traitement inclu le calcul d'orbite	- similaire au GPS

[1] Kovalevsky, J. et al, 1989; [2] Scheid, J.A, 1991; [3] Seeger, H., 1989

Tableau I.22. Inconvénients et avantages des techniques VLBI, GPS et SLR

Nous pouvons alors faire les constatations suivantes :

- Le VLBI est une technique sans égale pour la réalisation des systèmes inertiels et terrestres et la détermination de leur rotation relative.

- Le VLBI mobile et le SLR sont bien adaptées pour la maintenance d'un réseau terrestre mondial ayant des grandes bases.

- GPS et SLR sont plus souples à utiliser, largement moins coûteux que le VLBI

- Actuellement la haute précision des solutions GPS est obtenue si nous intégrons le réseau local dans un réseau global. Pour l'Europe occidentale plusieurs stations sont valables utilisant des techniques Laser ou du VLBI et qui sont prises en compte dans le calcul des solutions GPS (EUREF89). Laser et VLBI, pour une même précision n'exigent pas une détermination dans un réseau global.

- Les mesures verticales pour les trois techniques sont moins rigoureux que les mesures horizontales. Pour estimer des mouvements verticaux cas des rebond post-glaciaire, ces deux techniques ne répondent pas au besoin.

- L'atmosphère est le facteur fondamental qui limite la précision de ces techniques.

En effet la solution du traitement de la campagne européenne de VLBI mobile 1989 confirme ces deux dernières constatations. Les écart-types sur les composantes verticales (environ 2 cm) sont plus important que les composantes horizontales (de l'ordre du centimètre).

La précision de la campagne EUREF 89 est de 3 à 5 cm sur la composante horizontale et de 6 cm sur la composante verticale solution (Gurtner., W., et al., 1992). Cette solution EURE89 89 déterminé par Gurtner inclue fixe les stations VLBI/Laser de l'ITRF89.

Dans une conception de recherche nous pouvons conclure que malgré la haute précision relativement bonne pour ces trois techniques à coût inégale, il est souhaitable de franchir les limitations de la précision en étudiant plus particulièrement les effets de l'atmosphère.

REFERENCES

Première Partie

Abell, M.D., Morrison , M.L., "Results of analysis of mobil VLBI observations at selected sites in Europe", National Geodetic Survey NOAA, Rockville, Pasadena, California, April 3-5, 1990.

Allan, D.W, Barnes, J.A., "A modified 'Allan variance' with increased oscillator characterization ability" Proc. 35th annual frequency control symposium, Philadelphia, May 1981, PP 470-475.

Boucher, C., "Analyse d'un logiciel de combinaison de jeux de coordonnées tridimensionnel", IT/G n° 58, IGN/SGN N°27.490 Octobre 1988.

Broten, N.W., Legg, T.H., Locke, J.L., McLeish, C.W., Richards, R.S., Chisolm, R.M., Gush, H.P., Yen, J.L et Galt, J.A., Long baseline interferometry: a new technique, Science 156, 1592, 1967.

Carter, W. E., Robertson, D. S., Nothnagel, A., Nicolson, G. D., Schuh, H., Campbell, J., IRIS-S; "Extending Geodetic Very Long Baseline Interferometry observations to the southern hemisphère", J. Geophys. Res., 93, B12, 14947-14953, 1988.

Ma, C., Very Long Baseline Interferometry applied to polar motion, relativity and geodesy, NASA, Technical Memorandum 79582, 1978.

Charlot, P., Structure des sources radio extragalactiques dans les observations VLBI d'astrométrie et de géodynamique, Thèse de doctorat de l'Observatoire de Paris en Astronomie statistique et dynamique-géodésie, 17 Jan, 1989.

Clark, T.A., Hutton, L.K., Marandino, G.E., Couselman, C.C., Robertson,D.S., Shapiro, I.I., Wittels, J.J., Hinteregger, H.F., Knight, C.A., Roggers, A.E.E., Whitney, A.R., Niell, A.E., Ronnang, B.O. et Rydbeck, O.E.H., Radio source

positions from very-long-baseline interferometry observations, A.J. 81, 599, 1976.

Coates, R.J., Clark, T.A., Counselman, C.C., Shapiro, I.I., Hinteregger, H.F., Rogers, A.E. et Whitney, A.R., Very long baseline interferometry for centimeter accuracy geodetic measurements, Tecnophysics 29,9, 1975.

Counselman, C.C., Radio astrometry, Annual review of astronomy and astrophysics, Vol. 14, edited by G.R. Burbidge (Palo Alto: annual reviews, 1976)

Crustal Dynamics, Principal Investigator's Working Group, Pasadena, 6-7 Mars 1991.

Currie, D.G., Knapp, S.L. et Liewer, K.M., Four stellar diameter measurements by a new technique: amplitude interferometry, Ap. J. 187, 131, 1974

Farell, W.E., "Deformation of the Earth by surface loads", Rev Geophys. Space Phys., 10. 761-797, 1972.

Francis, O. et Mazzega, P., Global charts of ocean tide loading effects, J.G.R., Vol. 95, No. C7, Pages 11,411-11,424, July 15, 1990.

Goad, C. G., "Gravimetric Tidel Loading computed from integrated Green's functions", J. Geophys Res., 85, 2679-2683, 1980.

Gordon, R.G. et Stein, S., Global techtonics and space geodesy, Science, Vol. 256, Page 333-342, 17 April 1992.

Gubbay, J.S., Legg, A.J. et Robertson, D.S., Position solution of compact radio sources using long coherence VLBI, New problems in astrometry, IAU symposium N° 61, edited by W. Gliese, C.A. Murray, and R.H. Tucker (Dordrecht: D. Reidel, 1974).

Hellings, R., Relativistic effects in astronomical timing measurements, Astron. J., 91, 650-659, 1986.

Herring, T.A., Davis, J.L. et Shapiro, I.I.,Geodesy by radio interferometry: the application of Kalman filtering to the analysis of very long baseline interferometry data, J.G.R., Vol. 95, No. B8, Pages 12,561-12,581, August 10, 1990.

Hinteregger, H.F., Shapiro, I.I., Robertson, D.S., Knight, C.A., Ergas, R.A., Whitney, A.R., Rogers, A.E.E., Moran,J.M., Clark, T.A. et Burke, B.F., Precision geodesy via radio interferometry, Science 198, 396, 1972.

IERS Analysis Centers for VLBI, LLR, SLR, AAM, October 1991, Observatoire de Paris.

IERS Annual Report for 1989, Observatoire de Paris 1990.

IERS Standards, 1992, Mc Carthy , D.D., (ed.) In press.

IERS Technical note 8, Earth orientation and reference frame determinations, atmospheric excitation functions, up to 1990, (Annex to the IERS Annual Report for 1991).

Kovalevsky, J., Lecture notes in physics, astrometrie moderne, Springer-Verlag, Berlin Germany, 1990.

Lanyi, G. E., "Tropospheric Delay effects in Radio Interferometry", Telecommunications and Data Acquisition Prog. Rept. 42-78, pp. 152-159, Jet Propulsion Laboratory, Pasadena, California, April-june, 1984.

Lieske, J., "Expression for the precession quantities and their partial derivatives", Jet Propulsion Laboratory techn., report 32-1044, 1967.

Lieske, J., Expressions for the precession quantities and their partial derivatives, Jet propulsion laboratory tech., report 32-1044, 1967.

Melbourne, W., very long base line radio interferometry, project MERIT-A review of the techniques...,Wilkins (ed.), Roy.Greenwich Obs., 1980.

Minster, J.B. et Jordan, T.H., Present-day plate motions, J. Geophys. Res. 83, p. 5331, 1978.

Moran, J.M., Crowther, P.P., Burke, B.F., Barrett, A.H., Rogers, A.E.E., Ball, J.A., Carter, J.C. et Bare, C.C., Spectral leni interferometry with independent time standards at stationsseparated by 845 kilometers,Science 157, 676, 1967.

Ong, K.M., MacDoran, P.F., Thomas, J.B., Fliegel, H.F., Skjerve, D.J., Spitzmesser, D.J., Batelaan, P.D., Paine, S.T., Newsted, M.G., A demonstration of radio interferometric surveying using DSS14 and the project Aries transportable antenna, J. Geophys. Res. 81, 3587, 1976.

Pagiatakis, S. D., Langley, R. B., Vancek, P., "Ocean tide : a global model for the analysis of VLBI observations", presented at the 3rd International Symposium on the Use of Artificial Satellites for Geodesy and Geodynamics, National Technical University, Athens, Greece, Sept. 1982.

Petit, G. et Charlot, P., Evidence for the effects of sources structure in geodeti and astrometric VLBI, Proc. 7th Work. Meeting on European VLBI (133-140).

Resch, G.M., Miller, R.B., "Water vapor radiometry in Geodetic Applications", Geodetic Aspects of electromagnetic wave propagation through the atmosphere, ed. F.K.Brunner, Springer-Verlag, Berlin, Germany, 1983.

Robertson, D.S., Geodetic and astrometric measurements with very-long-baseline interferometry, M.I.T. (Ph.D. thesis),1975.

Rogers, A. E. E., "Radio sc, 5, 1239, 1970.

Rogers, A.E.E., Knight, C.A., Hinteregger, H.F., Whitney, A.R., Counselman, C.C., Shapiro, I.I., Gourevich, S.A., Clark, T.A., Geodesy by radio interferometry: determination of a 1.24-km base line vector with approx. 5-mm repeatability, J. Geophys. Res. 83, No. B1, 325, 1978.

Ryan, J.W. et Ma, C.: NASA Technical Memorandum, 100682,.1987.

Saastamoinien, J., "Atmospheric correction for the troposphere and stratosphere in radio ranging of satellites", Geophysical monograph 15, ed. Henrisken, PP. 247-251, 1972.

Scherneck, H.G., A parametrized solid earth tide model and ocean tide loading effects for global geodetic baseline measurements, Geophys. J. Int., 106, 677-694, 1991.

Schuh, H. et Moehlmann, L., Ocean loading station displacements observed by VLBI Geophysical, Geophysical Research Letters, vol. 16, No. 10, pages 1105-1108, october 1989.

Schwiderki, S. D., "On charting global ocean tides, Rev. Geophys., Space Phys., 18, 243-268, 1980.

Shapiro, I.I., Robertson, D.S., Knight, C.A., Counselman, C.C., Rogers, A.E.E., Hinteregger, H.F., Lippincott, S., Whitney, A.R., Clark, T.A., Niell, A.E. et Spitzmesser, D.J., Transcontinental baselines and the rotation of the earth measured by radio interferometry, Science 186, 920, 1974.

Soffel, M., relativity in astrometry, celestial mechanics and geodesy, Springer Verlag (1989).

Sovers, O.J., "Observation Model and Parameter partials for the JPL", VLBI Parameter Estimation software, "MODEST", NASA-JPL Publication, 83-89, Rev.4, August 1, 1991.

Spiros, D. et Pagiatakis, S.D., The response of a realistic earth to ocean tide loading, Geophys. J. Int. 103, 541-560, 1990.

Suchuh, H., Moehlmann, L., "Ocean loading station displacements observed by VLBI", Geophys. Res. letters, Vol. 16, N°.10, pp. 1105-1108, October 1989.

Thomas, J. B., "An analysis of Radio Interferometry with the Block O system", JPL Publication 81-49, Jet Propulsion Laboratory, Pasadena, California, 1981.

Thomas, J.B., "JPL technical report 32-1526, XVI, 47. 1973.

Thomas, J.B., Fanselow, J.L., MacDoran, P.F., Spitzmesser, D.J. et Skjerve, L.J., Radio interferometry measurements of a 16-km baseline with 4-cm precisions, J. Geophys. Res. 81, 995, 1976.

Thomson, A.R., Moran, J.M., Swenson Jr., G. W., "Interferometry and synthesis in radio-astronomy", Jhon Wiley and sons, New York, 1986.

Walker, G., "Astronomical observations", Cambridge university Press, Cambridge. 1987.

Wegner Consortium, Geodetic Applications for the Global and regional Study of the Dynamics of the Solid Earth, Nice 02-06-12, 1991.

Whitney, A.R., Rogers, A.E.E., Hinteregger, H.F., Knight, C.A., Levine, J.I., Lippincott, S., Clark, T.A., Shapiro, I.I. et Roberton, D.S., A very-long-baseline interferometer system for geodetic applications, Radio Science 11, 421, 1976.

Deuxième Partie

Armijo, R., Deschamps A. Poirier J.P., Carte sismotectonique de l'Europe et du Bassin Méditerranéen au 1:5.000.000, Institut physique du Globe de Paris, 1985.

Assamer, D., Telmat, H., Horizental crustal deformation in the Ech- Chelif seismogen Area by geodetic data, Eng.Thesis, U.S.T.H.B., Alger, 1989.

Ben Ayed, N., Evolution tectonique de l'avant-pays de la chaine Alpine de Tunisie du début du Mésozoique à l'actuel.Thèse Doct. Etat, sc Nat, univ, Paris Sud, centre d'Orsay, 1986.

Bounif, A., Haessler H. et Meghraoui M., The Constantine earthquake of October 27, 1985:surface ruptures and after shock study, Earth and Planet. sc. lett., 85, 451 460, 1987.

Bousquet, J.C. et Montenat C., Présence de décrochements Nord-Est. Sud-Ouest plioquaternaires dans les cordillères bétiques orientales (Espagne). Extension et signification générale. C.R. ac.sc., Paris. t.278.D.p. 2617-2620 1974.

Bousquet, J.C. et Philip H., Observations microtectoniques sur la compression Nord-Sud quaternaire des cordillères bétiques orientales (Espagne Méridionale, Arc de Gibraltar). Bull.soc.Géol.fr., (7), XVIII. p . 711-724, 1974.

Bousquet, J.C.et Philip H., Neotectonics of the calabriant Arc Apennines (Italy): an example of plio-quaternary evolution from island arcs to collisional stage. In: The origin of Arc. Ed. C. F. Wesel, Elseiver, 305-326, 1987.

Catula, J.L., Dalda A. y Almazan. J.L, Apllication al Estrecho de Gibraltar. Madrid, 8-10 Marzo 1989.

Chase, C. G. Plate Kinematics: The Americas, East Africa, and the rest of the world. Earth planet. sci. lett., 37, 355-368, 1978.

Groupe de recherche néotectonique de l'Arc de Gibraltar, L'histoire récente (tortonien à quaternaire) de l'Arc de Gibraltar et ses bordures de la mer d'Alboran. Bull. soc. Géol, Fr., 3, 575-614, 1977.

Hatzfeld, D., Etude sismotectonique de la zone de collision Ibero-Maghrébine. Thèse Doct ès sc physique, Univ. Sc et Médicale de Grenoble 1978.

Hfaeidh, M., Ben Ayed N. et Dorel J., Etude néotectonique et sédimentologique de la Tunisie Nord Orientale. Note de service Géologique de Tunis n° 51, 1985.

Karnik, V.,- Seismicity of the European area. Dordrecht, HollanD.Reidel Publ. Co., 2 vol., 218 p. et 364 p., 1971.

Mckenzie, D.P, Active tectonics of the Méditerranean region. Geophys. J. R. Astr. Soc., 30, p. 109-185, 1972.

Meghraoui, M., Etude néotectonique de la région Nord-Est d'El Asnam: relation avec le séisme du 10 Octobre 1980, Thèse de 3e cycle, univ. Paris-Sud, centre d'Orsay, France, 1982.

Meghraoui, M., Géologie des zones sismiques du Nord de l'Algérie: paléosismologie, Tectonique Active et synthèse sismotectonique. Thèse Doct. Etat. Univ. Paris-Sud, Centre d'Orsay, France. relation avec le séisme du 10 Octobre 1980, Thèse de 3e cycle, univ. Paris-Sud, centre d'Orsay, France, 1988.

Minster, J.B et Jordan T.H., Present-day platemotions.- J. Geophys. Res., 83, p 5331, 1978, 1972.

Morel, J.L; Zouine et Mostafa, Evolution néotectonique des bordures des bassins de la Haute-Mouloyya (Maroc). Colloque de Geologie Franco-Marocain, 1989.

Morel, J.L, Evolution récente de l'orogenèse Rifain et de son avant pays depuis la fin de la mise en place des nappes. Mem Géodiffusion, 4, 584 p, 226 fig, 5pl. H. t., Paris, 1988.

