



HAL
open science

Combinaison de techniques spatiales pour la détermination et la maintenance d'un système de référence terrestre centimétrique

Zuheir Altamimi

► **To cite this version:**

Zuheir Altamimi. Combinaison de techniques spatiales pour la détermination et la maintenance d'un système de référence terrestre centimétrique. Astrophysique [astro-ph]. Observatoire de Paris, 1990. Français. NNT: . tel-01958572

HAL Id: tel-01958572

<https://theses.hal.science/tel-01958572>

Submitted on 18 Dec 2018

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
DE L'OBSERVATOIRE DE PARIS**
(nouveau régime)

90 OBSP 0001

**EN
ASTRONOMIE FONDAMENTALE ,
MECANIQUE CELESTE ET GEODESIE**

présentée par :

Zuheir ALTAMIMI



sujet de la thèse :

**COMBINAISON DE TECHNIQUES SPATIALES
POUR LA DETERMINATION ET LA MAINTENANCE
D'UN SYSTEME DE REFERENCE TERRESTRE CENTIMETRIQUE**

Soutenue à l'Institut Géographique National , le 8 Janvier 1990 , devant le jury composé de :

M. Bernard GUINOT	Président
M. Claude BOUCHER	Directeur de thèse
M. François BARLIER	Rapporteur
Mme Martine FEISSEL	Rapporteur
M. Pascal WILLIS	Rapporteur

Remerciements

Je tiens à exprimer toute ma gratitude à Monsieur Claude BOUCHER pour ses idées originales et ses directives très instructives dont j'ai pu bénéficier. Je le remercie infiniment pour les conseils qu'il m'a toujours prodigués et qui m'ont permis de progresser dans mon travail.

Je tiens également à exprimer mes remerciements à Monsieur Bernard GUINOT qui est à l'origine des initiatives prises dans le domaine de la rotation de la Terre, domaine dans lequel s'inscrit cette thèse. Je le remercie d'avoir bien voulu présider le jury et pour ses suggestions appréciables.

Je tiens à remercier Monsieur François BARLIER pour son soutien, ses suggestions et ses encouragements.

Mes remerciements et ma reconnaissance vont également à Madame Martine FEISSEL pour son appui constant, ses suggestions très utiles et l'intérêt qu'elle a toujours manifesté à mon travail tout au long de sa réalisation.

Je tiens également à remercier Monsieur Pascal WILLIS pour avoir bien voulu lire la première version de cette thèse et pour ses conseils utiles.

Je remercie également Monsieur Gérard PETIT pour les nombreux échanges que nous avons eus.

Je tiens aussi à remercier Monsieur Chopo MA, du Goddard Space Flight Center / NASA, pour les données VLBI qu'il m'a fournies et pour les discussions intéressantes que nous avons eues.

Je remercie aussi tous mes collègues du Service de Géodésie et de Nivellement de l'Institut Géographique National pour leur soutien et leur aide.

Je remercie l'IGN de m'avoir permis la réalisation de ce travail.

Je remercie enfin ma femme pour son aide constante et sa patience tout au long de ce travail.

LEXIQUE

L'objet de ce lexique est de définir certaines notions utilisées fréquemment dans ce mémoire, afin de mettre l'accent sur leur importance.

Colocation : notion correspondant à des stations rattachées entre elles, observées par au moins deux techniques différentes.

Jeu de coordonnées : ensemble de coordonnées de stations, exprimées dans un système de référence terrestre, appartenant à un repère de référence terrestre matérialisant ce dernier.

Point : point localisé sur la surface de la Terre pouvant être un point d'un réseau géodésique (pilier, borne...) ou un point de référence d'un instrument de mesure.

Point de référence : point d'un site choisi arbitrairement, auquel les autres points du site sont rattachés.

Rattachement : vecteur tridimensionnel liant deux points (appartenant à un même site ou non), exprimé dans un système de référence terrestre géocentrique.

Repère de Référence Conventionnel (RRC): ensemble de points ou d'objets avec leurs coordonnées en fonction du temps, matérialisant (ou réalisant) le système de référence conventionnel.

Site : zone géographique contenant des points proches (distants d'une cinquantaine de kilomètres au maximum les uns des autres). Les points d'un site sont rattachés entre eux ou à un point particulier, appelé point de référence du site.

Structure physique: ensemble physique sur lequel on fera porter la définition idéale d'un système de référence: la croûte terrestre dans le cas des systèmes terrestres, le mouvement d'un objet ou la direction d'un objet considéré comme fixe dans le cas des systèmes célestes.

Système de Référence : système d'axes de coordonnées qui est construit de telle façon qu'il puisse permettre de décrire quantitativement la position et le mouvement de points appartenant à un même ensemble physique (Kovalevsky, 1985).

Système de Référence Conventionnel (SRC): modélisation mathématique des propriétés de la structure physique, nécessitant un choix arbitraire de modèles théoriques et de valeurs d'un certain nombre de paramètres.

Système de Référence Idéal (SRI) : une définition théorique d'une propriété générale que doit vérifier le système de référence.

Sigles et abréviations utilisés dans ce mémoire

BIH	: Bureau International de l'Heure
BTS	: BIH Terrestrial System
CERGA	: Centre d'Etudes et de Recherches Géodynamiques et Astrophysique / France
CIO	: Conventional International Origin
CNES	: Centre National d'Etudes Spatiales
CSR	: Centre for Space Research / USA
DGFI	: Deutsches Geodetische Forschungsintitut / RFA
DMA	: Defense Mapping Agency / USA
DOD	: Department of Defense
DSN	: Deep Space Network
ERP	: Earth Rotation Parameters
GPS	: Global Positioning System
GRGS	: Groupe de Recherches de Géodésie Spatiale / France
GSFC	: Goddard Space Flight Center / USA
IERS	: International Earth Rotation Service
IGN	: Institut Géographique National / France
IRIS	: International Radio Interferometric Surveying
ITRF	: IERS Terrestrial Reference Frame
JPL	: Jet Propulsion Laboratory / USA
LLR	: Lunar Laser Ranging
MERIT	: Mesure de la rotation de la Terre et intercomparaison des techniques
MIT	: Massachussetts Institute of Technology
NASA	: National Aeraunotics and Space Administration / USA
NGS	: National Geodetic Survey / USA
NSWC	: Naval Surface Weapons Center / USA

RRC	: Repère de Référence Conventionnel
SRC	: Système de Référence Conventionnel
SRI	: Système de référence Idéal
SLR	: Satellite Laser Ranging
SSC	: Set of Station Coordinates
UAI	: Union Astronomique Internationale
UGGI	: Union Géodésique et Géophysique Internationale
VLBI	: Very Long Baseline Interferometry
WGS	: World Geodetic System

PRESENTATION

Le but de la géodésie étant l'étude de la forme de la Terre, on est amené à choisir sur celle-ci des points pour lesquels on déterminera des positions exprimées dans des systèmes de coordonnées qu'il faut par conséquent définir. En astronomie également, des systèmes de coordonnées célestes sont établis, dans lesquels les positions des étoiles et des planètes sont exprimées.

Le développement des techniques spatiales depuis une vingtaine d'années, l'accroissement de la précision des observations et la mise en oeuvre de programmes internationaux de mesure dans les domaines de la géodésie et de la rotation de la Terre, ont nécessité la clarification de cette notion de système de coordonnées. Ainsi, des colloques internationaux, dont le premier s'est tenu à Torun en 1974 (Kolaczek et Weiffenbach, 1975), ont été entièrement consacrés à ce sujet. La notion de système de référence (plutôt que de système de coordonnées) a par conséquent pris un développement considérable, tenant compte de la relation physique qui lie d'une part le point dont on veut déterminer la position et le mouvement et d'autre part, les objets observés à cet effet. Ceci conduit à considérer à la fois un système de référence céleste et un système de référence terrestre.

Un système de référence peut être défini (Kovalevsky, 1985) comme étant un système d'axes de coordonnées qui est construit de telle façon qu'il puisse permettre de décrire quantitativement la position et le mouvement de points appartenant à un même ensemble physique.

Un système de référence doit par conséquent nous permettre une modélisation satisfaisante de divers aspects liés aux objets (Boucher, 1989) :

- cinématique : expression de la position dans l'espace et de la date dans le temps, d'où le mouvement,

- dynamique : expression des lois du mouvement (ex : translation des planètes du Système Solaire, rotation de la Terre..),

- métrologique : expression des mesures pour les diverses techniques, essentiellement fondée sur la propagation d'ondes électromagnétiques.

Les utilisateurs des systèmes de référence sont nombreux, nous citons en particulier les domaines suivants:

- topographie, photogrammétrie, cartographie (utilisant des systèmes de référence terrestres locaux, relatifs à des zones géographiques ou à des pays),

- géophysique (utilisant des systèmes terrestres locaux ou globaux, liés à la Terre entière),

- navigation (terrestre, maritime ou spatiale) civile et militaire,

- études cinématiques et dynamiques de la Terre et des objets célestes de l'Univers.

En ce qui concerne les systèmes de référence terrestres auxquels nous nous intéressons plus particulièrement dans ce travail, le concept actuel d'une Terre subissant des déformations, nous conduit à poser le problème de la réalisation et la maintenance d'un système de référence adéquat. En réalité, la dynamique de la Terre comprend la rotation de celle-ci par rapport à son centre de masse, son mouvement orbital ainsi que celui de la Lune par rapport au Soleil, et les déformations de la croûte terrestre dues aux phénomènes des marées terrestres et océaniques, des mouvements des plaques tectoniques et des mouvements géologiques locaux.

Il est tout d'abord nécessaire de définir un système de référence céleste auquel le mouvement global de la Terre peut être rapporté. C'est ensuite le rôle du système de référence terrestre de représenter, avec la meilleure approximation possible, la surface de la Terre, ou plus exactement sa croûte déformable. Nous essaierons, dans la première partie de ce mémoire, de dégager les concepts fondamentaux des systèmes de référence (célestes et terrestres), ainsi que les relations qui les lient.

Afin d'évaluer les mouvements de la croûte terrestre, il est nécessaire de disposer de moyens permettant des mesures précises sur des points bien répartis sur les plaques tectoniques principales. Il est à noter que le choix des points et leur répartition nécessite une définition précise du système de référence terrestre dont la matérialisation est concrétisée par ces mêmes points et leurs coordonnées en fonction du temps.

La détermination très précise de positions par les nouvelles techniques de géodésie spatiale permet l'estimation des déformations de la croûte terrestre. Ces techniques sont principalement l'interférométrie à très longue base (VLBI), la télémétrie laser sur la Lune (LLR) et les méthodes de positionnement à l'aide de satellites artificiels (télémétrie laser (SLR), mesure radio électrique du Global Positioning System (GPS)...). Le traitement des mesures de ces techniques est effectué par des centres d'analyse spécialisés. Ces centres produisent de manière régulière des jeux de coordonnées des stations d'observation et des séries de paramètres de rotation de la Terre. Les réseaux d'observation de ces techniques comportent

des sites communs, dans lesquels les rattachements entre stations (dites en colocation) sont connus avec une grande précision. Il faut cependant noter que chaque technique définit son propre système de référence dépendant de ses caractéristiques propres et des modèles utilisés dans le traitement des observations. La deuxième partie de ce mémoire rappelle d'une manière synthétique, le principe des techniques de mesure et les caractéristiques des systèmes de référence associés à chacune d'elles.

Grâce aux stations en colocation, des comparaisons peuvent être faites afin d'évaluer les écarts systématiques entre les différentes réalisations des systèmes de référence. On peut également combiner plusieurs réalisations en vue de l'obtention d'un système de référence terrestre global, réunissant toutes les qualités des réalisations individuelles qui le composent. Nous présenterons dans la troisième partie les différents aspects de la modélisation générale servant à la réalisation d'un système de référence terrestre, ainsi que les méthodes de comparaison et de combinaison.

Il existe plusieurs programmes mondiaux de mesures, ayant des objectifs très divers: les plus importants sont la mesure de la rotation de la Terre et l'établissement d'un système de référence terrestre conventionnel. Le projet MERIT (Mesure de la rotation de la Terre et intercomparaisons des techniques) en particulier, conduit de 1983 à 1987, a permis d'étudier en détail les écarts systématiques entre les réalisations du système de référence terrestre conventionnel issues des différentes techniques.

Le Bureau International de l'Heure (BIH) a joué un grand rôle dans la combinaison des différentes mesures de la rotation de la Terre et la mise en place de son système de référence terrestre conventionnel. La définition initiale de ce dernier en 1968, et ce jusqu'à 1984, reposait sur des observations astronomiques et, de ce fait, ne concernait que l'orientation de ces axes. L'introduction de la géodésie spatiale a permis au BIH d'étendre la définition du système terrestre aux éléments métriques manquants (origine et échelle), tout en conservant au mieux les directions conventionnelles antérieures. En effet, suite à une proposition de Guinot (1981) et d'après les conclusions du groupe COTES (CONventional TERrestrial System), au sein du projet MERIT, il a été convenu que les stations permanentes des différents programmes de mesures devraient contribuer à la réalisation et à la maintenance du système de référence terrestre conventionnel.

De 1984 à 1988, la réalisation du système terrestre du BIH (BTS pour BIH Terrestrial System) s'appuyait sur les coordonnées de stations d'observation des techniques spatiales. Sa réalisation pratique est faite par une combinaison de plusieurs

jeux de coordonnées, exprimées dans des systèmes propres aux différentes techniques, et des séries correspondantes des paramètres de la rotation de la Terre.

Depuis 1988, les activités du BIH sur la rotation de la Terre et les systèmes de référence se poursuivent dans le cadre du Service International de la Rotation Terrestre (IERS pour International Earth Rotation Service). Le Bureau Central de l'IERS est confié en association à l'Observatoire de Paris (pour la rotation de la Terre), à l'Institut Géographique National (pour le système terrestre) et au Bureau des Longitudes (pour le système céleste). Le Bureau Central a la charge de la combinaison des différentes solutions (ensembles cohérents de résultats) issues des techniques spatiales (VLBI, télémétrie laser sur la Lune et sur satellite artificiel) élaborées par les centres d'analyse spécialisés. Il en déduit les repères de référence terrestre et céleste et la série temporelle des paramètres de rotation de la Terre.

La quatrième partie de ce mémoire est consacrée aux applications dans le cadre du Bureau Central de l'IERS. Nous y exposerons la méthode d'analyse permettant les réalisations du Système de Référence Terrestre de l'IERS et les résultats obtenus. Des analyses particulières relatives à des effets liés au repère terrestre et à la rotation de la Terre y sont présentées. Des améliorations et perspectives futures sont également esquissées.

PREMIERE PARTIE

LES CONCEPTS DES SYSTEMES DE REFERENCE

I.1. INTRODUCTION

Les études cinématiques et dynamiques de la Terre et des objets célestes de l'Univers représentent la majeure partie des recherches en géodésie, en géophysique et en astronomie. Dans tous ces domaines où l'on effectue des mesures sur la surface de la Terre ou dans l'espace, on fait toujours appel à une référence à laquelle ces mesures peuvent être rapportées. Cette notion de référence est le besoin commun à toutes ces sciences concernées par des phénomènes dynamiques comme le mouvement des plaques tectoniques, les marées terrestres et les surcharges océaniques, le mouvement du pôle, la rotation de la Terre, mouvement des planètes et des satellites, etc.

La notion de référence implique la définition d'un objet par rapport auquel d'autres objets peuvent être positionnés (Boucher, 1984). Le mouvement et la position d'un point ne peuvent être décrits que par rapport à une référence. Celle-ci peut être définie par une construction mathématique d'un système de coordonnées. Cependant physiquement, il existe une relation entre le point et les objets utilisés (ou observés) afin d'obtenir les coordonnées du premier. C'est avec l'avènement des nouvelles techniques, dans les domaines de la géodésie spatiale et de la rotation de la Terre, observant de divers objets célestes (Figure 1) et l'accroissement de la précision de leurs observations qu'on est conduit à considérer avec soin cette relation points-objets observés. D'où la notion récente du repère comme matérialisation physique d'un système de référence.

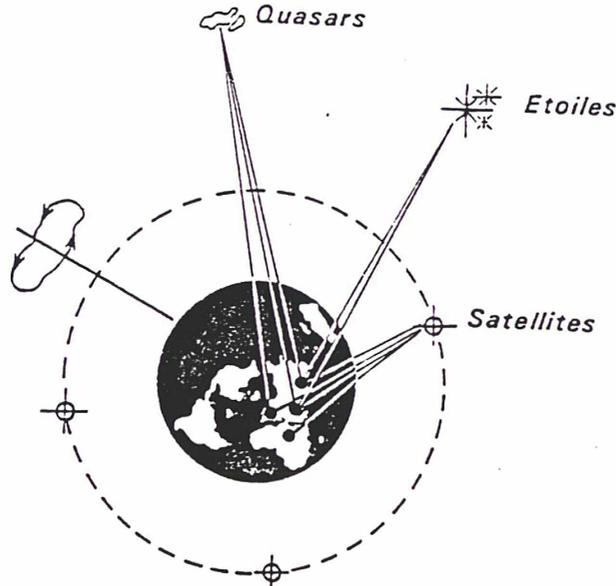


Figure 1. Objets célestes observés par les techniques spatiales (emblème de la conférence internationale de l'UAI, "The Earth Rotation & Reference Frames for Geodesy and Geodynamique" , Coolfont / USA, Octobre 1986)

Par ailleurs, la nature des techniques spatiales nécessite la définition de deux systèmes de référence. Le premier est un système céleste auquel le mouvement global (rotation et translation) de la Terre peut être rapporté. Le deuxième est un système terrestre représentant, avec la meilleure approximation possible, la surface de la Terre ou plus exactement sa croûte déformable.

Le passage du concept d'un système de référence à un repère effectivement utilisable comporte trois éléments essentiels: le Système de Référence Idéal, le Système de Référence Conventionnel et enfin le Repère de Référence Conventionnel.

Afin de décrire rigoureusement ces éléments, nous suivrons une démarche toute récente (Kovalevsky et Mueller, 1981, kovalevsky, 1985, Mueller, 1985a et Kovalevsky et al, 1989). Cette démarche comporte quatre étapes à franchir dans la construction d'un système de référence. Ces étapes sont :

- le concept,
- le choix d'une structure physique,
- la modélisation de la structure,
- la matérialisation ou la réalisation du système de référence.

L'aboutissement de cette démarche est un repère de référence accessible aux utilisateurs. Afin de rendre le repère encore plus accessible, une cinquième étape (extension du repère) est nécessaire. Ces étapes sont décrites dans les chapitres qui vont suivre. Elles seront explicitées dans le cas des systèmes terrestres et célestes respectivement, en précisant les caractéristiques intrinsèques (origine, échelle et orientation) de chaque système.

I.2. CONCEPT

Le concept est la première étape dans la construction d'un système de référence. Il sert à préciser la définition théorique de ce dernier. En effet, à l'origine de la construction d'un système de référence se trouve l'énoncé d'une propriété générale que le système de référence doit vérifier. C'est la définition théorique ou le concept de la propriété générale qu'on appellera Système de Référence Idéal (SRI).

En l'absence de déformations de la croûte terrestre, les systèmes de référence terrestres se définissent comme étant liés à la Terre solide dans son mouvement diurne. Ils sont en général géocentriques et parfaitement adaptés à la description des points sur la surface de la Terre ou dans son environnement immédiat.

La définition des systèmes de référence terrestres devient plus compliquée en présence des déformations, en particulier les déformations de longues périodes ou séculaires. En effet, ceci est dû au fait qu'un système de référence terrestre est appelé à décrire quantitativement les déformations de la croûte terrestre.

Il en découle que le concept idéal d'un système de référence terrestre est celui d'un système dans lequel la croûte terrestre ne possède que des déformations, c'est à dire ni rotation ni translation d'ensemble. Afin de répondre à cette conception, le système d'axes de Tisserand se présente comme un modèle physique adéquat pour décrire les positions et les mouvements de la croûte terrestre.

Un système d'axes de Tisserand est défini par le fait que l'énergie cinétique de la croûte terrestre c est minimale. Il est également caractérisé par une quantité de mouvement (\vec{p}) et un moment cinétique (\vec{h}) nuls :

$$\left\{ \begin{array}{l} \vec{p} = \int_c \vec{v} \, dm = \vec{0} \\ \vec{h} = \int_c \vec{x} \wedge \vec{v} \, dm = \vec{0} \end{array} \right. \quad (\text{I.1})$$

où \vec{v} est la vitesse de l'objet, dm est son élément de masse et \vec{x} est son vecteur coordonnées.

En ce qui concerne les systèmes de référence célestes, ils peuvent être définis comme étant des références spatiales dans lesquelles tout le système solaire peut être décrit (Boucher, 1986a).

La conception idéale d'un système de référence céleste est celle d'un système dans lequel les équations de mouvement ne comportent pas de terme rotationnel, (Boucher, 1986a, Mueller, 1985a). Cette conception peut s'exprimer de deux façons différentes (Kovalevsky, 1985):

- définition dynamique où, les positions ou directions des objets de référence sont des fonctions du temps déterminées à l'aide de théories dynamiques faisant appel aux lois de la mécanique. Dans cette définition, la conception idéale d'un système de référence céleste est relative à un système inertiel tel que les équations de mouvement n'ont pas de termes d'accélération d'entraînement (rotation ou translation non uniforme). Cette définition est valable dans le cadre Newtonien où le système inertiel est identifié à un système Galiléen où il n'existe pas de force inertielle (Boucher, 1986a).

- définition cinématique où, les positions ou directions des objets de référence sont considérés comme fixes. Dans cette définition, la conception idéale d'un système de référence céleste est celle d'un système défini par le fait que les objets du repère correspondant n'ont pas (ou supposés ne pas avoir) de mouvement propre.

I.3. CHOIX D'UNE STRUCTURE PHYSIQUE

La deuxième étape dans la construction d'un système de référence consiste à choisir une structure physique sur laquelle on fera porter la définition idéale et dont les mouvements dans le SRI peuvent être décrits par les théories physiques. Le choix de cette structure doit être telle que la propriété générale du système de référence idéal puisse être vérifiée avec la meilleure approximation possible.

Dans le cas des systèmes terrestres, le choix de la croûte terrestre entière en tant que structure physique est difficile en réalité, car la condition de l'équation (I.1) n'est en fait pas praticable. On peut donc faire une approximation en

remplaçant les intégrales par des sommes sur un nombre fini (n) de points représentatifs de la croûte :

$$\left\{ \begin{array}{l} \sum_1^n m_i \vec{v}_i = \vec{0} \\ \sum_1^n m_i \vec{x}_i \wedge \vec{v}_i = \vec{0} \end{array} \right. \quad (I.2)$$

De plus, les points choisis sur la surface de la Terre doivent être accompagnés de vecteurs vitesses décrivant leur mouvement.

En ce qui concerne les systèmes célestes, la structure physique peut être :

- dans une définition dynamique, le mouvement des planètes dans le système solaire, le mouvement de la Lune ou celui d'un satellite artificiel;

- dans une définition cinématique, la direction de galaxies lointaines et de quasars (radio sources extragalactiques), utilisés comme référence dans cette définition.

I.4. MODELISATION DE LA STRUCTURE PHYSIQUE

Le choix de la structure physique étant fait, la troisième étape consiste à lui associer un certain nombre de paramètres, arbitraires, permettant une modélisation mathématique des propriétés physiques de la structure. Cette modélisation, comprenant le choix des conventions, des constantes et des modèles théoriques, est appelée Système de Référence Conventionnel (SRC).

Le terme "conventionnel" est dû au fait que d'une part l'ensemble de ces choix n'est pas unique, et d'autre part les

moyens mis en oeuvre pour réaliser un système de référence sont habituellement conventionnels.

En outre, le choix d'un modèle physique adéquat à la notion de système de référence doit remplir les conditions suivantes (Boucher, 1984) :

- pouvoir modéliser le mouvement des objets, à la fois sur un plan cinématique et dynamique,

- pouvoir modéliser la propagation des ondes électromagnétiques,

- pouvoir modéliser l'ensemble des mesures utilisées sans introduire d'erreur de modèle supérieure à la précision des ces mesures.

Dans le cas des systèmes terrestres, la modélisation des déformations de la croûte terrestre est traitée en détail dans la troisième partie lorsque nous parlerons de la modélisation générale en vue de l'estimation des coordonnées des stations.

Par ailleurs, les systèmes de référence terrestres se caractérisent par :

- l'origine, géocentrique, par définition dans le cas des méthodes dynamiques (télémétrie laser sur satellite ou sur la Lune). Elle est, par contre, définie d'une manière arbitraire dans le cas du VLBI dont la modélisation n'est pas sensible au centre des masses de la Terre;

- l'échelle, dépend du choix des valeurs adoptées pour la constante géogravitationnelle GM (G est la constante gravitationnelle et M est la masse de la Terre) et la vitesse de la lumière c et de la modélisation des effets relativistes;

- l'orientation qui s'obtient généralement par rotation à partir du système céleste dans lequel les équations de mouvement sont calculées. Ceci en faisant intervenir bien entendu la rotation de la Terre: le mouvement du pôle, temps universel, nutation et précession. Elle est également définie, dans certains cas (laser satellite par exemple) en fixant les coordonnées d'une ou plusieurs stations du réseau.

En ce qui concerne les systèmes célestes, la modélisation de la structure physique dépend du type de réalisation :

- les réalisations dynamiques. Elles utilisent des modèles dynamiques de mouvements barycentrique ou géocentriques des différents objets célestes comme les planètes, la Lune et les satellites artificiels.

Dans ce type de réalisation, un système céleste conventionnel est défini par la modélisation des mouvements de ces objets ainsi que l'adoption d'un certain nombre de paramètres fondamentaux.

Dans le cas des planètes, la modélisation contient les constantes astronomiques de l'Union Astronomique Internationale (UAI), relatives à la dynamique du système solaire.

En ce qui concerne la Lune, le modèle de mouvement lunaire comprend le mouvement orbital de son centre de masse et sa rotation (libration) déterminés en tenant compte de l'ensemble des corps du système solaire.

Enfin la modélisation de mouvement d'un satellite artificiel comprend les modèles de toutes les forces agissant sur le satellite : action du champ de gravité de la Terre, de la Lune et des planètes, frottement atmosphérique, pression de radiation, etc.

Il est en outre important de noter que des approximations doivent être introduites dans les modèles, et par conséquent que ces réalisations ne définissent pas un système inertiel idéal. C'est la raison pour laquelle l'on utilise le terme quasi-inertiel pour caractériser de tels systèmes célestes.

Un système quasi-inertiel est défini comme un système dont l'origine est en mouvement arbitraire par rapport à un système inertiel, ses axes restant parallèles à ceux du système inertiel.

- les réalisations cinématiques. Elles sont obtenues par les directions des objets quasi ponctuels galactiques ou extragalactiques que l'on identifie par leur émission électromagnétique, soit dans le domaine optique soit dans le domaine radio.

Alors que l'astrométrie optique utilise les étoiles de la Galaxie, l'interferométrie à très longue base (VLBI) utilise les radio-sources galactiques (radio-étoiles), ou extragalactiques (quasars).

Dans le cas des objets extragalactiques considérés comme fixes, leurs directions définissent sans ambiguïté le système céleste conventionnel. Quant aux étoiles, on doit considérer leur mouvement propre, ce qui limite la qualité de ce type de réalisation.

Les systèmes célestes sont également caractérisés par :

- l'origine, pouvant être soit barycentrique (barycentre du système solaire) soit géocentrique (centre de masse de la Terre);
- l'échelle, barycentrique, proche de l'unité du Système International SI;
- l'orientation, qui peut être écliptique ou équatoriale.

Notons que le passage d'un système céleste au système terrestre est réalisé dans la modélisation par le choix d'une date, de paramètres et constantes du mouvement de précession-nutation et de la rotation de la Terre, voir plus loin (I.7.3).

I.4.1. Modélisation dans un cadre Newtonien

La physique Newtonienne nous offre une bonne première approximation en définissant un espace Euclidien orthogonal avec une orientation, une échelle et une origine. Dans cet espace, un système de référence sera modélisé par un repère affine (O, E) , où O , l'origine, est un point quelconque de l'espace et E est une base orthogonale vérifiant :

$$E = (\vec{E}_i)_{i=1,2,3} \quad (I.3)$$

avec $\vec{E}_i \cdot \vec{E}_j = \lambda^2 \delta_{ij}$ et $|\vec{E}_i| = \lambda > 0$

λ est l'unité de longueur des vecteurs origine de la base exprimée en mètres (SI) et δ_{ij} est le symbole de Kronecker.

- l'origine, définie par O , un point quelconque de l'espace pouvant être, par exemple proche du centre de masse de la Terre (système géocentrique), ou du barycentre du système solaire

(système barycentrique);

- l'orientation, peut être écliptique ou équatoriale, définie par des vecteurs unitaires E^* tels que :

$$E^* = (\vec{E}_i^*)_{i=1,2,3} \quad (I.4)$$

est une base orthonormée, avec $\vec{E}_i^* = \vec{E}_i / \lambda$

- l'échelle, définie par λ de manière isotrope, proche de l'unité exprimée en mètre du Système International SI. Ce problème de l'unité de longueur n'est résolu qu'à un facteur d'échelle près. Il est généralement possible d'admettre $\lambda = 1$ en considérant le possible facteur d'échelle comme un paramètre inconnu qu'il conviendra de modéliser par la suite.

I.4.2. Modélisation dans un cadre relativiste

Une théorie relativiste de la gravitation telle que la relativité générale s'impose par l'avènement des techniques spatiales faisant appel à l'Univers où les approximations du cadre Newtonien ne suffisent plus, au regard de la précision atteinte par ces nouvelles techniques.

Contrairement à la mécanique classique où un système de référence est universel, la relativité générale donne à la notion de système de référence un aspect local, valable au voisinage du point où le système est défini. Elle nous offre en effet pour un système de référence, un système de coordonnées local quasi-cartésien. Le transport du système d'un point à un autre nécessite des transformations conditionnées par la connaissance de la distribution des masses dans l'espace (Misner et al, 1973).

L'objet de la présentation qui va suivre est de mettre l'accent sur certains effets relativistes qui peuvent être modélisés et introduits comme corrections aux expressions Newtoniennes. Pour une description détaillée des systèmes de référence en relativité générale, voir par exemple (Brumberg et Kopejkin, 1989).

Dans ce cadre local, en faisant appel au formalisme

Paramétrique Post-Newtonien (PPN), on définit un espace temps muni d'une métrique g . Ceci forme une classe de systèmes de coordonnées quasi-cartésiens appelés Systèmes de Coordonnées PPN (SCP). Ceci est valable avec l'approximation de champ gravitationnel faible ainsi que de faible vitesse par rapport à la vitesse de la lumière.

Dans un (SCP), la métrique est fonction d'un ensemble de paramètres PPN notés :

$$(\beta \quad \gamma \quad \alpha_1 \quad \alpha_2 \quad \alpha_3 \quad \zeta_1 \quad \zeta_2 \quad \zeta_3 \quad \zeta_4 \quad \xi)$$

La relativité générale fournit pour tout SCP l'ensemble suivant:

$$(1 \quad 1 \quad 0 \quad 0)$$

L'élément de longueur ds s'écrit traditionnellement sous la forme:

$$ds^2 = g_{\alpha\beta} dx^\alpha dx^\beta = \sum_0^3 \sum_0^3 g_{\alpha\beta} dx^\alpha dx^\beta \quad (\text{I.5})$$

La métrique g s'exprime en général sous la forme:

$$\left\{ \begin{array}{l} g_{00} = -1 + \frac{2U}{c^2} + O_4 \\ g_{0i} = O_3 \\ g_{ij} = \left(1 + 2\gamma \frac{2U}{c^2} \right) \delta_{ij} + O_4 \end{array} \right. \quad (\text{I.6})$$

avec i et j allant de 1 à 3 et O_i sont des termes d'ordre i , c est la vitesse de la lumière et U le champs gravitationnel exprimé par:

$$U = G \int \frac{\rho d^3X'}{|X-X'|} \quad (I.7)$$

où ρ représente la densité de l'objet perturbateur (Soleil, planète...) et X' ses coordonnées.

Dans un tel système, la première coordonnée x_0 définit le temps:

$$x_0 = ct \quad (I.8)$$

et les trois autres sont les coordonnées d'espace: x_1, x_2, x_3 .

La métrique dans le système local nous permet de modéliser le système et d'effectuer les transformations nécessaires. En effet, la propagation de la lumière suit l'équation géodésique de longueur nulle: $ds = 0$. En ne gardant que les termes de premier ordre, en $(1/c^2)$, l'équation de la géodésique nulle doit donc satisfaire, après développement de l'équation (I.5):

$$0 = \left(-1 + \frac{2U}{c^2} \right) c^2 dt^2 + \left(1 + 2\gamma \frac{U}{c^2} \right) (dx^2 + dy^2 + dz^2) \quad (I.9)$$

D'autre part, il est nécessaire de faire la transformation de temps coordonné t en temps propre τ , qui est enregistré par l'horloge de la station d'observation et est défini par:

$$ds^2 = -c^2 d\tau^2 \quad (I.10)$$

ce qui donne, après développement de (I.5), et en ne gardant que le termes en $(1/c^2)$:

$$d\tau^2 = \left[1 - \left(\frac{2U}{c^2} + \frac{v^2}{c^2} \right) \right] dt^2 \quad (\text{I.11})$$

ou encore,

$$d\tau = \left[1 - \left(\frac{U}{c^2} + \frac{v^2}{2c^2} \right) \right] dt \quad (\text{I.12})$$

où v est la vitesse de l'horloge dans le système barycentrique solaire.

En posant $L = \left(\frac{U}{c^2} + \frac{v^2}{2c^2} \right)$, l'équation (I.12) devient:

$$d\tau = (1 - L) dt \quad (\text{I.13})$$

La valeur de L est estimée à environ 1.5×10^{-8} (Hellings, 1986, Boucher, 1986b).

Notons à ce propos que l'UAI a défini un temps coordonné appelé Temps Dynamique Barycentrique (TDB) qui diffère du temps propre des horloges atomiques (Temps Dynamique Terrestre, TDT) par des termes périodiques. Afin de définir le TDB, il faut multiplier le temps coordonné PPN par le facteur $(1 - L)$. La différence entre le TDB et le TDT ne comprend ensuite, selon la convention de l'UAI, que des termes périodiques.