Orthib, L, J.C Ruegg J Angelier, B.Colletta, M.Kasser and P.Lesage, Geodetic and tectonic analyses Along an active plate boundary : The central Gulf of California, Tectonics, vol. 8, n° 3, pages 429-411, June 1989.

Ouyed, M., Meghraoui M., Cisternas A., Deschamps A., Dorel j., Frechet J., Gaulon R., Hatzfeld D. and Philip H., 1981.- Seismotectonics of the El Asnam earthquake. Nature vol. 292. 1981.

Philip, H., Meghraoui M., La tectonique actuelle et récente dans le domaine méditerranéen et ses bordures, ses relations avec la sismicité. Thèse Doct. Etat, Montpellier, France, 1983.

Philip, H., Meghraoui M., Structural analysis and interpretation of surface deformations of the El Asnam earthquake of October 10, 1980, Tectonics, 2, 17-49, 1983.

Rinscetti, M., Shick R. Earthquake and tectonics in southern Italy. Bol. Geol. Teor. apll. XVII, 65, P. 59-78, 1975.

Ruegg, J.C, Géodésie G.P.S et terrestre à Djibouti en 1987; Opération INSU 1987-Rapport scientifique.

Ruegg, J.C.; Kasser M.; Tarontola A.; Lepine J.C. and Choukrat B., Deformations associated with the El Asnam of 10 October 1980; Geodetic determination of vertical and horizental movements. Bull. Seismol. Soc. Americ., Vol 72, N°6, p.2227-2244, 1982.

Suhadolc, P., Fault plane solutions and seismity around the E.G.T southern segment. Journal of EGT. p. 371-386, 1989.

ANNEXES

(A, B, C, D, E)

ANNEXE A

PASSAGE EN FORMAT MODEST

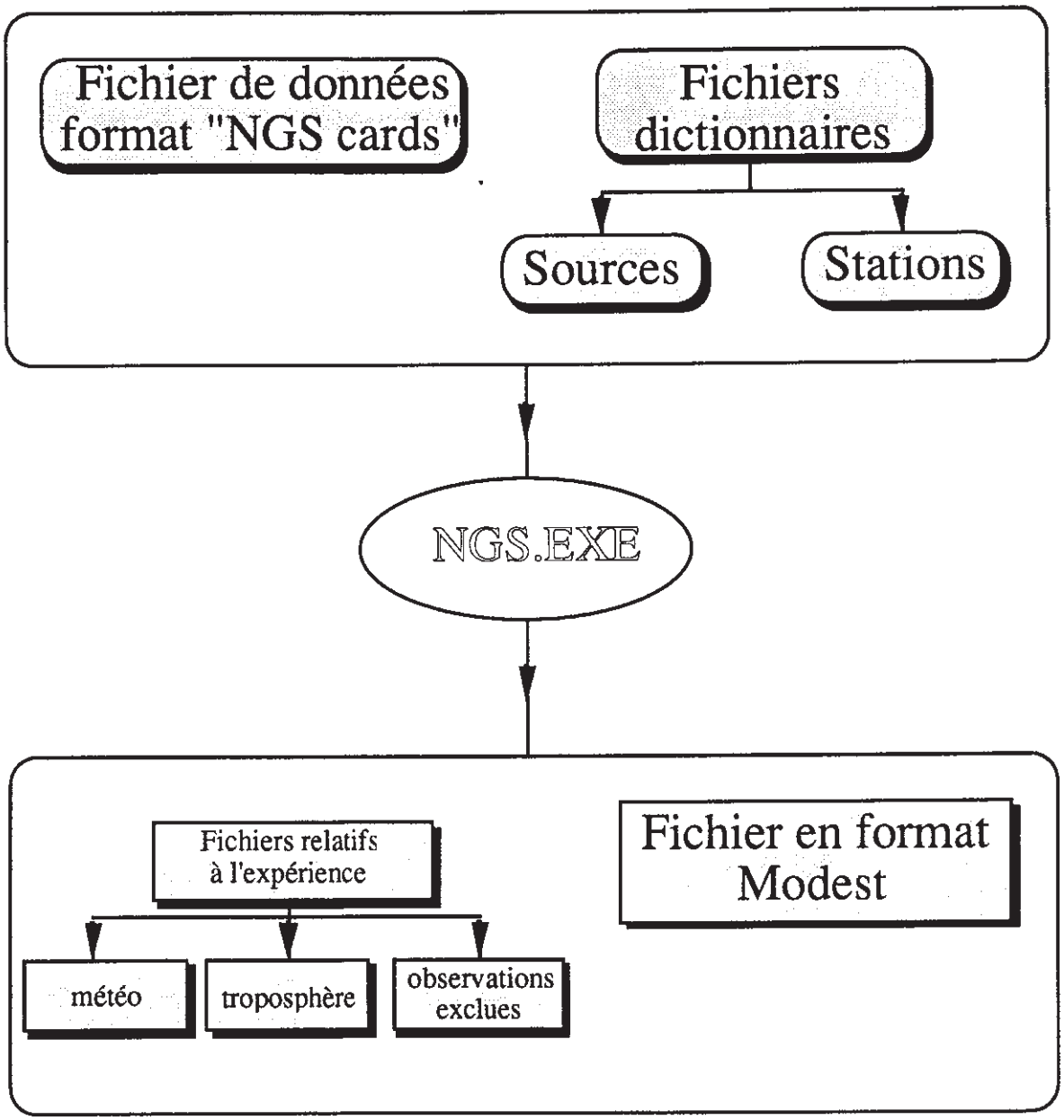


Figure I.a : Organigramme du passage en format modest

Nous avons choisi le fichier de données 89AUG19X.DAT comme exemple type qui servira pour toutes les étapes du mode opératoire, décrites dans les annexes A, B, C, D et E.

LES ENTREES

1- Fichier des données: 89AUG19X.DAT

```
DATA IN NGS FORMAT FROM DATA BASE @89AUG19X* VERSION    8
WETTZELL    4075541.90600   931734.18900  4801629.39301 AZEL   0.00000
CARNUSTY    3526418.29200  -171422.07000  5294099.14400 AZEL   0.00000
$END
1741-038  17 43    58.855851 - 3 50     4.610000
3C454.3   22 53    57.747861  16  8    53.565501
1803+784  18  0    45.683641  78 28     4.020605
NRAO150    3 59    29.747330  50 57    50.163003
2234+282  22 36    22.471001  28 28    57.420002
3C345     16 42    58.809671  39 48    36.995703
2121+053  21 23    44.517271   5 35    22.097100
0234+285   2 37    52.405700  28 48     8.991602
0106+013   1  8    38.771040   1 35      .323200
0552+398   5 55    30.805640  39 48    49.165402
0528+134   5 30    56.416650  13 31    55.148401
0420-014   4 23    15.800590 - 1 20    33.062700
4C39.25    9 27     3.013751  39  2    20.850502
0742+103   7 45    33.059570  10 11    12.689101
$END
                                GR PH

WETTZELL  CARNUSTY  1741-038 1989  8 19 20  8   4.0000000000              0   101
    1656379.31075111     .06137  -276972.6308599757     .15242 0       I    0   102
    .00041   0.00000   0.00000   0.00000   3.555263063503845         0.    0   103
      0.00  0.0      0.00  0.0      0.00  0.0      0.00  0.0               0   104
   -.01383    .02690   0.00000   0.00000   0.00000   0.00000               0   105
    18.005    17.860   950.400  1005.766    68.436    84.795 0 0           0   106
       -2.0951186307    .02212        -.0159876859    .00440  0            0   108
WETTZELL  CARNUSTY  3C454.3  1989  8 19 20 14  46.0000000000              0   201
    3455158.98109926     .04333    40016.4493381816     .15233 0       I    0   202
    .00178   0.00000   0.00000   0.00000   4.645739645543235         0.    0   203
      0.00  0.0      0.00  0.0      0.00  0.0      0.00  0.0               0   204
   -.01483    .01493   0.00000   0.00000   0.00000   0.00000               0   205
    17.903    17.835   950.396  1005.772    69.332    85.554 0 0           0   206
       -2.0359163173    .00539        -.0299725590    .00243  0            0   208

                                !
                                !
                                !

WETTZELL  CARNUSTY  NRAO150  1989  8 20  6 46  56.0000000000              0  7701
    -569457.94005229     .05693  -181736.5153427772     .15237 0       I    0  7702
    .00047   0.00000   0.00000   0.00000  -2.689110931661846         0.    0  7703
      0.00  0.0      0.00  0.0      0.00  0.0      0.00  0.0               0  7704
    .03992    .00331   0.00000   0.00000   0.00000   0.00000               0  7705
    15.496    17.737   949.135  1004.535    86.637    83.834 0 0           0  7706
       -2.4236948229    .01504         .0152071620    .00226  0            0  7708
WETTZELL  CARNUSTY  0106+013 1989  8 20  6 54  24.0000000000              0  7801
   -2017182.96129797     .07571  -262834.9336092350     .15258 0       I    0  7802
    .00029   0.00000   0.00000   0.00000  -5.754610681231260         0.    0  7803
      0.00  0.0      0.00  0.0      0.00  0.0      0.00  0.0               0  7804
    .03492   -.00358   0.00000   0.00000   0.00000   0.00000               0  7805
    15.613    17.746   949.141  1004.526    86.187    83.929 0 0           0  7806
       -2.6847305708    .01721         .0546337267    .00291  0            0  7808
```

2- Les fichiers dictionnaires

2.1- Les sources : SRCDICT.DAT

JGW	JGW, no bl	Others				
GC 0003+38	GC0003+38	0003+38	3+38			
NRAO 5	NRAO5					
P 0005-239	P0005-239	0005-239	5-239	P 0005-2		
III ZW 2	IIIZW2					
GC 0007+17	GC0007+17	0007+17	7+17	0007+171	7+171	
P 0008-42	P0008-42	0008-42	8-42	P 0008-4		
P 0008-264	P0008-264	P 0008-2	P0008-2	0008-264	8-264	
P 0011-046	P0011-046	0011-046	11-046	P 0011-0		
P 0013-00	P0013-00	0013-00	0013-005	13-005	P 0013-0	
0014+813	14+813					
0016+731	16+731					
P 0019-00	P0019-00	4C+00.02	0019-00	19-00	P 0019-0	
GC 0019+05	GC0019+05	0019+05	19+05			
P 0019+058	P0019+058	0019+058	19+058	P 0019+0		
OB 337.7	OB337.7					
		!				
		!				
		!				
DW 0224+67	DW0224+67	4C 67.05	4C67.05	DW 0224+	DW0224+	0224+671
DW 0224+6	DW0224+6	224+671				
P 0229+13	P0229+13	0229+131	229+131	P 0229+1		
O 30-790	230-790					
P 0234-301	P0234-301	0234-301	234-301	P 0234-3		
CTD 20	CTD20	P 0234+285	P0234+285	0234+285	234+285	
P 0235+091	P0235+091	OD 160	OD160	0235+091	235+091	P 0235+0
GC 0235+16	GC0235+16	GC 0235+	GC0235+	0235+164	235+164	
P 0237-027	P0237-027	PHL 8462	PHL8462	0237-027	237-027	P 0237-0
GC 0237+04	GC0237+04	0237+04	0237+040	237+040		
P 0237-23	P0237-23	P 0237-2	P0237-2	0237-233	237-233	
MAFFEI 2	MAFFEI2					
P 0238-084	P0238-084	NGC 1052	NGC1052	0238-084	238-084	P 0238-0
OD 166	OD166	0239+108	239+108			
3C 71	3C71					
P 0240-217	P0240-217	0240-217	240-217	P 0240-2		

2.2- Les stations: STNDICT.DAT

WESTFORD	NOAM WESTFORD	WESTF
RICHMOND	NOAM RICHMOND	RICHM
MOJAVE12	NOAM MOJAVE12	MOJAV
WETTZELL	EURA WETTZELL	WETTZ
ONSALA60	EURA ONSALA60	ONSAL
NOTOP	EURA NOTOP	NOTOP
GRASSE	EURA GRASSE	GRASS
BREST	EURA BREST	BREST
TROMSONO	EURA TROMSONO	TROMS
METSHOVI	EURA METSHOVI	METSH
HOHENFRG	EURA HOHENFRG	HOHEN
CARNUSTY	EURA CARNUSTY	CARNU

LES SORTIES

1- Fichier des données météo: 89AUG19.MET

```
C     Surface meteorological data from NGS card images.
C     Pressure and temperature averaged over observing session.
 FORMAT(4A4)
 FORMAT(3I2,I3,I2,F5.1,F8.2,F7.2,10F4.0)
WETTZELL    EURA
89 819 0000  0.0  949.40 288.25
89 820 2359 59.9  949.40 288.25
CARNUSTY    EURA
89 819 0000  0.0 1005.24 290.95
89 820 2359 59.9 1005.24 290.95
```

2- Fichier des allongements troposphériques: 89AUG19.TRP

```
C     Zenith trop. delay from averaged meteo data from
C     NGS card image using the Sastamoinen model
 FORMAT(4A4)
 FORMAT(3I2,I3,I2,F5.1,F8.4,F7.4,6F4.0)
WETTZELL    EURA
89 819 0000  0.0  2.1614 0.1527
89 820 2359 59.9  2.1614 0.1527
CARNUSTY    EURA
89 819 0000  0.0  2.2866 0.1767
89 820 2359 59.9  2.2866 0.1767
```

3- Fichier des scans : 89AUG19.EXC

```
WETTZ-CARNU:890819R010-1P003
WETTZ-CARNU:890819R010-1P006
WETTZ-CARNU:890819R024-1P003
WETTZ-CARNU:890819R024-1P006
WETTZ-CARNU:890820R045-1P003
WETTZ-CARNU:890820R045-1P006
WETTZ-CARNU:890820R064-1P003
WETTZ-CARNU:890820R064-1P006
WETTZ-CARNU:890820R068-1P006
```

4- Extrait résumé du fichier 89AUG19X.FIT: 89AUG19X.PRT

File 89AUG19.FIT

RUN	OBSERVATION	TIME	SOURCE
1	WETTZ-CARNU:890819R001-1	20: 8: 4.0	P 1741-038
2	WETTZ-CARNU:890819R002-1	20:14:46.0	3C 454.3
3	WETTZ-CARNU:890819R003-1	20:21:36.0	1803+784
4	WETTZ-CARNU:890819R004-1	20:30:36.0	NRAO 150
5	WETTZ-CARNU:890819R005-1	20:39: 4.0	GC 2234+28
6	WETTZ-CARNU:890819R006-1	20:47:16.0	3C 345
7	WETTZ-CARNU:890819R007-1	20:55:44.0	OX 036
8	WETTZ-CARNU:890819R008-1	21: 1:26.0	3C 454.3
9	WETTZ-CARNU:890819R009-1	21: 8:16.0	P 1741-038
10	WETTZ-CARNU:890819R010-1	21:17:16.0	CTD 20
11	WETTZ-CARNU:890819R011-1	21:25:44.0	1803+784
12	WETTZ-CARNU:890819R012-1	21:33: 4.0	NRAO 150
13	WETTZ-CARNU:890819R013-1	21:41:36.0	3C 345

```
14  WETTZ-CARNU:890819R014-1   21:49:44.0  GC 2234+28
15  WETTZ-CARNU:890819R015-1   21:58:16.0  OX 036
16  WETTZ-CARNU:890819R016-1   22: 3:58.0  3C 454.3
17  WETTZ-CARNU:890819R017-1   22:10:44.0  CTD 20
18  WETTZ-CARNU:890819R018-1   22:36:44.0  P 1741-038
19  WETTZ-CARNU:890819R019-1   22:45:16.0  1803+784
20  WETTZ-CARNU:890819R020-1   22:53:24.0  P 0106+01
21  WETTZ-CARNU:890819R021-1   23: 1:56.0  DA 193
22  WETTZ-CARNU:890819R022-1   23: 9:16.0  NRAO 150
23  WETTZ-CARNU:890819R023-1   23:17:44.0  3C 345
24  WETTZ-CARNU:890819R024-1   23:25:56.0  GC 2234+28
25  WETTZ-CARNU:890819R025-1   23:34:24.0  P 0106+01
26  WETTZ-CARNU:890819R026-1   23:41:44.0  DA 193
27  WETTZ-CARNU:890819R027-1   23:48:38.0  3C 454.3
28  WETTZ-CARNU:890819R028-1   23:55:56.0  P 1741-038
29  WETTZ-CARNU:890820R029-1    0: 4:24.0  OX 036
30  WETTZ-CARNU:890820R030-1    0:12:44.0  CTD 20
31  WETTZ-CARNU:890820R031-1    0:21:16.0  1803+784
32  WETTZ-CARNU:890820R032-1    0:28:36.0  NRAO 150
33  WETTZ-CARNU:890820R033-1    0:37: 4.0  3C 345
34  WETTZ-CARNU:890820R034-1    0:45:24.0  GC 2234+28
                        !
                        !
54  WETTZ-CARNU:890820R054-1    3:24:16.0  NRAO 150
55  WETTZ-CARNU:890820R055-1    3:32:44.0  GC 2234+28
56  WETTZ-CARNU:890820R056-1    3:40:56.0  P 0528+134
57  WETTZ-CARNU:890820R057-1    3:49:24.0  DA 193
58  WETTZ-CARNU:890820R058-1    3:57:44.0  P 0106+01
59  WETTZ-CARNU:890820R059-1    4: 6:24.0  P 0420-01
60  WETTZ-CARNU:890820R060-1    4:14:44.0  OX 036
61  WETTZ-CARNU:890820R061-1    4:21:38.0  3C 454.3
62  WETTZ-CARNU:890820R062-1    4:28:56.0  DW 0742+10
63  WETTZ-CARNU:890820R063-1    4:37:24.0  4C 39.25
64  WETTZ-CARNU:890820R064-1    4:45: 4.0  CTD 20
                        !
                        !
74  WETTZ-CARNU:890820R074-1    6:24:16.0  1803+784
75  WETTZ-CARNU:890820R075-1    6:31: 6.0  3C 454.3
76  WETTZ-CARNU:890820R076-1    6:38:24.0  P 0528+134
77  WETTZ-CARNU:890820R077-1    6:46:56.0  NRAO 150
78  WETTZ-CARNU:890820R078-1    6:54:24.0  P 0106+01
```

ANNEXE B

MODEST/O-C

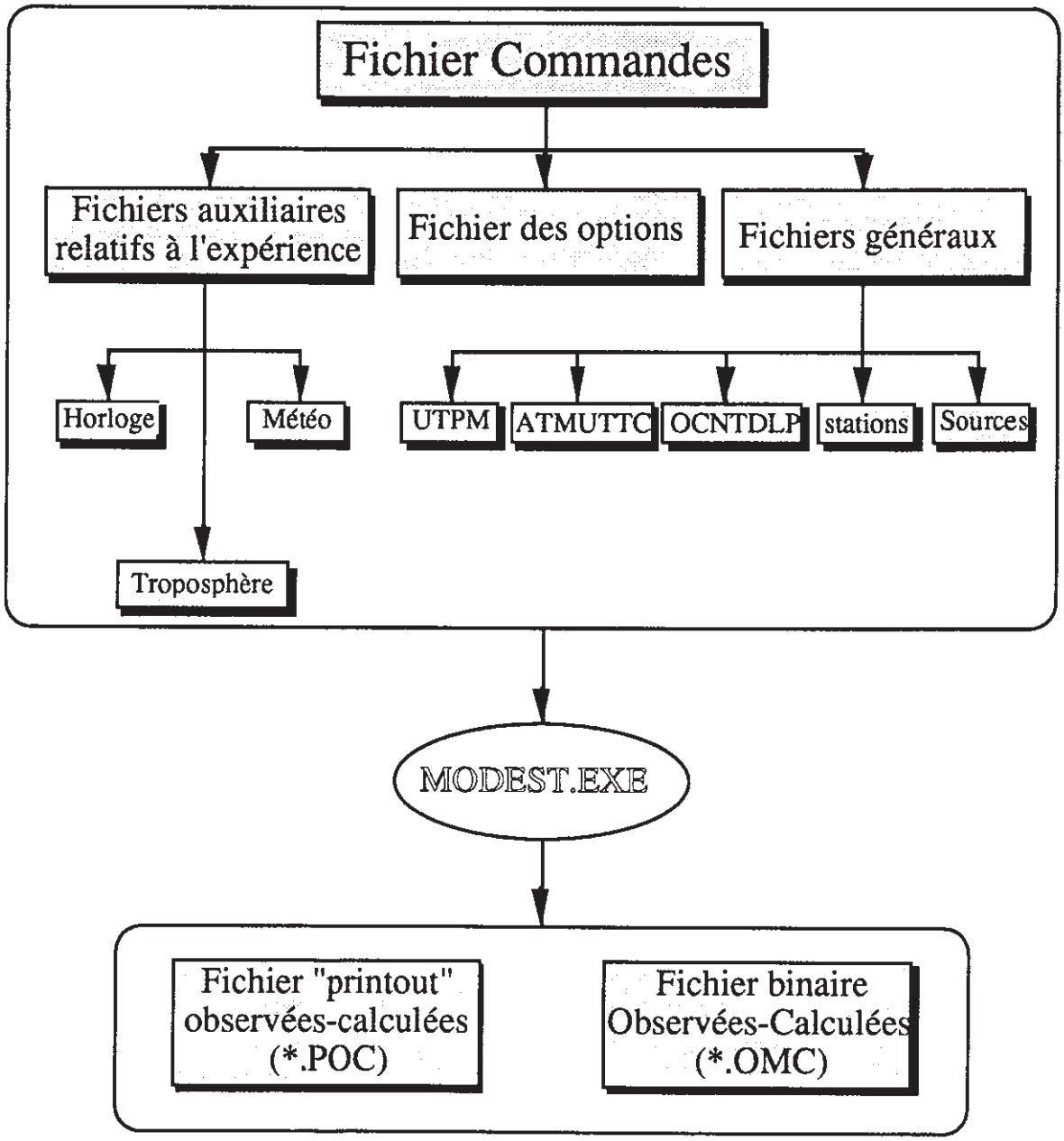


Figure I.b : Organigramme de l'étape du calcul des Observées - Calculées

FICHIER COMMANDE: VLBIM89.COC

```
$IF P1.EQS."" THEN INQUIRE P1 "RUN ID"
$IF P2.EQS."" THEN INQUIRE P2 "N POUR NGS, I POUR IERS"
$ASSIGN DUA2:<REBAI.TRAITEMENT.OMC90>   OMC90
$ASSIGN DUA2:<REBAI.DATA>               DATA
$ASSIGN OMC90:'P1'.IOC     CARDS ! Card image input
$ASSIGN OMC90:'P1'.POC     PRINT ! Printout
$ASSIGN OMC90:'P1'.OMC     OMC !   output
$ASSIGN DATA:EPH78MM.DA    EPHEM ! Ephemeris
$ASSIGN DATA:'P1'.CLK      CLKTIM ! Clocks
$ASSIGN DATA:NOION.DAT     IONFIL ! Ionosphere
$ASSIGN DATA:'P1'.TRP      TRPFIL ! Troposphere
$ASSIGN DATA:'P1'.MET      SURFM ! Elements meteo
$ASSIGN DATA:'P1'.FIT      CALIBIN ! FIT output
$ASSIGN DATA:VLBIM89'P2'.CAT      SORCAT ! Source catalog
$ASSIGN DATA:VLBIM89'P2'.STA      STALOC ! Station locations
$ASSIGN DATA:OCNTDLP.DAT          OCNTID ! Ocean loading
$ASSIGN DATA:ATMUTC.DAT           ATMUTC ! UTC
$ASSIGN DATA:VLBIM89.UTPM        POLE   ! Polar motion (IRIS)
$ASSIGN DATA:LOCUTC.DAT           LOCUTC ! UTC
$ASSIGN NL:                       ARCHSUM ! Archive summary
$RUN/NODEB DUA2:[REBAI.MASTERFIT.MODEST]MODEST.EXE
$EXIT
```

ENTREES

1- FICHIER DES OPTIONS: 89AUG19.IOC

```
COMMAND FILE*************************************************************
DUA2:<REBAI.TRAITEMENT.OMC90>VLBIM89.COC
MASTERFIT STEP SELECTION FLAGS  ****************************************
Modeling: O-C              Yes
Estimate parameters         No
Plot residuals              No
Output final parameters     No

ARCHIVE HEADER  ********************************************************
  DONNEES VLBI MOBILE 19/08/89

*******************************************************************************
MODEL SPECIFICATIONS-------------------------------------------------------------
  FORMAT(A12,3XA20,4XA8)
C            ----------------------------------------------------------------
C   MODEL    | CATEGORY              |  USE     |  CHOICES (default first)      |
C            ----------------------------------------------------------------
GENERAL      | Input debug level     !  0       !  0              1            !
             | Partial precision     |  Double  |  Double         Single       |
             | Print O-Cs            |  Yes     |  Yes            No           |
             | Troposphere sigmas    |  No      |  No             Yes          |
             | Ionosphere sigmas     |  No      |  No             Yes          |
             | Linear combinations   |  No      |  No             Yes          |
             | Write formatted file  |  No      |  No             Yes          |
             | O-C debug level       |  0       |  0              1            |
CLOCKS       | Polynomial            |  L       |  Q(Quadratic)   L(Linear)    |
             | Debug level           |  0       |  0      1       2            |
TROPOSPHERE  | Mapping function      |  Lanyi   |  Lanyi          Davis        |
             |                       |          |  Chao                        |
             | Surface temperatures  |  Yes     |  No             Yes          |
             | Wet partials          |  No      |  No             Yes          |
             | Rate partials         |  Yes     |  No             Yes          |
             | Map partials          |  No      |  No             Yes          |
             | Debug level           |  1       |  0      1       2            |
EARTH ORIENT | Precession            |  IAU     |  IAU            Unity        |
             | Precession partials   |  No      |  No             Yes          |
             | Tweak partials        |  No      |  No             Yes          |
```

```
              | Nutation              |  IAU     |  IAU            Herrng86      |
              |                       |          |  Woolard        Unity         |
              |                       |          |  Zhu1           Zhu2
              | Nut. angle partials   |  No      |  No             Yes           |
              | Nut. ampl. partials   |  No      |  No             50(number)    |
                Nut. from UTPM file     Yes        No              Yes
              | Debug level           |  0       |  0      1       2       3     |
IONOSPHERE    | TEC partials          |  No      |  No             Yes           |
              | Efron factor          |  No      |  No             Yes           |
              | Debug level           |  0       |  0      1       2             |
STATIONS      | Maximum number        |  15      |  15             (number)      |
              | Coordinate system     |  Cart    |  Cyl(indrical)  Cart(esian)   |
              | Rate partials         |  No      |  No             Yes           |
              | Gamma partials        |  No      |  No             Yes           |
              | A priori gamma        |  1.0D0   |  1.0D0          (value)       |
              | Reference time        |  850101  |  850101         yymmdd(date)  |
              | Plate motion model    |  None    |  None           AM0-2         |
              |                       |          |  AM1-2                        |
              | Solid Earth tides     |  Yes     |  Yes            No            |
              | Vertical Love #       |  0.609D0 |  0.609D0        (universal)   |
              | Horizontal Love #     |  8.52D-2 |  8.52D-2        (universal)   |
              | Tide phase            |  0.0D0   |  0.0D0          (degrees)     |
              | Ocean loading         |  No      |  Yes            No            |
              | Pole tide             |  Yes     |  Yes            No            |
              | K1 correction         |  Yes     |  Yes            No            |
              | Atmosphere loading    |  No      |  No             Yes           |
              | Ant. offset bending   |  Yes     |  Yes            No            |
              | Antenna trop. corr.   |  No      |  No             Yes           |
              | Polarization (phase)  |  None    |  None           RCP           |
              |                       |          |  LCP                          |
              | Hellings PPN scaling  |  No      |  No             Yes           |
              | Debug level           |  0       |  0      1       2             |
SOURCES       | Maximum number        |  500     |  500            (number)      |
              | Debug level           |  0       |  0      1       2             |
C             ------------------------------------------------------------------
STATION ALIAS INFORMATION   ******************************************
  FORMAT(1X4A4,1X4A4,3F9.3,1XA4)
  FORMAT(I5,2I3,F4.1,I5,2I3,F4.1)
LAST
LAST
SOLID EARTH TIDE LOVE NUMBERS   ****************************************
  FORMAT(4A4,4X3F20.0)
EARTH ORIENTATION TWEAK APRIORIS****************************************
  FORMAT(A4,6X4F10.0)
X
Y
Z
PRECESSION A PRIORIS***************************************************
  FORMAT(2D10.2)

NUTATION PARAMETERS ****************************************************
  FORMAT(6A4,2D10.3)
NUTATION AMPLTD PSIA       0.000D0   0.000D0
NUTATION AMPLTD EPSA       0.000D0   0.000D0

OBSERVATION SELECTION LIST  ********************************************
  FORMAT(2I4,6(1XA3))
   1 200 D   DR  S-X
  -1  -1
STATION ALIAS NAMES TO BE APPLIED ON INPUT BY BASELINE  ****************
  FORMAT(16A4)
  FORMAT(I5,2I3,F6.2,I5,2I3,F6.2)
LAST
```

2- LES FICHIERS AUXILLIAIRES

Les fichiers **89AUG19.MET** et **89AUG19.TRP** sont présentés en ANNEXE A

- 89AUG19.CLK

```
C       according to the format statement, each entry consists of 3 lines
c       the first line contains the STATION NAME (up to 16 characters)
c       which may be omitted if all stations have the same clock
c       attributes during the experiment
c
c       the second line contains 2 of these:
C     Start, stop time (year, month, day, hr, min, sec) for
C     interval over which associated clock parameters hold (usually 1 expt.)
C
c     The third line contains the various clock parameters' apriori offsets
c       there are 6 more numbers which allow adjustment of all the
c       clock parameters individually
c     1=C EPOCH [s];      2=C RATE  [s/day];      3=DCRAT/DT[s/day/day];
c     4=F OFFSET[s/day?]; 5=F DRIFT [s/day/day?]; 6=ref. time [Julian date]
c       (the order of 4 and 5 may be reversed, I'm not sure)
C     Example format masks
c   <--><--><-->
c   -><-><-><-><--->XX<-><-><-><-><-><---><----------><---------->
  FORMAT(4A4)
  FORMAT(5I3,F5.0,2X,5I3,F5.0,6D12.0)
WETTZELL    EURA
 89 08 19 00 00 00.0    89 08 20 23 59 59.9    0.000D-06    0.000D-06
CARNUSTY    EURA
 89 08 19 00 00 00.0    89 08 20 23 59 59.9    0.000D-06    0.000D-06
```

3- LES FICHIERS GENERAUX RELATIFS A L'EXPERIENCE

- VLBIM89I.STA

```
C               LES COORDONNEES DES STATIONS
C
C                CAMPAGNE VLBI.MOBILE 1989
C
C   $$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$
C
C     LES MEUILLEURS COORDONNEES APPROCHEES EN ITRF90
C     " STATION COORDINATES IN ITRF90 EPOCH (01/07/1989 MJD 47708)
C      GRASSE D'APRES PREMIERE ANALYSE VLBI MOBILE
C     "DSN ANTENNAES FROM SSC (JPL) 83R05 ?"
  FORMAT(4A4,3F15.0,A4,F11.0)
TROMSONO    EURA  2102.90421100    721.60245800  5958.2012540 AZEL    0.00000
BREST       EURA  4228.87721100   -333.10429100  4747.1808920 AZEL    0.00000
RICHMOND    NOAM   961.25815000 -5674.09003500  2740.5337570 EQUR    5.17900
WETTZELL    EURA  4075.54004100    931.73516300  4801.6292800 AZEL    0.00000
ONSALA60    EURA  3370.60616200    711.91740800  5349.8306360 AZEL    0.00000
METSHOVI    EURA  2890.65287300   1310.29523600  5513.9586040 AZEL    0.00000
MOJAVE12    NOAM -2356.17092600 -4646.75589400  3668.4706020 X-YN    0.00000
WESTFORD    NOAM  1492.20674100 -4458.13049500  4296.0154950 AZEL    0.31800
GRASSE      EURA  4581.69778200    556.12565500  4389.3513120 AZEL    0.00000
NOTOP       EURA  4934.56329500   1321.20116700  3806.4843410 AZEL    1.83000
HOHENFRG    EURA  3778.21499600    698.64468100  5074.0535100 AZEL    0.00000
CARNUSTY    EURA  3526.41649400   -171.42120200  5294.0987670 AZEL    0.00000
```