Si, dans l'analyse des observations des techniques spatiales, le TDB est utilisé en tant que temps coordonné, il est également nécessaire d'appliquer le même facteur $(1 - L)$ aux coordonnées d'espace. Ceci semble évident par le fait que l'unité de longueur dépend de celle du temps. Plus de détails se

trouvent dans (Hellings, 1986).

Ce type de système de coordonnées représente un système barycentrique solaire caractérisé par:

- l'origine, le barycentre du système solaire;
- l'échelle, barycentrique;
- l'orientation, qui peut être écliptique ou équatoriale, qui peuvent être déduites l'une de l'autre par une rotation spatiale.

I.5. MATERIALISATION OU REALISATION DU SYSTEME

La quatrième étape de la construction d'un système de référence est de le rendre utilisable en le matérialisant. Sa matérialisation est obtenue en appliquant la modélisation ci-dessus afin d'obtenir les positions et les mouvements d'un certain nombre de points définissant ainsi le Repère de Référence Conventionnel (RRC). Celui-ci est constitué d'un ensemble de points dont les coordonnées en fonction du temps sont définies à tout instant dans le SRC.

I.5.1. Repère de référence terrestre conventionnel

Dans le cas des systèmes de référence terrestres, deux types de réalisations existent:

- les réalisations astronomiques, utilisant comme objets physiques les verticales locales en un certain nombre d'observatoires astronomiques. Pour illustrer ce type de réalisation, nous donnons comme exemple le système CIO-BIH qui était défini avant 1984 par les coordonnées astronomiques des observatoires qui participaient aux travaux du BIH et de l'IPMS. Ce type de système possède une bonne orientation qui est correctement définie et maintenue par les mesures des paramètres

de rotation de la Terre. Son échelle est implicitement prise à 1. Etant donné que les verticales locales ne sont pas concourantes, l'origine de ce système n'est donc pas correctement définie. Par conséquent, son exactitude interne ne peut être qu'approchée (au mieux un mètre).

- les réalisations tridimensionnelles, utilisant les coordonnées géométriques d'un certain nombre d'instruments de mesure. Elles proviennent des nouvelles techniques de géodésie spatiale. Celles-ci nous offrent une meilleure réalisation d'un système de référence terrestre, car l'exactitude interne d'un système terrestre réalisé par les nouvelles techniques, les plus précises, est au niveau du centimètre.

Les points qui constituent le repère terrestre peuvent être soit des points de référence localisés sur la surface de la Terre (comme les points d'un réseau géodésique ou des points instrumentaux) soit des points parcourus par un objet en mouvement, comme un satellite artificiel (éphémérides exprimées dans système terrestre géocentrique).

A une détermination donnée du repère terrestre, doit correspondre un ensemble de coordonnées de stations qu'on appellera jeu de coordonnées. Un jeu de coordonnées peut être caractérisé par:

- a) la technique de mesure utilisée, comme le VLBI, la télémétrie laser sur la Lune ou sur satellite...
- b) la modélisation appliquée par chaque centre d'analyse,
- c) le type de coordonnées (cartésiennes, géographiques, sphériques, etc.) et leurs écarts types,
- d) les vitesses (ajustées ou déduites d'un modèle) de déplacement des stations et leurs écarts types,
- e) l'époque de référence des coordonnées, ou l'époque des mesures.
- f) la matrice de corrélation des paramètres estimés.

Il existe actuellement une très grande variété de réalisations de part les techniques utilisées et les méthodes théoriques et pratiques mises en oeuvre pour des multiples finalités géophysiques et géodynamiques. Il est par conséquent d'un intérêt général d'analyser ces différentes réalisations par des comparaisons ou/et combinaisons et d'étudier également les variations temporelles des coordonnées des stations. Nous y reviendrons dans la quatrième partie en application, en utilisant des données disponibles relatives aux différentes techniques spatiales.

I.5.2. Repère de référence céleste conventionnel

En ce qui concerne les repères célestes conventionnels, ils sont définis par la détermination, soit des positions d'un ensemble d'étoiles ou de radio sources (repère cinématique), soit des éphémérides barycentriques ou géocentriques d'objets célestes (repère dynamique).

- Les repères stellaires. Ils sont définis par les directions des étoiles dont certaines ont des mouvements locaux et toutes sont sujettes à la rotation galactique. Dans les catalogues d'étoiles (comme le FK5) définissant ces repères, les positions d'étoiles sont données dans un système de coordonnées équatoriales (ascension droite et déclinaison) dont l'axe des Z est la direction du pôle céleste. Etant donné que la position du pôle céleste change en fonction du temps sous l'effet de la précession et de la nutation, les coordonnées d'étoiles sont donc fournies pour une époque donnée. Les mouvements propres, donnés également dans ces catalogues, n'étant pas parfaitement connus, ainsi que des erreurs de modèle de précession nutation limitent la précision des catalogues à quelques $0''.01$.

Notons enfin que les systèmes stellaires peuvent avoir des réalisations cinématiques pour certaines de leurs caractéristiques et dynamiques pour d'autres, raison pour laquelle on les appelle des systèmes hybrides.

- Les repères extragalactiques. Les positions relatives des sources sont déterminées par la technique d'interferométrie à très longue base (VLBI) : la déclinaison, calculée par rapport à l'axe instantané de rotation de la Terre et la différence d'ascension droite par rapport à une origine dont le choix est arbitraire.

Ces repères de référence sont définis par des catalogues de radio sources, fournissant pour une époque de référence les positions des sources en coordonnées équatoriales. La précision de ces catalogues dépend, entre autres de la configuration du réseau de radio télescopes, de la fréquence des observations et de la structure de chaque source (Charlot, 1989). Le niveau de cette précision ainsi que celle relative entre les différents catalogues est de l'ordre du millième de seconde d'arc ($0''.001$).

- Les repères dynamiques. Les repères célestes dits dynamiques sont définis par les éphémérides d'objets célestes tels que les planètes, la Lune et certains satellites artificiels.

Dans l'analyse des observations obtenues par la technique de télémétrie laser sur la Lune, les éphémérides de cette dernière peuvent être obtenues analytiquement ou numériquement (Calame, 1982).

Quant aux éphémérides des satellites artificiels, elles sont utilisées par les techniques de positionnement géodésique (Doppler sur le système TRANSIT, télémétrie laser, GPS ...etc). Le repère dynamique défini par ces éphémérides est réalisé implicitement en adoptant, pour chaque satellite, un modèle de mouvement faisant intervenir les différentes forces agissant sur le satellite (cf. II.4)

I.6. EXTENSION DU REPERE DE REFERENCE CONVENTIONNEL

Le nombre de points constituant le RRC peut ne pas être suffisant pour toutes les applications pratiques. L'extension du RRC est par conséquent nécessaire en ajoutant une cinquième étape.

Cette étape supplémentaire dans la construction d'un système de référence, permet de rendre le RRC plus accessible aux utilisateurs. L'enrichissement du repère se fait progressivement, lorsque des besoins spécifiques se font ressentir. On déterminera pour cela dans le SRC, les coordonnées de points supplémentaires qui seront de types et de précisions variés, en fonction des applications pratiques et des moyens de leur détermination.

Dans le cas d'un repère de référence terrestre donné, on souhaite parfois, pour des études spécifiques, exprimer les coordonnées de points n'appartenant pas au repère dans le système de référence terrestre matérialisé par celui-ci afin de bénéficier par exemple de son exactitude ou de sa cohérence interne. C'est le cas par exemple :

- d'études océanographiques: niveau moyen des mers, rattachement des marégraphes (voir Willis et Boucher, 1988a);
- d'orbitographie de satellites artificiels de la Terre;
- de GPS temps-fréquence.

Pour cela:

- soit on rattache les points en question (par des méthodes classiques ou spatiales) à d'autres existants dans le repère;
- soit on transforme leurs coordonnées dans le système correspondant. Les paramètres de transformation entre ce dernier et le(s) système(s) dans le(s)quel(s) sont exprimées les coordonnées des points sont nécessaire dans ce deuxième cas.

En ce qui concerne les repères célestes:

- dans le cas des repères stellaires, leur extension consiste à déterminer la position et le mouvement propre d'étoiles n'appartenant pas aux catalogues fondamentaux dans les systèmes matérialisés par ceux-ci. Le FK5 par exemple contient un nombre limité d'étoiles (5000 environs). Des catalogues secondaires sont établis contenant des milliers d'autres étoiles dans le même repère de référence conventionnel (voir Kovalevsky, 1989);

- les repères extragalactiques peuvent également être étendus à d'autres sources, secondaires et complémentaires (voir Arias, 1989). En outre, afin que les systèmes de référence célestes cinématiques matérialisés par ces repères soient utilisables en astronomie galactique, il est souhaitable de rattacher à ces systèmes les positions et les mouvements propres des étoiles qui n'ont généralement pas d'émission radio (voir Preston et Lestrade, 1985).

I.7. TRANSFORMATION GENERALE ENTRE SYSTEMES DE REFERENCE

La transformation générale d'un système de référence (1) vers un système de référence (2) s'effectue par une transformation affine tridimensionnelle, c'est à dire une similitude euclidienne dépendant de 7 paramètres, les trois composantes d'une translation, un facteur d'échelle et trois paramètres définissant une rotation dans l'espace (Boucher, 1984). La formule (I.14) ci-dessous, relie les coordonnées cartésiennes X_1, Y_1, Z_1 du système (1) aux coordonnées cartésiennes X_2, Y_2, Z_2 du système (2) :

$$\left\{ \begin{array}{l} X_2 = T + \lambda \cdot R \cdot X_1 \\ X_i = \begin{vmatrix} X_i \\ Y_i \\ Z_i \end{vmatrix}, \quad T = \begin{vmatrix} T_x \\ T_y \\ T_z \end{vmatrix} \\ \lambda > 0 \text{ et } R: \text{ matrice de rotation} \end{array} \right. \quad (\text{I.14})$$

Dans cette expression, il est implicitement admis que tous les systèmes de référence ont la même orientation, ce qui peut être trivialement imposé, moyennant des changements d'axes élémentaires. $\lambda < 0$ correspond à un trièdre rectangulaire orthonormé non direct.

Outre les coordonnées cartésiennes, d'autres coordonnées (géographiques, en projection, etc.) peuvent être choisies en fonction des besoins des utilisateurs. Le passage d'un système de coordonnées x_1 , associé à un système de référence (1), au système de coordonnées x_2 , associé à un système de référence (2), se fait de la manière suivante :

$$x_1 \xrightarrow{\text{I}} X_1 \xrightarrow{\text{II}} X_2 \xrightarrow{\text{III}} x_2$$

L'étape I transforme le système de coordonnées x_1 dans le système cartésien correspondant X_1 . L'étape II, c'est une transformation du type (I.14), et l'étape III transforme les coordonnées cartésiennes X_2 en coordonnées finales x_2 .

Dans le cas particulier où x_1 et x_2 sont de même nature, il est possible de dériver des expressions différentielles, dites de Molodensky dans le cas de coordonnées géographiques par exemple (voir Boucher, 1979a).

I.7.1. Transformation entre systèmes terrestres.

Dans le cas de systèmes terrestres, ils sont suffisamment proches les uns des autres: les origines sont près du centre de masse de la Terre, les axes sont presque parallèles, et les échelles sont proches de l'unité. En d'autres termes, les différences d'origines, d'échelles et d'orientations sont des quantités suffisamment petites pour nous permettre, avec une précision centimétrique, de linéariser la formule (I.14) de la façon suivante :

$$X_2 = X_1 + T + Q.X_1 \quad (\text{I.15})$$

avec,

$$\lambda = 1 + D$$

$$R = I + \begin{pmatrix} 0 & -R_3 & R_2 \\ R_3 & 0 & -R_1 \\ -R_2 & R_1 & 0 \end{pmatrix} + O_2$$

$$Q = \begin{pmatrix} D & -R_3 & R_2 \\ R_3 & D & -R_1 \\ -R_2 & R_1 & D \end{pmatrix}$$

où O_2 sont des termes de deuxième ordre ($\approx 10^{-10}$, soit $2 \cdot 10^{-5}$ ou 0.6 mm à la surface de la Terre), (voir Boucher, 1988a).

La détermination des 7 paramètres (T_x , T_y , T_z , D , R_1 , R_2 , R_3) entre les deux systèmes terrestres, se fait par comparaison de deux jeux de coordonnées, calculés dans les deux systèmes, et ayant des stations en colocation (stations rattachées entre elles et observées par au moins deux techniques, voir III.4).

D'une manière générale, les coordonnées et les paramètres de transformation dépendent du temps. Ainsi, afin d'effectuer une transformation complète d'un système vers un autre, il faut par conséquent tenir compte des variations temporelles des coordonnées et des paramètres de transformation (voir la troisième partie, III.3.2).

I.7.2. Transformation entre systèmes célestes.

En ce qui concerne les systèmes célestes, le passage direct d'un système à un autre est beaucoup plus compliqué que celui d'un système terrestre à un autre. Ceci est dû au fait que, contrairement aux systèmes terrestres dont la matérialisation est réalisée par les mêmes objets (stations terrestres, moyennant les rattachements entre elles), les différents systèmes célestes existants sont matérialisés en général par des objets célestes complètement distincts. Il existe néanmoins quelques méthodes permettant de relier entre elles les différentes réalisations de systèmes célestes (Dickey, 1989), par exemple:

- l'astrométrie spatiale ou terrestre, reliant un système stellaire à un système extragalactique (observations des radio étoiles par VLBI et astrométrie optique),

- le VLBI différentiel, reliant un système stellaire ou le système planétaire à un système extragalactique (observations simultanées de planètes et de quasars),

- la méthode d'occultation des étoiles par la Lune, reliant un système dynamique à un système stellaire.

Il existe en revanche une méthode indirecte (Kovalevsky, 1980) qui permet de relier deux systèmes célestes en utilisant les mesures de la rotation de la Terre. Elle se décompose en deux étapes:

- en comparant les deux jeux de coordonnées des stations en colocation relatifs aux deux systèmes terrestres correspondants, on obtient les trois rotations R_1 , R_2 , R_3 ;

- ces trois rotations sont ensuite introduites en tant que biais dans les séries de paramètres de rotation de la Terre. Les différences entre les deux séries sur une même période de temps permettent d'obtenir les trois rotations (A_1 , A_2 , A_3) entre les deux systèmes célestes en utilisant la relation (Mueller et al, 1982):

$$\left\{ \begin{array}{l} - (y_{p_1} - y_{p_2}) = - R_1 + A_1 \cos \theta + A_2 \sin \theta \\ - (x_{p_1} - x_{p_2}) = - R_2 - A_1 \sin \theta + A_2 \cos \theta \\ f. (UT1_1 - UT1_2) = - R_3 + A_3 \end{array} \right. \quad (I.16)$$

où x_p et y_p sont les coordonnées du pôle, θ est le temps sidéral de Greenwich, UT1 est le temps universel et f est le facteur de conversion de ce dernier en temps sidéral.

I.7.3. Passage du système céleste au système terrestre.

Le passage du système céleste vers le système terrestre est réalisé en deux étapes:

- construire, à partir du système barycentrique, b , un système céleste équatorial géocentrique, e . Pour ce faire, on peut suivre la procédure suivante (Boucher, 1985), qui consiste à :

- a) établir le système barycentrique avec la métrique g complète;
- b) résoudre les équations de mouvement du centre de masse de la Terre (C), avec une métrique g^* excluant le potentiel gravitationnel terrestre;
- c) construire autour de (C), un système normal de Fermi, qui nécessite la formule de transformation suivante:

$$X = X_C(t) + (1 - \gamma \frac{U_{*,C}^*}{c^2})x + \frac{V_C \cdot x}{2c^2} V_C - \frac{1}{c^2} Q(x) + \delta X + O_4 x \quad (I.17a)$$

$$T = T_C(t) + \frac{V_C \cdot x}{c^2} [1 + (2 + \gamma) \frac{U_{*,C}^*}{c^2} + \frac{V_C^2}{2c^2}] + O_3 \frac{x}{c} + \frac{1}{c^4} Q \cdot V_C x + \delta T \quad (I.17b)$$

avec,

- (cT, X) : coordonnées dans le système b
 (ct, x) : coordonnées dans le système e
 (T_C, X_C) : coordonnées du centre de masse de la Terre, C, dans le système b
 V_C : vitesse de C dans le système b
 U_* : potentiel gravitationnel dans la métrique g^* (sans la contribution de la Terre).
 Q : effet de la précession géodésique
 $(\delta X, \delta T)$: corrections de courbure de géodésique

d) définir enfin le système céleste équatorial géocentrique en considérant la métrique g complète et tenant compte de la contribution des marées terrestres. Dans ce système, la métrique g aura comme expression:

$$\left\{ \begin{array}{l} g_{00} = -1 + \frac{2U_{\otimes}^e}{c^2} + \frac{\theta_{00}}{c^3} + O_4 \\ g_{0i} = O_3 \\ g_{ij} = \left(1 + 2\gamma \frac{2U_{\otimes}^e}{c^2} \right) \delta_{ij} + \frac{\theta_{ij}}{c^2} + O_4 \end{array} \right. \quad (I.18)$$

avec

$$U_{\otimes}^e = G \int_{\otimes} \frac{\rho' d^3x'}{|x-x'|} \quad (I.19)$$

où θ est la contribution des marées terrestres.

- on passe ensuite au système terrestre géocentrique par une série de trois rotations; précession, nutation et rotation de la Terre (Mueller, 1969):

$$X_T = S.N.P.X_I \quad (I.20)$$

P, N et S sont les matrices de précession, de nutation et de rotation de la Terre respectivement.

Les formules matricielles des rotations sont, par convention, les suivantes:

$$R_x(a) = \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & C & S \\ 0 & -S & C \end{vmatrix}, \quad R_y(a) = \begin{vmatrix} C & 0 & -S \\ 0 & 1 & 0 \\ S & 0 & C \end{vmatrix}, \quad R_z(a) = \begin{vmatrix} C & S & 0 \\ -S & C & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{vmatrix}$$

avec $C = \cos(a)$, $S = \sin(a)$ et a est l'argument de la rotation considérée.

La matrice de précession P permet la transformation du système équatorial moyen à la date t_0 en système équatorial moyen à une date t . Elle est sous la forme :

$$P = R_z(\zeta_a)R_y(-\theta_a)R_z(z_a) \quad (\text{I.21})$$

où ζ_a , θ_a et z_a sont les arguments standards de précession.

La matrice de nutation N permet la transformation du système équatorial moyen à la date t au système équatorial vrai de la même date. Elle est donnée par:

$$N = R_x(-\epsilon_0)R_z(-\Delta\psi)R_x(\epsilon_0 + \Delta\epsilon) \quad (\text{I.22})$$

avec ϵ_0 l'obliquité moyenne et $\Delta\psi$ et $\Delta\epsilon$ les angles de nutation qui peuvent être calculés à partir des séries de nutation de l'UAI 1980 par exemple.

Enfin, la matrice de rotation de la Terre S est composée de:

$$S = R_y(-xp)R_x(-yp)R_z(\theta) \quad (\text{I.23})$$

où xp et yp sont les coordonnées du pôle et θ est le temps sidéral de Greenwich obtenu par:

$$\theta = (\text{GMST})_0 + f \cdot \text{UT1} + \text{Eq.E} \quad (\text{I.24})$$

où $(\text{GMST})_0$ est l'heure sidérale de Greenwich à 0^{h} UT1 (temps universel), f est le facteur de conversion du temps universel moyen en temps sidéral et Eq.E est l'"équation des équinoxes" donnée par:

$$\text{Eq.E} = \Delta\psi \cdot \cos\epsilon \quad (\text{I.25})$$

$\Delta\psi$ correspond à la nutation en longitude et ϵ est l'obliquité vraie.

DEUXIEME PARTIE

**LES TECHNIQUES DE MESURE ET LES SYSTEMES DE
REFERENCE ASSOCIES**

Rappelons que le principe des techniques de la géodésie spatiale nécessite la définition de deux systèmes de référence : céleste et terrestre. L'analyse de données et la détermination, au sein de chaque technique, des deux repères correspondants font appel à des modèles, des constantes et des conventions dont le choix est arbitraire.

Afin de comparer de la manière la plus exacte possible les résultats des différentes techniques, il est souhaitable que les centres d'analyse utilisent les mêmes modèles ou des modèles équivalants. Des recommandations ont été formulées dans ce sens par le groupe de travail sur la rotation de la Terre (groupe conjoint de l'UAI et de l'UGGI) et ont fait l'objet de l'élaboration des MERIT Standards (Melbourne et al, 1983), actuellement les Standards IERS (McCarthy et al, 1989).

Nous allons, dans cette deuxième partie, rappeler d'une manière synthétique, les techniques principales en mettant l'accent sur les caractéristiques des systèmes de référence associés à chacune d'elles. Nous les présentons dans l'ordre décroissant de l'éloignement des objets qu'elles observent. Une table récapitulative est fournie à la fin de cette partie, donnant le principe, l'exactitude de positionnement et la définition de l'origine, de l'échelle et de l'orientation du système de référence terrestre associé à chacune d'elles.

II.1. L'INTERFEROMETRIE A TRES LONGUE BASE (VLBI)

La technique d'interférométrie à très longue base (VLBI) repose sur la réception simultanée, par au moins deux antennes (radio-télescopes), des émissions d'une même radio source dans les mêmes bandes de fréquence radio. Les signaux reçus par les antennes sont enregistrés sur bandes magnétiques, lesquelles sont ensuite envoyées au corrélateur VLBI. Ce dernier détermine, pour chaque paire d'antennes la fréquence des franges et le décalage (retard) entre les dates d'arrivée d'un même front d'onde aux deux antennes.

Une variante du VLBI est la technique d'interférométrie connectée où les signaux reçus par les deux antennes sont transmis au corrélateur en temps réel (par câbles). Ceci suppose évidemment des lignes de bases plus courtes qu'en VLBI où la transmission des signaux au corrélateur en temps réel est exclue.

La Figure 2 schématise la géométrie de la technique VLBI: le vecteur \vec{B} représente la ligne de base entre les deux antennes, et \vec{S} est le vecteur unité dans la direction de la radio source. Le

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

$$\tau(t) = \frac{\vec{B} \cdot \vec{S}}{c} + \Delta\tau(t) \quad (\text{II.1})$$

où c est la vitesse de la lumière et $\Delta\tau$ est une somme de termes correctifs concernant le décalage des horloges, la propagation dans la traversée de l'ionosphère et de la troposphère, des corrections relativistes, structure de source, etc.

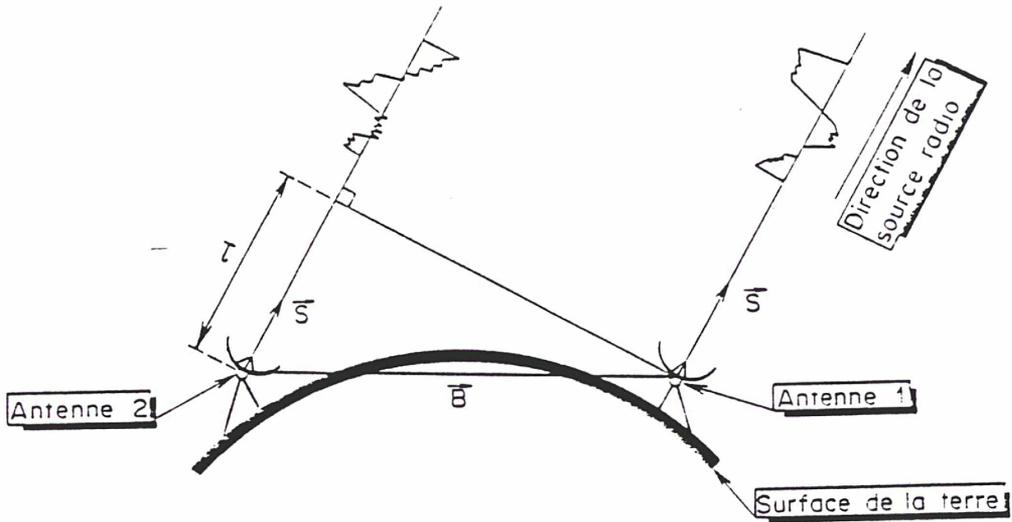


Figure 2. Géométrie du VLBI

La quantité τ est en fait l'information qui nous permet de faire le lien entre les deux repères céleste et terrestre. En effet, l'équation (II.1) peut s'écrire sous la forme approchée (Melbourne, 1980) :

$$c \cdot \tau(t) = B_z \cdot \sin\delta + B_e \cdot \cos\delta \cdot \cos(\alpha - \theta - \phi) \quad (\text{II.2})$$

avec $B_e = (B_x^2 + B_y^2)^{1/2}$ et $\text{tg}\phi = B_y/B_x$

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 et B_z sont les composantes équatoriales de la ligne de base dans un repère terrestre.

Notons que l'exactitude de positionnement de cette technique est au niveau du centimètre.

Le repère céleste est défini par un catalogue de radio sources contenant les coordonnées équatoriales (ascension droite et déclinaison) des sources observées. Cependant, dans l'estimation par moindres carrés, il y a un degré de liberté relatif à la définition de l'origine des ascensions droites. La manière de fixer cette origine n'est pas unique.

Quant au repère terrestre, il est défini de la façon suivante:

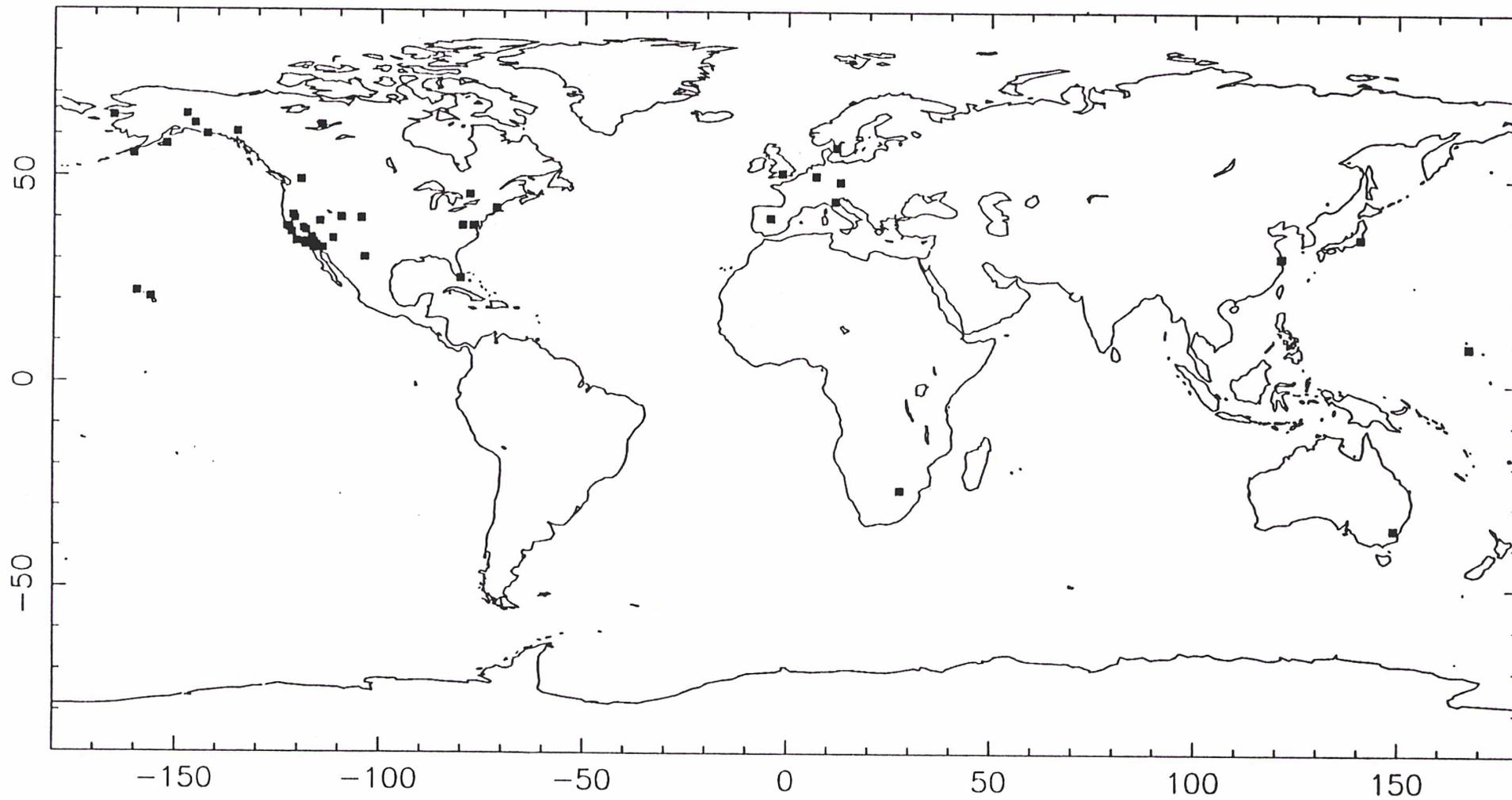
- l'origine est arbitrairement définie par l'adoption des coordonnées d'une station qu'on fixe dans l'ajustement global. Une meilleure connaissance de ces coordonnées permet la définition d'un repère géocentrique à quelques mètres près,

- l'échelle est déterminée par le choix de la valeur de la vitesse de la lumière c et l'application ou non de modélisation des effets relativistes. Ces effets correspondent aux différences de coordonnées (de l'ordre de 1.5×10^8) suivant qu'elles sont exprimées dans un système barycentrique ou dans un système géocentrique,

- l'orientation est généralement obtenue par l'adoption, à une époque de référence, de valeurs fixées des paramètres de rotation de la Terre.

Un réseau opérationnel d'une trentaine d'antennes fixes participe régulièrement aux différents programmes de mesures. Il existe d'autre part des antennes mobiles utilisées à des fins précises, comme l'étude de la déformation de l'écorce terrestre par exemple (Figure 3). On note la concentration de ces stations dans l'hémisphère Nord, particulièrement en Amérique du Nord et en Europe de l'ouest.

FIGURE 3 – REPARTITION DES STATIONS VLBI



Plusieurs organismes sont équipés de matériel permettant l'analyse des données VLBI:

- Le National Geodetic Survey (NGS), USA, conduit le projet IRIS/POLARIS de mesure de la rotation de la Terre. Les mesures, collectées depuis 1980, sont régulièrement traitées et font l'objet d'un ajustement annuel.

Sont estimés dans l'ajustement global par moindres carrés, les paramètres de rotation de la Terre, les coordonnées des sources et des radio télescopes et les paramètres auxiliaires.

Les observations sont traitées par des modèles qui sont généralement en accord avec les recommandations des Standards IERS, incluant le modèle de nutation de l'UAI 1980, et les modèles de corrections de marées terrestres et de surcharges océaniques.

La solution la plus récente, NGS 89 R 01, a les caractéristiques suivantes (Carter et al, 1989):

- le repère céleste est défini par un catalogue de 50 radio sources. L'origine de l'ascension droite est définie (comme dans les solutions antérieures, depuis 1987) en contraignant à zéro, la somme des différences entre les valeurs observées et calculées des ascensions droites de neuf radio sources (Carter et al 1987).

- le repère terrestre est définie par les coordonnées de 21 stations à la date du 1 janvier 1984, utilisant le modèle de mouvement de palques AMO-2 de (Minster et Jordan, 1978). Ce repère est caractérisé par:

- l'origine, définie par les coordonnées du radio télescope 18 m de Westford, fixées à des valeurs conventionnelles. Depuis 1986, cette origine est rendue plus géocentrique en adoptant celle du BTS, (Carter et al, 1987),

- l'échelle, définie par la valeur de la vitesse de la lumière et des corrections relativistes sur la propagation en utilisant le "modèle de Shapiro",

- l'orientation, obtenue en fixant les paramètres de rotation de la Terre du 25 octobre 1985 à celles du BIH.

- Le Goddard Space Flight Center (GSFC/NASA), USA, qui analyse les données VLBI dans le cadre du projet Crustal Dynamics. Les observations traitées sont issues des programmes de mesures Crustal Dynamics depuis 1976, et IRIS/POLARIS depuis 1980.

Dans l'ajustement global, par moindres carrés, les coordonnées des radio sources et des stations sont estimées en tant que paramètres globaux, tandis que les paramètres de rotation de la Terre et de nutation sont estimés pour chaque expérience.

Les modèles et constantes utilisés dans les traitements sont ceux des Standards IERS. L'analyse est faite dans le système J2000.0 avec les séries de nutation de l'UAI 1980.

La solution GSFC 89 R 01 est caractérisée par (Ma et al, 1989):

- le repère céleste est défini par les coordonnées de 65 radio sources. L'ascension droite de la source 3C273B est fixée à une valeur conventionnelle.

- le repère terrestre est défini par les coordonnées de 31 stations à la date du 1 janvier 1989, utilisant le modèle de mouvement de plaques AMO-2 de Minster et Jordan. Il est également caractérisé par:

- l'origine, définie par l'adoption des valeurs conventionnelles des coordonnées du radio télescope 18 m de Westford,

- l'échelle, barycentrique (pas de modélisation des effets relativistes),

- l'orientation, obtenue en adoptant les paramètres de rotation de la Terre du BIH et les valeurs des modèles de precession et de nutation des Standards IERS à la date du 6 novembre 1986.

- Le Jet Propulsion Laboratory (JPL), USA, responsable du réseau DSN (Deep Space Network) de la NASA. Le réseau DSN contient 3 ensembles d'antennes VLBI comprenant chacun 3 antennes (26, 34 et 70 mètres) en Californie, Espagne et Australie. Un projet permanent, utilisant le réseau DSN, connu sous le nom de TEMPO (Time and Earth Motion Precession Observations), est conduit par cet organisme et est consacré à la mesure de la rotation de la Terre. Des mesures de lignes de base sont régulièrement réalisées depuis 1978 entre l'Espagne et la Californie, et entre

l'Australie et la Californie.

La solution la plus récente, JPL 89 R 02, est caractérisée par (Steppe et al, 1989):

- le repère céleste est défini par les coordonnées de 189 radio sources. Les valeurs de l'ascension droite et de la déclinaison de la source OJ 287 et de la déclinaison de CTD 20 ont été fixées à celles données dans le repère céleste IERS 88 C 01 (Arias et al, 1988).