- VLBIM89I.CAT

```
SOURCE POSITIONS AS OF   8/ 9/89  10:37:25             BARY
 FORMAT(1X3A4,1X2I3,F12.8,1XA1,2I3,F11.7,F12.8,F11.7,F8.4,F8.2)
P 0008-264      0 11  1.24699355 - 26 12 33.3773551  0.00010644  0.0015781 -0.6898 1984.09
P 0013-00       0 16 11.08790923 -  0 15 12.2872724  0.00783962  2.2590075 -0.9998 1988.60
P 0019+058      0 22 32.44118862    6  8  4.2720531  0.00003601  0.0012603 -0.3775 1984.53
P 0048-09       0 50 41.31734533 -  9 29  5.2057755  0.00005632  0.0014180 -0.4892 1987.95
```

```
                                  !
                                  !

P 2320-035     23 23 31.95371778 -  3 17  5.0207566  0.00003543  0.0007714 -0.4440 1984.96
P 2335-027     23 37 57.33860332 -  2 30 57.5087913  0.00025623  0.0663971 -0.9606 1988.98
P 2345-16      23 48  2.60855413 - 16 31 12.0199908  0.00005820  0.0011185 -0.5467 1985.02
2351-154       23 54 30.19529932 - 15 13 11.2108776  0.00011260  0.0184788 -0.6724 1988.92
P 2355-106     23 58 10.88243721 - 10 20  8.6096896  0.00004540  0.0010260 -0.4868 1987.49
```

- OCNTDLP.DAT

```
C    Ocean tidal loading displacements : amplitudes and Greenwich
C    phase lags for six components of the Schwiderski model -
C          M2, S2, K1, O1, N2 and P1.
C    Amplitudes are in centimeters, phases in degrees.  The order
C    corresponds to that in Pagiatakis' software : radial (out),
C    N-S (N), E-W (W) displacements and phases for the six com-
C    ponents in the order listed above.
C
C    The numbers in this file are derived from the Pagiatakis-
C    Langley software for DSN, and from the improved Pagiatakis
C    software, June 1988, for IRIS. Onsala and Mojave are fake
C
C NR  les valeurs sont calculées à partir du logiciel de O.Francis
C        TOULOUSE (GRGS)
C
  FORMAT(I3)

  FORMAT(1X4A4,3F5.2,F7.1,2F6.1,2XA4/(F22.2,2F5.2,F7.1,2F6.1,2XA4))
 WESTFORD     NOAM 1.05 0.00 0.00 -172.8   0.0   0.0  M2
                   0.28 0.00 0.00 -149.1   0.0   0.0  S2
                   0.40 0.00 0.00   -5.5   0.0   0.0  K1
                   0.27 0.00 0.00   -3.2   0.0   0.0  O1
                   0.22 0.00 0.00  168.8   0.0   0.0  N2
                   0.13 0.00 0.00   -5.4   0.0   0.0  P1
 RICHMOND     NOAM 0.82 0.00 0.00  163.9   0.0   0.0  M2
                   0.23 0.00 0.00 -164.1   0.0   0.0  S2
                   0.17 0.00 0.00   15.2   0.0   0.0  K1
                   0.13 0.00 0.00   29.2   0.0   0.0  O1
                   0.13 0.00 0.00  138.5   0.0   0.0  N2
                   0.05 0.00 0.00    9.5   0.0   0.0  P1
 WETTZELL     EURA 0.51 0.00 0.00  -67.4   0.0   0.0  M2
                   0.15 0.00 0.00  -36.0   0.0   0.0  S2
                   0.18 0.00 0.00  -59.1   0.0   0.0  K1
                   0.07 0.00 0.00 -100.6   0.0   0.0  O1
                   0.10 0.00 0.00  -86.7   0.0   0.0  N2
                   0.06 0.00 0.00  -60.0   0.0   0.0  P1
 ONSALA60     EURA 0.37 0.00 0.00  -65.8   0.0   0.0  M2
                   0.10 0.00 0.00  -27.9   0.0   0.0  S2
                   0.22 0.00 0.00  -51.6   0.0   0.0  K1
                   0.11 0.00 0.00 -104.7   0.0   0.0  O1
                   0.07 0.00 0.00  -80.7   0.0   0.0  N2
                   0.07 0.00 0.00  -53.4   0.0   0.0  P1
 MOJAVE12     NOAM 0.18 0.00 0.00   -9.8   0.0   0.0  M2
                   0.15 0.00 0.00 -110.0   0.0   0.0  S2
                   0.95 0.00 0.00   43.6   0.0   0.0  K1
                   0.61 0.00 0.00   29.1   0.0   0.0  O1
                   0.11 0.00 0.00  -51.9   0.0   0.0  N2
                   0.30 0.00 0.00   42.7   0.0   0.0  P1
 HOHENFRG     EURA 0.47 0.00 0.00  -62.1   0.0   0.0  M2
                   0.14 0.00 0.00  -29.7   0.0   0.0  S2
                   0.21 0.00 0.00  -56.4   0.0   0.0  K1
                   0.09 0.00 0.00  -98.5   0.0   0.0  O1
                   0.10 0.00 0.00  -79.5   0.0   0.0  N2
                   0.07 0.00 0.00  -58.4   0.0   0.0  P1
 METSHOVI     EURA 0.24 0.00 0.00  -64.6   0.0   0.0  M2
                   0.06 0.00 0.00  -25.5   0.0   0.0  S2
                   0.17 0.00 0.00  -53.5   0.0   0.0  K1
```

```
                 0.10 0.00 0.00 -104.3   0.0    0.0  O1
                 0.05 0.00 0.00  -88.7   0.0    0.0  N2
                 0.06 0.00 0.00  -54.9   0.0    0.0  P1
NOTOP       EURA 0.48 0.00 0.00  -72.2   0.0    0.0  M2
                 0.14 0.00 0.00  -49.1   0.0    0.0  S2
                 0.10 0.00 0.00  -75.4   0.0    0.0  K1
                 0.03 0.00 0.00  -97.6   0.0    0.0  O1
                 0.10 0.00 0.00  -91.9   0.0    0.0  N2
                 0.03 0.00 0.00  -76.9   0.0    0.0  P1
GRASSE      EURA 0.70 0.00 0.00  -74.9   0.0    0.0  M2
                 0.22 0.00 0.00  -46.7   0.0    0.0  S2
                 0.18 0.00 0.00  -63.4   0.0    0.0  K1
                 0.05 0.00 0.00 -102.4   0.0    0.0  O1
                 0.14 0.00 0.00  -93.6   0.0    0.0  N2
                 0.06 0.00 0.00  -65.2   0.0    0.0  P1
BREST       EURA 4.20 0.00 0.00  -69.1   0.0    0.0  M2
                 1.37 0.00 0.00  -32.4   0.0    0.0  S2
                 0.30 0.00 0.00  -73.2   0.0    0.0  K1
                 0.15 0.00 0.00  170.6   0.0    0.0  O1
                 0.80 0.00 0.00  -87.8   0.0    0.0  N2
                 0.13 0.00 0.00  -76.7   0.0    0.0  P1
CARNUSTY    EURA 1.60 0.00 0.00  -86.8   0.0    0.0  M2
                 0.50 0.00 0.00  -40.0   0.0    0.0  S2
                 0.35 0.00 0.00  -33.3   0.0    0.0  K1
                 0.26 0.00 0.00 -117.1   0.0    0.0  O1
                 0.30 0.00 0.00  -99.2   0.0    0.0  N2
                 0.11 0.00 0.00  -33.5   0.0    0.0  P1
TROMSONO    EURA 0.85 0.00 0.00 -169.7   0.0    0.0  M2
                 0.30 0.00 0.00 -136.1   0.0    0.0  S2
                 0.23 0.00 0.00  -24.2   0.0    0.0  K1
                 0.17 0.00 0.00 -114.7   0.0    0.0  O1
                 0.17 0.00 0.00  156.1   0.0    0.0  N2
                 0.07 0.00 0.00  -32.0   0.0    0.0  P1
```

- ATMUTC.DAT

```
C     Leap seconds
 FORMAT(2F8.0,F6.0)
2441317 2441499    10
2441499 2441683    11
2441683 2442048    12
2442048 2442413    13
2442413 2442778    14
2442778 2443144    15
2443144 2443509    16
2443509 2443874    17
2443874 2444239    18
2444239 2444786    19
2444786 2445151    20
2445151 2445516    21
2445516 2446247    22
2446247 2447161    23
2447161 2447892    24
2447892 2448999    25
```

- VLBIM89I.UTPM

```
c       polar motion and UT1-UTC data (starting 1989) :
C    from Bulletin  (1989 ) - series (with nutation);
C       updates from subsequent bulletins.
c"""""""""""""""""""""""""""""""""""""""""""""""""""""""""""""""""""""""""""""""""""""
c    IERS 90C04 series (from NAJAT,91/4/4)
C""""""""""""""""""""""""""""""""""""""""""""""""""""""""""""""""""""""""""""""""""""""
C    The following two cards give format for and values of conversion
C    factors by which the values in this file should be divided to
C    give values in internal units (radians for pole, days for UT1).
```

```
C     A common factor applies to x, y polar motion; the second factor
C     is for UT1.  The third number is a flag for whether short-period
C     tidal terms are included in the UT1, pole values in this file
C     (0 = no, 1 = yes).
C
C     GP 31/05/91 Ces valeurs sont avec short period tidal terms. Flag = 1
C
  FORMAT(D23.16,D9.2,I2)
 2.0626486247096356D+09 8.64D+09 1
C      Format and values (tenths of marcsec for pole, hundredths of
C      msec for UT1)
  FORMAT(I3,2I2,I3,I2,2F6.0,F7.0,2F6.0)
 890601  0 0  1799  4356 -35129   -47   -36
 890602  0 0  1819  4340 -35313   -45   -37
 890603  0 0  1839  4324 -35457   -38   -36
 890604  0 0  1859  4308 -35570   -30   -37
 890605  0 0  1878  4292 -35663   -23   -36
 890606  0 0  1897  4275 -35753   -17   -35
 890607  0 0  1916  4259 -35851   -13   -33
 890608  0 0  1934  4241 -35963   -12   -31
 890609  0 0  1952  4223 -36093   -15   -30
 890610  0 0  1971  4204 -36237   -21   -28
 890611  0 0  1990  4184 -36390   -29   -27
 890612  0 0  2010  4163 -36546   -38   -28
 890613  0 0  2030  4142 -36698   -46   -29
 890614  0 0  2050  4120 -36839   -52   -31
 890615  0 0  2069  4096 -36966   -57   -33
 890616  0 0  2088  4072 -37075   -58   -35
 890617  0 0  2107  4048 -37165   -58   -38
 890618  0 0  2126  4023 -37234   -55   -37
 890619  0 0  2144  3998 -37291   -51   -36
 890620  0 0  2163  3973 -37346   -48   -34
 890621  0 0  2181  3947 -37410   -45   -31
 890622  0 0  2199  3920 -37492   -43   -29
 890623  0 0  2218  3894 -37602   -47   -27
 890624  0 0  2237  3867 -37739   -53   -27
 890625  0 0  2258  3840 -37896   -59   -27
 890626  0 0  2279  3814 -38060   -65   -28
 890627  0 0  2300  3787 -38219   -71   -28
 890628  0 0  2322  3761 -38353   -72   -30
 890629  0 0  2343  3733 -38458   -69   -32
 890630  0 0  2362  3705 -38531   -65   -33
 890701  0 0  2380  3676 -38577   -59   -34
 890702  0 0  2396  3647 -38607   -53   -35
 890703  0 0  2411  3618 -38633   -50   -32
 890704  0 0  2425  3589 -38668   -49   -30
 890705  0 0  2438  3560 -38719   -49   -26
 890706  0 0  2452  3530 -38790   -51   -22
 890707  0 0  2466  3501 -38881   -56   -20
 890708  0 0  2480  3471 -38986   -63   -20
 890709  0 0  2494  3443 -39102   -71   -20
 890710  0 0  2507  3414 -39219   -77   -20
 890711  0 0  2520  3386 -39331   -81   -20
 890712  0 0  2532  3359 -39433   -83   -22
 890713  0 0  2544  3331 -39525   -86   -22
 890714  0 0  2554  3304 -39605   -86   -22
 890715  0 0  2564  3276 -39674   -86   -22
 890716  0 0  2573  3248 -39737   -84   -21
 890717  0 0  2581  3219 -39798   -82   -20
 890718  0 0  2587  3190 -39865   -79   -19
 890719  0 0  2591  3161 -39951   -76   -19
 890720  0 0  2595  3132 -40065   -77   -19
 890721  0 0  2598  3103 -40208   -79   -18
 890722  0 0  2601  3074 -40376   -84   -18
 890723  0 0  2603  3044 -40558   -94   -20
 890724  0 0  2604  3013 -40736   -105  -22
 890725  0 0  2604  2980 -40898   -115  -25
 890726  0 0  2603  2945 -41032   -121  -27
```

890727	0	0	2602	2909	-41135	-124	-30
890728	0	0	2601	2874	-41210	-122	-31
890729	0	0	2599	2839	-41268	-116	-32
890730	0	0	2598	2805	-41318	-108	-31
890731	0	0	2598	2773	-41371	-100	-30
890801	0	0	2597	2743	-41437	-93	-27
890802	0	0	2596	2713	-41519	-90	-26
890803	0	0	2595	2684	-41619	-91	-24
890804	0	0	2595	2655	-41730	-96	-23
890805	0	0	2596	2625	-41848	-102	-23
890806	0	0	2596	2696	-41968	-109	-23
890807	0	0	2597	2566	-42083	-114	-23
890808	0	0	2598	2536	-42191	-118	-24
890809	0	0	2599	2506	-42286	-119	-26
890810	0	0	2600	2475	-42369	-119	-28
890811	0	0	2601	2445	-42440	-117	-29
890812	0	0	2601	2415	-42499	-111	-30
890813	0	0	2600	2385	-42557	-104	-31
890814	0	0	2598	2356	-42623	-98	-32
890815	0	0	2594	2326	-42707	-92	-31
890816	0	0	2589	2296	-42819	-90	-30
890817	0	0	2581	2265	-42962	-96	-29
890818	0	0	2572	2234	-43137	-104	-28
890819	0	0	2562	2201	-43333	-113	-27
890820	0	0	2552	2166	-43536	-124	-26
890821	0	0	2543	2131	-43729	-133	-26
890822	0	0	2534	2095	-43898	-138	-27
890823	0	0	2527	2060	-44031	-141	-27
890824	0	0	2522	2027	-44131	-142	-26
890825	0	0	2517	1996	-44210	-140	-27
890826	0	0	2512	1966	-44275	-136	-26
890827	0	0	2507	1938	-44342	-131	-26
890828	0	0	2499	1911	-44419	-125	-25
890829	0	0	2490	1885	-44509	-120	-24
890830	0	0	2479	1858	-44617	-118	-23
890831	0	0	2465	1831	-44743	-117	-22
890901	0	0	2450	1802	-44883	-120	-21
890902	0	0	2432	1771	-45030	-124	-22
890903	0	0	2413	1740	-45177	-130	-22
890904	0	0	2393	1708	-45314	-135	-23
890905	0	0	2371	1676	-45434	-139	-25
890906	0	0	2348	1645	-45534	-141	-28
890907	0	0	2325	1615	-45614	-141	-30
890908	0	0	2300	1586	-45683	-139	-32
890909	0	0	2275	1558	-45746	-136	-33
890910	0	0	2249	1532	-45812	-133	-32
890911	0	0	2224	1507	-45890	-129	-32
890912	0	0	2198	1483	-45988	-126	-30
890913	0	0	2173	1460	-46114	-124	-27
890914	0	0	2149	1437	-46276	-125	-25
890915	0	0	2126	1414	-46468	-127	-24
890916	0	0	2102	1391	-46683	-130	-25
890917	0	0	2079	1368	-46900	-134	-25
890918	0	0	2055	1345	-47100	-138	-27

- *SORTIES*

1- Fichier O-C: 89AUG19.POC

Ce fichier nous permet de vérifier que les 78 observations de l'expérience (Run 1 --> Run 78) sont retenues pour le calcul.

2- Fichier 89AUG19.OMC

Ce fichier est un fichier binaire dont on peut avoir un résumé à l'aide d'un programme utilitaire. Le consultation de ce fichier résumé au cours du traitement est pratiquement inutile.

ANNEXE C

MODEST/SOLVE

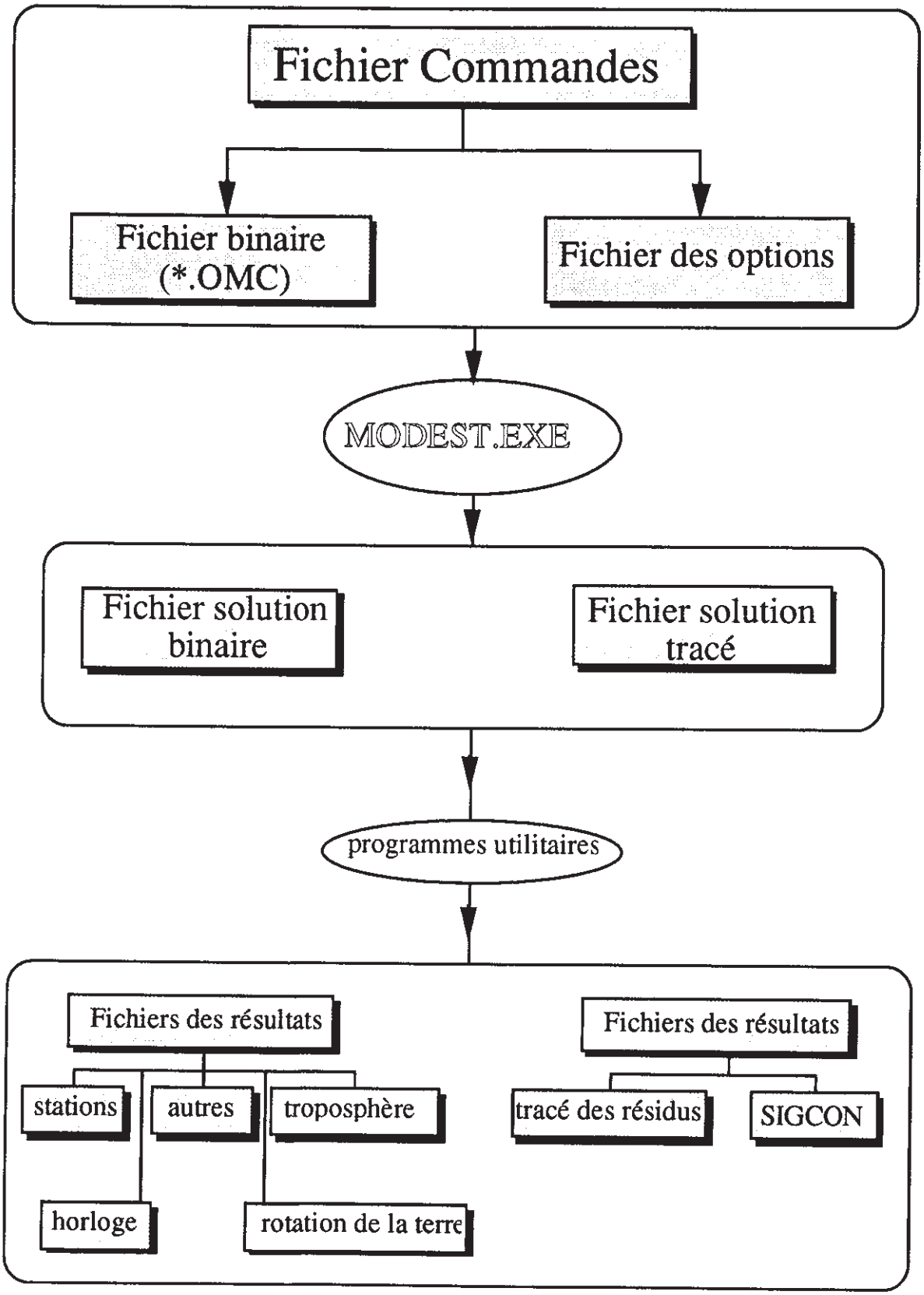


Figure I.c : Organigramme de la Solution VLBI

Fichier commande: VLBIM89.CSL

```
$IF P1 .EQS. "" THEN INQUIRE P1 "89MONDD"
$IF P2 .EQS. "" THEN INQUIRE P2 "RUN ID"
$ASSIGN DUA2:[REBAI.TRAITEMENT.SOLVE]'P1''P2'.ISL     CARDS ! Card input
$ASSIGN DUA2:[REBAI.TRAITEMENT.SOLVE]'P1''P2'.PSL        PRINT ! Printout
$ASSIGN DUA2:[REBAI.TRAITEMENT.OMC90]'P1'.OMC           OMC ! OMC output
$ASSIGN NL:                                      ARCHSUM ! Archive summary
$ASSIGN DUA2:[REBAI.TRAITEMENT.SOLVE]'P1''P2'.bin      SRIFOUT ! SRIF output
$RUN/NODEB  DUA2:[REBAI.MASTERFIT.MODEST]MODEST.EXE
```

ENTREES

1- Fichier binaire: 89AUG19.OMC

voir ANNEXE B

2- Fichier des options: 89AUG19A.ISL

```
COMMAND FILE*************************************************************
DUA2:<REBAI.TRAITEMENT.SOLVE>VLBIM89.CSL
MASTERFIT STEP SELECTION FLAGS  ****************************************
Modeling O-C                 No
Estimate parameters         Yes
Plot residuals              Yes
Output final parameters     Yes

ARCHIVE HEADER  *********************************************************
 VLBI MOBILE 89

***********************************************************************
C##################   Input for setting up SRIF   #######################
REGRESS INPUT PROCESSING INSTRUCTIONS    ******************************
C     Clocks
C
INCLUDE,WETTZ-CARNU:890819R001-1P001,WETTZ-CARNU:890820R078-1P006,
SIGCON,1,1.00D-10,
SIGCON,2,1.00D-13,
C
C     TREATMENT OF PARAMETERS  ******************************************
C     Clocks
IGNORE ,C EPOCH WETTZELL    EURA,
IGNORE ,C RATE  WETTZELL    EURA,
IGNORE ,DCRAT/DT****************,
IGNORE ,F OFFSET****************,
IGNORE ,F DRIFT ****************,
IGNORE ,C EPOCH CARNUSTY    EURA,
IGNORE ,C RATE  CARNUSTY    EURA,
IGNORE ,DCRAT/DT****************,
IGNORE ,F OFFSET****************,
IGNORE ,F DRIFT ****************,
C     Stations
IGNORE ,X       WETTZELL    EURA,
IGNORE ,Y       WETTZELL    EURA,
IGNORE ,Z       WETTZELL    EURA,
IGNORE ,DX/DT   ****************,
IGNORE ,DY/DT   ****************,
IGNORE ,DZ/DT   ****************,
IGNORE ,AXISOFF ****************,
C     Troposphere + ionosphere
IGNORE ,DRYZMAPA****************,
IGNORE ,DRYZMAPB****************,
IGNORE ,DRYMAPSG****************,
```

```
c     IGNORE ,DRYZTROP****************,
IGNORE ,WETZTROP****************,
IGNORE ,DDTRP/DT****************,
IGNORE ,DWTRP/DT****************,
IGNORE ,Z TECADD****************,
C     Global
IGNORE ,GEN REL GAMMA FACTOR    ,
IGNORE ,* AXIS ROT. TWEAK OFFSET,
IGNORE ,* AXIS ROT. TWEAK RATE *,
IGNORE ,LUNI-SOLAR PRECESSION   ,
IGNORE ,PLANETARY PRECESSION    ,
IGNORE ,VLOVE # ****************,
IGNORE ,HLOVE # ****************,
IGNORE ,TIDEPHZ ****************,
IGNORE ,NUTATION AMPLTD PSIT****,
C   APRIORI,NUTATION AMPLTD PSIA    ,,1.D-8,
C   APRIORI,NUTATION AMPLTD EPSA    ,,1.D-8,
C     Sources
C   IGNORE ,RIGHT ASCEN.3C 273      ,
IGNORE ,RIGHT ASCEN.************,
IGNORE ,DECLINATION ************,
C   APRIORI,RIGHT ASCEN.************,1.D-3,,
C   APRIORI,DECLINATION ************,1.D-3,,
C   APRIORI,RIGHT ASCEN.3C 273      ,1.D-12,,
C
C     UTPM
IGNORE ,UT1 MINUS UTC          *,
IGNORE ,* POLE MOTION           ,
LAST,
SOURCE EXCLUDE LIST ****************************************************
 FORMAT(3A4)

RUN EXCLUDE LIST*******************************************************
 FORMAT(A28)
WETTZ-CARNU:890819R010-1P003
WETTZ-CARNU:890819R010-1P006
WETTZ-CARNU:890819R024-1P003
WETTZ-CARNU:890819R024-1P006
WETTZ-CARNU:890820R045-1P003
WETTZ-CARNU:890820R045-1P006
WETTZ-CARNU:890820R064-1P003
WETTZ-CARNU:890820R064-1P006
WETTZ-CARNU:890820R068-1P006

ACCEPTABLE ID TYPE LISTS***********************************************
 FORMAT(A4)
S-X

LINEAR COMBINATION COEFFICIENTS INDEXED BY SOURCE NAME  ****************
 FORMAT(A12,8XF10.0)

RESIDUAL PLOTTING RUN LIMITS*******************************************
 FORMAT(2A28)

PLOTTING LIMITS -------------------------------------------------------
 FORMAT(A6,4X3I5,F10.0)

SOLVE SPECIFICATIONS---------------------------------------------------
 FORMAT(A12,3XA20,4XA8)
C            ------------------------------------------------------------
C   OPTION  | CATEGORY              |  USE     |  CHOICES (default first)      |
C           ------------------------------------------------------------
OPERATIONS  | Elevation limits      |  0       |  0              15            |
            | Augment residuals     |  No      |  No             Yes           |
            | Replace residuals     |  No      |  No             Yes           |
            | Linear combinations   |  No      |  No             Yes           |
            | Ops. debug level      |  0       |  0   2   3                    |
            |                       |----------------------------------------|
            | Maximum parameters    |  1000    |  400            800           |
```

	Max. params./model	1000	400	800
	List observations	No	No	Yes
	SRIF debug level	0	0 2 3 4	5
	Selective dump	0	0 2 3 4	5
	Dump lower limit	-1	-1	Obs. #
	Dump upper limit	-1	-1	Obs. #
	Dump SRIF output	No	No	Yes
	Warnings	0	0 -1(bypass)	500
ESTIMATION	Correlated obsvs.	No	No	Yes
	Corr. obs. scale	1.D0	1.D0	(factor)
	Exclude types		(blank)	1,2,3
	Restart	No	No	Yes
	Output for restart	No	No	Yes
	Obsvs. for HH pack	200	200	20
	Condition numbers	Yes	Yes	No
	Max. cond. number	1.D16	1.D14	1.D16
	Chi-square jump	1.D20	1.D2	1.D10
	Parameters estimated	All	All	Global
	Parameters only	No	No	Yes
	Print R matrix	No	No Inv	All
	Print R inverse	No	No	Yes
	Print correlation	Yes	No	Yes
	Correl. threshold	0.75D0	0.0D0	0.99D0
	Print covariance	Yes	No Yes	File
	Seq. print low	1	1	Seq. #
	Seq. print high		9999	Seq. #
	Debug level	1	1 0 2 3	4
	Selective dump	0	0 1 2 3	4
	Dump lower limit	-1	-1	Obs. #
	Dump upper limit	-1	-1	Obs. #
	Warnings	0	0 -1(bypass)	500
PLOTS	Residual table	Yes	No	Yes
	Parameter partials	No	No	Yes
	Autoscale	Yes	Yes	No
	Sequence boundaries	I	I	(blank)
	Significant change	-	-	(blank)
	Linear plots	Yes	Yes	No
	Logarithmic plots	No	No	Yes
	A priori plots	No	No	Yes
	Post-fit plots	Yes	Yes	No
	Residual plots	Yes	Yes	No
	Residual/sigma plots	Yes	Yes	No
	Source symbols	Yes	Yes	* (symbol)
	Source statistics	Yes	Yes	No
	Plot types	All	All (1,2,3,4)	1,2,4
OUTPUT	Natural units	No	Yes	No
	User units	Yes	Yes	No
	Parameters by model	Yes	Yes	No
	Binary baseline file	No	No	Yes
	Final source catalog	No	Yes	No

C

REFERENCE STATION
WETTZELL

SORTIES

1- Fichier binaire : 89AUG19A.BIN

A l'aide des programmes utilitaires nous listons les résultats des paramètres calculés. On génère par exemple le résultat des coordonnées des stations et des parmètres troposphériques:

- Le fichier des coordonnées: 89AUG19A.BSL

```
VLBI MASTERFIT 89AUG19A.bin: Station coordinates, reference time  85/ 1/ 1

Station                                          Avg. obs. time     Nob
            x (mm)                y (mm)                z (mm)
              <XY>                  <YZ>                  <XZ>
   Shifts:  E (mm)                N (mm)                V (mm)
              <EN>                  <NV>                  <EV>

CARNUSTY    EURA                                 89/ 8/20  1:28      74     73
 3526490130.5 +-  8.6  -171419089.4 +- 10.8  5294196890.7 +-  9.7
              0.34136              -0.08350              -0.00762
       7468.5 +- 10.9       -6957.3 +-  8.9      117911.0 +-  9.3
             -0.30479               0.12690                0.08878

VLBI MASTERFIT 89AUG19A.bin: Baselines from WETTZELL, reference time  85/ 1/ 1

Station                                          Avg. obs. time     Nob
            x (mm)                y (mm)                z (mm)
                                                        L (mm)

CARNUSTY    EURA                                 89/ 8/20  1:28      74     73
 -549049963.5 +-  8.6 -1103154210.4 +- 10.8   492567659.7 +-  9.7
                                             1327037291.8 +- 11.5
VLBI MASTERFIT 89AUG19A.bin: Station coordinate covariance

CARNUSTY
  1   1  7.4366997179309829D+01
  2   1  3.1705349173596261D+01
  2   2  1.1600232758432267D+02
  3   1 -6.3692398011145736D-01
  3   2 -8.7183202936065536D+00
  3   3  9.3969981172444077D+01
```

- le fichier des paramètres tropo: 89AUG19A.TRP

```
                    VLBI MASTER FIT 89aug19a.bin

                                                   Dry              Wet
                                             Value     Err  Value     Err
     Station       Date                JD        cm, cm/day      cm, cm/day
Nob

     WETTZELL    89/ 8/20   1:28   2447758.56   568.1+/-  0.6     0.0+/-  0.0
74

     CARNUSTY    89/ 8/20   1:28   2447758.56-2099.4+/-  0.8     0.0+/-  0.0
74
```

2- Tracer des résidus du fichier: 89AUG19A.PSL

Ce fichier nous permet d'identifier les sauts d'horloge et les mauvaises observations.
Les sauts d'horloge apparaissent au niveau des observations (10, 29, 59)

```
 THIS RUN WAS MADE WITH IMAGE :
      DUA2:[REBAI.MASTERFIT.MODEST]MODEST.EXE;100
JUN-1990 16:14
 THE COMMAND FILE USED WAS :
      DUA2:<REBAI.TRAITEMENT.SOLVE>VLBIM89.CSL;30
DEC-1990 15:45
END OF CARD INPUT DATA
```

OBSERVATION TYPE: 1

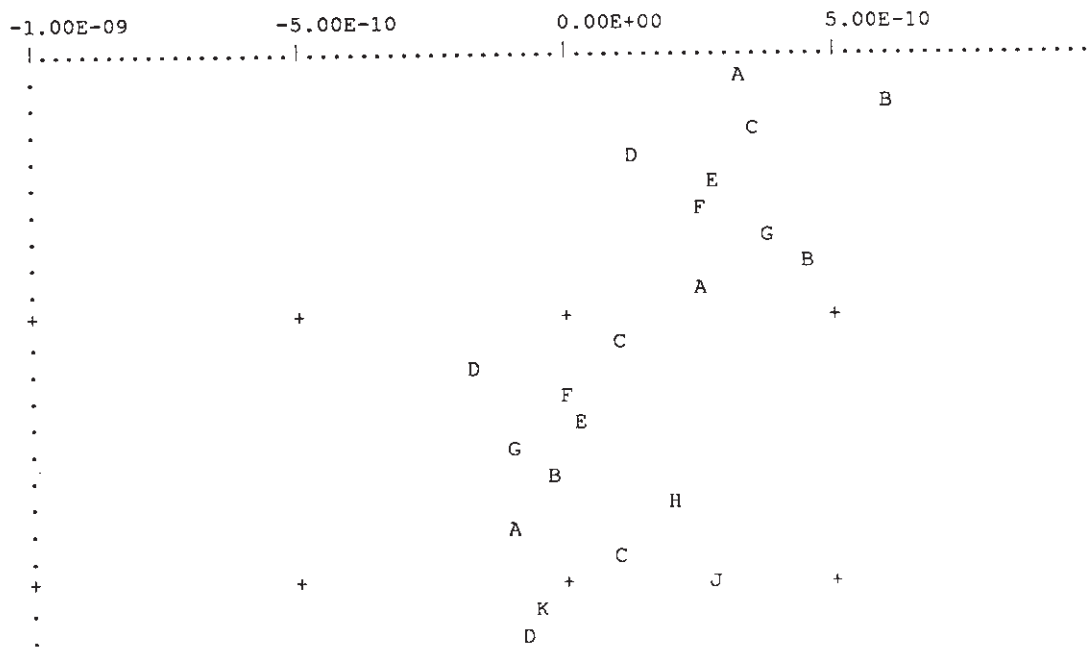
RESIDUAL VS DATA POINT FOR ADJUSTED MODEL