- le repère terrestre est défini par les coordonnées de 10 stations à la date du 1 janvier 1985, utilisant le modèle de mouvement de plaques AMO-2 de Minster et Jordan. Il est également caractérisé par:

- l'origine, définie par l'adoption des valeurs conventionnelles des coordonnées de l'antenne DSS-14 de Goldstone au 1 janvier 1985,

- l'échelle, barycentrique,

- l'orientation, définie en adoptant comme valeurs initiales des paramètres de rotation de la Terre celles du BIH pour 1986.

II.2. L'ASTROMETRIE OPTIQUE

Cette technique, la plus ancienne des techniques spatiales, repose sur les observations d'un ensemble fixe d'étoiles, permettant de déterminer le temps universel local UT0 et la latitude de la station d'observation. Ces mesures de temps et de latitudes sont rapportées aux verticales locales dont les directions subissent des variations (dont il faut tenir compte) dues aux marées terrestres et océaniques.

Une mesure de temps UT0, par rapport au temps de référence (UTC, temps universel coordonné), donne pour une station i de coordonnées L_i et F_i , la relation d'observation (II.3), faisant intervenir les coordonnées du pôle x , y et le Temps Universel UT1.

La relation d'observation (II.4) relative à la latitude observée φ_i fait intervenir les coordonnées du pôle uniquement.

$$(UT0_i - UTC)(t) = (UT1 - UTC)(t) + (x(t) \cdot \sin L_i + y(t) \cdot \cos L_i) \operatorname{tg} F_i \quad (\text{II.3})$$

$$\varphi_i(t) - F_i = x(t) \cdot \cos L_i - y(t) \cdot \sin L_i \quad (\text{II.4})$$

Le repère de référence céleste est matérialisé par un catalogue d'étoiles, comme le FK4 et le FK5 fournissant les positions d'étoiles, pour une époque donnée, en coordonnées équatoriales.

Quant au repère terrestre, il est implicitement défini par les coordonnées astronomiques des stations d'observation.

La définition, en 1968, du système du BIH reposait sur cette technique. C'est par rapport à ce système que les valeurs UT1-UTC, et les coordonnées du pôle, publiées dans les rapports du BIH de 1967 à 1987, ont été calculées.

Le repère terrestre correspondant a été défini par l'adoption des coordonnées de quelques dizaines de stations astronomiques, ajustées sur une période d'une année: 1966.5 à 1967.5. L'ajustement des coordonnées a été réalisé de manière à former un système cohérent avec les séries de paramètres de rotation de la Terre, calculées sur l'année de référence, à partir de mesures de temps et de latitudes des stations. Elles sont rapportées à l'Origine Conventionnelle Internationale (CIO) relative aux coordonnées du pôle, et à l'origine des longitudes, le point de l'équateur de (CIO) (Feissel, 1980).

Ces valeurs sont publiées dans les circulaires et rapports annuels du BIH. Elles sont malheureusement affectées d'erreurs systématiques dues aux:

- variations dans les directions des verticales locales,
- réfraction atmosphérique,
- erreurs de catalogues d'étoiles: nutation, mouvement propre.

L'avènement des techniques spatiales a conduit le BIH à introduire progressivement leur données dès 1973 (Feissel, 1982), et à corriger ses résultats d'un terme saisonnier. D'autre part,

La relation d'observation lie la quantité mesurée, D (voir la Figure 4) qui est le temps de propagation aller-retour de l'impulsion laser, les coordonnées sphériques géocentriques (r, ϕ, λ) d'une station terrestre, les coordonnées équatoriales (α, δ) et l'angle horaire H d'un réflecteur lunaire et des termes relatifs à la rotation de la Terre. La relation d'observation peut s'écrire sous la forme (d'après Calame, 1983):

$$\begin{aligned} D - D_0 = & 2\Delta \cdot r/D [(\cos \phi \cos \delta \sin H) \partial(\text{UT1-UTC}) - \lambda - \alpha] \\ & + \cos \phi \cos H \partial A + \sin \phi \partial B \\ & + (\cos \phi \cos H \sin \delta - \sin \phi \cos \delta) \partial C + \partial D \end{aligned} \quad (\text{II.5})$$

La notation $\partial..$ représente des corrections à apporter aux valeurs estimées r, ϕ, Δ, δ . Les quatre inconnues $\partial A, \partial B, \partial C, \partial D$ sont calculées en même temps que les paramètres de rotation de la Terre tenant compte des incertitudes de différents mouvements : mouvement orbital, libration, etc.

L'exactitude de positionnement de cette technique est de l'ordre de quelques centimètres.

Le repère céleste est défini par l'adoption des éphémérides lunaires et planétaires. Il existe principalement deux méthodes de calcul d'éphémérides: la méthode semi-analytique et la méthode par intégration numérique. Dans la première méthode, les équations du mouvement sont développées localement autour de valeurs nominales des paramètres de l'orbite. Cette méthode produit à court terme des erreurs assez importantes. En ce qui concerne la méthode par intégration numérique, plus stable que la première et la plus utilisée, le mouvement des planètes, du Soleil et de la Lune est décrit par des équations différentielles qui sont intégrées pas à pas à partir de conditions initiales.

Le repère terrestre est défini par:

- l'origine, géocentrique, du fait de la modélisation des éphémérides géocentriques,

- l'échelle, définie par la valeur adoptée de la vitesse de la lumière et l'application ou non de modélisation des effets relativistes,

- l'orientation, obtenue en contraignant à des valeurs a priori les paramètres de rotation de la Terre à une époque de référence.

Trois observatoires terrestres sont actuellement en fonctionnement opérationnel: à McDonald (USA), à Haleakala (Maui, USA) et à Grasse (France). La première station de l'observatoire

de McDonald avait fonctionné de 1969 à 1985 et la deuxième a été déplacée, en 1988, de quelques centaines de mètres de son emplacement initial.

Quelques centres d'analyse traitent régulièrement les données de cette technique, en particulier:

- Le Jet Propulsion Laboratory (JPL), analyse les données de télémétrie laser sur les quatre réflecteurs lunaire à partir des stations mentionnées plus haut.

L'ajustement global est réalisé afin d'obtenir les coordonnées géocentriques des stations, les paramètres de l'orbite de la Lune, et les positions sur la Lune des quatre réflecteurs.

La solution la plus récente, JPL 89 M 01, est caractérisée par (Newhall et al, 1989):

- le repère céleste est défini par les éphémérides planétaires et lunaires DE121/LE65 correspondants à l'équateur et l'équinoxe de 1950.0 dont l'origine coïncide avec celle du FK5.

- le repère terrestre correspondant est défini par les coordonnées de 5 stations à la date du 1 janvier 1988, utilisant le modèle de mouvement de plaque AMO-2 de Minster et Jordan. Ce repère est également caractérisé par:

- l'origine, géocentrique par définition,

- l'échelle, définie dans le système solaire barycentrique

- l'orientation, définie par les séries de paramètres de rotation de la Terre de l'IERS.

- Le Centre d'Etudes et Recherches de Géodynamique et Astrométrie (CERGA), Grasse, France, qui participe à l'analyse des données Laser Lune dans le cadre du programme EROLD et actuellement en tant que centre d'analyse dans le cadre du Service International de la Rotation Terrestre (IERS).

La solution la plus récente, CERGA 89 R 01, est caractérisée par (Veillet et Pham-Van, 1989):

- le repère céleste est celui de 1950.0 en utilisant les éphémérides du système solaire, identiques à celles du JPL (DE121/LE65), mais en les modifiant afin d'ajuster les éphémérides lunaires à partir des observations.

- le repère terrestre correspondant est défini de la même manière que celui du JPL, contenant les coordonnées de 4 stations. Aucun modèle de mouvement de plaques n'a été utilisé.

II.4. LES METHODES DE POSITIONNEMENT PAR SATELLITES ARTIFICIELS

L'utilisation des satellites artificiels pour le positionnement géodésique est aujourd'hui un outil indispensable au regard des besoins actuels, tant sur le plan de la mise en oeuvre que sur le plan de la précision de positionnement. L'amélioration de cette dernière est toujours l'un des objectifs prioritaires de ces méthodes. La précision est en effet passée de quelques mètres avec les premiers satellites à quelques centimètres.

La contribution de ces techniques aux réalisations des systèmes de référence est d'une grande importance, car elles nous permettent la réalisation d'un système géocentrique avec une précision centimétrique.

La modélisation théorique du mouvement d'un satellite artificiel est généralement faite dans un repère inertiel (dans lequel les forces sont plus faciles à modéliser) dont l'un des axes est l'axe de la rotation terrestre. Sa détermination pratique est par ailleurs obtenue par les observations à partir de stations terrestres dont les coordonnées sont exprimées dans un repère lié à la Terre.

Dans une première approche, le mouvement d'un satellite est réduit au mouvement de son centre de gravité S attiré par un point fixe O (centre de gravité de la Terre assimilée à une sphère solide) et produisant une accélération exprimée dans le repère inertiel par:

$$\frac{d^2\vec{r}}{dt^2} = - \frac{GM}{r^3} \vec{r} \quad (\text{II.6})$$

avec $\vec{r} = \vec{OS}$ et GM est la constante géogravitationnelle.

Le cas le plus général du mouvement est celui correspondant à une trajectoire elliptique (mouvement képlérien elliptique). La géométrie de l'ellipse est définie par deux paramètres indépendants, soient:

- a , demi grand axe,
- e , excentricité.

Nous n'expliciterons pas toutes les équations du mouvement. Pour une description détaillée, voir par exemple (Boucher, 1981, Levallois et Kovalevsky, 1971, Reigber, 1989). Nous nous contenterons d'exposer les expressions des coordonnées de S dans un repère orbital (O, U_1, U_2, U_3), ainsi que le passage de ce dernier au repère inertiel (O, X, Y, Z).

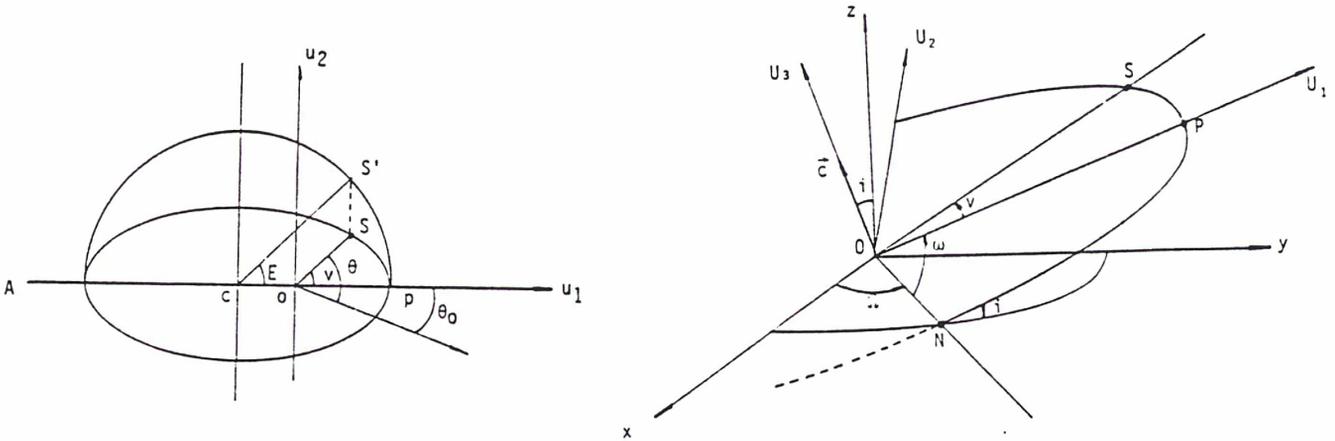


Figure 5. Eléments d'orbite d'un satellite artificiel de la Terre

La position de S sur l'ellipse de centre C peut être définie par (voir la Figure 5):

- l'anomalie vraie, $v = \theta - \theta_0$ où θ_0 est la direction de l'axe des foyers,
- l'anomalie excentrique, E.

La relation entre v et E est donnée par :

$$\operatorname{tg} v/2 = \left(\frac{1+e}{1-e} \right)^{1/2} \operatorname{tg} E/2 \quad (\text{II.7})$$

La position de S dans le repère orbital peut s'exprimer par:

$$\begin{cases} U_1 = r \cos v = a (\cos E - e) \\ U_2 = r \sin v = a \sqrt{1 - e^2} \sin E \\ U_3 = 0 \end{cases} \quad (\text{II.8})$$

Généralement, le passage au repère inertiel fait intervenir 3 constantes, par exemple les angles d'Euler:

- Ω est l'ascension droite du noeud ascendant, N (intersection de la trajectoire elliptique avec le plan OXY),
- i est l'inclinaison,
- ω est l'argument du périhélie.

La transformation du repère orbital vers le repère inertiel est sous la forme:

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} = R_3(-\Omega) R_1(-i) R_3(-\omega) \begin{pmatrix} U_1 \\ U_2 \\ U_3 \end{pmatrix} \quad (\text{II.9})$$

R_i désigne une rotation autour de l'axe i .

En considérant (II.8), la vitesse de S dans le repère orbital est donnée par:



$$\begin{cases} \dot{U}_1 = -a \sin E \cdot \dot{E} \\ \dot{U}_2 = a \sqrt{1 - e^2} \cos E \cdot \dot{E} \\ \dot{U}_3 = 0 \end{cases} \quad (\text{II.10})$$

En considérant l'équation de Képler :

$$E - e \sin E = n(t - t_p) \quad (\text{II.11})$$

où n est le moyen mouvement et t_p est une constante d'intégration correspondant à l'époque du périhélie (point où $E = v = 0$), les équations (II.10) peuvent s'écrire sous la forme :

$$\begin{cases} \dot{U}_1 = \frac{-a n \sin E}{1 - e \cos E} \\ \dot{U}_2 = \frac{a n (1 - e^2)^{\frac{1}{2}} \cos E}{1 - e \cos E} \\ \dot{U}_3 = 0 \end{cases} \quad (\text{II.12})$$

Par analogie de (II.9), nous avons enfin:

$$\begin{pmatrix} \dot{X} \\ \dot{Y} \\ \dot{Z} \end{pmatrix} = R_3(-\Omega) R_1(-i) R_3(-\omega) \begin{pmatrix} \dot{U}_1 \\ \dot{U}_2 \\ \dot{U}_3 \end{pmatrix} \quad (\text{II.13})$$

Si la Terre était rigoureusement sphérique et homogène et si la trajectoire du satellite était une ellipse parfaite, les six éléments Képlériens du mouvement ($a, e, \Omega, i, \omega, \tau_p$) seraient invariants.

En réalité, le satellite dans son mouvement est soumis, en plus des forces gravitationnelles, à des forces plus faibles appelées forces perturbatrices.

Les forces intervenant dans le mouvement d'un satellite artificiel de Terre peuvent être classées de la manière suivante:

- les forces gravitationnelles dérivant toutes d'un potentiel:

- forces créées par la Terre, \vec{F}_T . Le potentiel de la pesanteur de la Terre correspondant s'exprime habituellement sous forme de développement en harmoniques sphériques:

$$U = GM/r \left[1 + \sum_{n=2}^{\infty} \sum_{m=0}^n (R/r)^n P_{nm}(\sin \phi) (C_{nm} \cos m\lambda + S_{nm} \sin m\lambda) \right] \quad (\text{II.14})$$

avec,

(r, ϕ, λ) : coordonnées sphériques du point du calcul dans un repère terrestre géocentrique,

P_{nm} : fonction de Legendre de degré n et d'ordre m ,

C_{nm}, S_{nm} : coefficients harmoniques,

R : rayon terrestre

L'ordre et le degré de développement à prendre en compte dépendent des caractéristiques de l'orbite du satellite utilisé. Il existe ainsi plusieurs modèles de potentiel, développés par les différents centres de calcul et sont de plus en plus précis actuellement.

- forces créées par les autres corps du système solaire, \vec{F}_s .

Seul le Soleil et la Lune apportent une contribution significative du fait de la masse du premier et de la proximité de la deuxième. Le potentiel Luni-Solaire correspondant se traduit par deux phénomènes : les marées terrestres et océaniques et la précession/nutation.

- les forces de contact:

- la force du frottement atmosphérique. Elle est fonction de la section efficace (A) du satellite, de sa masse (m), de sa vitesse (V_a) par rapport à l'atmosphère, et de la densité de l'atmosphère (ρ). Elle peut s'exprimer par:

$$f_a = \frac{1}{2} C \left(\frac{A}{m}\right) \rho V_a^2 \quad (\text{II.15})$$

où C est un coefficient de frottement.

- la pression de radiation (\vec{f}_r), dépend de l'altitude et de la forme du satellite. Elle est relativement faible dans le cas des satellites bas et difficilement modélisable dans le cas des satellites hauts comme le GPS par exemple.

La modélisation exacte du mouvement d'un satellite artificiel de la Terre tient par conséquent compte de toutes les forces agissant sur le satellite. Ainsi, le mouvement du centre de masse S dans un repère inertiel peut s'écrire sous la forme:

$$m \frac{d^2 \vec{r}}{dt^2} = \vec{F}_T + \vec{f}_s + \vec{f}_a + \vec{f}_r + \Delta \vec{f} \quad (\text{II.16})$$

où Δf est une somme de forces complémentaires : forces électromagnétiques, d'inertie d'entraînement, d'inertie de Coriolis, etc.

Des modèles de traitement sont développés par les centres d'analyse, faisant appel à des modèles analytiques, des modèles d'intégration numériques ou une combinaison des deux afin de réaliser l'ajustement global des inconnues:

- coefficients des modèles des forces agissant sur le satellite;

- coordonnées de stations;

- paramètres de l'orbite;

- paramètres de rotation de la Terre.

Les modèles des forces appliquées au satellite définissent implicitement le repère inertiel, tandis que le repère terrestre

est défini de la manière suivante:

- l'origine, le centre de masse de la Terre, déterminée par l'annulation des termes d'ordre 1 du développement en harmoniques sphériques du potentiel terrestre,

- l'échelle, fonction du choix des constantes fondamentales: la vitesse de la lumière c et la constante géogravitationnelle GM , si elle n'est pas ajustée. Les Standards IERS donnent pour c la valeur 299792.458 km/s et pour GM la valeur 398600.440 km³/s².

- l'orientation, déterminée soit en fixant à une époque donnée les paramètres de rotation de la terre, soit en fixant trois coordonnées de stations, une longitude et deux latitudes.

Trois méthodes de positionnement par satellites sont largement utilisées à l'heure actuelle: la méthode de mesure radio électrique sur les satellites du Global Positioning System, la télémétrie laser, et la méthode Doppler sur le système TRANSIT.

Signalons d'autre part les satellites futurs tels que TOPEX/POSEIDON et ERS-1 d'études océanographiques comportant chacun un altimètre radar. Il seront également utilisés à d'autres fins. TOPEX/POSEIDON permettra des mesures de télémétrie laser, des mesures GPS et des mesures de positionnement radio électriques du projet Français DORIS. ERS-1 permettra des mesures de télémétrie laser et des mesures de positionnement radio électrique du projet Allemand PRARE.

Notons que la phase d'initialisation du projet DORIS commencera avec le satellite SPOT-2 dont le lancement est prévu pour le mois de janvier 1990.

II.4.1. Le Global Positioning System (GPS).

C'est un système de navigation par satellites permettant l'aquisition rapide d'information de positions et de vitesses tridimensionnelles (Wells et al, 1986).

La constellation finale (1991) comportera 21 satellites, d'orbite quasi circulaire et d'altitude de 20 000 km, placés sur six plans. Ainsi, 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 génèrent 1 ou 2 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 relèvement dans l'espace et de déterminer la position. Utilisant des éphémérides NSWC 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} .

Plusieurs types de localisation par GPS sont possibles (Willis et Boucher, 1988).

- navigation: positionnement absolu en temps réel nécessitant l'emploi d'un récepteur capable d'enregistrer les mesures de pseudo-distances sur au moins une fréquence. La précision de ce type de positionnement (différence entre deux positions déterminées à quelques minutes d'intervalle) est de 1 à 5 mètres. L'exactitude (différence entre la position estimée et celle théorique) est de l'ordre de 20 mètres;

- navigation différentielle : positionnement relatif entre 2 stations à condition d'enregistrer les données des mêmes satellites, aux mêmes instants et de calculer avec les mêmes éphémérides. La précision et l'exactitude sont de 1 à 5 mètres pour des distances allant jusqu'à plusieurs centaines de kilomètres;

- GPS géodésique : positionnement relatif nécessitant au moins 2 récepteurs enregistrant la phase GPS et en modélisant correctement les mesures de phases. La précision est de l'ordre de 2 ppm (partie par million) pour les récepteurs mono-fréquences et de 1 ppm pour les bi-fréquences;

- GPS cinématique : utilisation des mesures de phases directement, en temps réel, en positionnant un récepteur mobile par rapport à un autre fixe. La précision de ce type de positionnement peut atteindre $2 \cdot 10^{-6}$;

- trajectographie : positionnement relatif nécessitant au moins deux récepteurs enregistrant les pseudo-distances et les phases sur une même fréquence. Les mesures de phase sont utilisées pour lisser a posteriori les mesures de pseudo-

distances;

- 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), possédant 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, Blewitt, 1989).

- GPS temps-fréquence : permettant l'estimation de la différence de temps entre une horloge locale et un temps mondial. La précision est de 10 à 100 nanosecondes (Lewandowski et al, 1987) en mode standard et peut atteindre quelques nanosecondes (Guinot et Lewandowski, 1988).

L'utilisation de la technique GPS est de plus en plus répandue dans le monde, et plusieurs expériences ont été réalisées mettant en évidence ses capacités et performances comparables à celles des autres techniques spatiales.

La contribution du GPS aux réalisations de systèmes de référence peut être de deux manières:

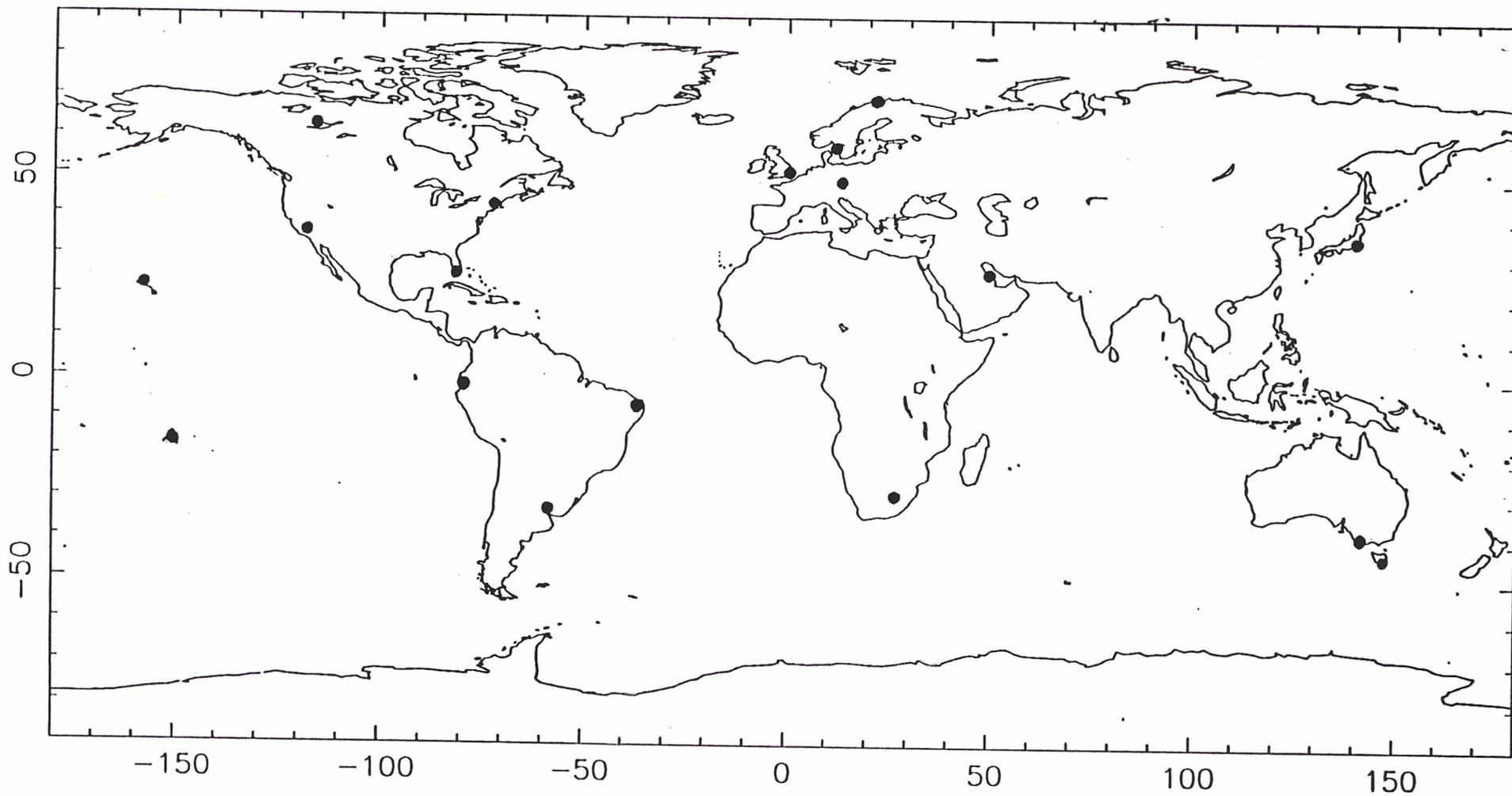
- définir son propre système de référence: installation d'antennes GPS fixes sur des points bien répartis sur la Terre, formant ainsi un réseau mondial qui servira de base pour un repère de référence propre à cette technique. C'est l'exemple d'un réseau mondial en cours de réalisation: Cooperative International GPS Network (CIGNET), (Figure 6), (voir GPS Bulletin, 1989). De plus, des études sont actuellement en cours par le JPL et le MIT afin de déterminer des séries de paramètres de rotation de la Terre.

- étant donné la possibilité de positionnement géodésique ultra précis, le GPS peut servir, d'une manière très précise, à rattacher entre eux, les points d'un site, voire des sites entre eux augmentant ainsi le nombre de colocation. Comme nous le verrons plus loin, ce problème de rattachement est très important lors des comparaisons et combinaisons de jeux de coordonnées.

Dans le cas des éphémérides radiodiffusées ou précises de la DMA, les coordonnées des stations issues de mesures GPS sont exprimées dans le système WGS84 (World Geodetic System 1984). Ce dernier a été proposé par l'US Department of Defence, DoD, en remplacement du WGS72 et ceci depuis le 01/01/1987 (DMA, 1987).

En plus du DoD et du NSWC, beaucoup d'autres organismes traitent les mesures GPS, à savoir le JPL, le MIT, le NGS et le CSR.

FIGURE 6 - REPARTITION DES STATIONS GPS DU RESEAU CIGNET



II.4.2. La télémétrie laser sur satellites.

Le principe de cette technique est identique à celui de la méthode de télémétrie laser sur la Lune. Les tirs au laser se font ici sur des réflecteurs placés sur le satellite.

Parmi les satellites géodésiques utilisables aujourd'hui, STARLETTE, satellite français lancé en 1975, LAGEOS, satellite américain lancé en 1976, AJISAI, satellite japonais lancé en 1986 et ETALON, satellite Russe lancé en 1989.

Au cours d'un passage du satellite au dessus d'une station, plusieurs milliers de mesures peuvent être obtenues et datées par l'horloge de la station. En moyennant ces mesures (au sens des moindres carrés), on peut les ramener à environ 100 mesures (points normaux) par passage.

Il existe un réseau mondial de stations d'observation comportant d'une part une vingtaine de stations munies de systèmes de télémétrie fixes et d'autre part, plus d'une soixantaine de stations font l'objet d'observations plus ou moins régulières en utilisant des systèmes de télémétrie mobiles, (Figure 7).

L'exactitude de positionnement de cette technique est au niveau du centimètre.

Les principaux centres d'analyse des données de télémétrie laser sur satellite sont :

- Le Centre for Space Research (CSR), USA, qui analyse les données de télémétrie laser sur le satellite LAGEOS dont les premières mesures remontent à 1976.

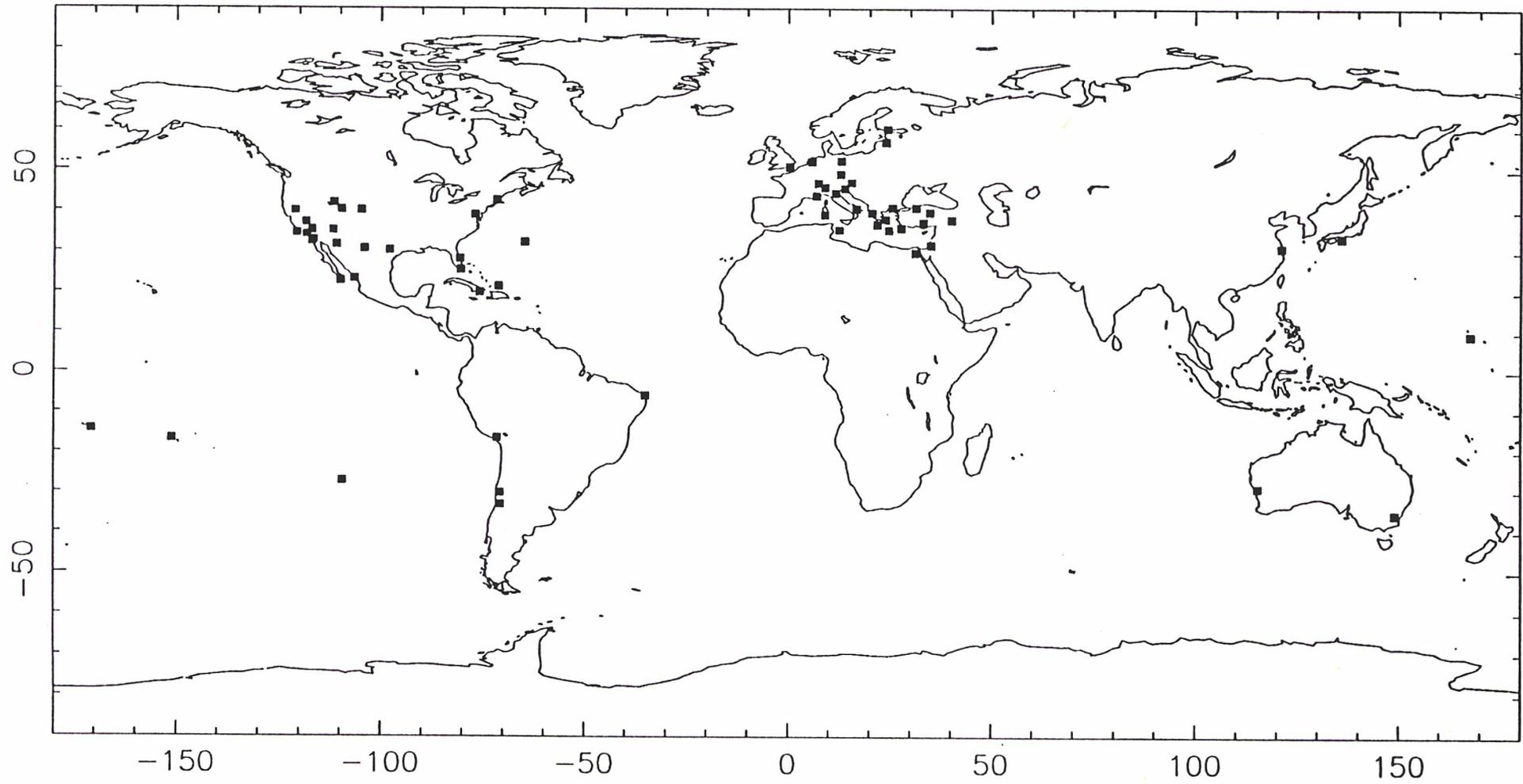
Dans l'ajustement global, les positions des stations, les paramètres de l'orbite du satellite et les paramètres de rotation de la Terre sont estimés simultanément.

La solution la plus récente, CSR 89 L 02, a les caractéristiques suivantes (Schutz et al, 1989):

- le repère inertiel est celui de l'équateur et de l'équinoxe moyens de J2000.0 réalisé par des modèles spécifiques en accord avec les recommandations des Standards IERS.

- le repère terrestre est défini par les coordonnées d'une centaine de stations. Les coordonnées sont rapportées à la date du 1 janvier 1989 en utilisant le modèle de mouvement de plaques AM1-2 de Minster et Jordan. Ce repère est d'autre part caractérisé par:

FIGURE 7 – REPARTITION DES STATIONS LASER SATELLITE



- l'origine, centre de masse de la Terre en utilisant le modèle de potentiel terrestre PTGF-3,

- l'échelle, définie par l'adoption de la valeur de c des Standards IERS et de la valeur de $GM = 398600.4404 \text{ km}^3/\text{s}^2$.

- l'orientation, définie par la longitude de la station de McDonald (7086) fixée à une valeur conventionnelle et par les paramètres de rotation de la Terre de l'IERS.

- Le Goddard Space Flight Center (GSFC/NASA), USA, analyse les données de Laser Satellite (LAGEOS) dans le cadre des programmes Crustal Dynamics de la NASA.

La solution récente, GSFC 89 L 01, est caractérisée par (Smith et al, 1989):

- le repère inertiel est rapporté à l'axe instantané de rotation de la Terre. Les séries de nutations de Wahr (Standards IERS) sont utilisées avec les éphémérides planétaires du JPL DE200 en adoptant les constantes définies dans le système J2000.0.

- le repère terrestre est défini par les coordonnées d'une centaine de stations. Les coordonnées sont rapportées à la date du 15 janvier 1983 en utilisant le modèle de mouvement de plaques AMO-2 de Minster et Jordan. Ce repère est d'autre part caractérisé par:

- l'origine, au centre de masse de la Terre, est définie par le modèle de potentiel terrestre GEM-T1,

- l'échelle, définie par les valeurs des constantes c (Standards IERS) et $GM = 398600.4408 \text{ km}^3/\text{s}^2$.

- l'orientation, obtenue par les valeurs de latitude et de longitude de la station de McDonald, USA, et la latitude de Mount Haleakala, Hawaii, fixées à des valeurs conventionnelles.

- Le Deutsches Geodetisches Forschungsinstitut (DGFI), RFA. La méthode adoptée par ce centre consiste à ajuster simultanément les paramètres de rotation de la Terre, les éléments de l'orbite et les coordonnées des stations pour chaque année d'observations. Ceci permet d'obtenir des solutions annuelles des coordonnées des stations, tenant ainsi compte de mouvements relatifs des stations (Reigber et al, 1988).