AXIS PARALLEL TO THIS LINE IS: RESIDUAL

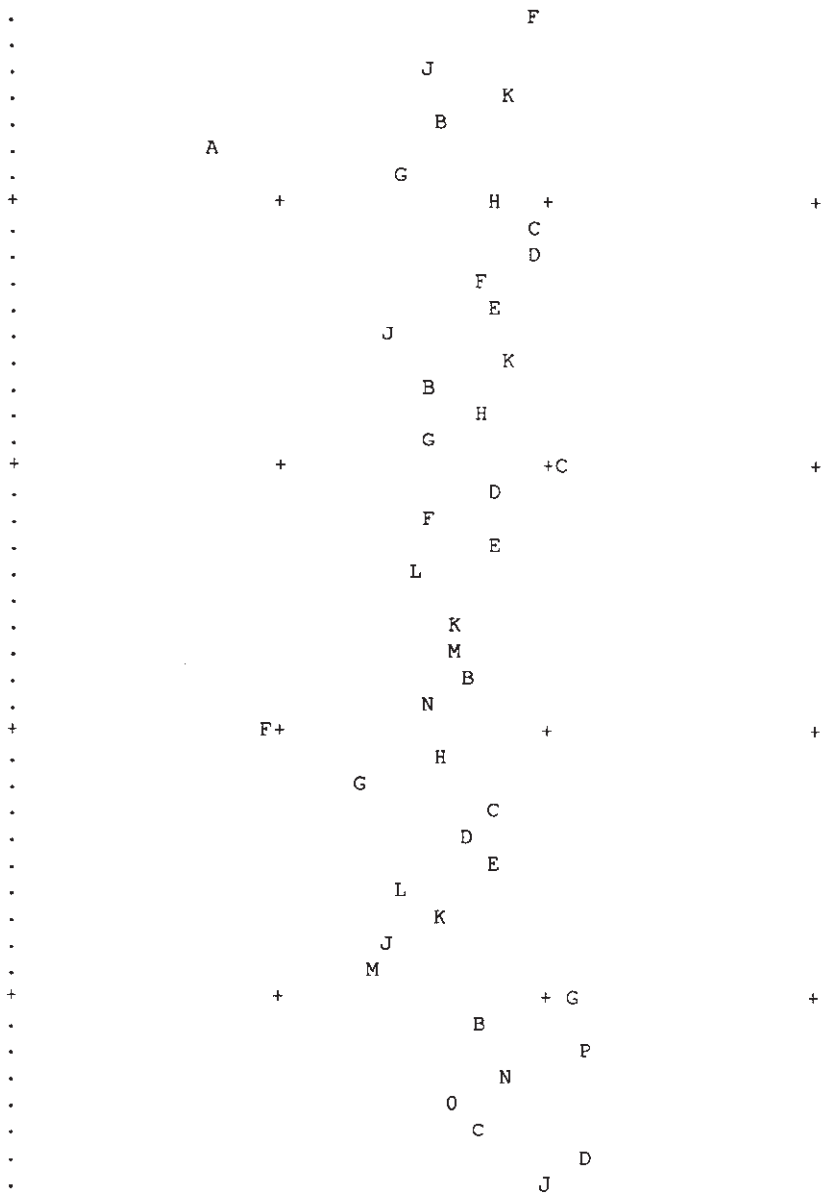
OTHER AXIS IS RUN #, RUN NAME, AND SOURCE NAME

SYMBOL: IIII ACROSS PLOT INDICATES NEW PARAMETER ADJUSTMENT SEQUENCE STARTED
SYMBOL: ---- ACROSS PLOT INDICATES AUTOMATIC DETECTION OF SIGNIFICANT CHANGE IN OBSERVATION DESCRIPTOR
SYMBOL: ---- PRIOR TO SOURCE NAME INDICATES START OF NEW SOURCE COUNT ACCUMULATION

PLOT SYMBOLS HAVE THE FOLLOWING MEANINGS :
* - OBSERVATION INCLUDED IN FIT (IF SPECIFIED, OTHER SYMBOLS, KEYED TO SOURCE NAME, USED)
0 - OBSERVATION NOT INCLUDED IN PARAMETER ADJUSTMENT
- PARAMETER A PRIORI, OR CONSTRAINT, USED IN ADJUSTMENT
< - PARAMETER A PRIORI, OR CONSTRAINT, NOT USED IN ADJUSTMENT



.	1	WETTZ-CARNU:890819R001-1P003	P 1741-038
.	3	WETTZ-CARNU:890819R002-1P003	3C 454.3
.	5	WETTZ-CARNU:890819R003-1P003	1803+784
.	7	WETTZ-CARNU:890819R004-1P003	NRAO 150
.	9	WETTZ-CARNU:890819R005-1P003	GC 2234+28
.	11	WETTZ-CARNU:890819R006-1P003	3C 345
.	13	WETTZ-CARNU:890819R007-1P003	OX 036
.	15	WETTZ-CARNU:890819R008-1P003	3C 454.3
.	17	WETTZ-CARNU:890819R009-1P003	P 1741-038
+0	19	WETTZ-CARNU:890819R010-1P003	CTD 20
.	21	WETTZ-CARNU:890819R011-1P003	1803+784
.	23	WETTZ-CARNU:890819R012-1P003	NRAO 150
.	25	WETTZ-CARNU:890819R013-1P003	3C 345
.	27	WETTZ-CARNU:890819R014-1P003	GC 2234+28
.	29	WETTZ-CARNU:890819R015-1P003	OX 036
.	31	WETTZ-CARNU:890819R016-1P003	3C 454.3
.	33	WETTZ-CARNU:890819R017-1P003	CTD 20
.	35	WETTZ-CARNU:890819R018-1P003	P 1741-038
.	37	WETTZ-CARNU:890819R019-1P003	1803+784
+	39	WETTZ-CARNU:890819R020-1P003	P 0106+01
.	41	WETTZ-CARNU:890819R021-1P003	DA 193
.	43	WETTZ-CARNU:890819R022-1P003	NRAO 150



```
.   45 WETTZ-CARNU:890819R023-1P003    3C 345
.0  47 WETTZ-CARNU:890819R024-1P003    GC 2234+28
.   49 WETTZ-CARNU:890819R025-1P003    P 0106+01
.   51 WETTZ-CARNU:890819R026-1P003    DA 193
.   53 WETTZ-CARNU:890819R027-1P003    3C 454.3
.   55 WETTZ-CARNU:890819R028-1P003    P 1741-038
.   57 WETTZ-CARNU:890820R029-1P003    OX 036
+   59 WETTZ-CARNU:890820R030-1P003    CTD 20
.   61 WETTZ-CARNU:890820R031-1P003    1803+784
.   63 WETTZ-CARNU:890820R032-1P003    NRAO 150
.   65 WETTZ-CARNU:890820R033-1P003    3C 345
.   67 WETTZ-CARNU:890820R034-1P003    GC 2234+28
.   69 WETTZ-CARNU:890820R035-1P003    P 0106+01
.   71 WETTZ-CARNU:890820R036-1P003    DA 193
.   73 WETTZ-CARNU:890820R037-1P003    3C 454.3
.   75 WETTZ-CARNU:890820R038-1P003    CTD 20
.   77 WETTZ-CARNU:890820R039-1P003    OX 036
+   79 WETTZ-CARNU:890820R040-1P003    1803+784
.   81 WETTZ-CARNU:890820R041-1P003    NRAO 150
.   83 WETTZ-CARNU:890820R042-1P003    3C 345
.   85 WETTZ-CARNU:890820R043-1P003    GC 2234+28
.   87 WETTZ-CARNU:890820R044-1P003    P 0528+134
.0  89 WETTZ-CARNU:890820R045-1P003    P 0106+01
.   91 WETTZ-CARNU:890820R046-1P003    DA 193
.   93 WETTZ-CARNU:890820R047-1P003    P 0420-01
.   95 WETTZ-CARNU:890820R048-1P003    3C 454.3
.   97 WETTZ-CARNU:890820R049-1P003    4C 39.25
+   99 WETTZ-CARNU:890820R050-1P003    3C 345
.  101 WETTZ-CARNU:890820R051-1P003    CTD 20
.  103 WETTZ-CARNU:890820R052-1P003    OX 036
.  105 WETTZ-CARNU:890820R053-1P003    1803+784
.  107 WETTZ-CARNU:890820R054-1P003    NRAO 150
.  109 WETTZ-CARNU:890820R055-1P003    GC 2234+28
.  111 WETTZ-CARNU:890820R056-1P003    P 0528+134
.  113 WETTZ-CARNU:890820R057-1P003    DA 193
.  115 WETTZ-CARNU:890820R058-1P003    P 0106+01
.  117 WETTZ-CARNU:890820R059-1P003    P 0420-01
+  119 WETTZ-CARNU:890820R060-1P003    OX 036
.  121 WETTZ-CARNU:890820R061-1P003    3C 454.3
.  123 WETTZ-CARNU:890820R062-1P003    DW 0742+10
.  125 WETTZ-CARNU:890820R063-1P003    4C 39.25
.  127 WETTZ-CARNU:890820R064-1P003    CTD 20
.  129 WETTZ-CARNU:890820R065-1P003    1803+784
.  131 WETTZ-CARNU:890820R066-1P003    NRAO 150
.  133 WETTZ-CARNU:890820R067-1P003    P 0106+01
```

```
 .                                                          P                 . 135 WETTZ-CARNU:890820R068-1P003    DW 0742+10
 .                                  K                                         . 137 WETTZ-CARNU:890820R069-1P003    DA 193
 +                    +              +     E             +                   + 139 WETTZ-CARNU:890820R070-1P003    GC 2234+28
 .                                      H                                     . 141 WETTZ-CARNU:890820R071-1P003    CTD 20
 .                                            N                               . 143 WETTZ-CARNU:890820R072-1P003    4C 39.25
 .                                          M                                 . 145 WETTZ-CARNU:890820R073-1P003    P 0420-01
 .                                              C                             . 147 WETTZ-CARNU:890820R074-1P003    1803+784
 .                                                                            .B149 WETTZ-CARNU:890820R075-1P003    3C 454.3
 .                                        L                                   . 151 WETTZ-CARNU:890820R076-1P003    P 0528+134
 .                                                D                           . 153 WETTZ-CARNU:890820R077-1P003    NRAO 150
 .                                                                     J      . 155 WETTZ-CARNU:890820R078-1P003    P 0106+01
                                                                               IN THIS SEQ, NOB =      74, RMS =  0.272727E-09
                                                                               IN THIS SEQ, NOB =      74, RMS =  0.272727E-09
 |.................|.................|.................|.................|
-1.00E-09        -5.00E-10         0.00E+00          5.00E-10          1.00E-09
1
                                                                                 7/ 3/92  13:37:09      PAGE:   15
 OBSERVATION TYPE:    1
CHI SQUARE = 3.96021E+02 CHI SQUARE/(NOB-NP) = 5.91076E+00 RMS RESIDUAL = 2.72727E-10 NOB =      74, NP =     7, OBSERV. TYPE: 1
```

ANNEXE D

IDENTIFIER LES SAUTS D'HORLOGES ET LES MAUVAISES OBSERVATIONS

A partir du tracé des résidus du premier test 89AUG19A.PSL, nous avons détecté deux sauts d'horloge (connus par un changement de pente du tracé des résidus) au niveau des observations (10, 29, 59) . Les mauvaises observations sont pour des valeurs de résidus supérieures à +- 200 ps. La liste des mauvaises observations déterminées automatiquement peut être modifiée soit par ajout ou retrait de certaines observations après la mise en place des sauts d'horloges.

Les sauts d'horloge seront notés au niveau du "INCLUDE " du fichier des options et les mauvaises observations seront misent au niveau de "EXCLUDE LIST". A l'exception de ces deux changements, le nouveau fichier option 89AUG19C.ISL sera identique au 89AUG19A.ISL.

Jusqu'à présent, les méthodes utilisées pour la détection des sauts d'horloge sont manuelles . Il serait donc fort intéressant de mener une étude pour l'automatisation de la détection des sauts d'horloge.

- Les "include" et les "exclude" du fichier 89AUG19C.ISL

```
C  INCLUDE
C
INCLUDE,WETTZ-CARNU:890819R001-1P001,WETTZ-CARNU:890819R010-1P006,
SIGCON,1,0.69D-10,
SIGCON,2,0.51D-13,
INCLUDE,WETTZ-CARNU:890819R011-1P001,WETTZ-CARNU:890820R029-1P006,
ICLCARNU,
INCLUDE,WETTZ-CARNU:890820R030-1P001,WETTZ-CARNU:890820R059-1P006,
ICLCARNU,
INCLUDE,WETTZ-CARNU:890820R060-1P001,WETTZ-CARNU:890821R078-1P006,
ICLCARNU,
c
C
RUN EXCLUDE LIST*******************************************************
  FORMAT(A28)
WETTZ-CARNU:890819R024-1P003
WETTZ-CARNU:890820R060-1P003
WETTZ-CARNU:890819R002-1P006
WETTZ-CARNU:890819R012-1P003
WETTZ-CARNU:890820R044-1P003
WETTZ-CARNU:890820R045-1P003
WETTZ-CARNU:890820R065-1P003
WETTZ-CARNU:890820R075-1P003
WETTZ-CARNU:890819R020-1P003
WETTZ-CARNU:890820R075-1P006
WETTZ-CARNU:890819R002-1P003
WETTZ-CARNU:890819R004-1P003
WETTZ-CARNU:890820R068-1P003
WETTZ-CARNU:890819R010-1P003
WETTZ-CARNU:890820R078-1P003
WETTZ-CARNU:890820R045-1P006
WETTZ-CARNU:890819R024-1P006
WETTZ-CARNU:890820R046-1P006
WETTZ-CARNU:890819R020-1P006
WETTZ-CARNU:890820R038-1P006
WETTZ-CARNU:890819R015-1P006
WETTZ-CARNU:890819R008-1P006
WETTZ-CARNU:890820R068-1P006
WETTZ-CARNU:890819R010-1P006
WETTZ-CARNU:890820R044-1P006
C
```