La solution DGFI 87 L 03 est caractérisée par :

- le repère inertiel est celui de l'équateur et l'équinoxe de J2000.0 en accord avec les recommandations de MERIT Standards.

- le repère de référence terrestre est défini par les coordonnées d'une cinquantaine de stations calculées de la manière suivante. Les variations en longitude et latitude de chaque station, obtenues à partir des solutions annuelles, sont calculées si la station est active pendant une période supérieure à deux ans. Les coordonnées des stations sont ensuite ramenées, à l'aide des variations annuelles, à la date de 1984.0. Les coordonnées des stations observées pendant 2 ans seulement sont moyennées, et enfin les coordonnées des stations observées pendant 1 an correspondent à l'année d'observation. Ce repère est d'autre part caractérisé par:

- l'origine, le centre de masse de la Terre en utilisant le modèle de potentiel terrestre GEM-L2,

- l'échelle, définie par les constante c et GM de MERIT Standards,

- l'orientation, obtenue par trois conditions:

+ la différence de longitude (pour 3 à 10 stations), entre la valeur ajustée et celle d'une solution antérieure est contrainte à zéro.

+ 2 conditions relatives à l'orientation de l'axe des Z , en alignant leurs séries de coordonnées du pôle (x et y) à celles du BIH.

II.4.3 La méthode Doppler sur le système TRANSIT.

Elle repose sur l'effet Doppler Fizeau qui est un phénomène de décalage de fréquence des signaux émis par une source mobile par rapport à l'observateur. La mesure du décalage de fréquence entre l'onde émise et l'onde reçue par l'observateur permet la mesure de la vitesse relative de l'émetteur par rapport au récepteur.

Un système opérationnel appelé TRANSIT a été mis au point en 1958 par l'US Navy et constitué de cinq satellites d'orbite polaire quasi circulaire d'altitude moyenne de 1100 km. Son usage est resté strictement militaire jusqu'en 1967, date de sa déclassification.

Chaque satellite émet en permanence deux ondes radio de fréquences respectives 150 et 400 MHz. Recevant les deux ondes radio, les récepteurs effectuent leur mélange numériquement ou analogiquement. En fait, la deuxième onde sert à éliminer le terme principal de l'effet ionosphérique sur la propagation des ondes dans l'atmosphère (Le Cocq, 1983).

La relation d'observation lie trois mesures: les deux instants de mesures (correspondant aux 2 ondes reçues) et le nombre de cycles d'une fréquence de battement obtenue à partir du mélange des ondes reçues et de l'onde produite par l'oscillateur local. Elle fait également intervenir les coordonnées des stations et celles des satellites.

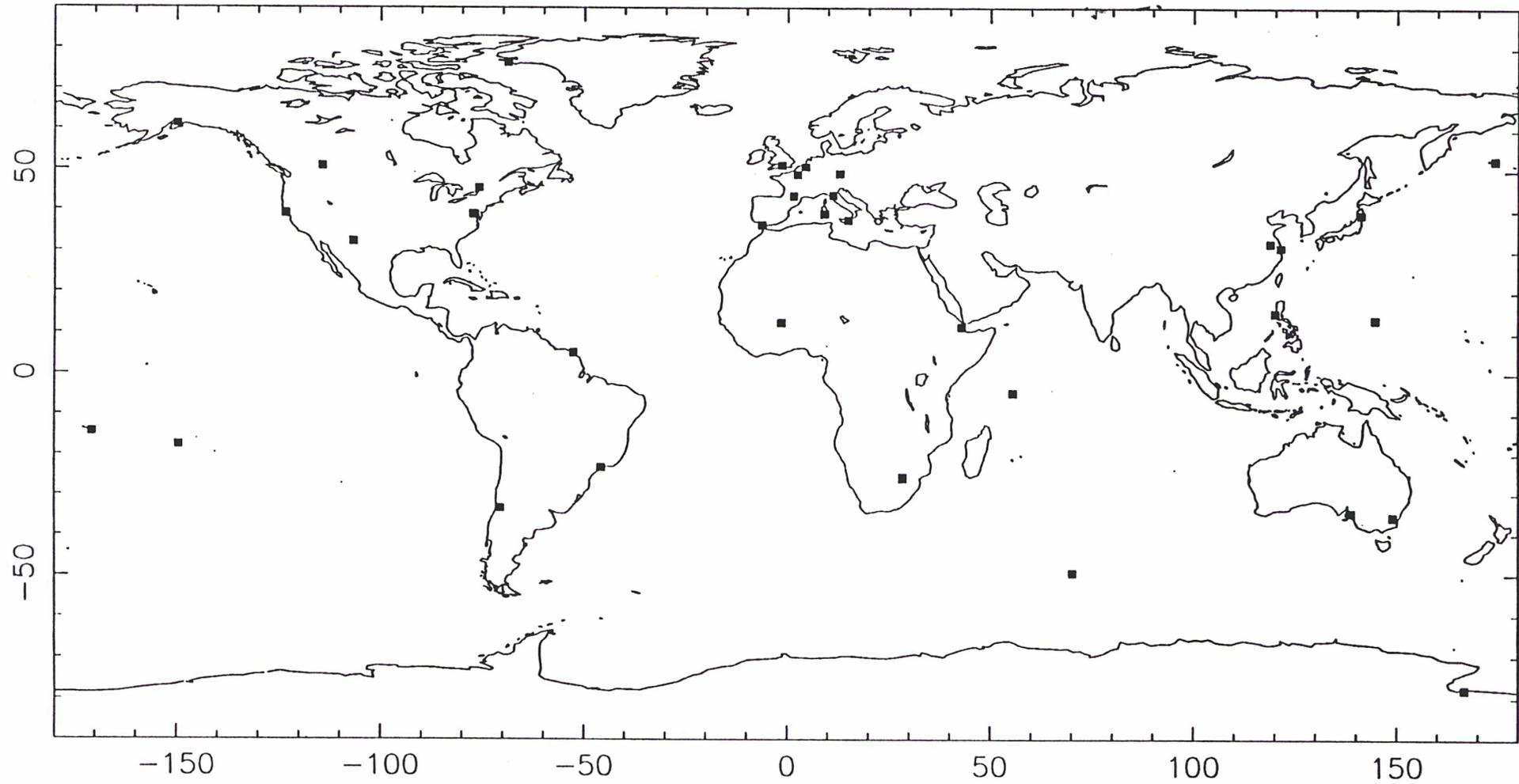
Les méthodes de traitement les plus utilisées sont les méthodes semi-dynamiques groupant le positionnement par point isolé et le positionnement par arcs courts (voir Boucher, 1983).

L'exactitude de positionnement de cette méthode est de l'ordre de 50 cm.

Un réseau international d'une trentaine de stations fixes (TRANET, MEDOC) participe régulièrement aux observations de satellites TRANSIT contribuant ainsi à la réalisation d'un repère terrestre permanent (Figure 8). Ajoutons à cela les différentes campagnes de mesure Doppler (EDOC-1, EDOC-2, ERIDOC, WEDOC, EDORF, RETDOC, MERITDOC, etc) utilisant, en plus de stations du réseau fixe, des récepteurs mobiles sur d'autres points, augmentant ainsi le nombre de stations du repère terrestre correspondant.

D'autres satellites (comme GEOS-3, SEASAT-1 ou GEOSAT) ont également fait l'objet d'analyses de données en vue de l'obtention de coordonnées de stations.

FIGURE 8 – REPARTITION DES STATIONS PERMANENTES DOPPLER



Les principaux centres d'analyse de données Doppler/TRANSIT sont:

- Le Naval Surface Weapons Center (NSWC), USA, analyse depuis 1969 les observations Doppler sur les satellites TRANSIT.

Un système de référence appelé NWL 9Z-2 (ou NSWC 9Z-2) a été défini par les coordonnées d'une vingtaine de stations d'observation (TRANET) déterminées par une solution globale de positions, de coefficients de modèle de gravité et d'autres paramètres complémentaires (Seppelin, 1974). La solution globale comporte deux ajustements: le premier consiste à ramener le système en accord avec le pôle du BIH (Beuglass et Anderle, 1972), tandis que le second ajustement comprend des itérations entre la solution d'éléments d'orbite et celle de positions de stations afin d'éliminer les incohérences dans les coordonnées relatives des stations (Anderle, 1975).

Initialement dans la solution globale, l'origine de ce système devait être le centre de masse de la Terre et l'orientation devait être en accord avec celle du BIH. Quant à l'échelle, elle est définie par l'adoption de la valeur $398601 \text{ km}^3/\text{s}^2$ pour la constante gravitationnelle GM. Des comparaisons entre les données Doppler TRANSIT et d'autres techniques ont montré que l'origine est déplacée de 4 mètres environ dans la composante Z, l'échelle comporte un biais de 0.4 à 0.5 ppm et l'orientation de 0.8 secondes d'arc en longitude (Hothem et al, 1982, 1983, Boucher et Altamimi, 1985).

Le système inertiel correspondant est défini par le repère de référence de l'équateur et de l'équinoxe moyens de 1950 dans lequel les éphémérides sont calculées. Les séries de precession nutation sont dérivées de l'"American Ephemeris and Nautical Almanac".

- Le Defense Mapping Agency/Hydrographic Topographic Center (DMAHTC). Cet organisme s'occupe principalement du calcul de la position du pôle et du calcul des éphémérides précises dans le système NSWC 9Z2. Les éphémérides sont calculées a posteriori avec une précision de l'ordre de 3 mètres.

Nous mentionnons également les éphémérides opérationnelles qui sont calculées, pour une durée de 12 heures, par extrapolation numérique sur une série de 36 heures de mesures Doppler effectuées par un réseau de quatre stations américaines. Elles sont radiodiffusées en temps réel par les satellites eux-mêmes et sont donc toujours disponibles. Leur précision est de l'ordre de 30 mètres.

- Le Groupe de Recherches de Géodésie Spatiale(GRGS), France, a mis sur pied en 1977 le programme MEDOC (Motion of the Earth by Doppler Observing Campaign) avec la contribution du Centre National d'études Spatiales (CNES) et de l'IGN. Le but initial de ce programme était d'acquérir de l'expérience dans la gestion d'un réseau permanent et dans la modélisation et l'analyse des observations des satellites TRANSIT.

Le réseau terrestre comporte quelques stations TRANET et quelques autres stations installées dans le cadre de ce programme. Une première campagne (MEDOC 1) a été réalisé de 1977 à 1980. Le calcul de coordonnées de stations, utilisant le modèle de potentiel GEM 10, a été réalisé par trois méthodes: positionnement par arcs courts, positionnement par point isolé et enfin la méthode semi-dynamique dans laquelle le modèle de forces a été fixé (Gambis et Nouël, 1980).

L'origine du repère de référence terrestre correspondant est géocentrique par définition, l'orientation est obtenue par l'adoption des coordonnées DMA de quelques stations TRANET, et l'échelle par la valeur de GM de $398600.64 \text{ km}^3/\text{s}^2$.

Une deuxième campagne a été conduite en 1984. Son analyse diffère de la première par l'adoption d'un autre modèle de potentiel, GRIM3 D2 établi par le GRGS et l'Université de Munich et de la valeur de GM qui est de $398600.5 \text{ km}^3/\text{s}^2$.

II.5. LES TECHNIQUES TERRESTRES

Les techniques terrestres utilisent des mesures d'angles horizontaux et verticaux, de distances (bases et mesures électromagnétiques), d'orientation astronomique (azimuts de Laplace). Ainsi, des réseaux géodésiques locaux, nationaux ou continentaux ont été établis.

A chacun de ces réseaux, correspond un système de référence terrestre et dans lequel les coordonnées de points sont exprimées. Son origine est fixée par le choix d'un point fondamental, l'échelle est déterminée par les mesures de distances, et l'orientation est obtenue par la réduction des mesures astronomiques utilisant en général les données du BIH.

Il est important de noter que le mode d'établissement des repères de référence d'origine terrestre est basé sur le principe bidimensionnel: détermination des coordonnées (deux par point) de points géodésiques sur une surface mathématique; sphère ou

ellipsoïde.

Les coordonnées de points sont obtenues sous forme de coordonnées ellipsoïdiques: λ et ϕ . Pour les exprimer en formalisme tridimensionnel, X, Y, Z , il faut utiliser les notions d'altitude h au dessus de l'ellipsoïde associé. Ainsi, si l'on dispose de l'altitude H au dessus du géoïde et de la hauteur N de ce dernier au dessus de l'ellipsoïde, nous avons:

$$h = H + N \quad (\text{II.17})$$

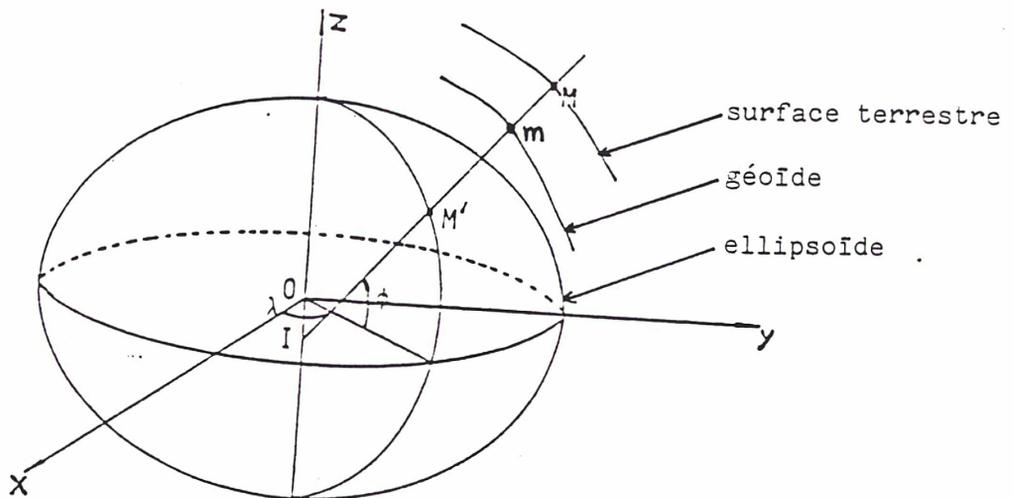


Figure 9. Passage des coordonnées géographiques aux coordonnées tridimensionnelles

Dans ce cas, les formules de passage des coordonnées géographiques, λ, ϕ, h , en coordonnées tridimensionnelles X, Y, Z sont (voir Figure 9) :

$$\begin{cases} X = (N' + h) \cos\phi \cdot \cos\lambda \\ Y = (N' + h) \cos\phi \cdot \sin\lambda \\ Z = [N'(1 - e^2) + h] \sin\phi \end{cases} \quad (\text{II.18})$$

avec,

a = demi grand axe de l'ellipsoïde
 e = excentricité

$$W = \sqrt{1 - e^2 \sin^2 \phi}$$

$N' = a/W$ = grande normale = M'I

N = hauteur du géoïde = m M'

H = altitude au dessus du géoïde = mM

Notons que l'échelle est par conséquent uniquement planimétrique. Ainsi, dans le passage aux coordonnées tridimensionnelles, toute erreur dans les quantités h, H ou N (mal connu en général) provoque une erreur dans l'échelle tridimensionnelle. Il est à noter que des formules de transformations entre systèmes bidimensionnels peuvent être développées, faisant appel aux fonctions polynomiales (voir Boucher, 1988a).

Par ailleurs, l'origine n'est pas rigoureusement géocentrique. Ceci est dû au fait que la déviation absolue de la verticale au point fondamental n'est pas utilisée en général. Cette origine peut donc être décalée, par rapport au géocentre, de plusieurs centaines de mètres.

Comme exemples de systèmes continentaux d'origine terrestre, nous mentionnons le "North American Datum" (NAD27, NAD83) et le "European Datum" (ED50, ED79, ED87).

Table 1. Techniques de mesure et définition des systèmes de référence terrestres associés

Technique/ Exactitude de posi- tionnement	Principe	Système de référence terrestre		
		origine	échelle	orientation
VLBI/ au niveau du centimètre	Détermination de fréquence de franges et de retard d'arrivée sur 2 antennes, d'un même front d'onde d'une source radio	arbitraire (adoption de coordonnées d'une station du réseau)	dépend de c et des termes relativistes	valeurs a priori de paramètres de rotation de la Terre à une époque de référence
Astrométrie Optique/ au niveau du mètre	observations d'étoiles et détermination du temps universel local et de latitudes	Non définies d'une manière explicite		maintenue par les paramètres de rotation de la Terre
Laser Lune/ quelques centimètres	mesure du temps de propagation aller et retour d'une impulsion laser tirée sur des réflecteurs lunaires	géocentrique	voir VLBI	même définition qu'en VLBI
GPS/ au niveau du centimètre	différence de la phase de battement entre le signal émis par le satellite et le signal généré par le récepteur	géocentrique	dépend de c et GM	en fixant les coordonnées d'une ou plusieurs stations
Laser satellite/ au niveau du centimètre	mesure du temps de propagation aller et retour d'une impulsion laser tirée sur des réflecteurs placés sur satellite	géocentrique	dépend de c et GM	valeurs a priori de paramètres de rotation de la Terre ou de coordonnées d'une ou plusieurs stations
Doppler sur le système TRANSIT/ 50 cm	mesure du décalage de fréquence entre les ondes émises par un satellite TRANSIT et les ondes reçues			même définition que le laser satellite
Techniques Terrestres/ quelques mètres	mesures d'angles horizontaux et verticaux et de distances	par le choix d'un point fondamental	par les mesures de distances	astronomique (azimuts de Laplace)

TROISIEME PARTIE

MODELISATION GENERALE EN VUE DES COMPARAISONS ET DES COMBINAISONS DE JEUX DE COORDONNEES

III.1. INTRODUCTION

Nous avons exposé dans la première partie, d'une manière générale, la modélisation de la structure physique sur laquelle la définition du système de référence idéal doit être portée.

Dans cette troisième partie, nous essayons de présenter les différents aspects de modélisation en vue de la réalisation et la maintenance d'un système de référence terrestre. Il existe deux grandes catégories de réalisations:

- les réalisations individuelles, issues d'une seule technique de mesure (VLBI, laser satellite...) et d'un calcul unique de toutes les mesures en un seul bloc;

- les réalisations combinées, issues de combinaisons de plusieurs jeux de coordonnées des réalisations individuelles.

Dans une première phase, nous présentons un modèle général permettant l'estimation des coordonnées de stations tenant compte de leur variations temporelles dues aux déformations de la croûte terrestre. Ensuite, dans une deuxième phase, nous présenterons un modèle d'estimation pour les comparaisons et les combinaisons de jeux de coordonnées. Nous expliciterons également dans les deux phases le processus de maintenance d'un système de référence terrestre.

Dans le processus de réalisation d'un système terrestre par une technique donnée, on distingue la notion de la modélisation physique de la notion de modèle d'estimation pour les coordonnées des stations.

III.2. MODELISATION PHYSIQUE

Les quantités mesurées par les techniques spatiales sont par nature conditionnées par les propriétés physiques des milieux dans lesquels ces mesures sont réalisées. Une modélisation physique adéquate est nécessaire afin d'estimer d'une manière rigoureuse les différents paramètres recherchés. Il est néanmoins important de préciser les éléments suivants dont il faut tenir compte plus particulièrement:

- les corrections des effets relativistes qui sont de l'ordre de 1.5×10^{-8} et ceci en fonction du calcul effectué et de ses hypothèses (Hellings, 1986, Boucher, 1986a, Martin et al, 1985). Ces effets correspondent en fait aux différences entre deux types de modélisations: le premier est relatif à un système barycentrique dans un cadre relativiste et le deuxième est relatif à un système géocentrique local de la Terre.

- les corrections dues aux marées terrestres qui doivent être considérées d'une manière claire afin de connaître les termes et les constantes qui sont introduits dans la solution (voir III.3.1). On se réfère en général aux recommandations des Standards IERS (McCarthy et al , 1989).

- les constantes utilisées dans le calcul, comme la constante géogravitationnelle GM et la vitesse de la lumière c. Ces deux constantes ont une influence importante dans la définition de l'échelle du système de référence terrestre. En ce qui concerne la constante c, son influence sur l'échelle est due au fait que l'unité de longueur dépend de celle du temps. Quant à GM, ceci est vrai dans les techniques dynamiques telles que le laser satellite si sa valeur est fixée, car elle intervient directement dans les équations du mouvement du satellite (voir II.4).

- les paramètres fixés, contraints ou libres comme les coordonnées d'une ou plusieurs stations et les paramètres de rotation de la Terre qui sont en général ceux du BIH ou de l'IERS actuellement.

III.3. MODELE D'ESTIMATION DES COORDONNEES DE STATIONS

La forme de la Terre, objet traditionnel de la géodésie, varie, localement ainsi que globalement, en fonction du temps. Ces variations sont dues aux phénomènes géophysiques, entraînant des déformations (en particulier séculaires) de la croûte terrestre et, par conséquent, des variations dans les coordonnées des points sur la surface de la Terre. Il est nécessaire de tenir compte de ces variations dans l'estimation des coordonnées des stations et dans l'évolution temporelle d'un système de référence terrestre (voir Bock, 1982, Boucher et Feissel, 1983 et Boucher, 1988b).

III.3.1. Déformations du réseau de stations.

Les déformations peuvent être de deux types : globales (dues à des phénomènes globaux) et locales (dues à des phénomènes locaux). Les premières sont communes à toutes les stations, bien que variables d'une station à l'autre. Les secondes dépendent du lieu et de l'environnement géologique et géophysique de chaque station.

- Déformations globales.

Les deux principaux phénomènes provoquant des déformations globales sont les marées terrestres et océaniques et le mouvement de plaques tectoniques.

- Les marées terrestres et océaniques. Elles sont provoquées par les forces d'attraction gravitationnelle des objets célestes dont les plus importantes sont celles de la Lune et du Soleil. Notons que l'effet de la force d'attraction de la Lune 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. Ainsi, le point terrestre le plus proche de la Lune est plus attiré dans la direction de celle-ci que le point le plus éloigné, diamétralement opposé, qui lui est attiré dans la direction opposée.

Cette attraction provoque des variations dans la force gravitationnelle terrestre et, par ce fait, elle déforme la croûte terrestre. Pour évaluer les différentes variations dues à cette force d'attraction, celle-ci peut se traduire en termes de

potentiel (luni-solaire) pouvant être développé en harmoniques sphériques. Le potentiel luni-solaire varie naturellement en fonction du temps étant donné que les positions de la Lune et du Soleil varient eux-mêmes en fonction du temps.

Des corrections de potentiel doivent donc être introduites dans les modèles de potentiel utilisés par les centres de calcul des différentes techniques et plus particulièrement les techniques dynamiques (Doppler/TRANSIT, télémétrie laser sur satellite ou sur la Lune). Ces modèles de corrections 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).

En ce qui concerne l'effet des marées dans les déplacements de stations, il existe deux types de corrections importantes dont il faut tenir compte pour une détermination centimétrique:

a) une correction qui varie en fonction du temps, à appliquer uniquement dans la direction radiale et peut être considérée, avec une précision suffisante, comme une variation périodique d'altitude de la station. Les Standards IERS, page 28, fournissent la formule suivante, pour les marées terrestres:

$$dh = -0.0253 \sin\varphi \cdot \cos\varphi \cdot \sin(\theta + \lambda) \quad (\text{III.1})$$

où φ et λ sont respectivement la latitude et la longitude de la station et θ est le temps sidéral de Greenwich.

dh maximal = 0.013 m pour $\varphi = 45^\circ$.

En ce qui concerne les marées océaniques, c'est en fait l'effet de surcharges induites par ces marées qui produit des variations verticales de l'ordre de quelques centimètres. Les Standards IERS fournissent des tables contenant les valeurs de d'amplitudes et de phases de 11 composantes de coefficients de potentiel des marées océaniques, 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 (i), une variation d'altitude en mètres est obtenue par (Les Standards IERS, page 37):

$$\Delta h = \text{amp}(i) \cdot \cos(\text{arg}(i,t) - \text{phase}(i)) \quad (\text{III.2})$$

où $\text{arg}(i,t)$ est l'argument angulaire de la composante i à la date t et en fonction des positions de la Lune et du Soleil.

b) une correction permanente des marées terrestres uniquement, divisée en deux parties. La première est une variation d'altitude (Les Standards IERS, page 28) :

$$\Delta h = -0.121 \left(\frac{3}{2} \sin^2 \phi - \frac{1}{2} \right) \quad (\text{III.3})$$

où ϕ est la latitude de la station d'observation. La deuxième est selon la composante vers le nord, en mètres,

$$\Delta N = -0.051 \cos \phi \cdot \sin \phi \quad (\text{III.4})$$

- Les mouvements des plaques tectoniques. La théorie des plaques tectoniques suppose la division de la croûte terrestre en plusieurs plaques, principalement 11 plaques importantes (Figure 10), plus quelques unes de dimensions plus réduites. De nombreuses 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 10 cm par an (typiquement quelques centimètres par an).

Les variations des coordonnées de 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 la même nature que RM2, baptisé NUVEL-1 est en cours de réalisation (DeMets et al, 1989).

Le modèle RM2 de Minster et Jordan décrit d'une manière globale le mouvement relatif des plaques les unes par rapport aux autres. Les déplacements dépendent de chaque plaque pour laquelle on définit un vecteur de rotation Ω_p , exprimé dans un système terrestre. Ainsi, pour un point de coordonnées X, sur une plaque p, on définit une vitesse \dot{X} telle que:

$$\dot{X} = \Omega_p \wedge X \quad (\text{III.5})$$

Signalons que les variations des coordonnées des stations estimées par ces modèles jouent uniquement sur les composantes horizontales. Il reste néanmoins un élément important, à savoir les déformations verticales dont il faut également tenir compte. Ces déformations séculaires peuvent être très significatives et sont essentiellement dues au rebond post-glaciaire. N'étant pas prévues par les modèles existants, les variations des coordonnées de stations dues à ces déformations doivent être prises en compte dans la modélisation.

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 concernées par ces modèles; des améliorations locales peuvent être faites par les nouvelles techniques de géodésie spatiale (Jordan et Minster, 1988).

Des mouvements relatifs entre plaques ont pu être observés par les techniques spatiales, confirmant quantitativement les prédictions du modèle RM2 de Minster et Jordan (Christodoloudis et al, 1985, Tapley et al, 1985 et Herring et al, 1986). Nous donnons dans la Table 2 quelques exemples de variations de lignes de base estimées par télémétrie laser sur satellite ou VLBI, en regards des valeurs correspondantes prédites par RM2.

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'autre 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 lignes de base sur une même plaque doivent avoir une précision meilleur que 1 mm par an (Jordan et Minster, 1988).

FIGURE 10 DISTRIBUTION DES 11 PLAQUES TECTONIQUES PRINCIPALES

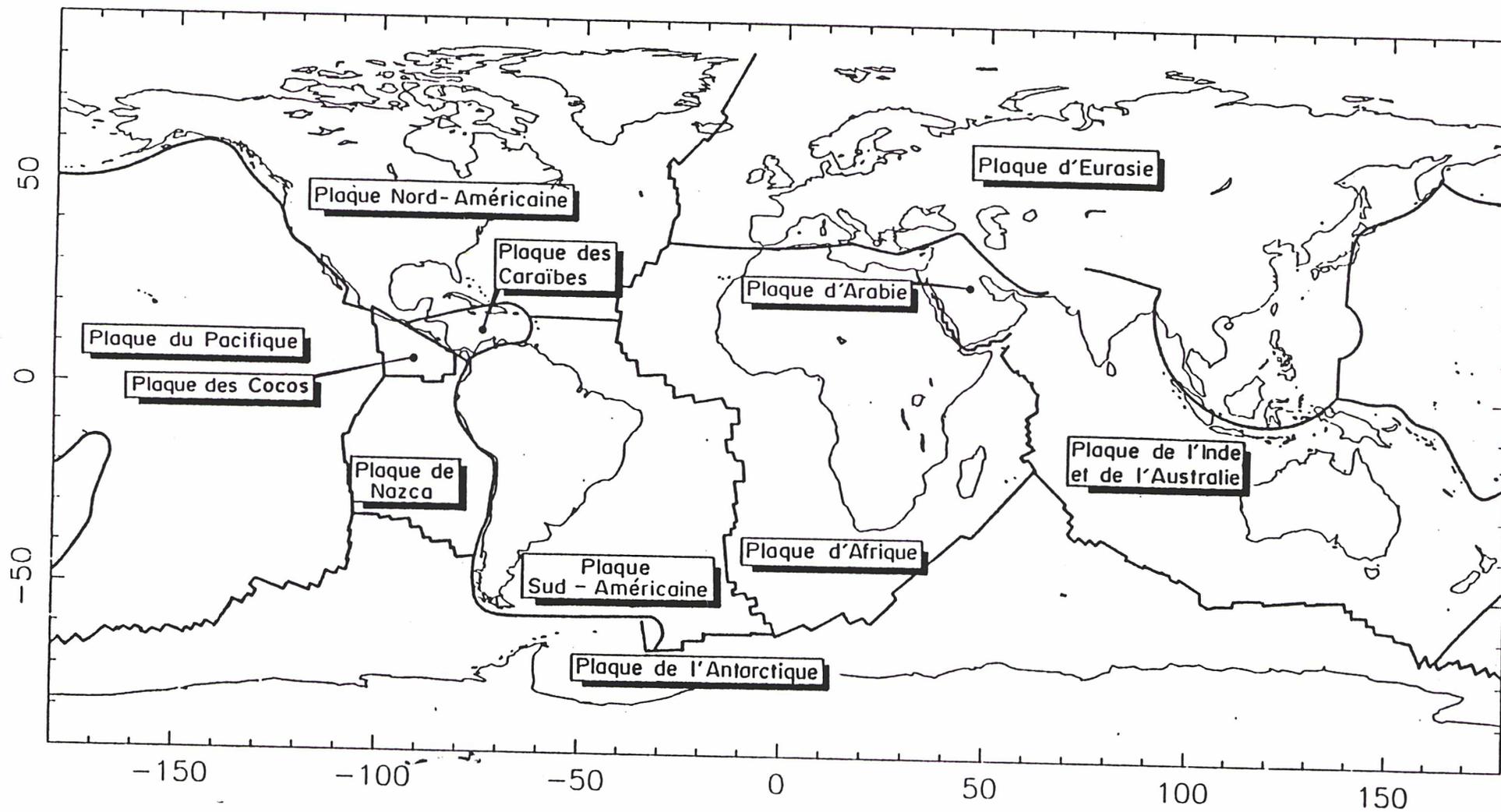


Table 2. Exemples de variations de lignes de base, dues aux mouvements de plaques tectoniques, estimées par Laser Satellite ou VLBI. Unité: mm/an.

Ligne de base	Plaques	Las.Sat.	VLBI	RM2	Réf.
Haystack	Amérique N.		17 ±2	17 ±3	(1)
Onsala	Eurasie				
Fort Davis	Amérique N.		20 ±7	16 ±3	(1)
Onsala	Eurasie				
Yaragadee	Inde/Australie	-32 ±4		-31 ±3	(2)
Owens Valley	Amérique N.				
Monument peak	Pacifique	-64 ±9		-53 ±3	(2)
Quincy	Amérique N.				

(1) Herring et al, 1986

(2) Tapley et al, 1985

Quatre modèles de mouvement *absolu* (selon la définition de Minster et Jordan, 1978) ont été déduits de RM2, et ceci en adoptant implicitement un repère de référence fixe par rapport à la position moyenne du manteau. Ce dernier est supposé rigide ou ayant des mouvements internes très inférieurs à ceux des plaques.

Parmi les quatre modèles dérivés de RM2, deux sont généralement utilisés lors de traitement de données géodésiques :

+) AMO-2, qui est un modèle déduit par une condition de non rotation globale de la lithosphère, considérant les masses des plaques et leurs contours. Ce modèle peut être adopté afin de définir l'évolution temporelle du repère terrestre (voir plus loin, III.3.2). Il est recommandé par les Standards IERS et le plus utilisé.

+) AM1-2, qui minimise le mouvement d'un ensemble de points dits "points chauds" (9 points en tout, répartis sur 4 plaques: PCFC, COCO, NAZCA, NOAM). Le choix de ces points peut évidemment avoir des incertitudes. (Molnar et Stock, 1987) parlent même de mouvements relatifs entre points chauds de 1 à 2 cm par an.

La Table 3 ci-dessous, fournit pour les deux modèles, les composantes cartésiennes du vecteur rotation relatif à chaque plaque. La différence constatée entre les deux modèles, d'après la Table 3, est de l'ordre de 0.25 deg. par million d'années (0.065 pour Omega.x, 0.143 pour Omega.y et -0.195 pour Omega.z), ce qui représente environ 0".001 (3 cm) par an.

Table 3. Les composantes cartésiennes du vecteur rotation, par plaque, données par les deux modèles de mouvements de plaques AMO-2 et AML-2 de Minster et Jordan.

Plaque		AMO-2			
		Omega.x	Omega.y	Omega.z	Omega deg. par million d'années
Pacifique	(PACF)	-0.12276	0.31163	-0.65537	0.736
Cocos	(COCO)	-0.63726	-1.33142	0.72556	1.645
Nazca	(NAZC)	-0.09086	-0.53281	0.63061	0.831
Caraïbe	(CARB)	-0.02787	-0.05661	0.10780	0.125
Amérique S.	(SOAM)	-0.05604	-0.10672	-0.08642	0.148
Antarctique	(ANTA)	-0.05286	-0.09492	0.21570	0.242
Inde/Australie	(INDI)	0.48372	0.25011	0.43132	0.695
Afrique	(AFRC)	0.05660	-0.19249	0.24016	0.313
Arabie	(ARAB)	0.27885	-0.16744	0.37359	0.495
Eurasie	(EURA)	-0.03071	-0.15865	0.19605	0.254
Amérique N.	(NOAM)	0.03299	-0.22828	-0.01427	0.231

Plaque		AML-2			
		Omega.x	Omega.y	Omega.z	Omega deg. par million d'années
Pacifique	(PACF)	-0.05745	0.45543	-0.85110	0.967
Cocos	(COCO)	-0.57241	-1.18885	0.53016	1.422
Nazca	(NAZC)	-0.02602	-0.39065	0.43467	0.585
Caraïbe	(CARB)	0.03736	0.08696	-0.08765	0.129
Amérique S.	(SOAM)	0.00948	0.03709	-0.28242	0.258
Antarctique	(ANTA)	0.01251	0.04854	0.02010	0.054
Inde/Australie	(INDI)	0.54942	0.39393	0.23582	0.716
Afrique	(AFRC)	0.12224	-0.04879	0.04470	0.139
Arabie	(ARAB)	0.34400	-0.02369	0.17790	0.388
Eurasie	(EURA)	0.03493	-0.01496	0.00046	0.038
Amérique N.	(NOAM)	0.09842	-0.08456	-0.21017	0.247

- Déformations locales

Outre les déformations globales décrites précédemment, les déformations locales doivent également être prises en considération dans le modèle d'estimation. Ces déformations représentent le mouvement propre à chaque station en fonction de son environnement. Dépendant de l'endroit où l'on se trouve, certaines de ces déformations peuvent avoir une amplitude importante. Parmi les différentes causes de ces déformations, nous citons en particulier:

- la circulation des eaux souterraines;
- les déformations locales des zones actives;
- des mouvements locaux (glissement de terrain, subsidence...).

III.3.2. Maintenance temporelle d'un système de référence terrestre

Avant de parler de la maintenance d'un système de référence terrestre, voyons d'abord, d'une manière générale, le modèle d'estimation de coordonnées de stations tenant compte de leur mouvements dus aux déformations exposées ci-dessus.

Le vecteur coordonnées $X(t)$ d'un point (s) sur la surface de la Terre peut s'exprimer de la manière suivante (Boucher, 1988b):

$$X_s(t) = X_{o,s} + \dot{X}_{o,s}(t-t_o) + L_{k,s}(t) + \Delta X_{m,s}(t) \quad (\text{III.6})$$

avec,

$$\dot{X}_{o,s} = \Omega_P \wedge X_{o,s} + \dot{h}_s \frac{X_{o,s}}{|X_{o,s}|} \quad (\text{III.7})$$

où

$X_{o,s}$: constantes; coordonnées déterminées à t_o ,

$L_{k,s}$: mouvement additionnel pour des périodes régulières, $t \in [t_k, t_k + T[$, où T peut être un jour, un mois, une année....,

$\Delta X_{m,s}$: modèle de mouvement dû aux marées terrestres, comprenant la déformation permanente,

\dot{h}_s : déplacement vertical,

Ω_p : vecteur rotation de la plaque p.

L'équation (III.6) représente un modèle général d'estimation, comprenant les mouvements des plaques tectoniques, les marées terrestres et surcharges océaniques et les mouvements complémentaires (L_k). Ces derniers termes, L_k , sont très

importants car il peuvent à la fois, modéliser les variations locales, résiduelles ou irrégulières et éventuellement, si l'on a adopté un modèle, compenser ses inexactitudes.

Il convient de rappeler ici que la matérialisation d'un système de référence terrestre à une époque initiale, t_0 , définit le repère de référence correspondant. Ce dernier est en quelque sorte fixé par les positions initiales (à t_0) des stations du système terrestre et ne change pas. Il est par conséquent clair que c'est le système terrestre qui est en mouvement (au sens des déformations de la croûte terrestre) et ne coïncide en général avec son repère qu'à t_0 .

Dans ce cas, si l'équation (III.6) est valable dans le système (1), avec l'équation (I.15, page 30) ceci nous donne dans le système (2) :

$$\begin{aligned} X2_s(t) = & X1_{o,s} + \dot{X}1_{o,s}(t-t_0) + L1_{k,s}(t) + \Delta X_{m,s}(t) \\ & + T(t) + Q(t).X1_{o,s} + O_2.X1_{o,s} \end{aligned} \quad (\text{III.8})$$

Le fait que (III.6) est également valable dans le système (2) nous permet de développer T et Q au premier ordre, avec une précision suffisante, et :

$$\begin{cases} X2_{o,s} = X1_{o,s} + T_o + Q_o \cdot X1_{o,s} \\ \dot{X}2_{o,s} = \dot{X}1_{o,s} + \dot{T}_o + \dot{Q}_o \cdot X1_{o,s} \\ L1_{k,s} = L2_{k,s} \end{cases} \quad (\text{III.9})$$

en négligeant les termes $Q_o \cdot \dot{X}1_{o,s}$

Les équations (III.9) représentent des formules de transformation d'un système de référence terrestre (1) vers un système de référence terrestre (2) tenant compte des variations temporelles (dues aux déformations globales et locales) des coordonnées et des paramètres de transformation.

Voyons maintenant ce que nous entendons par maintenance d'un système de référence terrestre.

La maintenance d'un système de référence terrestre consiste à préserver l'orientation de ses axes de telle façon que les paramètres de rotation de la Terre soient toujours définis par rapport aux mêmes axes. Afin d'arriver à ceci, il faut rappeler les faits suivants:

- les paramètres de rotation de la Terre sont des paramètres globaux, en ce sens qu'ils représentent l'orientation globale de la Terre dans l'espace (ou par rapport à un système céleste),

- les déformations ne concernent qu'une partie (la croûte) de la Terre,

- le principe des techniques spatiales crée une dépendance inévitable entre la position du point sur la surface de la Terre et l'orientation de celle-ci dans l'espace.

Il en résulte que pour maintenir un système de référence terrestre, il faut nécessairement séparer les paramètres globaux (rotation et éventuellement translation) des déformations. Il s'en suit que la définition complète d'un système de référence se décompose en deux étapes:

- sa définition à une époque de référence (t_0) moyennant 7 contraintes d'origine, d'échelle et d'orientation. C'est ici, par rapport aux axes du système à t_0 (ou de son repère, car ils sont confondus à cette date là), que les paramètres de rotation de la Terre sont définis,

- son évolution dans le temps, obtenue en imposant dans la modélisation des contraintes supplémentaires ne concernant que les déformations.

L'approche qui peut être faite pour une meilleure définition d'un système terrestre et de sa maintenance est celle d'un système d'axes de Tisserand (Boucher et Feissel, 1983, Boucher 1988b). Dans un tel système, l'énergie cinétique de la croûte terrestre c est minimale:

$$T = \frac{1}{2} \int_c v^2 dm \quad (\text{III.10})$$

On définit également, dans ce système, une quantité de mouvement \vec{p} et un moment cinétique \vec{h} . Nous allons voir ci-dessous pourquoi ces deux quantités sont nulles comme nous l'avons mentionné dans la première partie (équation I.1, page 14).

Soient \vec{X} et \vec{V} respectivement la position et la vitesse d'un point sur la surface de la Terre dans un système inertiel, et \vec{x} , \vec{v} dans le système terrestre. On a :

$$\begin{cases} \vec{X} = \vec{r}_0 + \vec{x} \\ \vec{V} = \vec{V}_0 + \vec{v} + \vec{\omega} \wedge \vec{x} \end{cases} \quad (\text{III.11})$$

où $\vec{\omega}$ est le vecteur rotation instantanée du système terrestre par rapport au système inertiel.

L'équation (III.11) donne en différentiant,

$$\begin{cases} \vec{\delta} = \delta \vec{r}_o + \delta \vec{x} \\ \vec{\delta} = \delta \vec{V}_o + \delta \vec{v} + \delta \vec{\omega} \wedge \vec{x} + \vec{\omega} \wedge \delta \vec{x} \end{cases} \quad (\text{III.12})$$

et donc

$$\delta T = \int_c \vec{v} \cdot \delta \vec{v} \, dm = -\vec{p} \cdot \delta \vec{V}_o - \vec{h} \cdot \delta \vec{\omega} + \vec{p} \cdot (\vec{\omega} \wedge \delta \vec{r}_o) \quad (\text{III.13})$$

$$\delta T = 0 \Leftrightarrow \vec{p} = \vec{h} = \vec{\delta} \quad (\text{III.14})$$

Le domaine d'intégration considéré ici correspond à l'ensemble de la croûte terrestre (Smith, 1981), car c'est sur cette dernière que les stations d'observation sont localisées.

Etant donné que le repère terrestre est constitué d'un nombre fini de stations, on est alors amené à faire une approximation en remplaçant les intégrales par des sommes finies.

Un système terrestre de Tisserand est donc caractérisé par une quantité de mouvement et un moment cinétique nuls. Il est par conséquent défini à une époque de référence (t_o) et son évolution dans le temps est réalisée (en considérant les équations (III.6) et (I.1) et en remplaçant \int_c par \sum_s) par :

$$\left\{ \begin{array}{l} \sum_s m_s (\dot{X}_s + dL_{k,s}/dt) = 0 \\ \sum_s m_s X_{o,s} \wedge (\dot{X}_s + dL_{k,s}/dt) = 0 \end{array} \right. \quad (\text{III.15})$$

ou encore en considérant (III.7),

$$\left\{ \begin{array}{l} \sum_s m_s \Omega_p \wedge X_{o,s} + \sum_s m_s \dot{h}_s \frac{X_{o,s}}{|X_{o,s}|} + \sum_s m_s dL_{k,s}/dt = 0 \\ \sum_s m_s X_{o,s} \wedge (\Omega_p \wedge X_{o,s}) + \sum_s m_s X_{o,s} \wedge dL_{k,s}/dt = 0 \end{array} \right. \quad (\text{III.16})$$

Les termes des marées terrestres étant éliminés, l'équation (III.16) introduit six contraintes dans la définition du système de référence. L'échelle étant considérée comme indépendante du temps et m_s jouant le rôle de pondération des équations. Cette équation représente la condition générale du système d'axes de Tisserand.

Les six contraintes minimum imposées par cette équation peuvent être, par exemple, appliquées sur quelques stations se trouvant sur des parties stables à l'intérieur des plaques tectoniques principales. Le choix de ces stations peut aussi être fait parmi celles ayant une période d'observation importante permettant l'estimation de leurs mouvements. Ceux-ci peuvent également être contraints à ceux calculés par un modèle a priori. Ce choix d'un modèle a priori peut être nécessaire, permettant ainsi de comparer les mouvements ajustés à ceux prédits par le modèle.

L'adoption seulement d'un modèle de mouvement absolu, comme ceux de Minster et Jordan par exemple, peut être une approche quant à l'évolution temporelle du système terrestre. Ceci est réalisé en adoptant les vitesses estimées par le modèle sans aucune contrainte supplémentaire et, le système terrestre suit par conséquent le mouvement global prédit par le modèle adopté.

Notons que dans tous les cas, une bonne répartition des stations sur les plaques tectoniques principales (ce qui n'est pas le cas actuellement) est souhaitable pour une meilleure estimation des déformations de la croûte terrestre.

Les centres d'analyse ont une grande variété de choix quant à, d'une part l'adoption des modèles de corrections et d'autre part, les paramètres ajustés dans l'estimation par moindres carrés. Parmi les nombreuses possibilités qui peuvent exister, nous en donnons ci-dessus quatre (résumées également dans la Table 4), qui sont généralement les plus utilisées actuellement:

A) solution pour les valeurs constantes de positions à l'époque t_0 ,

$$X_s(t) = X_{o,s} + \Delta X_{m,s}(t)$$

Les valeurs X_o sont ajustées pour chaque station. Dans ce cas, supposant que t_s et T_s soient respectivement l'époque centrale et la période totale des observations de la station (s), nous avons,

$$\langle X_s \rangle = \frac{1}{T_s} \int_{t_s - T_s/2}^{t_s + T_s/2} X_s(t) dt \quad (\text{III.17})$$

et donc

$$X_{o,s} = \langle X_s - \Delta X_{m,s} \rangle \quad (\text{III.18})$$

La notation $\langle x \rangle$ désigne la valeur moyenne de x .

B) solution à l'époque t_0 avec modèle de mouvement des plaques,

$$X_s(t) = X_{o,s} + \dot{X}_s(t-t_0) + \Delta X_{m,s}(t)$$

Trois coordonnées sont également ajustées pour chaque station, X_o ,

$$X_{o,s} = \langle X_s - \Omega_p \wedge X_{o,s}(t-t_o) - \Delta X_{m,s} \rangle \quad (\text{III.19})$$

C) solution de positions et de vitesses à t_o ,

$$X_s(t) = X_{o,s} + \dot{X}_s(t-t_o) + \Delta X_{m,s}(t)$$

Six paramètres sont ajustés pour chaque station, X_o et \dot{X} ,

$$X_{o,s} + \dot{X}_s(t-t_o) = \langle X_s - \Delta X_{m,s} \rangle \quad (\text{III.20})$$

D) solution à des périodes régulières,

$$X_s(t) = X_{o,s} + \dot{X}_s(t-t_o) + L_{k,s}(t) + \Delta X_{m,s}(t)$$

Trois positions X_o et trois corrections de période T sont ajustées,

$$X_{o,s} + L_{k,s} = \langle X_s - \Omega_p \wedge X_{o,s}(t-t_o) - \Delta X_{m,s} \rangle_{t_k}^{t_{k+1}} \quad (\text{III.21})$$

$$\forall t_k \in [t_s - T_s/2 , t_s + T_s/2] \text{ et, } t_{k+1} = t_k + T$$

Dans les cas (A) à (C), le système et son évolution dans le temps sont définis par des contraintes d'origine, d'échelle et d'orientation comme décrit plus haut. Le cas (D) peut se faire de la même manière ou par l'intermédiaire de la forme discrétisée du système d'axes de Tisserand :

- résolution à l'époque t_o , on obtient ainsi les coordonnées

initiales X_k ,

- résolution à l'époque t_i avec 7 contraintes minimum :
 une contrainte d'échelleⁱ et 6 contraintes d'évolution en
 utilisant l'équation d'évolution suivante (provenant de
 l'équation (I.2), page 22):

$$\left\{ \begin{array}{l} \sum_s m_s (X_{k+1,s} - X_{k,s}) = 0 \\ \sum_s m_s X_{k,s} \wedge (X_{k+1,s} - X_{k,s}) = 0 \end{array} \right. \quad (\text{III.22})$$

avec l'approximation de \vec{V}_k par $\frac{X_{k+1,s} - X_{k,s}}{T}$

Table 4. Quatre possibilités d'estimation des coordonnées de stations

Choix -----	Paramètres estimés -----	Modèles de correction -----	Epoque de Référence -----
(A)	X_0	ΔX_m	t_0
(B)	X_0	ΔX_m et \dot{X}	t_0
(C)	X_0 et \dot{X}	ΔX_m	t_0
(D)	X_0 et L_k	ΔX_m et \dot{X}	périodes régulières

III.4. MODELE D'ESTIMATION POUR LES COMPARAISONS ET LES COMBINAISONS DE JEUX DE COORDONNEES

Les différentes techniques de mesure nous offrent chacune une réalisation de son propre système de référence dans lequel sont exprimées les coordonnées de stations. Des écarts systématiques peuvent exister entre les réalisations, même au sein d'une même technique, si les différents centres de calcul utilisent des modèles distincts dans le traitement des observations.

Ainsi, un nombre important de réalisations est actuellement disponible grâce aux différents programmes internationaux de mesures et d'analyse. Comme exemples de ces programmes, le projet MERIT/COTES, les programmes permanents (Crustal Dynamics, IRIS-VLBI...) et plus particulièrement aujourd'hui dans le cadre du Service International de la Rotation Terrestre (IERS).

Il est d'un intérêt général d'analyser ces différentes réalisations, de les comparer afin d'estimer les relations qui les lient et enfin de les combiner en vue de l'établissement d'un système global et unifié. La combinaison suppose un certain degré de cohérence entre les différentes réalisations concernées. Afin de procéder à ceci, il convient tout d'abord de préciser les points suivants:

a) la combinaison de plusieurs réalisations doit être faite en tenant compte du résultat auquel l'on veut arriver: précision des coordonnées, répartition des stations sur la Terre, mouvement de plaques, définition du système sous-jacent (origine, échelle et orientation) et son évolution dans le temps...;

b) l'analyse de chaque réalisation individuelle doit être accompagnée de la connaissance précise de toute la modélisation utilisée par le centre de calcul: les corrections introduites (relativistes, marées terrestres, mouvement de plaques...), les valeurs des constantes conventionnelles (GM, c), la définition même du système de référence sous-jacent...;

c) apporter, le cas échéant, aux réalisations individuelles, avant la combinaison, toutes les corrections nécessaires à leur homogénéisation.

Il existe plusieurs modèles de comparaison, chacun est adapté à un type de comparaison précis (voir Boucher, 1979a et 1979b). Le modèle de comparaison adopté ici est celui de Bursa-Wolf, exprimé par l'équation (I.15, page 30) en négligeant les termes du deuxième ordre. C'est un modèle standard à sept paramètres et est le mieux adapté à la comparaison de jeux de coordonnées relatifs aux systèmes d'origine spatiale, mettant en

évidence les paramètres fortement corrélés.

III.4.1. Liens locaux entre les stations d'observation

L'analyse des différentes réalisations du système terrestre, comme les comparaisons et les combinaisons, nécessite la connaissance précise des éléments de rattachement entre les stations en colocation. Il faut donc s'assurer de la validité du rattachement, de la date à laquelle il a été réalisé, de la technique (terrestre ou spatiale) utilisée, de son exactitude et de sa précision. Cette dernière doit être centimétrique voire millimétrique pour un calcul le plus précis possible.

Deux stations sont en colocation si le vecteur tridimensionnel les reliant est connu dans un système de référence terrestre géocentrique.

En pratique, les valeurs de rattachement sont utilisées :

- soit comme fixes: il n'y a pas de déplacement sensible des stations, et dans ce cas nous choisissons arbitrairement un point par site qu'on appellera point de référence. Le vecteur rattachement entre une station s et le point de référence r du site, doit être exprimé dans un système géocentrique. Il peut donc s'écrire sous la forme tridimensionnelle suivante:

$$\Delta X_{s,r} = X_r - X_s \quad (\text{III.23})$$

- soit en tant qu'équations d'observation. Pour deux stations en colocation, l et k , la ligne de base les reliant est considérée comme une équation d'observation :

$$X_l - X_k = \Delta X_{k,l} + V_{k,l} \quad (\text{III.24})$$

où les termes $V_{k,l}$ sont les résidus.

Les différents types de rattachements peuvent provenir des techniques terrestres traditionnelles, par des levés locaux, ou des techniques spatiales comme le VLBI et le GPS en mode différentiel.

III.4.2. Comparaisons de jeux de coordonnées

La comparaison de deux jeux de coordonnées permet en particulier :

- l'estimation des relations qui les lient,
- de révéler les systématismes qui peuvent exister dans l'un ou l'autre jeu.

Ayant deux jeux de coordonnées contenant des stations en colocation, la comparaison consiste alors en l'estimation, par moindres carrés, utilisant le modèle (I.15), des sept paramètres de transformation (3 translations, 1 facteur d'échelle et 3 rotations) entre les deux systèmes correspondants.

Dans le cas où les rattachements sont fixes, les coordonnées des stations en colocation sont ramenées aux points de référence de leurs sites par les éléments de rattachement. La comparaison entre les deux jeux sera par conséquent réalisée au niveau des points de référence des sites. Dans le cas de deux réalisations différentes d'un même lot d'observations, élaborées bien entendu avec deux modèles de traitement distincts, la comparaison sera faite au niveau des stations elles-mêmes.

La formule (I.15) devient dans ce cas, avec (III.23) :

$$X2_r = \Delta X_{s,r} + X1_s + T + Q.X1_s \quad (\text{III.25})$$

On suppose d'autre part, que les différences d'échelle et d'orientation entre les systèmes dans lesquels sont exprimées les coordonnées et le système dans lequel est exprimé le rattachement sont négligeables. Dans le cas où cette dernière hypothèse n'est plus valable, une solution envisageable est d'écrire l'équation (III.25) sous la forme:

$$X2_r = (1 + Q') \cdot \Delta X_{s,r} + X1_s + T + Q \cdot X1_s \quad (\text{III.26})$$

où Q' peut être estimé ou contraint à des valeurs a priori connues.

Les valeurs estimées des paramètres de transformation dépendent de la répartition géographique des stations en colocation, des caractéristiques internes à chaque jeu de coordonnées et enfin du modèle de comparaison choisi (Boucher, 1979b).

III.4.3. Combinaisons de plusieurs jeux de coordonnées

La combinaison de plusieurs jeux de coordonnées permet, outre les points mentionnés dans le cas d'une comparaison :

- de construire un repère global contenant tous les points des repères individuels inclus dans la combinaison,
- la possibilité de choisir l'origine, l'échelle et/ou l'orientation de l'un ou l'autre parmi les repères concernés.

Comme nous l'avons mentionné auparavant, chaque technique fournit un système de référence spécifique, dont les caractéristiques (origine, échelle et orientation) dépendent des modèles de traitement adoptés par les différents centres de calcul. Ainsi par exemple, l'origine peut être mieux définie par les techniques dynamiques (télémétrie laser sur satellite ou sur la Lune), l'échelle par les techniques dynamiques sur satellite (laser) et l'orientation par les techniques de radio astrométrie comme le VLBI.

La combinaison est l'outil qui nous permet le mélange de plusieurs jeux de coordonnées, exprimées dans différents systèmes de référence, afin de calculer un seul jeu de coordonnées cohérentes, dans un système de référence unique. Ce dernier aura toutes les qualités des systèmes individuels qui le composent.

La méthode de combinaison de plusieurs jeux de coordonnées consiste en un ajustement global, par moindres carrés, utilisant le même modèle (I.15). Ceci nécessite bien évidemment des stations en colocation dans les différents jeux de coordonnées incorporés dans l'ajustement. Les paramètres estimés sont d'une part, les coordonnées des stations dans le système de référence terrestre global et d'autre part, les paramètres de transformation entre le système global et chaque système individuel i , avec :

$$X^{(i)} = X + T^i + Q^i \cdot X \quad (\text{III.27})$$

Le système linéaire représenté par l'équation (III.27) a un défaut de rang minimum de 7, ce qui correspond à la définition même du système de référence. Il est par conséquent nécessaire d'introduire au moins 7 contraintes dans l'ajustement. Ces contraintes peuvent être introduites par exemple:

- en fixant les 7 paramètres d'une solution, et dans ce cas le système global sera identifié à celui de la solution particulière,

- en fixant par exemple, les 3 translations d'une solution issue des méthodes dynamiques afin de définir une origine géocentrique, le facteur d'échelle d'une deuxième ayant une échelle locale de la Terre et les trois rotations d'une troisième ayant une bonne orientation comme le VLBI;

- en contraignant à des valeurs a priori, les paramètres d'une ou plusieurs solutions.

En ce qui concerne les rattachements entre les stations en colocation, ils peuvent être utilisés des deux manières décrites plus haut.

En plus de l'estimation d'un jeu de coordonnées global, la combinaison nous permet également d'évaluer les paramètres de transformation entre chaque système individuel et le système global et, par là même, entre les systèmes individuels eux-mêmes.

III.4.4. Maintenance temporelle d'un système de référence terrestre combiné

Nous avons décrit dans (III.3.2) une procédure générale de maintenance temporelle du système de référence terrestre. Elle peut évidemment s'inscrire dans le cadre d'un système élaboré par une combinaison de plusieurs jeux de coordonnées et ceci en deux étapes:

a) combinaison de jeux de coordonnées à une date de référence, t_0 . Les jeux de coordonnées concernés doivent également avoir t_0 comme date de référence;

b) combinaison à une date t_1 , où les 7 contraintes minimum seront obtenues par :

- une contrainte d'échelle;
- 6 contraintes d'évolution en utilisant l'équation (III.16) ou la forme discrétisée du système d'axes de Tisserand (équation III.22).

Cette procédure nécessite des jeux de coordonnées sous forme de séries temporelles (annuelles par exemple), ou de positions et vitesses à une époque de référence.

La continuité d'orientation du système terrestre peut être assurée en alignant l'orientation du système issu de la combinaison à t_0 à celle d'un système existant (celui de l'IERS par exemple), et ceci:

- soit par l'introduction de séries de paramètres de rotation de la Terre, avec une contrainte d'alignement des axes. Ceci nécessite des équations supplémentaire (du type I.16, page 31) dans le modèle de combinaison;

- soit par l'introduction d'un jeu de coordonnées a priori, exprimées dans le système existant, et en fixant les paramètres d'orientation (et éventuellement de translation) de ce dernier.

III.4.5. Extension d'un repère de référence terrestre combiné

Pour des besoins spécifiques (mentionnés précédemment, voir chapitre I.6), on est parfois amené à connaître la position d'un point dans un système global (comme celui issu d'une combinaison) afin de bénéficier de la cohérence interne et de l'exactitude de ce système. Ceci peut être réalisé :

- soit en rattachant ce point à un autre déjà existant dans le repère matérialisant le système combiné;

- soit, si ce point se trouve dans un endroit isolé, en transformant ses coordonnées dans le système global. Il faut pour cela bien sûr, connaître ses coordonnées dans un système dont les paramètres de transformation par rapport au système global peuvent être connus. C'est le cas par exemple de positionnement absolu par GPS ou Doppler/TRANSIT dont les paramètres de transformation de leurs systèmes respectifs (WGS84 et NSW 922) par rapport au système global peuvent être estimés (voir la quatrième partie, IV.2.6).

QUATRIEME PARTIE

APPLICATIONS DANS LE CADRE DU SERVICE INTERNATIONAL DE LA ROTATION TERRESTRE

IV.1. INTRODUCTION

La définition initiale du système terrestre du BIH en 1968, et ce jusqu'à 1983, a été limitée au maintien de l'orientation de ses axes par l'intermédiaire des séries de paramètres de la rotation de la Terre (ERP : Earth Rotation Parameters), calculées à partir de mesures de temps et de latitudes des stations d'astrométrie optique (cf. II.2)

C'est donc une définition implicite, sans matérialisation physique précise, et l'accès à ce système ne pouvait se faire qu'en passant par les paramètres de rotation de la Terre. Une telle réalisation du système terrestre n'est donc pas satisfaisante car, ni l'origine ni l'échelle ne sont définies.

Il est donc apparu nécessaire d'améliorer la réalisation de ce système en s'appuyant sur les résultats de différents programmes de mesure de la rotation de la Terre par les techniques de géodésie spatiale (Guinot, 1981). Ceci a conduit à la formation du groupe de travail COTES (Système Terrestre Conventionnel), en complément des objectifs initiaux du programme MERIT.

Les données et résultats de ces programmes de mesure et en particulier dans le cadre des travaux de MERIT/COTES, ont permis au BIH de redéfinir son système terrestre en 1984, en continuité avec sa réalisation antérieure.

De 1984 à 1987, les réalisations annuelles du système terrestre du BIH (BTS pour BIH Terrestrial System) s'appuyaient donc sur les coordonnées de stations d'observation des techniques spatiales (Doppler, télémétrie laser sur satellite et sur la Lune et VLBI), et les séries correspondantes des paramètres de rotation de la Terre. Cette procédure avec quelques améliorations, comme nous le verrons plus loin, est actuellement maintenue dans le cadre du Service International de la Rotation Terrestre (IERS).

IV.2. LES REALISATIONS DU SYSTEME DE REFERENCE TERRESTRE CONVENTIONNEL

IV.2.1. Modélisations

a - Modélisation dans le cadre du BIH

La modélisation adoptée dans les réalisations du BTS est une extension du modèle de combinaison décrit précédemment (voir III.4), faisant aussi intervenir les paramètres de rotation de la Terre (Boucher et Feissel, 1984).

Les équations d'observation sont:

- pour chaque coordonnées $X_s^{(i)}$ d'un point s, relatives au système individuel i, et rapportées au point de référence r du site:

$$X_r + T^i + \begin{pmatrix} D^i & -R3^i & R2^i \\ R3^i & D^i & -R1^i \\ -R2^i & R1^i & D^i \end{pmatrix} . X_r = X_s^{(i)} + \Delta X_{s,r} + V_s^{(i)} \quad (IV.1)$$

- pour chaque série (ERP) dérivée du système individuel i, comportant les coordonnées du pôle x, y et le temps universel UT1 aux dates t (par vingtième d'année):

$$\begin{cases} x_t + R2^i = x_t^{(i)} + vx_t^{(i)} \\ y_t + R1^i = y_t^{(i)} + vy_t^{(i)} \\ f.UT1_t - R3^i + A3^i = f.UT1_t^{(i)} + vUT1_t^{(i)} \end{cases} \quad (IV.2)$$

où f est le facteur de conversion de temps universel en temps sidéral.

- afin d'assurer la continuité avec la réalisation initiale du système du BIH, une contrainte d'alignement des axes est introduite sous la forme :

$$\sigma^{-1} \cdot (x_t - x_t^{\text{BIH}}) = 0, \quad t \in T \quad (\text{IV.3})$$

et respectivement pour y et $UT1$, où σ est l'écart type a priori et T est l'intervalle de temps dans lequel la nouvelle série ERP est contrainte à être identique à celle existante du BIH, x_t^{BIH} .

Les inconnues dans le système d'équations ci-dessus sont:

- les coordonnées X_r de chaque point de référence des sites dans le BTS,
- les 7 paramètres de transformation ($T1^i, T2^i, T3^i, D^i, R1^i, R2^i, R3^i$) pour chaque système individuel par rapport au BTS,
- une série (ERP) ($x_t, y_t, UT1_t$) relative au BTS aux dates t .

Dans l'équation (IV.2), dérivée de (I.16), les paramètres de chaque série (ERP) ($x^{(i)}, y^{(i)}, UT1^{(i)}$) sont des valeurs moyennées par vingtième d'année d'intervalle. A l'inverse de A3, les rotations A1 et A2 entre les systèmes célestes correspondants au BTS et au système individuel i , ne peuvent pas être déterminées dans cette analyse. Ceci est dû au fait que les termes en $\cos\theta$ et $\sin\theta$ (où θ est le temps sidéral de greenwich, voir équation (I.16), page 31) sont des termes diurnes qui se trouvent annulés dans les solutions individuelles (obtenues sur un nombre entier de jours de mesures)

b - Modélisation dans le cadre de l'IERS

La modélisation utilisée dans les réalisations du système de référence terrestre de l'IERS, matérialisé par l'ITRF (IERS Terrestrial Reference Frame), diffère de celle du BIH. Elle comporte une première étape, basée sur la combinaison de jeux de coordonnées uniquement. Les coordonnées de toutes les stations sont d'autre part estimées:

- pour chaque coordonnées X_s d'un point s , relatives au système individuel i :

$$X_s + T^i + \begin{pmatrix} D^i & -R3^i & R2^i \\ R3^i & D^i & -R1^i \\ -R2^i & R1^i & D^i \end{pmatrix} . X_s = X_s^{(i)} + V_s^{(i)} \quad (IV.4)$$

- pour deux points en colocation l et k , la ligne de base les reliant est considérée comme une équation d'observation, voir l'équation (III.27)

- la continuité avec la réalisation précédente est assurée par l'introduction des coordonnées des stations de la réalisation précédente et en fixant les 7 paramètres de transformation correspondants.

- une date de référence est choisie (actuellement 1988.0), à laquelle sont ramenées, avant de les introduire dans la combinaison, toutes les coordonnées exprimées dans les systèmes individuels en utilisant leurs modèles de mouvement de plaques respectifs.

Dans une deuxième étape, les trois rotations : $R1$, $R2$ et $R3$ des systèmes individuels par rapport à l'ITRF sont utilisées en tant que biais dans la combinaison des séries temporelles des paramètres de rotation de la Terre. Cette deuxième étape est indiqué sur la Figure 11 schématisant l'analyse globale du Bureau Central de l'IERS.

CENTRAL BUREAU OF IERS : GLOBAL ANALYSIS

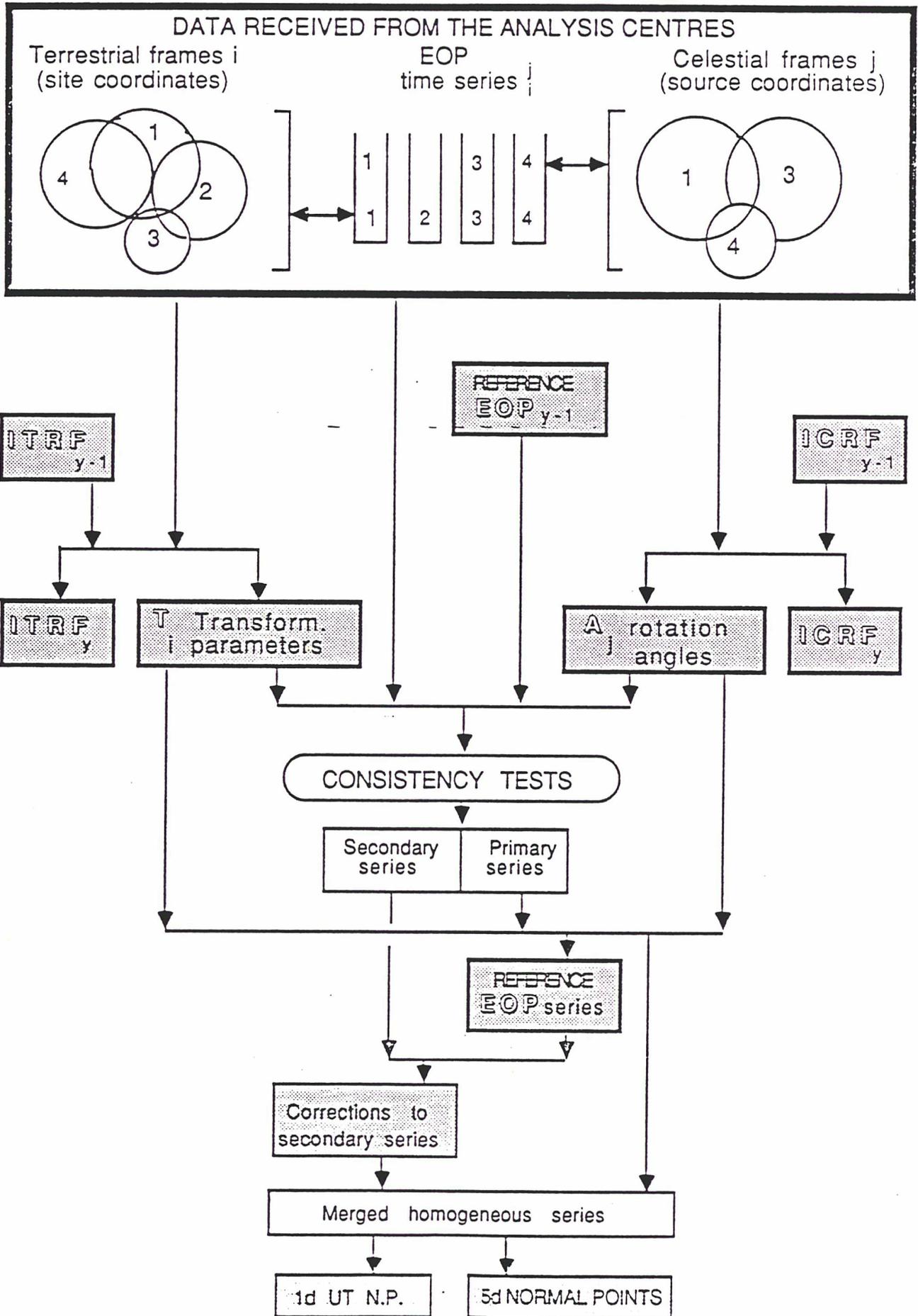


Figure 11. Schéma de la combinaison générale des mesures d'orientation de la Terre (Rapport annuel de l'IERS pour 1988)



IV.2.2 Les réalisations successives du BTS.