- Tracer des résidus du Fichier 89AUG19C.PSL

```
                  PLOT SYMBOLS HAVE THE FOLLOWING MEANINGS :
                       * - OBSERVATION INCLUDED IN FIT (IF SPECIFIED, OTHER SYMBOLS, KEYED TO SOURCE NAME, USED)
                       O - OBSERVATION NOT INCLUDED IN PARAMETER ADJUSTMENT
                       # - PARAMETER A PRIORI, OR CONSTRAINT, USED IN ADJUSTMENT
                       < - PARAMETER A PRIORI, OR CONSTRAINT, NOT USED IN ADJUSTMENT

-1.80E-10          -9.00E-11          0.00E+00          9.00E-11          1.80E-10
 |..................|..................|..................|..................|
 .                                                   A                     .   1 WETTZ-CARNU:890819R001-1P003    P 1741-038
 .                                                                         .0  3 WETTZ-CARNU:890819R002-1P003    3C 454.3
 .                         B                                               .   5 WETTZ-CARNU:890819R003-1P003    1803+784
0.                                                                         .   7 WETTZ-CARNU:890819R004-1P003    NRAO 150
 .                         D                                               .   9 WETTZ-CARNU:890819R005-1P003    GC 2234+28
 .           E                                                             .  11 WETTZ-CARNU:890819R006-1P003    3C 345
 .                                                   F                     .  13 WETTZ-CARNU:890819R007-1P003    OX 036
 .                                                           G             .  15 WETTZ-CARNU:890819R008-1P003    3C 454.3
 .                          A                                              .  17 WETTZ-CARNU:890819R009-1P003    P 1741-038
 +                   +                   +                   +            +0 19 WETTZ-CARNU:890819R010-1P003    CTD 20
IIIIIIIIIIIIIIIIIIIIIIIIIIIIIIIIIIIIIIIIIIIIIIIIIIIIIIIIIIIIIIIIIIIIIIIIIIIIIIIIIIIIIIIIIIIIIIIIIIIIIIIIIIII IN THIS SEQ, NOB =       7, RMS =  0.801015E-10
 .                         B                                               .  21 WETTZ-CARNU:890819R011-1P003    1803+784
0.                                                                         .  23 WETTZ-CARNU:890819R012-1P003    NRAO 150
 .                   E                                                     .  25 WETTZ-CARNU:890819R013-1P003    3C 345
 .                                       D                                 .  27 WETTZ-CARNU:890819R014-1P003    GC 2234+28
 .                         F                                               .  29 WETTZ-CARNU:890819R015-1P003    OX 036
 .                                     G                                   .  31 WETTZ-CARNU:890819R016-1P003    3C 454.3
 .                                                                   H     .  33 WETTZ-CARNU:890819R017-1P003    CTD 20
 .                                             A                           .  35 WETTZ-CARNU:890819R018-1P003    P 1741-038
 .                                                   B                     .  37 WETTZ-CARNU:890819R019-1P003    1803+784
 +                   +                   +                   +            +0 39 WETTZ-CARNU:890819R020-1P003    P 0106+01
 .                                       J                                 .  41 WETTZ-CARNU:890819R021-1P003    DA 193
 .                         C                                               .  43 WETTZ-CARNU:890819R022-1P003    NRAO 150
 .                                           E                             .  45 WETTZ-CARNU:890819R023-1P003    3C 345
 .                                                                         .0 47 WETTZ-CARNU:890819R024-1P003    GC 2234+28
 .                 K                                                       .  49 WETTZ-CARNU:890819R025-1P003    P 0106+01
 .                                     J                                   .  51 WETTZ-CARNU:890819R026-1P003    DA 193
 .                                   G                                     .  53 WETTZ-CARNU:890819R027-1P003    3C 454.3
 .                                 A                                       .  55 WETTZ-CARNU:890819R028-1P003    P 1741-038
 .                                F                                        .  57 WETTZ-CARNU:890820R029-1P003    OX 036
```

```
IIIIIIIIIIIIIIIIIIIIIIIIIIIIIIIIIIIIIIIIIIIIIIIIIIIIIIIIIIIIIIIIIIIIIIIIIIIIIIII IN THIS SEQ, NOB =       16, RMS =  0.568129E-10
+                   +                   +H                  +                   +  59 WETTZ-CARNU:890820R030-1P003    CTD 20
.                                       B                                       .  61 WETTZ-CARNU:890820R031-1P003    1803+784
.                                                   C                           .  63 WETTZ-CARNU:890820R032-1P003    NRAO 150
.                                E                                              .  65 WETTZ-CARNU:890820R033-1P003    3C 345
.                                                  D                            .  67 WETTZ-CARNU:890820R034-1P003    GC 2234+28
.            K                                                                  .  69 WETTZ-CARNU:890820R035-1P003    P 0106+01
.                                    J                                          .  71 WETTZ-CARNU:890820R036-1P003    DA 193
.                               G                                               .  73 WETTZ-CARNU:890820R037-1P003    3C 454.3
.                                              H                                .  75 WETTZ-CARNU:890820R038-1P003    CTD 20
.                                  F                                            .  77 WETTZ-CARNU:890820R039-1P003    OX 036
+                   +                   +                B  +                   +  79 WETTZ-CARNU:890820R040-1P003    1803+784
.                                               C                               .  81 WETTZ-CARNU:890820R041-1P003    NRAO 150
.                                     E                                         .  83 WETTZ-CARNU:890820R042-1P003    3C 345
.                                                        D                      .  85 WETTZ-CARNU:890820R043-1P003    GC 2234+28
.0                                                                              .  87 WETTZ-CARNU:890820R044-1P003    P 0528+134
.                                                                               .0 89 WETTZ-CARNU:890820R045-1P003    P 0106+01
.                              J                                                .  91 WETTZ-CARNU:890820R046-1P003    DA 193
.                               L                                               .  93 WETTZ-CARNU:890820R047-1P003    P 0420-01
.                                                       G                       .  95 WETTZ-CARNU:890820R048-1P003    3C 454.3
.                        M                                                      .  97 WETTZ-CARNU:890820R049-1P003    4C 39.25
+                   +               E   +                   +                   +  99 WETTZ-CARNU:890820R050-1P003    3C 345
.                                              H                                . 101 WETTZ-CARNU:890820R051-1P003    CTD 20
.                      F                                                        . 103 WETTZ-CARNU:890820R052-1P003    OX 036
.                                       B                                       . 105 WETTZ-CARNU:890820R053-1P003    1803+784
.                                                 C                             . 107 WETTZ-CARNU:890820R054-1P003    NRAO 150
.                                                                D              . 109 WETTZ-CARNU:890820R055-1P003    GC 2234+28
.                             N                                                 . 111 WETTZ-CARNU:890820R056-1P003    P 0528+134
.                                       J                                       . 113 WETTZ-CARNU:890820R057-1P003    DA 193
.                                      K                                        . 115 WETTZ-CARNU:890820R058-1P003    P 0106+01
.                           L                                                   . 117 WETTZ-CARNU:890820R059-1P003    P 0420-01
IIIIIIIIIIIIIIIIIIIIIIIIIIIIIIIIIIIIIIIIIIIIIIIIIIIIIIIIIIIIIIIIIIIIIIIIIIIIIIII IN THIS SEQ, NOB =       28, RMS =  0.520045E-10
+                   +                   +                   +                   +0119 WETTZ-CARNU:890820R060-1P003    OX 036
.                                              G                                . 121 WETTZ-CARNU:890820R061-1P003    3C 454.3
.                                                         P                     . 123 WETTZ-CARNU:890820R062-1P003    DW 0742+10
.                               M                                               . 125 WETTZ-CARNU:890820R063-1P003    4C 39.25
.                         H                                                     . 127 WETTZ-CARNU:890820R064-1P003    CTD 20
.0                                                                              . 129 WETTZ-CARNU:890820R065-1P003    1803+784
.                                                   C                           . 131 WETTZ-CARNU:890820R066-1P003    NRAO 150
.                                        K                                      . 133 WETTZ-CARNU:890820R067-1P003    P 0106+01
.                                                                               .0135 WETTZ-CARNU:890820R068-1P003    DW 0742+10
.                  J                                                            . 137 WETTZ-CARNU:890820R069-1P003    DA 193
+                   +                   +           D       +                   + 139 WETTZ-CARNU:890820R070-1P003    GC 2234+28
.                               H                                               . 141 WETTZ-CARNU:890820R071-1P003    CTD 20
.                                              M                                . 143 WETTZ-CARNU:890820R072-1P003    4C 39.25
```

```
.                                                   L                    . 145 WETTZ-CARNU:890820R073-1P003    P 0420-01
.                          B                                             . 147 WETTZ-CARNU:890820R074-1P003    1803+784
.                                                                        .0149 WETTZ-CARNU:890820R075-1P003    3C 454.3
.                          N                                             . 151 WETTZ-CARNU:890820R076-1P003    P 0528+134
.                                       C                                . 153 WETTZ-CARNU:890820R077-1P003    NRAO 150
.                                                                        .0155 WETTZ-CARNU:890820R078-1P003    P 0106+01
                                                                            IN THIS SEQ, NOB =      65, RMS =  0.573320E-10
                                                                            IN THIS SEQ, NOB =      14, RMS =  0.543598E-10
 |.................|.................|.................|.................|
-1.80E-10         -9.00E-11          0.00E+00          9.00E-11         1.80E-10

CHI SQUARE = 2.61804E+01 CHI SQUARE/(NOB-NP) = 5.03469E-01 RMS RESIDUAL = 5.73320E-11 NOB =      65, NP =    13, OBSERV. TYPE: 1
```

Une fois la distribution des résidus est normale, nous passons à la repondération des observations. Il s'agit d'extraire du fichier 89AUG19C.PSL les valeurs des erreurs estimées SIGCON, et nous aurons le fichier 89AUG19C.SIG

- RMS OBSERVATION SIGMAS AND POST-FIT RESIDUALS FOR 89AUG19C.PSL

Observations	Type	Sigma Obs.	Sigma PF	PFN RMSR	SIGCON	NP	Chisq
65 WETTZ-CARNU:890820	1	0.910E-10	0.573E-10	0.635	0.069	0.0	0.000
66 WETTZ-CARNU:890820	2	0.161E-12	0.825E-13	0.511	0.051	0.0	0.000

ANNEXE E

REPONDERER LES OBSERVATIONS

Le SIGCON est le bruit ajouté aux écarts type a priori. Si le rapport (RMS a posteriori / RMS a priori) est plus grand que 1, on augmente l'écart type a priori donc un SIGCON plus grand et vise versa.

A partir des valeurs SIGCON estimées, nous obtenons des valeurs a posteriori. Par deux itérations successives nous aurons:

RMS observation sigmas and post-fit residuals for 89AUG19C.PSL

Observations	Type	Sigma Obs.	Sigma PF	PFN RMSR	PFN SIGCON	NP	Chisq
65 WETTZ-CARNU:890820	1	0.910E-10	0.573E-10	0.635	0.069	0.0	0.000
66 WETTZ-CARNU:890820	2	0.161E-12	0.825E-13	0.511	0.051	0.0	0.000

Pour chaque ligne de base nous avons déterminé le bruit à ajouter (SIGCON) après la détection des sauts d'horloges et les mauvaises observations. A cause de la sensibilité des antennes.nous avons procédé base par base Plus la longueur de la base est longue plus l'effet troposphérique est décorrelé. Nous obtienons donc une valeur de SIGCON par base et par session d'observations, pour le retard et la fréquence des franges.

Les résultats de ces itérations sont présentées dans les tableaux (I.4.a à I.4.z) suivants :

Tableaux I.4.a. à I.4.z. Résultats expérimentales base par base et session par session

a- Session D'observation Du 21/06/89

Ligne de base	Nombre d'observations			Pourcentage d'observations exclues	SIGCON (ns)
	total(τ,τ)		traitées		
WESTF-WETTZ	54	τ	34	37	0.069
		$\dot{\tau}$	46	15	0.071
WETTZ-NOTOP	83	τ	63	24	0.076
		$\dot{\tau}$	59	29	0.071
WESTF-NOTOP	44	τ	18	59	0.112
		$\dot{\tau}$	36	18	0.121
WESTF-RICHM	69	τ	51	26	0.100
		$\dot{\tau}$	58	16	0.100
WESTF-MOJAV	68	τ	40	41	0.100
		$\dot{\tau}$	56	18	0.073
RICHM-MOJAV	76	τ	69	9	0.100
		$\dot{\tau}$	66	13	0.072
HOHEN-RICHM	44	τ	15	66	0.071
		$\dot{\tau}$	24	45	0.100
WESTF-HOHEN	53	τ	27	49	0.100
		$\dot{\tau}$	40	25	0.100
HOHEN-MOJAV	41	τ	12	71	0.074
		$\dot{\tau}$	22	46	0.100
WETTZ-MOJAV	44	τ	25	43	0.100
		$\dot{\tau}$	38	14	0.061
WETTZ-RICHM	40	τ	30	25	0.074
		$\dot{\tau}$	32	20	0.100
WETTZ-HOHEN	81	τ	66	19	0.074
		$\dot{\tau}$	73	10	0.076

a- Session D'observation Du 21/06/89
(suite)

Ligne de base	Nombre d'observations			Pourcentage d'observations exclues	SIGCON (ns)
	total(τ,τ)	traitées			
HOHEN-NOTOP	75	τ	52	31	0.074
		$\dot{\tau}$	64	15	0.074
RICHM-NOTOP	32	τ	13	59	0.100
		$\dot{\tau}$	24	25	0.100
MOJAV-NOTOP	30	τ	12	60	0.100
		$\dot{\tau}$	23	23	0.100

b- Session D'observation Du 23/06/89

Ligne de base	Nombre d'observations			Pourcentage d'observations exclues	SIGCON (ns)
	total(τ,τ)	traitées			
WETTZ-HOHEN	109	τ	102	6	0.010
		$\dot{\tau}$	102	6	0.010
WETTZ-NOTOP	110	τ	87	21	0.076
		$\dot{\tau}$	100	9	0.079
NOTOP-HOHEN	101	τ	79	22	0.086
		$\dot{\tau}$	79	22	0.090

c- Session D'observation Du 24/06/89

Ligne de base	Nombre d'observations			Pourcentage d'observations exclues	SIGCON (ns)
	total(τ,τ)	traitées			
WETTZ-HOHEN	106	τ	103	3	0.003
		$\dot{\tau}$	103	3	0.003
WETTZ-NOTOP	108	τ	89	18	0.055
		$\dot{\tau}$	93	14	0.055
NOTOP-HOHEN	102	τ	79	23	0.074
		$\dot{\tau}$	89	13	0.076

d- Session D'observation Du 25/06/89

Ligne de base	Nombre d'observations			Pourcentage d'observations exclues	SIGCON (ns)
	total(τ,τ)	traitées			
WETTZ-NOTOP	104	τ	79	24	0.078
		$\dot{\tau}$	91	13	0.075
WETTZ-HOHEN	105	τ	91	13	0.073
		$\dot{\tau}$	92	12	0.057
NOTOP-HOHEN	107	τ	82	23	0.020
		$\dot{\tau}$	89	17	0.030

e- Session D'observation Du 26/06/89

Ligne de base	Nombre d'observations			Pourcentage d'observations exclues	SIGCON (ns)
	total(τ,τ)		traitées		
WESTF-MOJAV	89	τ	67	25	0.020
		$\dot{\tau}$	82	8	0.025
HOHEN-MOJAV	40	τ	18	6	0.100
		$\dot{\tau}$	25	4	0.100
WESTF-HOHEN	59	τ	37	37	0.085
		$\dot{\tau}$	51	14	0.085
WETTZ-NOTOP	90	τ	69	23	0.077
		$\dot{\tau}$	77	14	0.075
WETTZ-MOJAV	49	τ	35	29	0.100
		$\dot{\tau}$	41	16	0.100
WETTZ-HOHEN	81	τ	77	5	0.068
		$\dot{\tau}$	74	9	0.084
WESTF-NOTOP	57	τ	34	40	0.100
		$\dot{\tau}$	47	18	0.084
WESTF-WETTZ	61	τ	43	30	0.083
		$\dot{\tau}$	52	15	0.082
HOHEN-NOTOP	77	τ	64	17	0.079
		$\dot{\tau}$	65	16	0.070
MOJAV-NOTOP	34	τ	20	41	0.100
		$\dot{\tau}$	27	21	0.103
RICHM-MOJAV	78	τ	71	9	0.100
		$\dot{\tau}$	71	9	0.084
WESTF-RICHM	71	τ	60	15	0.080
		$\dot{\tau}$	65	8	0.077

e- Session D'observation Du 26/06/89
(suite)