Quatre réalisations ont été élaborées: BTS84, 85, 86 et 87. Les résultats de celles-ci ont été publiés dans les rapports annuels du BIH, voir également (Boucher et Altamimi, 1985, 1986b). Ces résultats comprennent un jeu de coordonnées des sites sélectionnés, les paramètres de transformation entre les systèmes individuels et chaque réalisation et enfin, une série temporelle des paramètres de rotation de la Terre.

Le modèle de mouvement de plaques AMO-2, dérivé du modèle global RM2 de Minster et Jordan (1978) a été introduit dans les deux dernières réalisations, en choisissant le 1/01/1984 comme date de référence des coordonnées. Dans la réalisation du BTS86, les coordonnées des sites ont été rapportées à la date de référence dans le cas où la date des coordonnées dans les systèmes individuels est connue.

En ce qui concerne la réalisation BTS87, toutes les coordonnées dans les systèmes individuels disposaient d'une date initiale :

- les jeux de coordonnées calculés en faisant intervenir un modèle de mouvement de plaques possèdent par définition une date de référence,

- pour les jeux de coordonnées calculés sans modèle de mouvement de plaques, nous avons adopté comme date initiale, et ceci pour chaque station, la date centrale des observations.

13 jeux de coordonnées et les séries (ERP) correspondantes ont été sélectionnés pour cette dernière réalisation. Les coordonnées des sites du BTS86 ont également été incorporées.

La réalisation du BTS87 est caractérisée par:

- l'origine, définie en fixant celles des solutions dynamiques Laser satellite et Laser Lune: SSC(CSR) 88 L 01, SSC(GSFC) 87 L 14, SSC(JPL) 88 M 01, SSC(CERGA)88 M 01 et SSC(SO) 86 M 01,

- l'échelle, définie par celles de deux solutions Laser satellite: SSC(CSR) 88 L 01 et SSC(GSFC) 87 L 14,

- l'orientation, définie en fixant celle du BTS86,

- afin d'assurer la continuité avec la réalisation BTS86, la contrainte d'alignement introduite s'étend sur toute la série ERP de l'année 1986.

On désigne par SSC (Set of Station Coordinates) un jeu de coordonnées, R : VLBI, M : laser Lune (LLR) et L : laser satellite (SLR)

- l'évolution temporelle suit la condition de non rotation globale, en adoptant les vitesses de déplacements données par le modèle AMO-2 de Minster et Jordan.

La répartition des 64 sites du BTS87 est illustrée par la Figure 12. La Table 5 donne, par technique, le nombre des sites en colocation répartis sur les 6 plaques tectoniques principales.

La Table 6 donne les paramètres de transformation entre le BTS87 et les systèmes individuels. Ces paramètres sont à utiliser dans le sens système individuel vers le BTS87 en utilisant l'équation (I.15).

Les Tables 5 et 6 ainsi que la Figure 12 sont données ici à titre indicatif. L'analyse et les critiques des réalisations du BTS qui peuvent être faites sont identiques à celles de l'ITRF88 présentées plus loin (voir IV.2.4).

Table 5. Répartition par technique des 64 sites du BTS87 sur les plaques tectoniques principales.

Technique	Plaques tectoniques					
	NOAM	SOAM	PCFC	EURA	AFRC	INDI
VLBI	10		1	6	1	1
LLR	1		1	1		
SLR	17	4	8	21	2	2
Doppler	15	2	5	15		2
Total des sites en colocation	21	4	8	26	3	2

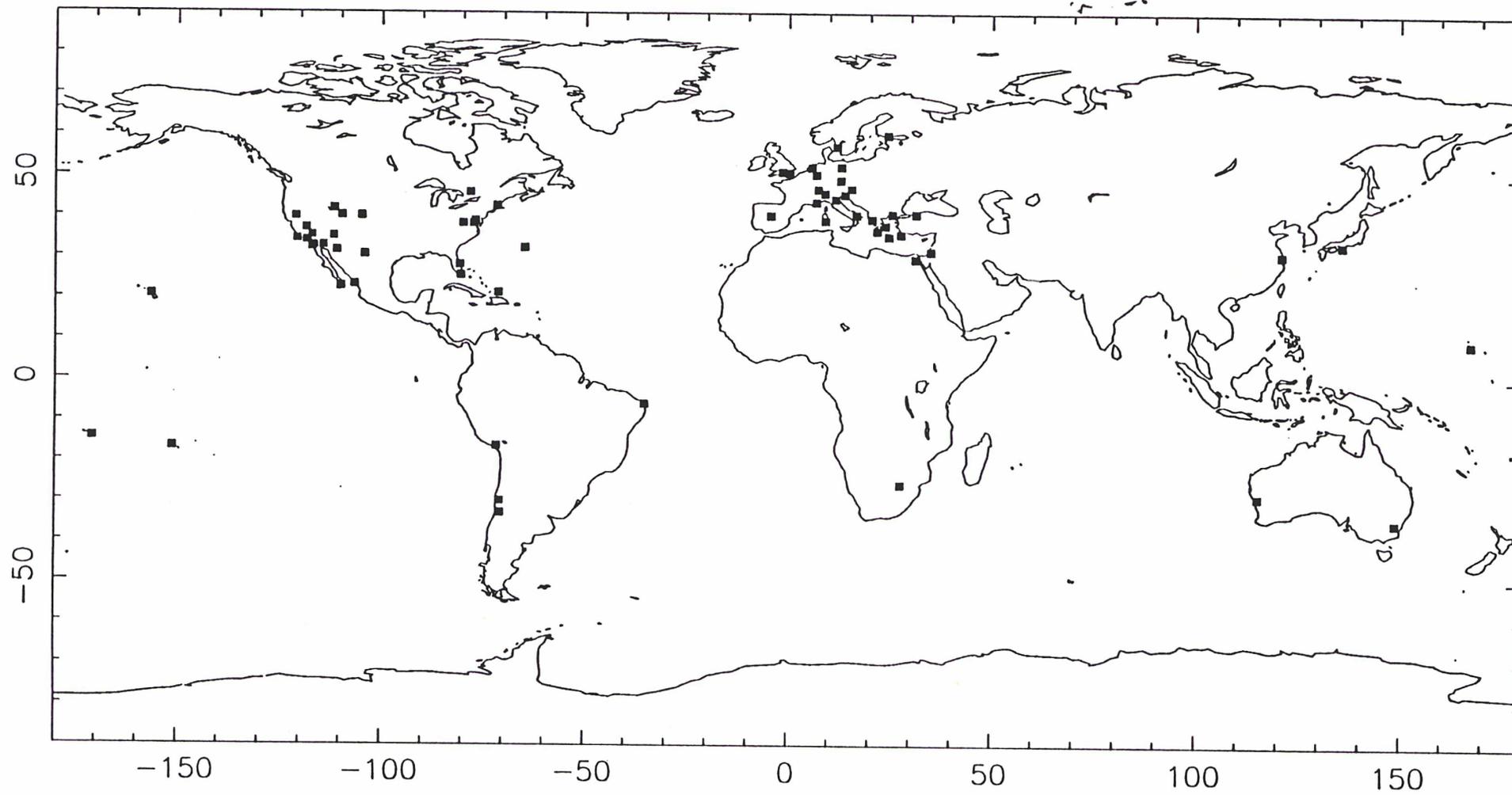
Table 6. Paramètres de transformation de chaque système individuel vers le BTS87
(les incertitudes sont sur la deuxième ligne)

SSC	T1	T2	T3	D	R1	R2	R3
	m	m	m	10^{-6}	"	"	"
NGS 88 R 01	.089 .015	-.143 .015	.016 .016	-.0094 .0028	.0043 .0002	-.0093 .0002	.0033 .0002
GSFC 88 R 01	-1.671 .014	1.054 .014	-.400 .015	.0230 .0026	.0072 .0002	-.0050 .0002	.0036 .0002
JPL 83 R 05	-.242 .072	.121 .073	.183 .074	.0391 .0114	.0014 .0030	.0048 .0028	.0057 .0014
SO 88 R 01	-1.638 .023	.975 .019	-.417 .021	.0091 .0033	.0047 .0005	-.0058 .0007	.0034 .0005
JPL 88 M 01				.0170 .0136	-.0040 .0036	.0004 .0040	.0086 .0036
CERGA 88 M 01				.0243 .0157	.0056 .0045	.0008 .0040	.0038 .0006
SO 86 M 01				.0375 .0193	-.0014 .0048	-.0075 .0051	.0155 .0022
CSR 88 L 01					.0047 .0002	-.0023 .0002	.0105 .0005
GSFC 88 L 01					.0018 .0003	-.0062 .0002	.0075 .0005
DGFI 87 L 03	.040 .011	-.009 .011	-.119 .011	-.0129 .0016	.2842 .0004	.0449 .0004	-.0068 .0005
SO 87 L 01	.043 .039	.045 .039	-.072 .043	-.0053 .0068	.0043 .0005	.0027 .0006	.0019 .0016
DUT 87 L 04	.075 .014	-.047 .014	-.119 .014	-.0103 .0021	-.0002 .0005	.0010 .0005	.0000 .0007
DMA 77 D 01	-.071 .205	.509 .200	4.666 .191	-.5827 .0263	-.0179 .0083	.0005 .0079	.8073 .0060
BTS 86	.085 .014	.027 .015	-.018 .015	-.0004 .0024	.0000 .0000	.0000 .0000	.0000 .0000

Note 1: les paramètres laissés en blanc ont été fixés à zéro dans l'ajustement.

Note 2: les incertitudes correspondent aux écarts types a posteriori

FIGURE 12 – REPARTITION DES SITES DU BTS EN 1987



IV.2.3. Le repère de référence terrestre initial de l'IERS (ITRF-0)

La description du Système de Référence Terrestre de l'IERS telle qu'elle est adoptée dans les Standards IERS est comme suit:

- "a) l'ITRF est géocentrique, considérant la Terre entière ainsi que les océans et l'atmosphère;
- b) son échelle est celle d'un repère local terrestre au sens de la théorie relativiste de la gravitation;
- c) son orientation est définie par celle du BTS en 1984.0;
- d) son évolution dans le temps doit être assurée par une condition de non transformation globale.

Il est en outre recommandé :

- e) d'introduire la correction permanente des marées terrestres telle que les coordonnées adoptées diffèrent de leur valeur instantanée par des termes périodiques uniquement;
- f) d'adopter de préférence les coordonnées cartésiennes équatoriales X, Y, Z. Dans le cas des coordonnées géographiques, λ , ϕ , h , l'ellipsoïde recommandé est le GRS80 ($a = 6378137$ m $1/f = 298.257222$)"

Tenant compte des recommandations précédentes, une réalisation de base (Boucher et Altamimi, 1989) a été élaborée afin de servir en tant que repère de référence terrestre initial, baptisé (ITRF-0). Cette réalisation est, comme nous le verrons plus loin, le lien de continuité entre le BTS87 et l'ITRF88.

Les données incorporées dans cette réalisation sont:

VLBI

- [SSC(NGS) 88 R 01], calculé par le NGS en utilisant les observations couvrant la période Septembre 1980 à Janvier 1988. Le modèle de mouvements de plaques AMO-2 de Minster et Jordan a été appliqué dans le calcul des coordonnées des stations dont la date de référence est le 01/01/1984. Le modèle de corrections relativistes sur la propagation dans un système géocentrique (Hellings, 1986) a été également utilisé (Carter et al, 1988).

- [SSC(GSFC) 88 R 01], calculé par le GSFC en utilisant des observations collectées depuis 1979 et issues des programmes Crustal Dynamics et IRIS. Le modèle de mouvements de plaques AMO-2 a été également utilisé. La date de référence des coordonnées des stations est le 17/10/1980, date à laquelle les paramètres de la rotation de la Terre ont été fixés afin de définir

l'orientation du système terrestre (Ma et al, 1988).

Laser Satellite

- [SSC(CSR) 88 L 01], calculé par le CSR sur la période d'observations 1976-1988. Le modèle de mouvements de plaques AM1-2 de Minster et Jordan a été introduit dans le calcul des coordonnées des stations qui sont rapportées à la date du 01/01/1983.

- [SSC(GSFC) 87 L 14], calculé par le GSFC sur la période d'observation 1976-1987. Le modèle AM0-2 de Minster et Jordan a été appliqué, rapportant les coordonnées des stations à la date du 01/01/1983.

BTS87

Un extrait du BTS 87 a également été incorporé dans le calcul, comportant les coordonnées de 34 sites dits "sites primaires".

On appelle site primaire, un site pour lequel une position tridimensionnelle dans le système de l'IERS peut être estimée d'une manière régulière avec une précision de quelques centimètres.

Les critères de sélection d'un tel site sont donc:

- avoir un instrument de mesure permanent, de préférence laser satellite ou VLBI. Les stations munies d'un instrument mobile et ayant des mesures régulières peuvent être considérées à condition que le rattachement (pour chaque session de mesure) soit exact à quelques millimètres près.;

- utiliser la meilleure technologie actuelle (laser 3ème génération, le système d'acquisition VLBI Mark III S/X...) compatible avec la précision demandée;

- avoir des mesures régulières afin de pouvoir estimer les coordonnées à des périodes régulières (mensuelles) à quelques centimètres près.

L'ITRF-0 est caractérisé par :

- l'origine, l'échelle et l'orientation sont définies en fixant les 7 paramètres du jeu de coordonnées des 34 sites primaires issus du BTS 87. Les paramètres de transformation des autres jeux ont été ajustés. Ainsi, le nouveau repère de référence (ITRF-0) est défini dans le système BTS87.

- l'évolution temporelle suit la condition de non rotation globale, en adoptant les déplacements fixes donnés par le modèle AMO-2 de Minster et Jordan.

Les paramètres de transformation des systèmes individuels par rapport à l'ITRF-0 figurent dans la Table 7. Les coordonnées des points de référence des 34 sites définissant l'ITRF-0 sont données dans la Table 8 où nous donnons également les vitesses prédites par le modèle de mouvement des plaques AMO-2.

Table 7. Paramètres de transformation de l'ITRF-0 vers les systèmes individuels (les incertitudes sont sur la deuxième ligne)

SSC	T1	T2	T3	D	R1	R2	R3
	cm	cm	cm	⁻⁸ 10	0.001"	0.001"	0.001"
SSC(NGS) 88 R 01	-13.7 2.3	17.0 2.3	-2.7 2.2	1.5 .3	-3.6 .9	9.8 .9	.1 .7
SSC(GSFC) 88 R 01	159.5 2.2	-96.4 2.3	38.2 2.1	-1.2 .3	-5.8 .9	5.2 .9	-1.5 .7
SSC(CSR) 88 L 01	-.3 2.2	-.0 2.2	1.6 2.0	-.2 .3	-4.6 .9	1.9 .8	-11.0 .7
SSC(GSFC) 88 L 01	-1.9 2.2	.1 2.2	2.1 2.0	-.3 .3	-1.7 .9	6.0 .8	-7.7 .7

Table 8. Coordonnées des 34 sites primaires dans l'ITRF-0
 Date de référence de coordonnées : 1988.0
 Modèle de mouvement des plaques : AM0-2

Numéro DOMES	Site	X m	Y m	Z m	Vx	Vy mm/an	Vz
10002 M001	Grasse	4581933.421 .072	556384.131 .074	4389077.242 .078	-14.1	18.0	12.4
10402 M003	Onsala	3370764.112 .071	711471.631 .070	5349802.716 .076	-17.2	14.4	9.0
11001 M001	Graz	4194424.238 .075	1162702.390 .073	4647245.221 .078	-16.8	16.8	11.0
12711 M001	Bologna	4461385.692 .076	919555.791 .074	4449529.756 .084	-15.5	17.7	11.9
12734 S001	Matera	4641965.142 .075	1393069.923 .076	4133262.204 .081	-16.2	18.1	12.1
13212 M002	Herstmonceux	4033586.048 .069	24250.909 .070	4924205.820 .074	-13.7	16.4	11.2
13504 M001	Kootwijk	3899217.468 .083	396767.961 .083	5015070.104 .078	-15.2	16.0	10.6
14001 M001	Zimmerwald	4331274.006 .074	567584.254 .075	4633139.172 .078	-14.8	17.3	11.7
14106 M001	Potsdam	3800621.416 .109	882005.377 .109	5028859.642 .092	-16.9	15.7	10.1
14201 M001	Wettzell	4075575.227 .072	931832.059 .072	4801568.895 .076	-16.5	16.5	10.8
20702 M001	Bar Giyyora	4443967.434 .085	3121945.385 .086	3334694.363 .092	-24.3	15.3	18.0
21605 M001	Shanghai	-2831089.881 .203	4676203.019 .188	3275170.119 .177	-25.1	-7.9	-10.3
21701 M001	Kashima	-3997912.773 .086	3276621.120 .083	3724030.144 .114	-21.5	-11.7	-12.8
21726 M001	Simosato	-3822373.413 .082	3699359.761 .081	3507585.767 .098	-22.4	-11.2	-12.6
40405 M001	Goldstone	-2353394.106 .065	-4641529.704 .065	3676899.234 .068	-15.8	-1.5	-12.0
40408 S001	Fairbanks	-2282195.211 .064	-1452934.546 .069	5756900.319 .069	-23.3	-2.7	-9.9

Table 8. (suite)

40420	Vandenberg						
M001		-2668815.870	-4530761.551	3598687.233	-15.5	-1.4	-13.2
		.065	.067	.072			
40424	Kauai						
S001		-5543845.996	-2054564.221	2387813.773	-10.5	68.5	34.6
		.075	.081	.093			
40433	Quincy						
M001		-2516893.115	-4198845.082	4076411.498	-17.3	-1.7	-12.4
		.064	.065	.066			
40439	Owens Valley						
M001		-2410422.379	-4477802.748	3838686.657	-16.4	-1.6	-12.2
		.064	.065	.068			
40440	Haystack						
M001		1492453.766	-4457278.813	4296815.900	-18.2	-2.8	3.4
		.064	.061	.069			
40442	Fort Davis						
M004		-1330832.474	-5328746.584	3235663.718	-14.2	-1.5	-8.4
		.066	.064	.070			
40445	Maui						
M001		-5466006.470	-2404427.916	2242187.470	-15.3	67.3	34.9
		.072	.076	.082			
40451	Washington						
M110		1130731.489	-4831322.617	3994136.414	-17.1	-2.6	1.7
		.064	.062	.070			
40489	Hat Creek						
M001		-2523871.893	-4123580.006	4147719.091	-17.6	-1.8	-12.4
		.064	.066	.069			
40496	Platteville						
M002		-1240708.052	-4720454.373	4094481.606	-17.5	-2.0	-7.7
		.064	.063	.066			
40497	Monument Peak						
M001		-2386277.924	-4802354.329	3444881.451	-36.2	34.7	23.3
		.066	.065	.069			
40499	Richmond						
M001		961317.873	-5674054.858	2740563.633	-12.3	-1.8	0.6
		.069	.066	.077			
40504	Mazatlan						
M001		-1660089.280	-5619100.405	2511637.834	-11.4	-1.0	-9.8
		.070	.066	.073			
41703	Easter Island						
M001		-1884983.905	-5357606.784	-2892852.671	85.9	-25.3	-9.0
		.229	.209	.207			
42202	Arequipa						
M002		1942784.901	-5804081.721	-1796911.235	-5.4	-4.7	9.3
		.092	.094	.093			
50103	Orroral						
M103		-4466609.920	2683169.494	-3667428.544	-36.2	-2.7	42.2
		.114	.109	.113			
50107	Yarragadee						
M001		-2389006.512	5043329.292	-3078525.371	-51.4	8.0	53.0
		.116	.109	.117			
92202	Motu Hiumoo						
M001		-5345882.693	-2958272.283	-1824430.449	-43.8	57.2	35.4
		.094	.092	.093			

IV.2.4. Le repère de référence terrestre de l'IERS pour 1988 (ITRF88)

Commençant par le premier rapport annuel de l'IERS, une première réalisation annuelle du système terrestre de l'IERS a été effectuée. Désignée par ITRF88, cette réalisation est le fruit d'une combinaison globale (ajustement par moindres carrés) de 15 jeux de coordonnées (6 VLBI, 5 laser satellite et 4 laser Lune) reçus par le Bureau Central de l'IERS en 1989.

La description de la détermination de ces jeux de coordonnées et les séries correspondantes des paramètres d'orientation de la Terre se trouve dans la Note Technique de l'IERS n° 2. Nous avons d'autre part dressé, annexe 1, des fiches descriptives des systèmes de référence terrestres correspondants.

Les caractéristiques de l'ITRF88 sont:

- l'origine, l'échelle et l'orientation sont définies en introduisant dans l'ajustement en tant que coordonnées a priori, les coordonnées des stations de l'ITRF-0 avec leurs variances. Autrement dit, en fixant les 7 paramètres de transformation du jeu de coordonnées ITRF-0;

- les rattachements locaux entre les stations ont été introduits (avec des écarts types a priori) en tant qu'observations (voir équation III.27). Ces rattachements sont issus des techniques terrestres traditionnelles et des techniques spatiales, GPS et VLBI;

- la date 1988.0 a été choisie comme époque de référence pour les jeux de coordonnées utilisés. Les jeux ayant une autre date de référence ont d'abord été ramenés à 1988.0 par leurs modèles de mouvement de plaques respectifs;

- ont été ajustées, les coordonnées de 158 stations regroupées dans 96 sites, ainsi que les 7 paramètres de transformation de chaque système individuel par rapport à l'ITRF88;

- le nombre de sites en colocation entre laser satellite et VLBI est de 16 (dans le cas de la solution VLBI du NGS) et de 19 (avec la solution VLBI du GSFC). Celui entre laser Lune et laser satellite est de 3. Il serait souhaitable d'augmenter le nombre de colocations afin d'obtenir une meilleure estimation des paramètres de transformation entre les différentes réalisations;

- la répartition des 96 sites de l'ITRF88 (Table 9 et Figure 13) est plus particulièrement concentrée dans l'hémisphère nord et notamment sur les deux plaques NOAM et EURA. L'on remarque surtout le nombre réduit des sites sur des plaques telles que SOAM, AFRC, INDI, et NAZC. En outre, les plaques de COCO, CARB, ANTA, ARAB ne possèdent aucun site actuellement.

Les résultats de l'ITRF88 ont été publiés dans le Rapport Annuel de l'IERS pour 1988. Nous reproduisons ici les coordonnées des 158 stations (annexe 2) et les paramètres de transformation des 15 jeux de coordonnées par rapport à l'ITRF88 (Table 10).

Table 9. Répartition par technique des 96 sites de l'ITRF88 sur les plaques tectoniques.

Technique	Plaques tectoniques						
	NOAM	SOAM	PCFC	EURA	AFRC	INDI	NAZC
VLBI	32		11	8	1	1	
LLR	1		1	1			
SLR	21	4	8	27	2	2	1
Total des sites en colocation	39	4	15	32	3	2	1

FIGURE 13- REPARTITION DES 96 SITES DE L'ITRF88

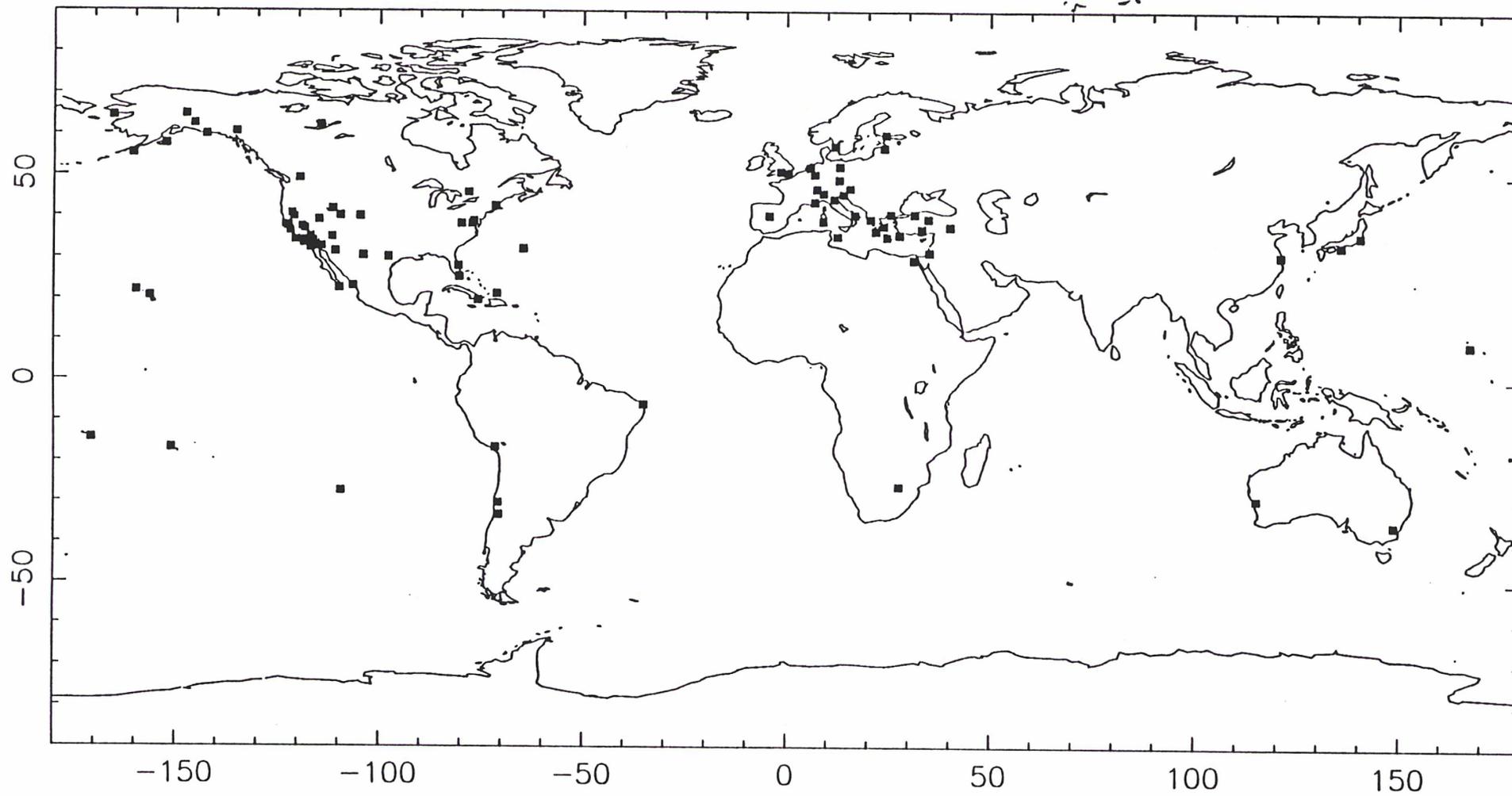


Table 10. Paramètres de transformation de l'ITRF88 vers les systèmes individuels.
(les incertitudes sont sur la deuxième ligne)

Solution	T1	T2	T3	D	R1	R2	R3
	cm	cm	cm	10^{-8}	.001"	.001"	.001"
SSC(NGS) 89 R 01	-6.0 1.7	12.0 1.7	-1.9 1.7	1.9 0.2	-3.1 0.7	8.0 0.7	1.2 0.5
SSC(GSFC) 89 R 01	160.4 1.7	-82.9 1.7	57.0 1.6	-1.5 0.2	2.5 0.7	2.0 0.7	1.4 0.5
SSC(GSFC) 89 R 03	160.7 1.7	-84.7 1.7	55.3 1.6	-1.5 0.2	1.7 0.7	1.8 0.7	1.4 0.5
SSC(JPL) 89 R 02	-4.3 1.8	1.9 1.8	-20.4 1.8	-3.5 0.2	-0.6 0.8	-1.1 0.7	7.9 0.6
SSC(NAOMZ) 89 R 01	-10.1 8.2	17.2 8.0	-2.7 6.8	1.1 1.0	-3.6 3.0	8.5 3.1	-0.2 2.2
SSC(SO) 89 R 01	158.6 23.4	-98.5 12.4	47.8 17.4	-1.0 1.4	-4.6 6.3	11.3 9.6	-1.5 3.9
SSC(JPL) 89 M 01	-9.2 3.3	5.6 3.7	4.9 3.5	-2.0 0.4	5.6 1.7	1.4 1.3	-12.1 1.0
SSC(CERGA) 89 M 01	-9.3 3.4	-3.7 4.0	-4.9 3.5	-5.2 0.4	-4.4 1.9	1.6 1.3	-12.2 1.0
SSC(UTXMO) 89 M 01	-4.0 9.8	-2.4 11.4	-14.8 10.2	-3.9 1.3	-3.9 5.4	4.9 3.7	-2337.2 2.8
SSC(SO) 86 M 01				-2.7 1.0	5.3 2.4	-0.6 3.2	-7.5 2.8
SSC(CSR) 89 L 02	1.2 1.7	1.8 1.7	3.5 1.6	-0.5 0.2	-3.4 0.7	4.4 0.7	-16.3 0.5
SSC(GSFC) 89 L 01	-0.3 1.7	2.1 1.7	6.2 1.6	-0.6 0.2	-0.6 0.7	5.6 0.6	-8.2 0.5
SSC(ZIPE) 89 L 01	12.3 3.4	1.2 3.3	-19.5 3.2	-1.5 0.5	-0.2 1.4	-3.1 1.4	-1.5 1.1
SSC(SO) 88 L 01	-1.7 3.3	5.1 3.3	6.1 3.2	1.0 0.5	-0.1 1.3	-1.0 1.3	-6.5 1.1
SSC(DUT) 89 L 01	0.5 1.7	3.0 1.7	-1.3 1.6	-1.6 0.2	1.2 0.7	0.4 0.7	-4.5 0.5

IV.2.5. Analyse des réalisations du Système de Référence Terrestre Conventionnel de l'IERS

Afin d'étudier la cohérence interne de la réalisation de l'ITRF88, et les relations qui lient, deux à deux, les solutions individuelles, des comparaisons et des combinaisons de jeux de coordonnées supplémentaires ont été effectuées. Avant de décrire ces dernières, il est nécessaire de rappeler brièvement les critères de qualité, au sens des moindres carrés, d'une combinaison de jeux de coordonnées. Ces critères sont:

- le facteur unitaire de variance, obtenu par le rapport de la somme des carrés des résidus sur le nombre de degré de liberté.

- les écarts types a posteriori sur les coordonnées des stations de la solution combinée ainsi que sur les paramètres de transformation;

- les résidus après compensation sur les coordonnées des stations des solutions individuelles, obtenus par les différences entre les coordonnées compensées et celles observées;

Ces critères sont, bien sûr, étroitement liés. Ainsi, une sur-estimation (écarts types a priori trop faibles) d'un ou plusieurs jeux de coordonnées peut provoquer des valeurs élevées du facteur unitaire de variance et des écarts types a posteriori. D'autre part, plus les résidus sont petits, meilleure est l'estimation, car celle-ci consiste à minimiser la somme des carrés des résidus (objet de la méthode des moindres carrés). De plus, des résidus élevés peuvent refléter plusieurs aspects, par exemple erreur de rattachement entre deux stations en colocation, erreur dans les coordonnées d'une station donnée, systématismes résiduels, etc.

L'ajustement de l'ITRF88 a conduit à une valeur élevée (5.5) du facteur unitaire de variance, conséquence d'une sur-estimation de la précision de certaines solutions, particulièrement VLBI. Ceci n'affecte pas significativement les paramètres estimés. D'où, les combinaisons supplémentaires ci-dessous ont été effectuées en imposant des bornes inférieures aux écarts-types a priori sur les coordonnées des stations des solutions individuelles : 3 cm pour le VLBI, 4 cm pour le laser satellite et 5 cm pour le laser Lune.

Les comparaisons et combinaisons supplémentaires effectuées sont :

- des comparaisons directes entre solutions issues d'une même technique et de techniques distinctes;

- une combinaison globale, notée ITRF88A, incluant 8 jeux de coordonnées (3 VLBI, 3 laser Lune et 2 laser satellite). Les coordonnées des stations de l'ITRF-0 ont également été introduites dans cette combinaison, jouant le même rôle que dans l'ITRF88.

- une combinaison globale, notée ITRF88B, incluant 2 jeux de coordonnées VLBI, 2 laser satellite et un jeu laser Lune. Les paramètres fixés sont ceux de la solution laser satellite SSC(CSR) 89 L 01.

Les paramètres de transformations entre les différentes solutions ont ainsi été estimés de quatre manières : comparaison directe, ITRF88, ITRF88A, ITRF88B. La Table 11 fournit les quatre estimations des paramètres de transformation entre deux solutions VLBI (NGS et GSFC), la Table 12 celles entre deux solutions laser satellite (CSR et GSFC), la Table 13 celles entre une solution VLBI (NGS) et une laser satellite (CSR) et enfin la Table 14 celles entre une solution laser satellite (CSR) et une laser Lune (JPL).

Table 11. Paramètres de transformation entre deux solutions VLBI (les incertitudes sont sur la deuxième ligne)

SSC(NGS) 89 R 01 ---> SSC(GSFC) 89 R 03 (25 sites en colocation)

Solution	T1	T2	T3	D	R1	R2	R3
	cm	cm	cm	10^{-8}	.001"	.001"	.001"
Comparaison directe	167.3	-100.8	54.9	-3.2	2.8	-7.6	1.1
	2.0	2.1	1.9	.3	.8	.8	.6
ITRF88	166.6	-96.7	56.2	-3.4	4.8	-6.2	0.2
	1.7	1.7	1.6	.2	.7	.7	.5
ITRF88A	167.7	-91.4	55.6	-3.4	2.8	-7.9	1.1
	2.5	2.6	2.5	.3	1.1	1.0	.8
ITRF88B	167.6	-91.1	54.3	-3.3	2.6	-7.9	1.2
	2.4	2.6	2.5	.4	1.0	.9	.9

Table 12. Paramètres de transformation entre deux solutions SLR
(les incertitudes sont sur la deuxième ligne)

SSC(CSR) 89 L 02 ---> SSC(GSFC) 89 L 01 (54 sites en colocation)

Solution	T1	T2	T3	D	R1	R2	R3
	cm	cm	cm	10^{-8}	.001"	.001"	.001"

Comparaison directe	-1.6 .6	0.2 .6	2.6 .6	0.0 .1	2.9 .2	1.0 .3	8.4 .2
ITRF88	-1.5 1.7	0.3 1.7	2.7 1.6	-0.1 .2	2.8 .7	1.2 .6	8.1 .5
ITRF88A	-0.9 2.2	-1.1 2.2	2.4 2.1	0.1 .3	2.4 .9	0.9 .9	8.3 .7
ITRF88B	-0.9 1.2	-0.9 1.2	2.5 1.2	0.1 .2	2.4 .5	0.9 .5	8.2 .4

Table 13. Paramètres de transformation entre une solution VLBI et
une SLR
(les incertitudes sont sur la deuxième ligne)

SSC(CSR) 89 L 02 ---> SSC(NGS) 89 R 01 (16 sites en colocation)

Solution	T1	T2	T3	D	R1	R2	R3
	cm	cm	cm	10^{-8}	.001"	.001"	.001"

Comparaison directe	-5.3 3.8	15.9 4.3	2.7 4.1	2.3 .6	4.8 1.7	6.8 1.4	14.1 1.2
ITRF88	-7.2 1.7	10.2 1.7	-5.4 1.6	2.4 .2	0.3 .7	3.6 .7	15.1 .5
ITRF88A	-5.9 2.4	13.1 2.4	2.6 2.3	1.8 .3	3.7 1.0	5.6 .9	14.7 .7
ITRF88B	-4.7 2.5	14.0 2.7	-0.5 2.6	2.4 .4	3.3 1.1	5.6 .9	14.7 .8

Table 14. Paramètres de transformation entre une solution LLR et une SLR
(les incertitudes sont sur la deuxième ligne)

SSC(CSR) 89 L 02 ---> SSC(JPL) 89 M 01 (3 sites en colocation)

Solution	T1	T2	T3	D	R1	R2	R3
	cm	cm	cm	10^{-8}	.001"	.001"	.001"

Comparaison directe	-14.7 9.4	9.9 11.5	5.5 9.8	-2.1 1.2	14.0 5.6	-1.6 3.6	4.5 2.7
ITRF88	-10.4 3.3	3.8 3.7	1.4 3.5	-1.5 .4	9.0 1.7	-3.0 1.3	4.2 1.0
ITRF88A	-9.8 6.2	-0.1 7.2	0.3 6.6	-1.4 .8	8.1 3.3	-3.3 2.3	4.1 1.8
ITRF88B	-13.7 6.5	8.5 7.6	1.1 6.9	-1.4 .9	12.3 3.6	-2.2 2.4	4.3 1.9

Analyse des solutions individuelles

Au vu de ces résultats (Tables 11 à 14), on peut faire les remarques suivantes:

- les paramètres de transformations entre les solutions analysées ne varient pas significativement d'une estimation à l'autre parmi les quatre solutions présentées,

- la différence d'origine entre les deux solutions VLBI (Table 11) est supérieure à 1 mètre, conséquence de la définition arbitraire de l'origine dans cette technique. On note cependant que l'incertitude de l'estimation des translations entre ces deux solutions est de 3 cm. L'origine étant géocentrique par définition dans les techniques dynamiques, on remarque le très bon accord (de l'ordre de 3 cm avec une incertitude du même ordre de grandeur) entre les deux solutions laser satellite (Table 12). Par contre, la différence d'origine entre les solutions laser satellite et laser Lune (Table 14) est de l'ordre de 10 cm (avec une incertitude du même ordre). Ceci s'explique par la géométrie assez pauvre du réseau laser Lune; 3 sites seulement sont en colocation avec le laser satellite, Ce qui entraîne une forte corrélation entre les paramètres de transformation,

- la différence d'échelle entre les deux solutions VLBI est de l'ordre de 3.3×10^{-8} (Table 11). Ceci est dû, en grande partie (1.5×10^{-8}), à la différence de modélisation des effets relativistes entre le NGS et le GSFC. Cette différence est presque négligeable entre les deux solutions laser satellite (Table 12), utilisant les mêmes valeurs de GM et de c. Il n'empêche que cette différence d'échelle est de l'ordre de 2×10^{-8} entre le VLBI NGS et le laser satellite CSR (Table 13), alors qu'elle est de l'ordre de 1×10^{-8} et de 1.5×10^{-8} , dans le sens opposé, dans les cas du VLBI GSFC et du laser Lune JPL respectivement. Ce qui laisse un point d'interrogation sur la modélisation des effets relativistes du NGS,

- l'orientation dépend, pour toutes les solutions présentées ici, des valeurs initiales des paramètres de rotation de la Terre fixées dans chaque solution individuelle. On note cependant que la différence d'orientations entre ces solutions est de l'ordre de quelques 0.001". Par contre, la précision de l'estimation de la différence d'orientation entre les solutions laser satellite et laser Lune (Table 14) est de l'ordre de 0.004". Ceci est dû au faible nombre de stations en colocation entraînant une forte corrélation entre les paramètres de transformation.

Cohérence interne de l'ITRF

La précision et la cohérence interne des déterminations successives de l'ITRF dépendent bien évidemment de celles des solutions individuelles utilisées dans chaque combinaison. Ceci est vrai pour l'ensemble des analyses faites au Bureau Central de l'IERS (systèmes terrestre et céleste et séries temporelles des paramètres de rotation de la Terre) dont le souci permanent est la cohérence entre ces différentes analyses. Heureusement, bien que les conditions initiales (contraintes sur l'origine et l'orientation) des solutions individuelles changent d'une année à l'autre, dans le même temps, la qualité de ces solutions s'améliore. Ceci est illustré dans la Table 15 où l'on a contrôlé la cohérence des paramètres de rotations entre différents systèmes individuels avec les différences systématiques entre les paramètres de rotation de la Terre relatifs aux mêmes systèmes. Trois ensembles de données, correspondant à trois époques différentes, sont présentés dans la Table 15. Les incohérences internes diminuent considérablement au cours du temps gagnant près d'un ordre de grandeur en quelques années.

Notons d'autre part que la technologie actuelle (VLBI Mark III et laser satellite 3ème génération) contribue à l'amélioration de l'exactitude des différentes réalisations. Ceci est implicitement visible dans la Table 15 où les incertitudes de l'estimation des paramètres de rotation de la Terre entre les solutions VLBI et laser satellite passe de quelques dizaines de 0.001" en 1980 pour tomber au niveau du 0.001" actuellement.

Table 15. Paramètres de rotation entre différents systèmes terrestre (Ri) et les différences systématiques entre les paramètres de rotation de la Terre (ri) relatifs aux mêmes systèmes. (Unités : 0.001")

	cohé- rence			cohé- rence			cohérence				
	R1	r1	R1-r1	R2	r2	R2-r2	R3	A3-R3	r3	A3-R3-r3	
1) RN-RG	-2.3 1.0	0.6 .4	-2.9	-0.2 1.0	-1.7 .7	1.5	2.3 .5				
LG-LC	14.6 3.5	18.4 .9	-3.8	11.0 3.7	4.5 1.5	6.5	298.5 3.3				
LC-RN	-15.8 16.0	-6.0 1.1	-9.8	-12.4 14.0	-6.2 1.1	-6.2	-183.7 6.8				
LC-RG	6.9 45.7	-4.4 1.1	11.3	10.4 14.2	-9.8 1.5	20.2	-173.8 15.8				
2) RN-RG	2.6 1.0	2.2 .1	0.4	4.6 1.0	5.3 .1	-0.7	1.7 .7	-1.4	-0.1	1.3	
LG-LC	2.9 1.0	2.9 .1	0.0	4.3 1.0	4.2 .1	.1	3.1 .3				
LC-RN	-1.3 1.0	0.0 .1	-1.3	-9.4 1.0	-7.5 .1	-1.9	-10.9 .7				
LC-RG	1.3 1.0	2.1 .1	-0.8	-5.0 1.0	-2.2 .1	-2.8	-9.2 .7				
3) RN-RG	-5.6 1.0	-6.0 .1	0.4	6.0 1.0	9.1 .1	-3.1	-0.2 .5	0.1	0.6	-0.5	
LG-LC	2.8 1.0	3.2 .1	-0.4	1.2 .9	1.2 .1	0.0	8.5 .5				
LC-RN	-0.3 1.0	0.8 .2	-1.1	-3.6 1.0	-5.4 .2	1.8	-15.1 .5				
LC-RG	-3.1 1.0	-2.0 .1	-1.1	3.6 .9	4.9 .1	-1.3	-17.7 .5				

RN : VLBI NGS RG : VLBI GSFC LC : SLR CSR LG : SLR GSFC

1) Données 1980-1983 (Boucher et Feissel, 1984)

2) Données 1988 (Arias et al, 1988)

3) Données 1989 (Altamimi et al, 1989)

Continuité des réalisations du SRTC de l'IERS

La contrainte de continuité des réalisations du SRTC est indispensable à plusieurs égards et en particulier:

- le lien direct entre la détermination des paramètres de la rotation de la Terre et le SRTC;

- la maintenance de ce dernier à travers ses réalisations successives;

- la diversité des solutions individuelles et plus particulièrement de leurs définitions de l'origine, de l'échelle et de l'orientation;

- la référence "absolue" à laquelle le SRTC doit correspondre dans l'étude des déformations de la croûte terrestre.

Cette continuité avec la précision requise ainsi que la meilleure réalisation possible ont toujours été, dans le cadre du BIH, et sont toujours le souci principal dans le cadre de l'IERS. Ceci est bien montré dans la Table 16 où l'on voit que l'instabilité des origines, échelles et orientations passent de plusieurs centimètres avec les premières réalisations pour tomber en dessous du centimètre avec les réalisations les plus récentes.

Table 16. Paramètres de transformation entre les différentes réalisations du SRTC du BIH et de l'IERS

RRTC de	vers	T1 cm	T2 cm	T3 cm	D 10 ⁻⁸	R1 .001"	R2 .001"	R3 .001"
BTS84	BTS85	2.3 2.0	4.4 2.0	3.7 2.0	-0.2 .3	-0.2 .8	-1.4 .7	-4.2 .7
BTS85	BTS86	5.1 2.2	-2.3 2.2	-7.0 2.2	-0.9 .3	-2.5 .9	-0.6 .8	-6.9 .8
BTS86	BTS87	8.5 1.4	2.7 1.5	-1.8 1.5	0.0 0.2	0.0	0.0	0.0
BTS87	ITRF0	0.4 1.0	-0.1 1.0	0.2 1.0	-0.1 .1	0.0 .4	0.0 .4	-0.2 .3
ITRF0	ITRF88	0.7 0.4	-0.3 0.4	-0.7 0.4	0.1 .1	-0.3 .1	-0.2 .1	-0.1 .1

IV.2.6. Extension de l'ITRF88

Il existe un grand nombre d'applications dans lesquelles, dans des endroits dépourvus de station laser ou VLBI, l'on a besoin de se rattacher à un système terrestre précis.

Le repère ITRF se présente comme un bon candidat afin de répondre à ces besoins, offrant une bonne cohérence interne. Pour que l'ITRF soit accessible de la manière la plus large possible, il est nécessaire de fournir des paramètres de transformation entre l'ITRF et d'autres systèmes issus des méthodes de positionnement par point isolé comme le NSW 922 (système des Ephémérides Précises) et le WGS84 utilisé par le GPS.

Pour ceci, nous avons réalisé une combinaison incluant d'une part un jeu de coordonnées des stations de l'ITRF88 et d'autre part, un jeu de coordonnées Doppler exprimé dans le système NSW 922. Ce jeu Doppler contient plus de 100 stations en colocation avec au moins une station de l'un des trois réseaux, VLBI, laser Lune et laser satellite. Ceci nous a permis d'obtenir des paramètres de transformation entre l'ITRF88 et le système des Ephémérides Précises NSW 922, donnés Table 17. Connaissant les paramètres de transformation entre le NSW 922 et le WGS84 (voir DMA, 1987), nous avons également fourni des paramètres de transformation entre l'ITRF88 et le WGS84.

Etant donné que ces deux systèmes (WGS84 et NSW 922) sont définis avec une précision interne de 50 cm, l'exactitude de l'estimation des paramètres de transformation fournis dans la Table 17 est également de 50 cm.

Notons cependant que nous avons sélectionné le plus de stations Doppler possibles (plus de 100 stations) afin d'obtenir une meilleure estimation. Une autre sélection de stations entraînerait d'autres valeurs de paramètres de transformation.

Bien que la précision de ce type de coordonnées, issues du Doppler, ne puisse être meilleure que 50 cm, le passage par un système précis tel que celui offert par l'ITRF, nous permet de bénéficier de sa globalité et de sa cohérence interne.

Table 17. Paramètres de transformation entre l'ITRF88,
NSWC 9Z2 et WGS84

De	Vers	T1	T2	T3	D	R1	R2	R3
		m	m	m	10^{-6}	"	"	"
1 ITRF88	NSWC9Z2	-0.124	-0.810	-4.888	0.5858	.0085	.0011	-.7969 (1)
2 NSWC9Z2	WGS84	0.000	0.000	4.500	-0.6000	.0000	.0000	.8140 (2)
3 ITRF88	WGS84	-0.124	-0.810	-0.388	-0.0142	.0085	.0011	.0171 (3)

(1) Valeurs issues de l'ajustement global

(2) Valeurs issues de (DMA, 1987); voir aussi Boucher et al, (1988)

(3) 1 + 2

IV.3. ANALYSE D'EFFETS LIES AU REPERE TERRESTRE

IV.3.1. Nombre et répartition géographique des colocations

Comme nous l'avons mentionné dans la troisième partie, le nombre des stations en colocation et leur répartition géographique ont une influence importante dans l'estimation des paramètres de transformation entre les différentes solutions. Afin d'évaluer l'effet de nombre de colocations, nous avons réalisé trois combinaisons contenant les mêmes jeux de coordonnées (2 SLR : CSR 89 L02 (LC) et GSFC 89 L01 (LG) et 2 VLBI : NGS 89 R01 (RN) et GSFC 89 R01 (RG)), mais en faisant intervenir toutes les stations en colocation SLR-VLBI (soit au total 19 sites) dans la première, 10 sites dans la deuxième et enfin 5 sites dans la troisième. Dans la deuxième et la troisième combinaison, nous avons veillé à ce que la répartition géographique soit la même (contenant toutes deux les deux colocations européennes; Wettzell et Bologne, et les autres colocations se trouvent toutes en Amérique du nord). Afin d'évaluer l'effet de la répartition géographique, une quatrième combinaison a été réalisée, contenant 10 colocations se trouvant toutes dans la partie ouest des USA (distance maximale entre stations inférieure à 2000 km). De chacune de ces quatre combinaisons, nous avons extrait (Table 18) les paramètres de transformation entre la solution laser satellite CSR et les deux solutions VLBI du GSFC et du NGS.

Nous aurions pu faire des comparaisons directes (deux à deux) entre les solutions SLR et VLBI, ce qui ne donneraient pas exactement les mêmes valeurs des paramètres de transformation. Nous avons cependant préféré les combinaisons afin de faire contribuer les stations en colocation entre par exemple (LC et RN n'existant pas entre LG et RN) ou entre (LG et RN n'existant pas entre LC et RN), etc. Exemples : le site de Bologne (Italie) existe dans RN, RG et LC et pas dans LG, le site de Vandenberg (USA) existe dans RN, RG et LG et pas dans LC.

L'analyse des paramètres estimés et de leur incertitude dans les quatre cas, nous montre en particulier que (voir Table 18):

- plus l'on dispose de stations en colocation, plus précise est l'estimation des paramètres,

- l'estimation des paramètres de transformation de la quatrième combinaison est la plus mauvaise. Ceci est, bien sûr, dû au fait que les colocations de cette quatrième combinaison ont une répartition géographique non optimale.

- les différences entre les quatre ensembles de valeurs estimées sont supérieures aux incertitudes de leurs déterminations, surtout en ce qui concerne les rotations,

- il est à noter que moins on dispose de colocations, plus fortes sont les corrélations entre les paramètres estimés, notamment entre les translations et les rotations.

Nous pouvons dire en conclusion que pour une meilleure estimation des paramètres de transformation et pour augmenter la cohérence d'ensemble (systèmes céleste et terrestre et rotation de la Terre), il faut disposer de solutions contenant entre elles le plus de colocations possibles avec la meilleure répartition géographique possible.

Table 18. L'effet de nombre et de la répartition géographique des colocations sur l'estimation des paramètres de transformation :

SSC(CSR) 89 L 01 ---> SSC(GSFC) 89 R 03 (RG)
SSC(CSR) 89 L 01 ---> SSC(NGS) 89 R 01 (RN)

	T1	T2	T3	D	R1	R2	R3	Nb.
	cm	cm	cm	10^{-8}	.001"	.001"	.001"	
<hr/>								
<u>RG</u>								
COMBINAISON 1	162.9	-87.1	53.8	-0.9	5.9	-2.3	15.9	19
	2.4	2.6	2.4	.4	1.0	.9	.8	
COMBINAISON 2	160.9	-90.6	48.5	-0.8	3.6	-3.8	17.6	10
	3.2	3.5	3.2	.4	1.5	1.2	.9	
COMBINAISON 3	165.9	-92.9	46.4	-0.9	1.7	-5.4	16.7	5
	5.3	5.0	4.8	.5	2.3	2.2	1.1	
COMBINAISON 4	164.0	-94.9	9.8	2.4	-7.5	-1.3	17.6	10
	19.7	16.9	23.3	2.2	7.8	6.2	5.4	
<u>RN</u>								
COMBINAISON 1	-4.7	14.0	-0.5	2.4	3.3	5.6	14.7	16
	2.5	2.7	2.6	.4	1.1	.9	.8	
COMBINAISON 2	-6.5	9.9	-6.6	2.5	0.7	3.8	16.6	10
	3.4	3.6	3.3	.4	1.5	1.3	.9	
COMBINAISON 3	-1.5	7.6	-8.5	2.3	-1.1	2.2	15.6	5
	5.4	5.0	4.8	.5	2.3	2.2	1.1	
COMBINAISON 4	-3.4	5.6	-45.2	5.7	-10.3	6.3	16.6	10
	19.7	16.9	23.3	2.2	7.8	6.2	5.4	

Nb. : nombre de sites en colocation

IV.3.2. Modélisation du mouvement des sites

Nous avons sélectionné ici quelques exemples de solutions laser satellite et VLBI comportant divers traitements du mouvement des stations. L'analyse et les critiques de ces solutions sont basées sur les deux ensembles: coordonnées de stations et paramètres de rotation de la Terre, ou sur l'un ou l'autre ensemble, en fonction des données disponibles.

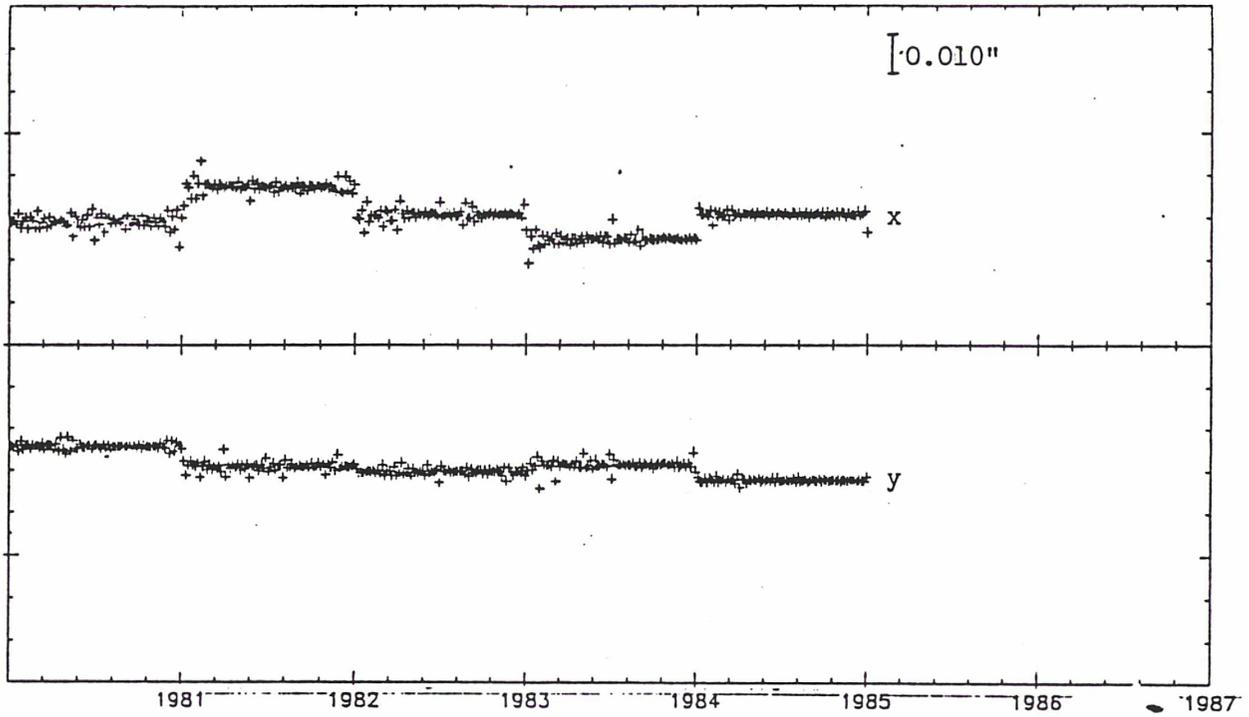
L'analyse des séries temporelles des paramètres de rotation de la Terre a été réalisée avec l'aimable collaboration de Madame Martine Feissel.

EXEMPLE 1

Il s'agit d'une solution laser satellite élaborée par le DGFI/RFA, calculée sur la période de 1980 à 1984. Cinq solutions annuelles des coordonnées de stations, des paramètres de rotation de la Terre et des paramètres d'orbite ont été estimées. La contrainte de continuité d'orientation imposée dans les cinq solutions est la suivante: en fixant aux mêmes valeurs la longitude et la latitude de la station de Yaragadee et la latitude de la station de Wettzell. Des cinq jeux de coordonnées de toutes les stations laser ainsi obtenus, un jeu global a été moyenné et ramené à la date de 1984.0 à l'aide des variations des coordonnées annuelles.

Une analyse des paramètres de rotation de la Terre a montré que la continuité des cinq séries annuelles n'était pas assurée. Une deuxième solution a été fournie par ce même centre, dans laquelle la contrainte de continuité consiste à ajuster en moyenne les séries de paramètres de rotation de la Terre sur celles du BIH. Les séries de la première solution ont été comparées à celles de la deuxième solution. La Figure 14 montre les différences des coordonnées du pôle (x,y) entre les deux séries. On voit des sauts importants (atteignant parfois 0.01"). Ceci montre bien que la contrainte de continuité géométrique imposée dans la première solution ne correspond pas à la réalité physique révélée par les paramètres de rotation de la Terre.

Figure 14. Différences de coordonnées du pôle entre deux séries laser satellite (DGFI L01 et L02) de paramètres de rotation de la Terre



EXEMPLE 2

L'objet de cet exemple est, pour un certain nombre de stations, de comparer les prédictions du modèle AMO-2 de Minster et Jordan, à ce que donnent les observations.

A cet effet, Chopo Ma, du Goddard Space Flight Center, nous a aimablement fourni 5 solutions annuelles VLBI, relatives aux époques 1984.5 à 1988.5. Chacune de ces solutions a été calculée d'une manière indépendante (au point de vue des mesures incorporées dans chaque solution) et n'a concerné que les stations observées durant l'année de la solution. Les caractéristiques de ces cinq solutions sont:

- l'origine: en fixant les coordonnées de la station de Westford aux mêmes valeurs dans les cinq solutions (les coordonnées adoptées au 17/10/80 dans la solution VLBI GLB480 (GSFC 89 R01), voir annexe 1 pour la description de cette solution);

- l'orientation: en choisissant une date de référence près du milieu de chaque année pour laquelle les valeurs a priori des paramètres d'orientation de la Terre sont celles de la solution VLBI GLB480. Ainsi, l'orientation de chacune des 5 solutions est en principe identique à celle de la solution GLB480;

- l'évolution temporelle: aucun modèle de mouvement n'a été utilisé. Chaque solution fournit les positions de stations moyennées sur l'année d'observation. La date de référence des coordonnées qu'il faut considérer ici correspond au milieu de l'année.

Avant de procéder à la comparaison des solutions annuelles et la solution globale (GLB480), nous allons d'abord analyser ces solutions concernant les origines et les orientations des systèmes de référence qui y sont associés.

L'origine est définie, dans les solutions annuelles ainsi que dans la globale (GLB480), par l'adoption de coordonnées pour la station Westford. Mais il se trouve que les coordonnées utilisées dans les cinq solutions annuelles sont différentes des coordonnées effectives dans la solution globale dans laquelle Westford était astreinte à se déplacer selon le modèle AMO-2. Une correction d'origine s'impose par conséquent, en appliquant à chaque solution annuelle une translation correspondant aux différences de coordonnées de Westford dans les deux cas. Les cinq translations appliquées sont données dans la Table 19.

Après leur avoir appliqué cette correction d'origine, nous avons comparé les 5 jeux de coordonnées à celui donné par la solution GLB480. Ce dernier étant calculé en adoptant les vitesses de déplacements données par le modèle AMO-2, nous l'avons d'abord ramené, par ce même modèle, à la date de chacune

des 5 solutions avant chaque comparaison. Les paramètres de transformation ainsi obtenus sont fournis dans la Table 20.

Table 19. Correction d'origine à appliquer aux jeux VLBI annuels afin de tenir compte du mouvement de Westford (AM0-2) dans la solution GLB480

Solution GLB480 - Solutions annuelles

Date	dx m	dy m	dz m
84.5	-0.066	-0.010	0.013
85.5	-0.085	-0.013	0.016
86.5	-0.103	-0.016	0.019
87.5	-0.121	-0.018	0.023
88.5	-0.139	-0.021	0.026

Table 20. Paramètres de transformation entre les solutions annuelles VLBI et la solution globale GLB480, calculées par le GSFC

De GLB480	T1	T2	T3	D	R1	R2	R3	ns
vers	cm	cm	cm	10^{-8}	.001"	.001"	.001"	
Solution 1984.5	2.1 1.3	6.5 1.3	0.7 1.3	0.1 .2	1.6 .5	0.1 .5	-1.1 .4	18
Solution 1985.5	8.1 .8	3.0 .8	2.3 .8	0.0 .1	1.2 .3	-1.6 .3	-1.8 .2	18
Solution 1986.5	0.1 .3	.4 .3	1.6 .3	-0.1 .1	0.4 .1	0.4 .1	-0.3 .1	17
Solution 1987.5	-1.7 .7	-3.4 .7	-4.2 .6	0.0 .1	-1.4 .3	-1.2 .3	1.9 .2	15
Solution 1988.5	3.4 .6	-0.9 .6	0.6 .5	-0.3 .1	-0.4 .2	-0.6 .2	-1.0 .2	22

ns. : nombre de stations dans chaque solution

D'après la Table 20, les remarques suivantes peuvent être faites:

- l'ordre de grandeur des paramètres de transformation est inférieur à 10 cm,

- les différences d'échelles sont négligeables,

- les valeurs de la translation en Z, -4.2 cm, et de la rotation autour de Z, 0.0019", de la solution 1987.5 sont dans le sens opposé par rapport à celles des autres solutions,

- l'évolution temporelle des paramètres de transformation est aléatoire, reflétant ainsi un comportement différent d'une solution à l'autre,

En fait, les paramètres de transformation de la Table 20 reflètent les différences globales entre les deux estimations. Ces différences comprenant naturellement toutes sortes d'erreurs systématiques y compris, au moins pour certaines stations, les écarts par rapport au modèle AMO-2. Il est par conséquent plus profitable de comparer les positions de stations dans les deux cas. Avant de procéder à ceci nous allons d'abord voir ce que nous révèlent les paramètres de rotation de la Terre

Les séries annuelles de paramètres d'orientation de la Terre relatives à ces solutions ont d'autre part été comparées à celles de la solution GLB480. Les différences entre les 5 séries de paramètres d'orientation de la Terre ainsi obtenues sont représentées sur la Figure 15. On note clairement sur cette Figure une pente croissante dans les trois coordonnées, plus particulièrement en UT1. Cette pente est en quelque sorte prévisible dans la mesure où l'évolution temporelle du système terrestre associé à la solution GLB480 (AMO-2) est différente de celle du système associé aux solutions annuelles. On voit d'autre part des décrochements annuels, en particulier de la série 1987 et notamment en UT1. L'estimation des différences moyennes entre ces paramètres est donnée dans la Table 21. Il apparaît par conséquent nécessaire d'assurer la continuité d'orientation le plus exactement possible.

La correction d'orientation à appliquer correspond en fait aux différences systématiques annuelles de paramètres de rotation de la Terre. Ainsi, nous avons appliqué à chaque solution annuelle, des rotations issues de la Table 21: -dy pour R1, -dx pour R2 et enfin dUT1 pour R3. Les valeurs de A3 ont été négligées et qui sont de l'ordre de -0.27, -0.53, 0.62, 0.02 et 0.30 respectivement pour 1984.5 à 1988.5

Table 21. Différences systématiques entre les paramètres d'orientation de la Terre donnés par les solutions annuelles VLBI et la solution globale GLB480.

De (GSFC) 89 R01 vers	dx .001"	dy .001"	dUT1 .001"	d ψ .001"	d ϵ .001"
Solution 1984.5	0.01 .09	0.21 .16	-0.05 .06	-9.13 .08	2.42 .03
Solution 1985.5	-0.28 .05	0.06 .05	0.08 .17	-10.00 .10	2.24 .03
Solution 1986.5	0.20 .06	0.06 .04	0.61 .08	-8.50 .11	2.33 .04
Solution 1987.5	-0.60 .09	-1.09 .04	-2.37 .07	-8.24 .08	2.11 .03
Solution 1988.5	-0.12 .06	0.04 .04	0.67 .05	-5.97 .06	3.28 .03

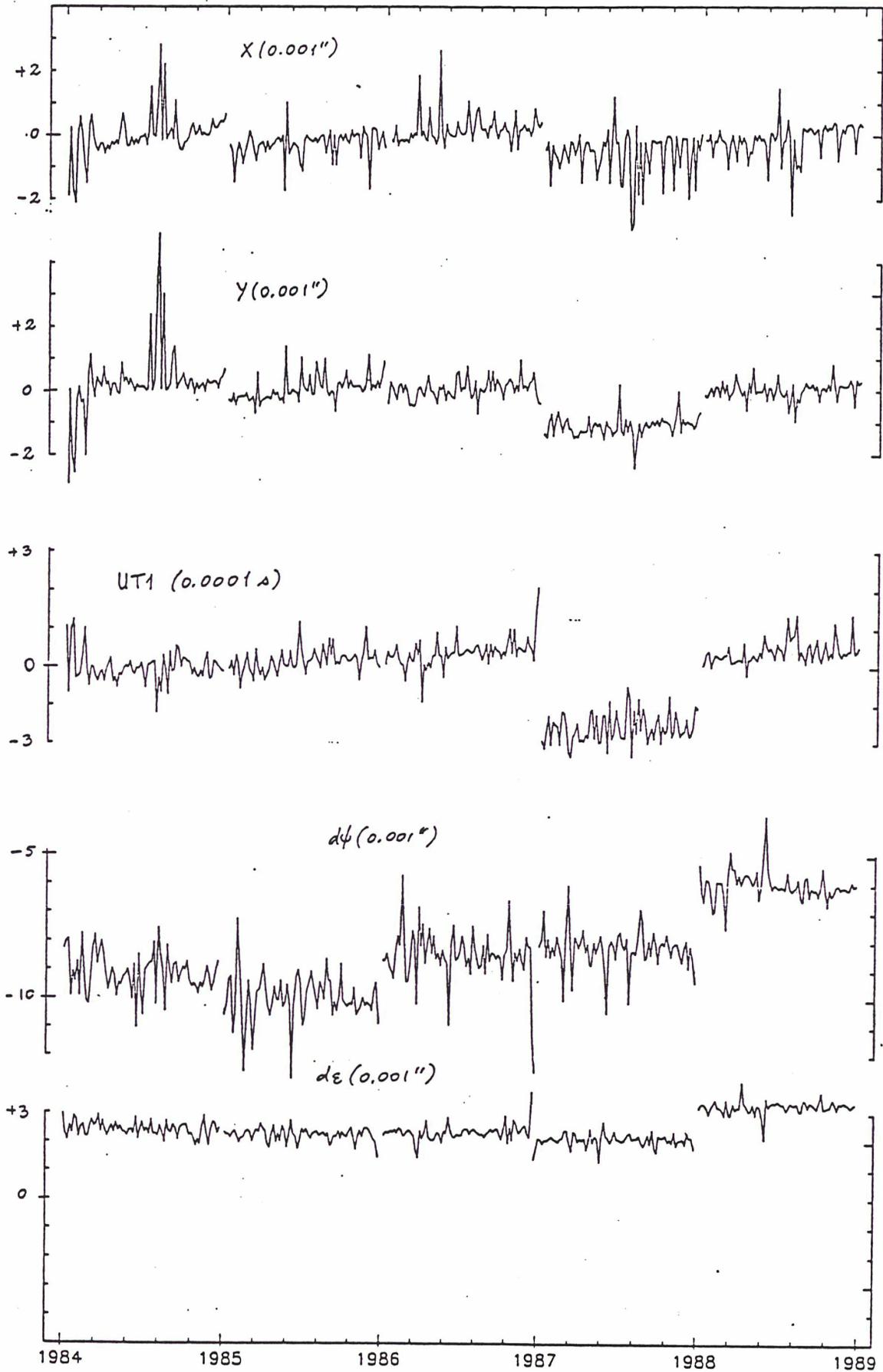
Quant à la comparaison de positions des stations, nous sommes face à deux choix :

- soit la comparaison de positions "absolues" des stations et dans ce cas, rien ne nous permet de conclure que les différences, quantitativement faibles, correspondraient réellement aux inexactitudes du modèle, étant donné d'une part la quantité assez réduite de données disponibles et d'autre part, les erreurs systématiques qui peuvent s'y ajouter. Par contre, l'avantage dans ce cas, si d'une part on dispose de suffisamment de données et d'autre part, la continuité d'orientation et d'origine est correctement assurée, est d'avoir l'évolution temporelle des positions absolues de chaque station tenant compte ainsi des déformations locales;

- soit la comparaison de positions relatives, tenant compte des mouvements d'ensemble du réseau de stations les unes par rapport aux autres. L'inconvénient dans ce cas est que l'on est obligé de fixer au moins une des stations du réseau.