Ligne de base	Nombre d'observations			Pourcentage d'observations exclues	SIGCON (ns)
	total(τ,τ)	traitées			
WETTZ-RICHM	38	τ	32	16	0.103
		$\dot{\tau}$	29	24	0.088
HOHEN-RICHM	37	τ	13	65	0.083
		$\dot{\tau}$	17	54	0.082
RICHM-NOTOP	35	τ	19	45	0.100
		$\dot{\tau}$	26	25	0.088

f- Session D'observation Du 05/07/89

Ligne de base	Nombre d'observations			Pourcentage d'observations exclues	SIGCON (ns)
	total(τ,τ)	traitées			
ONSAL-WETTZ	109	τ	94	14	0.020
		$\dot{\tau}$	99	9	0.042
ONSAL-METSH	107	τ	76	29	0.076
		$\dot{\tau}$	98	8	0.079
WETTZ-METSH	75	τ	65	13	0.074
		$\dot{\tau}$	62	17	0.057

g- Session D'observation Du 06/07/89

Ligne de base	Nombre d'observations			Pourcentage d'observations exclues	SIGCON (ns)
	total(τ,τ)		traitées		
WETTZ-MOJAV	40	τ	23	43	0.020
		$\dot{\tau}$	34	15	0.005
WETTZ-ONSAL	72	τ	56	22	0.074
		$\dot{\tau}$	66	8	0.054
WETTZ-METSH	74	τ	53	28	0.070
		$\dot{\tau}$	64	14	0.060
ONSAL-METSH	65	τ	42	35	0.040
		$\dot{\tau}$	63	3	0.056
ONSAL-MOJAV	42	τ	24	43	0.084
		$\dot{\tau}$	38	10	0.075
METSH-MOJAV	31	τ	7	77	0.060
		$\dot{\tau}$	18	42	0.057
WESTF-MOJAV	83	τ	42	49	0.076
		$\dot{\tau}$	72	13	0.092
WESTF-WETTZ	57	τ	28	51	0.100
		$\dot{\tau}$	43	25	0.087
WESTF-ONSAL	56	τ	34	39	0.088
		$\dot{\tau}$	43	23	0.081
WESTF-METSH	50	τ	18	64	0.089
		$\dot{\tau}$	40	20	0.083
WESTF-RICHM	76	τ	44	42	0.100
		$\dot{\tau}$	57	25	0.100
RICHM-MOJAV	70	τ	56	20	0.086
		$\dot{\tau}$	58	17	0.080

g- Session D'observation Du 06/07/89
(suite)

Ligne de base	Nombre d'observations			Pourcentage d'observations exclues	SIGCON (ns)
	total(τ,τ)	traitées			
WETTZ-RICHM	40	τ	26	35	0.076
		$\dot{\tau}$	22	45	0.075
ONSAL-RICHM	36	τ	25	31	0.100
		$\dot{\tau}$	29	19	0.078
METSH-RICHM	28	τ	6	79	0.100
		$\dot{\tau}$	12	57	0.100

h- Session D'observation Du 08/07/89

Ligne de base	Nombre d'observations			Pourcentage d'observations exclues	SIGCON (ns)
	total(τ,τ)	traitées			
ONSAL-WETTZ	120	τ	100	17	0.005
		$\dot{\tau}$	108	10	0.006
ONSAL-METSH	119	τ	78	34	0.072
		$\dot{\tau}$	111	7	0.080
WETTZ-METSH	110	τ	82	25	0.080
		$\dot{\tau}$	93	15	0.089

i- Session D'observation Du 09/07/89

Ligne de base	Nombre d'observations			Pourcentage d'observations exclues	SIGCON (ns)
	total(τ,τ)	traitées			
ONSAL-WETTZ	112	τ	106	5	0.062
		$\dot{\tau}$	101	10	0.065
ONSAL-METSH	102	τ	63	38	0.065
		$\dot{\tau}$	90	12	0.084
WETTZ-METSH	97	τ	86	11	0.070
		$\dot{\tau}$	86	11	0.070

j- Session D'observation Du 11/07/89

Ligne de base	Nombre d'observations			Pourcentage d'observations exclues	SIGCON (ns)
	total(τ,τ)		traitées		
WESTF-RICHM	81	τ	52	36	0.060
		$\dot{\tau}$	67	17	0.025
WETTZ-ONSAL	81	τ	62	23	0.060
		$\dot{\tau}$	64	21	0.065
WETTZ-METSH	76	τ	66	13	0.067
		$\dot{\tau}$	66	13	0.062
ONSAL-METSH	71	τ	31	56	0.080
		$\dot{\tau}$	58	18	0.072
WESTF-WETTZ	57	τ	35	39	0.100
		$\dot{\tau}$	46	19	0.083
WESTF-ONSAL	48	τ	25	48	0.076
		$\dot{\tau}$	27	44	0.089
WESTF-METSH	42	τ	6	86	0.083
		$\dot{\tau}$	19	55	0.100
WETTZ-RICHM	41	τ	29	29	0.084
		$\dot{\tau}$	29	29	0.069
ONSAL-RICHM	34	τ	20	41	0.100
		$\dot{\tau}$	20	41	0.090
METSH-RICHM	27	τ	1	96	0.045
		$\dot{\tau}$	5	81	0.045
RICHM-MOJAV	59	τ	49	17	0.100
		$\dot{\tau}$	52	12	0.076
WESTF-MOJAV	69	τ	52	25	0.088
		$\dot{\tau}$	53	23	0.060

j- Session D'observation Du 11/07/89
(suite)

Ligne de base	Nombre d'observations			Pourcentage d'observations exclues	SIGCON (ns)
	total(τ,τ)	traitées			
WETTZ-MOJAV	33	τ	15	55	0.082
		$\dot{\tau}$	21	36	0.066
ONSAL-MOJAV	33	τ	10	70	0.096
		$\dot{\tau}$	18	45	0.102
METSH-MOJAV	22	τ	2	91	0.100
		$\dot{\tau}$	5	77	0.083

k- Session D'observation Du 30/07/89

Ligne de base	Nombre d'observations			Pourcentage d'observations exclues	SIGCON (ns)
	total(τ,τ)	traitées			
ONSAL-WETTZ	114	τ	96	16	0.061
		$\dot{\tau}$	85	25	0.049
ONSAL-TROMS	112	τ	79	29	0.075
		$\dot{\tau}$	93	17	0.048
WETTZ-TROMS	96	τ	75	22	0.072
		$\dot{\tau}$	74	23	0.043

1- Session D'observation Du 31/07/89

Ligne de base	Nombre d'observations			Pourcentage d'observations exclues	SIGCON (ns)
	total(τ,τ)	traitées			
ONSAL-RICHM	44	τ	30	32	0.071
		$\dot{\tau}$	30	32	0.066
ONSAL-MOJAV	53	τ	43	19	0.100
		$\dot{\tau}$	43	19	0.062
TROMS-RICHM	38	τ	6	84	0.100
		$\dot{\tau}$	13	66	0.100
RICHM-MOJAV	79	τ	61	23	0.100
		$\dot{\tau}$	61	23	0.100
ONSAL-TROMS	92	τ	70	24	0.075
		$\dot{\tau}$	70	24	0.071
TROMS-MOJAV	50	τ	24	52	0.077
		$\dot{\tau}$	24	52	0.046
WESTF-WETTZ	60	τ	46	23	0.100
		$\dot{\tau}$	51	15	0.100
WESTF-ONSAL	68	τ	54	21	0.100
		$\dot{\tau}$	54	21	0.100
WESTF-RICHM	80	τ	62	23	0.100
		$\dot{\tau}$	62	23	0.100
WESTF-MOJAV	86	τ	71	17	0.100
		$\dot{\tau}$	71	17	0.074
WETTZ-ONSAL	92	τ	81	12	0.069
		$\dot{\tau}$	65	29	0.054
WETTZ-RICHM	41	τ	22	46	0.100
		$\dot{\tau}$	24	41	0.100

l- Session D'observation Du 31/07/89
(suite)

Ligne de base	Nombre d'observations			Pourcentage d'observations exclues	SIGCON (ns)
	total(τ,τ)	traitées			
WETTZ-MOJAV	47	τ	35	26	0.072
		$\dot{\tau}$	40	15	0.071
WESTF-TROMS	63	τ	48	24	0.079
		$\dot{\tau}$	48	24	0.072
WETTZ-TROMS	86	τ	71	17	0.055
		$\dot{\tau}$	70	19	0.056

m- Session D'observation Du 01/08/89

Ligne de base	Nombre d'observations			Pourcentage d'observations exclues	SIGCON (ns)
	total(τ,τ)	traitées			
ONSAL-WETTZ	111	τ	106	5	0.049
		$\dot{\tau}$	103	7	0.076
ONSAL-TROMS	109	τ	82	25	0.070
		$\dot{\tau}$	98	10	0.089
WETTZ-TROMS	88	τ	71	19	0.073
		$\dot{\tau}$	77	13	0.074

n- Session D'observation Du 02/08/89

Ligne de base	Nombre d'observations			Pourcentage d'observations exclues	SIGCON (ns)
	total(τ,τ)		traitées		
ONSAL-WETTZ	116	τ	112	3	0.055
		$\dot{\tau}$	103	11	0.044
ONSAL-TROMS	92	τ	70	24	0.082
		$\dot{\tau}$	72	22	0.067
WETTZ-TROMS	85	τ	70	18	0.064
		$\dot{\tau}$	60	29	0.035

o- Session D'observation Du 18/08/89

Ligne de base	Nombre d'observations			Pourcentage d'observations exclues	SIGCON (ns)
	total(τ,τ)		traitées		
WETTZ-CARNU	68	τ	62	9	0.073
		$\dot{\tau}$	58	15	0.031

p- Session D'observation Du 19/08/89

Ligne de base	Nombre d'observations			Pourcentage d'observations exclues	SIGCON (ns)
	total(τ,τ)		traitées		
WETTZ-CARNU	78	τ	43	45	0.069
		$\dot{\tau}$	42	46	0.051

q- Session D'observation Du 20/08/89

Ligne de base	Nombre d'observations			Pourcentage d'observations exclues	SIGCON (ns)
	total(τ,τ)		traitées		
WESTF-WETTZ	71	τ	57	20	0.040
		$\dot{\tau}$	61	14	0.050
WESTF-RICHM	76	τ	57	25	0.100
		$\dot{\tau}$	69	9	0.100
WESTF-MOJAV	90	τ	73	19	0.086
		$\dot{\tau}$	82	9	0.087
WETTZ-RICHM	43	τ	33	23	0.080
		$\dot{\tau}$	39	9	0.100
WETTZ-MOJAV	52	τ	35	33	0.085
		$\dot{\tau}$	48	8	0.075
CARNU-RICHM	43	τ	5	88	0.100
		$\dot{\tau}$	17	60	0.100
CARNU-MOJAV	54	τ	17	69	0.060
		$\dot{\tau}$	26	52	0.088
RICHM-MOJAV	89	τ	80	10	0.080
		$\dot{\tau}$	80	10	0.081
WESTF-CARNU	71	τ	31	56	0.100
		$\dot{\tau}$	44	38	0.100
WETTZ-CARNU	94	τ	75	20	0.071
		$\dot{\tau}$	81	14	0.070

r- Session D'observation Du 22/08/89

Ligne de base	Nombre d'observations			Pourcentage d'observations exclues	SIGCON (ns)
	total(τ,τ)		traitées		
WETTZ-CARNU	154	τ	98	36	0.062
		$\dot{\tau}$	108	30	0.052

s- Session D'observation Du 30/08/89
(suite)

Ligne de base	Nombre d'observations			Pourcentage d'observations exclues	SIGCON (ns)
	total(τ,τ)		traitées		
WETTZ-RICHM	31	τ	25	19	0.083
		$\dot{\tau}$	26	16	0.050
BREST-RICHM	34	τ	12	65	0.020
		$\dot{\tau}$	18	47	0.044
NOTOP-RICHM	24	τ	13	46	0.071
		$\dot{\tau}$	15	38	0.110

t- Session D'observation Du 01/09/89

Ligne de base	Nombre d'observations			Pourcentage d'observations exclues	SIGCON (ns)
	total(τ,τ)		traitées		
WETTZ-NOTOP	118	τ	95	19	0.073
		$\dot{\tau}$	104	12	0.058
WETTZ-BREST	109	τ	85	22	0.100
		$\dot{\tau}$	94	14	0.073
BREST-NOTOP	110	τ	72	35	0.083
		$\dot{\tau}$	88	20	0.005

u- Session D'observation Du 02/09/89

Ligne de base	Nombre d'observations			Pourcentage d'observations exclues	SIGCON (ns)
	total(τ,τ)		traitées		
WETTZ-NOTOP	99	τ	72	27	0.053
		$\dot{\tau}$	70	29	0.040
WETTZ-BREST	101	τ	88	13	0.066
		$\dot{\tau}$	95	6	0.057
BREST-NOTOP	97	τ	66	32	0.063
		$\dot{\tau}$	69	29	0.100

v- Session D'observation Du 04/09/89

Ligne de base	Nombre d'observations			Pourcentage d'observations exclues	SIGCON (ns)
	total(τ,τ)		traitées		
WESTF-WETTZ	53	τ	48	9	0.071
		$\dot{\tau}$	49	8	0.061
WESTF-MOJAV	78	τ	51	35	0.100
		$\dot{\tau}$	67	14	0.055
WESTF-ONSAL	59	τ	49	17	0.100
		$\dot{\tau}$	56	5	0.055
WETTZ-MOJAV	48	τ	24	50	0.091
		$\dot{\tau}$	45	6	0.066
WETTZ-ONSAL	85	τ	69	18	0.085
		$\dot{\tau}$	84	1	0.071
MOJAV-ONSAL	50	τ	22	56	0.100
		$\dot{\tau}$	44	12	0.088
WETTZ-NOTOP	80	τ	54	33	0.070
		$\dot{\tau}$	61	24	0.069
WETTZ-BREST	73	τ	57	22	0.070
		$\dot{\tau}$	64	12	0.035
NOTOP-BREST	66	τ	38	42	0.075
		$\dot{\tau}$	49	26	0.055
WESTF-BREST	62	τ	33	47	0.061
		$\dot{\tau}$	49	21	0.061
BREST-MOJAV	43	τ	7	84	0.035
		$\dot{\tau}$	20	53	0.062
WESTF-NOTOP	46	τ	26	43	0.100
		$\dot{\tau}$	29	37	0.055

v- Session D'observation Du 04/09/89
(suite)

Ligne de base	Nombre d'observations			Pourcentage d'observations exclues	SIGCON (ns)
	total(τ,τ)		traitées		
NOTOP-MOJAV	36	τ	12	67	0.100
		$\dot{\tau}$	23	36	0.100
BREST-ONSAL	71	τ	43	39	0.080
		$\dot{\tau}$	63	11	0.050
NOTOP-ONSAL	69	τ	48	30	0.075
		$\dot{\tau}$	54	22	0.069

w- Session D'observation Du 12/09/89

Ligne de base	Nombre d'observations			Pourcentage d'observations exclues	SIGCON (ns)
	total(τ,τ)		traitées		
WETTZ-GRASS	112	τ	93	17	0.049
		$\dot{\tau}$	103	8	0.044
WETTZ-NOTOP	75	τ	68	9	0.046
		$\dot{\tau}$	67	11	0.075
GRASS-NOTOP	64	τ	55	14	0.082
		$\dot{\tau}$	59	8	0.062

x- Session D'observation Du 13/09/89

Ligne de base	Nombre d'observations			Pourcentage d'observations exclues	SIGCON (ns)
	total(τ,τ)	traitées			
WETTZ-GRASS	148	τ	125	16	0.075
		$\dot{\tau}$	132	11	0.060
WETTZ-NOTOP	78	τ	76	3	0.057
		$\dot{\tau}$	72	8	0.079
GRASS-NOTOP	78	τ	66	15	0.071
		$\dot{\tau}$	68	13	0.091

y- Session D'observation Du 14/09/89

Ligne de base	Nombre d'observations			Pourcentage d'observations exclues	SIGCON (ns)
	total(τ,τ)		traitées		
WESTF-WETTZ	67	τ	42	37	0.002
		$\dot{\tau}$	48	28	0.002
WESTF-RICHM	77	τ	60	22	0.075
		$\dot{\tau}$	60	22	0.085
WESTF-MOJAV	78	τ	60	23	0.071
		$\dot{\tau}$	68	23	0.071
WETTZ-RICHM	40	τ	32	45	0.080
		$\dot{\tau}$	37	8	0.085
WETTZ-MOJAV	51	τ	38	25	0.100
		$\dot{\tau}$	46	10	0.065
RICHM-MOJAV	83	τ	65	22	0.065
		$\dot{\tau}$	72	13	0.070
WETTZ-GRASS	94	τ	80	15	0.055
		$\dot{\tau}$	86	9	0.055
GRASS-RICHM	43	τ	13	70	0.065
		$\dot{\tau}$	22	49	0.070
GRASS-MOJAV	47	τ	15	68	0.025
		$\dot{\tau}$	30	36	0.060
WESTF-GRASS	67	τ	30	55	0.040
		$\dot{\tau}$	41	38	0.065

z- Session D'observation Du 16/09/89

Ligne de base	Nombre d'observations			Pourcentage d'observations exclues	SIGCON (ns)
	total(τ,τ)		traitées		
WETTZ-GRASS	115	τ	93	19	0.062
		$\dot{\tau}$	107	7	0.061

OBSERVATOIRE DE PARIS