Le choix de l'un ou l'autre cas peut se faire en fonction de la technique de mesure, de la quantité de données disponibles et des caractéristiques des solutions en question.

Figure 15. Différences de paramètres de rotation de la Terre entre les séries VLBI GSFC 89 R01 et les séries issues des solutions annuelles.



Ayant corrigé l'orientation des solutions annuelles afin de préserver la continuité, la nature même de la technique VLBI (mesures relatives de lignes de base) et le fait que la solution globale et les solutions annuelles soient calculées en fixant toujours les coordonnées de la même station (Westford), nous orientent d'opter pour le deuxième choix.

Ainsi, nous avons sélectionné, Table 22, les stations ayant au moins 3 années d'observations. Après avoir transformé les coordonnées en géographiques sur l'ellipsoïde GRS80, nous avons calculé les différences de composantes des lignes de base, par rapport à la station de Westford, entre la solution globale et celles données par les solutions annuelles. En ce qui concerne les incertitudes fournies dans cette Table, nous n'avons considéré que celles des coordonnées des solutions annuelles, étant donné que celles des rotations (Table 21) sont négligeables par rapport aux premières.

La répartition des stations concernées par cette étude se trouve sur la Figure 16.

Table 22. Différences de composantes des lignes de base, par rapport à Westford, entre la solution VLBI globale GLB480 et les solutions annuelles.

Solutions annuelles - GLB480

Station (plaque)	date	d λ .001"	d ϕ .001"	dh cm

WETTZELL				
(EURA)	84.5	0.71 \pm 0.26	-0.45 \pm 0.03	1.8 \pm 2.4
	85.5	-1.66 \pm 0.18	-0.13 \pm 0.05	6.6 \pm 1.8
	86.5	0.28 \pm 0.20	0.17 \pm 0.04	1.4 \pm 2.0
	87.5	1.12 \pm 0.20	1.80 \pm 0.03	-5.6 \pm 2.0
	88.5	-0.34 \pm 0.10	-0.16 \pm 0.01	-0.3 \pm 1.0
ONSALA				
(EURA)	84.5	1.46 \pm 0.33	-0.48 \pm 0.05	0.4 \pm 2.5
	85.5	-1.64 \pm 0.24	-0.32 \pm 0.02	7.1 \pm 1.7
	86.5	0.01 \pm 0.25	0.13 \pm 0.04	2.6 \pm 1.9
	87.5	0.82 \pm 0.24	2.01 \pm 0.04	-6.8 \pm 1.8
	88.5	-0.42 \pm 0.13	-0.17 \pm 0.03	-0.9 \pm 0.9

Table 22 (suite)

Station (plaque)	date	$d\lambda$.001"	$d\varphi$.001"	dh cm

HARTEBEESTHOEK				
(AFRC)	84.5			
	85.5			
	86.5	0.01 \pm 0.03	-0.20 \pm 1.48	-2.9 \pm 3.2
	87.5	1.96 \pm 0.05	-0.37 \pm 1.36	0.2 \pm 3.2
	88.5	-0.62 \pm 0.04	-0.15 \pm 1.12	0.9 \pm 3.1
HAYSTACK				
(NOAM)	84.5	0.09 \pm 0.35	-0.58 \pm 0.62	-4.3 \pm 0.9
	85.5	0.30 \pm 0.24	-0.14 \pm 0.32	1.0 \pm 0.2
	86.5	0.01 \pm 0.07	-0.05 \pm 0.10	-0.2 \pm 0.1
	87.5			
	88.5			
FAIRBANKS				
(NOAM)	84.5	-1.18 \pm 0.66	0.96 \pm 0.95	-1.6 \pm 1.9
	85.5	-0.10 \pm 0.23	1.03 \pm 0.45	-2.2 \pm 0.8
	86.5	0.60 \pm 0.30	0.05 \pm 0.48	0.5 \pm 0.9
	87.5	2.53 \pm 0.34	-0.54 \pm 0.47	-1.6 \pm 1.0
	88.5	-0.09 \pm 0.24	0.50 \pm 0.33	0.8 \pm 0.6
MOJAVE				
(NOAM)	84.5	-0.60 \pm 0.12	-0.83 \pm 0.84	-5.4 \pm 0.3
	85.5	-0.20 \pm 0.08	-0.10 \pm 0.44	-1.6 \pm 0.2
	86.5	0.12 \pm 0.10	-0.27 \pm 0.52	0.6 \pm 0.2
	87.5	1.36 \pm 0.11	-0.53 \pm 0.48	2.0 \pm 0.1
	88.5	-0.30 \pm 0.05	0.59 \pm 0.27	-1.1 \pm 0.1
HAT CREEK				
(NOAM)	84.5	-0.46 \pm 0.14	-0.53 \pm 1.11	-7.1 \pm 0.1
	85.5	0.10 \pm 0.07	0.19 \pm 0.51	-2.3 \pm 0.1
	86.5	0.32 \pm 0.10	-0.10 \pm 0.60	-0.7 \pm 0.1
	87.5	1.39 \pm 0.12	-0.54 \pm 0.54	0.1 \pm 0.1
	88.5	-0.45 \pm 0.04	0.50 \pm 0.38	0.5 \pm 0.1
FORT DAVIS				
(NOAM)	84.5	-0.49 \pm 0.01	-0.04 \pm 0.46	0.7 \pm 0.5
	85.5	0.06 \pm 0.01	0.28 \pm 0.34	-3.0 \pm 0.3
	86.5	0.24 \pm 0.01	-0.10 \pm 0.40	-0.8 \pm 0.3
	87.5	1.06 \pm 0.01	-0.40 \pm 0.38	0.4 \pm 0.3
	88.5	-0.06 \pm 0.01	0.15 \pm 0.19	0.2 \pm 0.2

Table 22 (suite)

Station (plaque)	date	$d\lambda$.001"	$d\phi$.001"	dh cm

OWENS VALLEY				
(NOAM)	84.5	-0.39 \pm 0.13	-0.82 \pm 0.99	-2.5 \pm 0.3
	85.5	-0.06 \pm 0.07	-0.07 \pm 0.47	0.1 \pm 0.2
	86.5	0.04 \pm 0.09	-0.09 \pm 0.58	3.2 \pm 0.2
	87.5	1.11 \pm 0.10	-0.39 \pm 0.53	2.2 \pm 0.2
	88.5	-0.53 \pm 0.04	0.71 \pm 0.34	0.8 \pm 0.2
PLATTEVILLE				
(NOAM)	84.5	-0.82 \pm 0.07	0.16 \pm 1.95	-13.1 \pm 1.1
	85.5	0.37 \pm 0.03	0.59 \pm 1.20	-10.7 \pm 0.7
	86.5	0.37 \pm 0.02	0.10 \pm 0.82	1.1 \pm 0.4
	87.5	0.47 \pm 0.02	-0.33 \pm 0.61	3.2 \pm 0.3
	88.5	-0.27 \pm 0.01	0.13 \pm 0.73	-2.8 \pm 0.4
RICHMOND				
(NOAM)	84.5	-0.19 \pm 0.18	0.40 \pm 0.31	1.3 \pm 0.4
	85.5	-0.04 \pm 0.13	0.07 \pm 0.20	-0.5 \pm 0.3
	86.5	0.04 \pm 0.15	-0.02 \pm 0.21	0.4 \pm 0.3
	87.5	0.52 \pm 0.15	-0.19 \pm 0.20	1.7 \pm 0.3
	88.5	-0.09 \pm 0.08	0.10 \pm 0.11	0.0 \pm 0.2
KASHIMA				
(NOAM)	84.5	0.66 \pm 1.38	0.91 \pm 1.84	6.9 \pm 3.1
	85.5	-1.51 \pm 0.89	1.13 \pm 0.81	-3.2 \pm 1.0
	86.5	1.43 \pm 0.98	0.62 \pm 0.86	1.0 \pm 1.1
	87.5	2.32 \pm 0.97	0.11 \pm 0.90	-6.8 \pm 1.1
	88.5	-2.25 \pm 0.81	0.57 \pm 0.81	-4.6 \pm 0.5
KAUAI				
(PCFC)	84.5	-3.83 \pm 0.71	1.12 \pm 1.72	-5.1 \pm 1.0
	85.5	-2.49 \pm 0.44	0.48 \pm 0.83	-8.1 \pm 0.8
	86.5	-0.54 \pm 0.51	0.66 \pm 0.94	-0.5 \pm 0.8
	87.5	-0.68 \pm 0.49	-1.24 \pm 0.93	-3.1 \pm 0.8
	88.5	-0.67 \pm 0.28	0.42 \pm 0.70	-3.9 \pm 0.9
KWAJALEIN				
(PCFC)	84.5	-4.89 \pm 1.46	1.77 \pm 2.30	0.4 \pm 2.0
	85.5	-4.14 \pm 0.89	0.09 \pm 1.00	-7.8 \pm 1.6
	86.5	-0.68 \pm 0.99	0.67 \pm 1.09	-1.6 \pm 1.7
	87.5			
	88.5	-1.46 \pm 0.73	-0.35 \pm 0.89	-5.8 \pm 2.1

Table 22 (suite)

Station (plaque)	date	$d\lambda$.001"	$d\varphi$.001"	dh cm
VANDENBERG				
(PCFC)	84.5	-1.32 \pm 0.05	0.87 \pm 1.01	-2.8 \pm 0.6
	85.5	-0.86 \pm 0.08	0.93 \pm 0.51	-3.8 \pm 0.3
	86.5	-0.15 \pm 0.11	0.40 \pm 0.58	-0.8 \pm 0.2
	87.5	1.31 \pm 0.11	-0.49 \pm 0.56	2.1 \pm 0.2
	88.5	-0.13 \pm 0.03	-0.13 \pm 0.39	-1.3 \pm 0.3

Comme nous pouvons le constater, Table 22, les différences de lignes de base sont des quantités assez petites, voire négligeables dans la plus part des cas. Il est néanmoins important de noter que ces différences ne sont pas, du moins pour les plus importantes, dues uniquement aux écarts par rapport au modèle AMO-2, bien que ce dernier y ait une bonne part. Cela étant, les commentaires que nous pouvons faire à propos de ces différences sont les suivants:

- des valeurs, horizontales et verticales, quantitativement comparables pour les stations de Wettzell et Onsala, se trouvant toutes deux sur la plaque eurasiatique;

- la même constatation que la précédente pour les stations : Mojave, Hat Creek, Fort Davis et Owens Valley se trouvant toutes sur la plaque nord américaine;

- des valeurs particulièrement négligeables pour les stations de Richmond et Haystack. Heureusement pour cette dernière car elle se trouve tout près de Westford;

- Fairbanks (Alaska) a un comportement relativement différent des autres stations de la plaque nord américaine;

- Kashima (Japon), considéré sur la plaque nord américaine a cependant un comportement différent des autres stations de cette plaque;

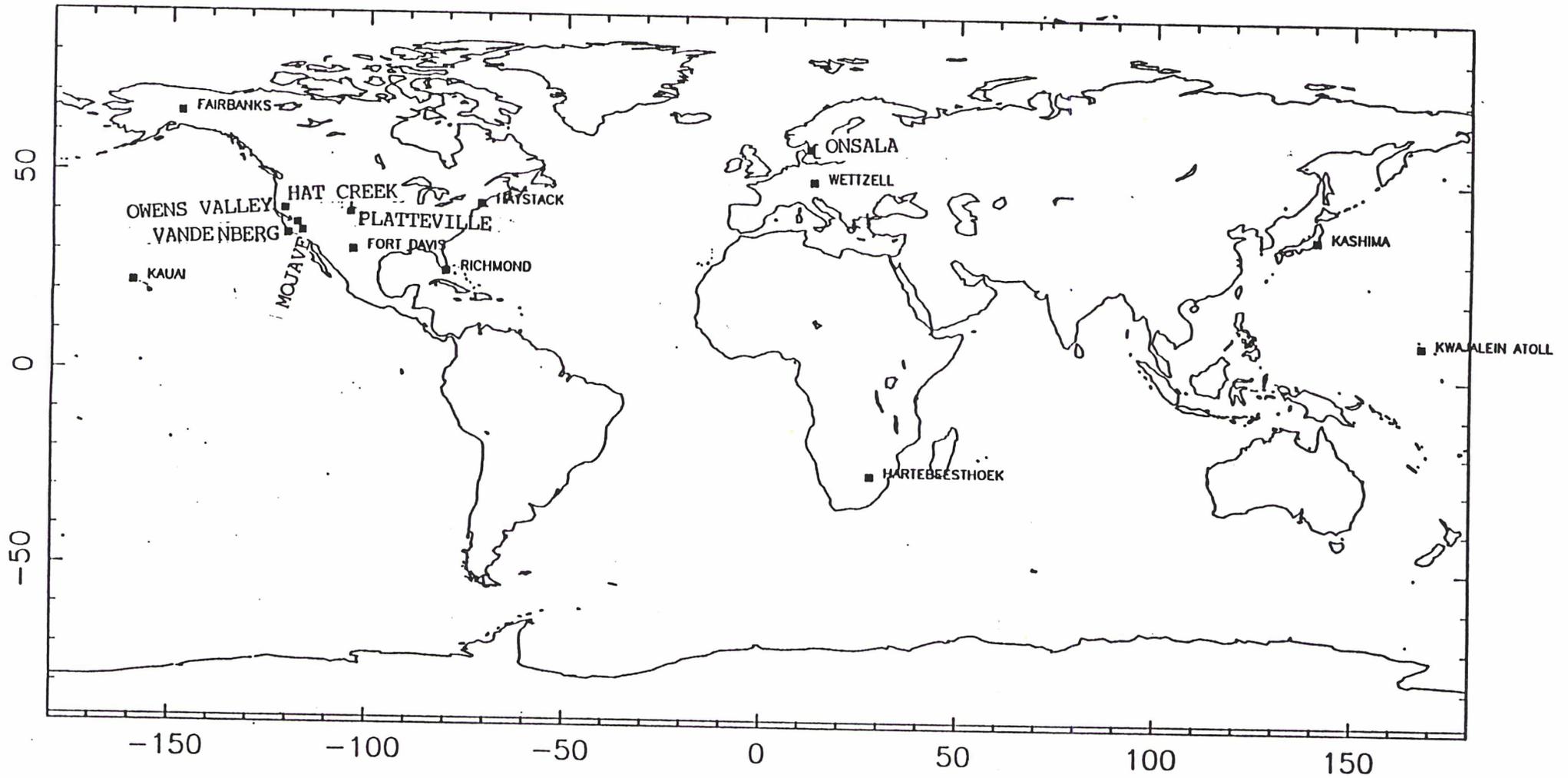
- les valeurs concernant les stations situées sur la plaque pacifique (Kauai, Kwajalein et Vandenberg) ont pratiquement toutes la même tendance (négative en λ et positive en φ , sauf à la date de 1987.5);

- en ce qui concerne les différences d'altitudes, on note plus particulièrement pour les stations du Pacifique des valeurs pour la plus part négatives et notamment Kauai et Kwajalein. Il pourrait s'agir d'un mouvement vertical pour ces stations.

D'une manière globale, on peut dire que pour les stations atlantiques des deux plaques NOAM et EURA, il y a un accord entre les positions annuelles issues des observations et le modèle AMO-2. Par contre, pour les stations ayant des mouvements importants, notamment celles du Pacifique, l'accord avec AMO-2 ne semble pas aussi évident. Par conséquent, les mouvements des stations du Pacifique et des stations se trouvant sur les limites des plaques nécessitent une attention particulière.

Par ailleurs, cet exemple illustre bien la difficulté dans la séparation des paramètres globaux (translations et surtout rotations) des déformations, c'est à dire d'assurer la continuité d'orientation d'une manière exacte, aspect très important dans la maintenance temporelle d'un système de référence terrestre.

FIGURE 16. STATIONS VLBI CONCERNEES PAR L'ETUDE DE LEURS MOUVEMENTS



EXEMPLE 3

C'est une solution globale VLBI de positions et vitesses, calculée par le GSFC (notée GLB482, SSC(GSFC) 89 R 02, voir annexe 1). Les mesures traitées sont issues des programmes IRIS et "Crustal Dynamics Project" (CDP). Les coordonnées des stations sont fournies sous forme de 11 jeux, de 79 à 89, et caractérisées par (Ma et al, 1989):

- l'origine est définie en fixant, d'une manière conventionnelle, les coordonnées de la station de Westford au 17/10/80;

- l'orientation donnée par les paramètres de la rotation de la Terre du BIH au 6/11/86;

- l'évolution temporelle: Westford se déplace selon AMO-2, l'azimut de Westford-Richmond varie selon AMO-2, toutes les vitesses ont été ajustées, sauf pour certaines stations n'ayant pas assez d'observations et qui ont été contraintes à se déplacer selon le modèle AMO-2. En fait, ce choix de condition de non rotation globale correspond à un alignement sur le modèle AMO-2.

Des comparaisons des 11 jeux ont été réalisées par rapport à l'ITRF88 afin d'estimer les variations temporelles des paramètres de transformation entre les deux. La Table 23 fournit les paramètres de transformations de l'ITRF88 vers les jeux de positions 79 et 89. D'où, une estimation des variations annuelles de ces paramètres, qui se trouvent dans cette même Table.

Table 23. Paramètres de transformation de l'ITRF88 vers les jeux de positions VLBI GSFC (GLB482) et leurs variations annuelles

De L'ITRF88	T1	T2	T3	D	R1	R2	R3
vers	cm	cm	cm	10^{-8}	.001"	.001"	.001"

positions 79	173.8 3.8	-101.3 4.1	47.6 3.8	-1.5 .5	-2.1 1.7	1.4 1.5	3.7 1.2
positions 89	161.6 .4	-85.1 .4	55.4 .4	-1.5 .1	1.5 .2	1.6 .1	1.3 .1

	$\dot{T}1$	$\dot{T}2$	$\dot{T}3$	\dot{D}	$\dot{R}1$	$\dot{R}2$	$\dot{R}3$
	cm	cm	cm	10^{-8}	.001"	.001"	.001"

	-1.2	1.6	0.8	0.0	.36	.02	-.24

L'analyse des séries temporelles de paramètres de rotation de la Terre a été faite également en les comparant à celles de la solution GLB480 dans laquelle le modèle AMO-2 a été adopté. Cette comparaison a été faite en deux étapes:

- dans la première étape, un sous ensemble des séries temporelles a été sélectionné, ne concernant que les sessions de mesures des stations du réseau IRIS-Atlantique (IRIS-A). Cette sélection est justifiée par le fait que les stations du réseau IRIS-A (dont le but principal est la mesure de la rotation de la Terre) ont une configuration plus stable que les autres stations. Les séries sélectionnées ont été comparées à celles de la solution GLB480. Les différences de coordonnées du pôle et du temps universel sont représentées sur la Figure 17. On voit sur cette figure que les valeurs des différences s'alignent sur une pente régulière estimée (en 0.001" par an) à 0.00 pour x, 0.19 pour y et 0.10 pour UT1.

- dans la deuxième étape, les séries complètes des deux solutions ont été comparées entre elles. La Figure 18 représente les différences des paramètres ainsi obtenues. La pente estimée dans ce cas (en 0.001" par an) est de -0.13 pour x, 0.04 pour y et 0.21 pour UT1. On distingue aisément sur cette figure un alignement de la plus part des valeurs. Cet alignement correspond parfaitement à celui issu de la première comparaison (Figure 17). De plus, on remarque des valeurs complètement en dehors de cet alignement qui correspondent, sans doute, aux stations du réseau CDP.

Au vu de cette analyse, les remarques suivantes peuvent être faites:

- l'alignement sur le modèle AMO-2 (par la condition de non rotation globale imposée dans la solution GL482) n'a pas été réussi pour toutes les stations concernées;

- les déplacements ajustés des stations IRIS-A semblent suivre le modèle AMO-2, contrairement à ceux des stations CDP qui se trouvent pour la plus part dans le Pacifique.

Figure 17. Différences de paramètres de rotation de la Terre entre les deux séries VLBI GSFC 89 R02 et 89 R01 (stations IRIS-A uniquement)

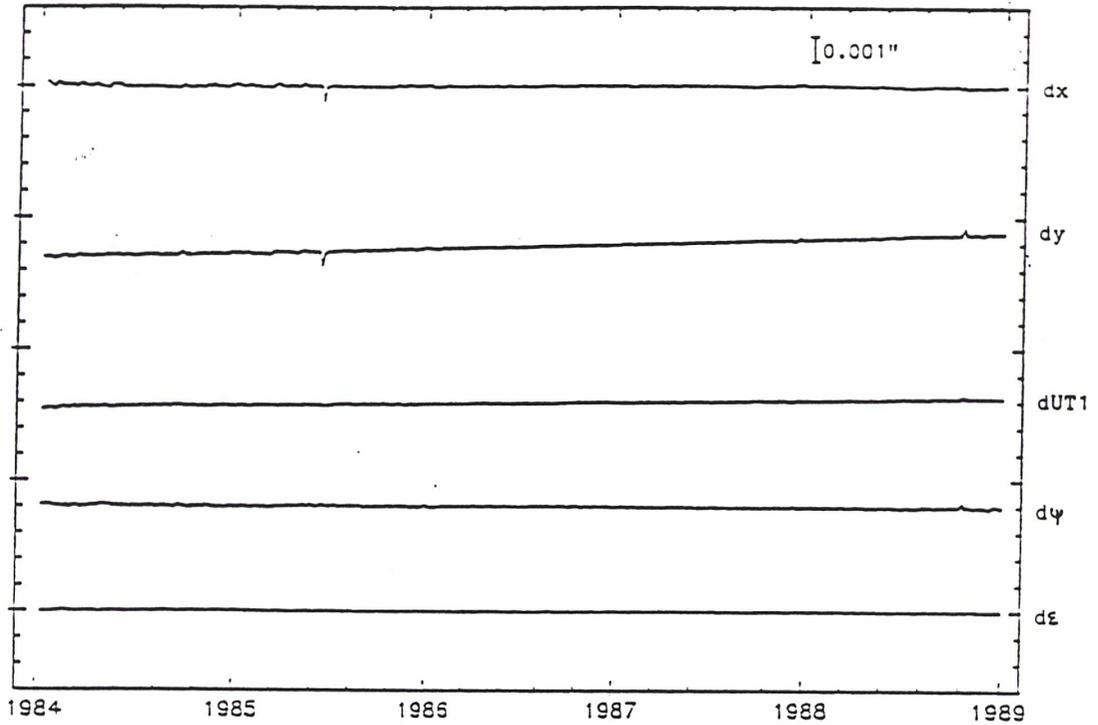
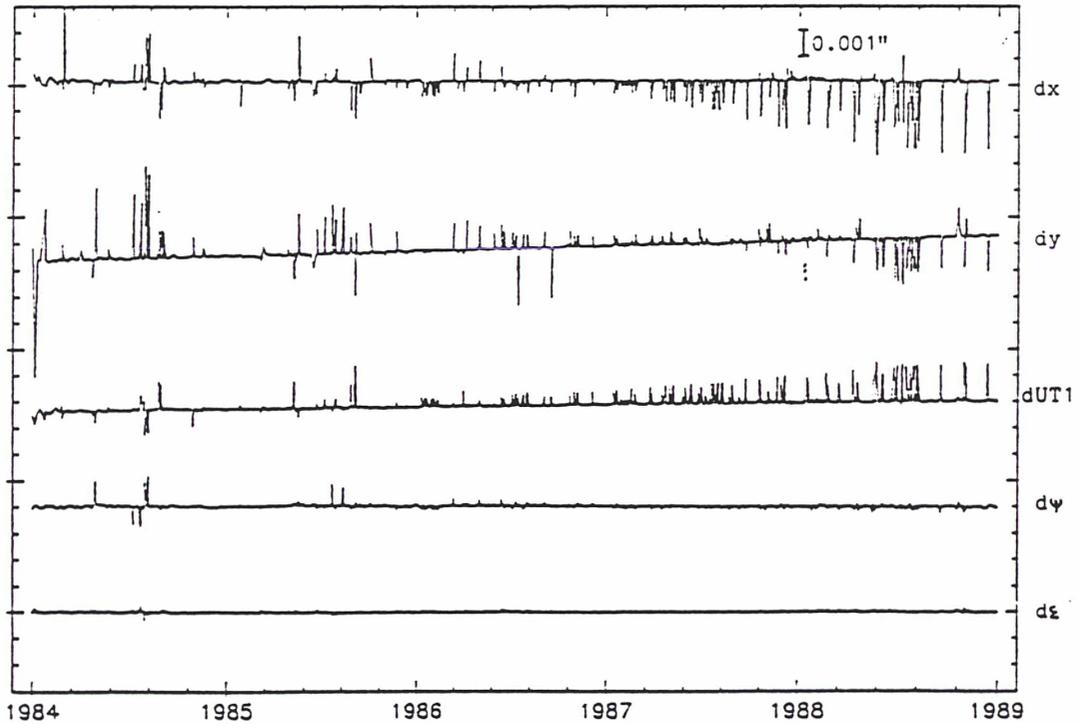


Figure 18. Différences de paramètres de rotation de la Terre entre les deux séries VLBI GSFC 89 R02 et 89 R01



IV.4. Améliorations et Perspectives Futures

Nous assistons actuellement à un développement croissant de programmes internationaux d'observations et de surveillance géophysique pour les années 1990. Des exemples de ces programmes se trouvent dans (Feissel, 1989).

L'IERS a certainement un rôle important à jouer dans ces programmes et notamment dans le développement d'une stratégie et d'une étude globale portant sur l'ensemble des techniques spatiales. Des améliorations peuvent être envisagées en ce qui concerne la réalisation du SRTC (voir également Boucher et Altamimi, 1989) et notamment:

- l'introduction des coordonnées, et ceci pour chaque point, en tant que séries temporelles X_k afin d'utiliser le modèle d'estimation des coordonnées des stations (exprimé par l'équation III.6, page 80).

- en plus de l'estimation des paramètres de transformation entre l'ITRF et les solutions individuelles à la date t_0 , les variations temporelles de ces paramètres peuvent également être déterminées.

- les rattachements entre les stations en colocation doivent être utilisés avec leurs époques et covariances;

- l'évolution temporelle doit être assurée par les conditions du Tisserand.

- les corrélations entre les différents paramètres estimés doivent être considérées.

Au vu de ces améliorations, il est évident que l'on aura besoin que les centres d'analyse nous fournissent:

- soit des solutions annuelles,
- soit des solutions de positions à une date de référence et des vitesses de déplacement des stations.

- les matrices de corrélations des paramètres estimés.

CONCLUSION

Les conclusions que nous pouvons tirer de ce travail vont dans le sens de la meilleure réalisation d'un système de référence terrestre. Nous les présentons suivants les aspects les plus importants. Ces aspects sont classés dans l'ordre de leur enchaînement, à commencer par le problème du mouvement des sites représentatif des déformations de la croûte terrestre. Puis, nous parlerons des réalisations individuelles qui apportent des solutions diverses, et des colocations permettant la combinaison de différentes solutions. Ensuite, nous dirons quelques mots sur les réalisations faites dans le cadre du Bureau Central de l'IERS: l'ITRF. Enfin, nous terminerons par quelques mots sur la maintenance du système terrestre et quelques suggestions pour le contrôle futur de son évolution temporelle.

Mouvement des sites

Les déformations de la croûte terrestre représentent sans doute un sujet capital auquel s'intéressent plusieurs centres de recherches géodynamiques de la Terre. En ce qui concerne notre travail, Il est impératif de tenir compte des mouvements globaux et locaux des stations d'observation, considérant à la fois leur déplacement horizontal et vertical. Le modèle d'estimation des coordonnées des stations présenté dans ce mémoire a l'avantage d'être général, en ce sens qu'il tient compte de toutes les déformations mentionnées ci-dessus.

L'étude concernant les mouvements des sites que nous avons effectuée dans la quatrième partie (voir, IV.3.2), a pour but de mettre en évidence d'une part l'importance de ces mouvements et leurs conséquences, lorsqu'on n'en tient pas compte dans la réalisation d'un système de référence terrestre et la rotation de la Terre et d'autre part, les différentes manières de leur modélisation. Cette étude souligne les idées principales suivantes:

- les modèles de mouvements de plaques existants (comme ceux de Minster et Jordan par exemple) fournissent une bonne information a priori et plus particulièrement en ce qui concerne les vitesses de déplacement des stations de l'Atlantique (Europe de l'ouest et Amérique du nord). Par contre, une attention particulière doit être portée aux sites dont les mouvements sont importants, notamment ceux du Pacifique (Kauai, Kwajalein...) ou sur des limites de plaques (Kashima, Vandenberg...) et pour lesquels le modèle AM0-2 de Minster et Jordan paraît avoir des insuffisances.

- il est maintenant possible d'estimer des vitesses de déplacement par les techniques de géodésie spatiales les plus précises (VLBI, laser satellite), surtout en ce qui concerne les stations ayant une période d'observation suffisante.

- afin d'estimer les mouvements des stations d'observation, représentatifs des déformations de la croûte terrestre, il faut nécessairement les séparer des paramètres globaux d'orientation de la Terre dans l'espace. Ce qui revient à dire d'assurer d'abord le plus exactement possible la continuité d'orientation du système terrestre.

Les réalisations individuelles

Les remarques importantes que nous pouvons faire à propos des réalisations individuelles sont les suivantes:

- il est nécessaire qu'elles soient bien documentées, indiquant clairement (ce qui n'est pas toujours le cas) toute la modélisation appliquée ,

- il est souhaitable que ces réalisations contiennent le plus de stations possibles avec le souci d'une meilleure répartition géographique,

- il est actuellement possible de produire des solutions régulières (annuelles par exemple) ou de positions à une date de référence et de vitesses de déplacement des stations. Cela permettra d'évaluer et/ou de comparer les vitesses de déplacement des stations calculées par différentes méthodes.

Les colocations

Les colocations étant à la base des comparaisons et des combinaisons de différentes réalisations, il est d'un grand intérêt :

- d'avoir le plus de stations en colocation avec surtout une répartition géographique la plus optimale possible pour une meilleure estimation de solutions combinées ainsi que des paramètres de transformation entre les différentes solutions,

- de veiller à ce que les rattachements entre les stations en colocation soient les plus précis possibles (1 mm), accompagnés d'une documentation claire avec l'époque du rattachement et la méthode utilisée.

Combinaison de jeux de coordonnées

La variété importante de réalisations individuelles, conséquence de la diversité des techniques et des modèles de traitement, nécessite leur comparaison et leur combinaison afin :

- de bénéficier de toutes leurs qualités réunies,
- de révéler les systématismes qui peuvent exister dans les réalisations individuelles,
- de construire (par combinaison) un repère terrestre global contenant tous les points (en colocation ou non) des repères individuels.

L'ITRF

Les réalisations régulières du système de référence terrestre de l'IERS, entretenues par l'IGN depuis 1985, marquent une amélioration continue au cours du temps, conséquence d'une volonté de meilleure réalisation, au service de la communauté scientifique internationale. La reconnaissance de cette activité au niveau international est un témoignage de confiance et d'encouragement. Elle est concrétisée par l'adoption de l'ITRF:

- pour la surveillance du niveau des mers, par le "Permanent Service of Mean Sea Level";
- par le Comité Consultatif pour la Définition de la Seconde (CCDS) et le Comité Consultatif Radio International (CCIR);
- par le NGS, en adoptant son origine
- par la DMA, pour la référence en longitude.
- comme repère de référence pour le projet DORIS;

Maintenance du système de référence terrestre

Comme nous l'avons vu dans la troisième partie de ce mémoire, la maintenance d'un système de référence terrestre revient à le définir à une date de référence t_0 (où les paramètres de rotation de la Terre sont définis) et à assurer son évolution temporelle par une loi adéquate comme par exemple celle du système d'axes de Tisserand.

Contrôle de l'évolution temporelle du système terrestre

Parmi les aspects de recherche future dans le cadre de l'IERS, le contrôle de l'évolution temporelle du système de référence terrestre doit être pris en considération. Nous entendons par ceci une surveillance géophysique des zones dans lesquelles sont situés les sites primaires du repère de référence terrestre. Autrement dit, de s'assurer que le mouvement de ces sites représente réellement le mouvement d'ensemble de leurs zones respectives. Une zone peut être définie, par exemple, par "un cercle de rayon ≈ 50 km". Cette surveillance géophysique peut être réalisée par le GPS en établissant des réseaux géodésiques locaux. Ces derniers seront constitués de points GPS autour des sites primaires du repère terrestre avec des observations répétitives dépendant des déformations de chaque zone, par exemple :

- des mesures tout les six mois minimum pour les sites à l'intérieur (loin des marges) des plaques tectoniques,

- des mesures mensuelles pour les sites des zones actives, sur les limites des plaques et les sites dont le mouvement est important (pacifique).

Enfin, nous pensons que le travail, déjà réalisé dans le cadre de l'IERS, représente un effort non négligeable et une bonne base pour les analyses et les recherches à venir.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Kovalevsky, J., Mueller, I.I., Kolaczek, B. (eds.), 1989, Reference frames in Astronomy and Geophysics, Kluwer Academic Publisher, Dordrecht.
- Levallois, J.J. et Kovalevsky, J., 1971, Géodésie Générale Tome 4: géodésie spatiale, Collection IGN, Eyrolles, Paris.

BIBLIOGRAPHIE

- Altamimi,Z., Arias,E.F., Boucher,C., Feissel,M., 1989, Earth orientation determinations : Some tests of consistency, IAG Symp. 105, Earth rotation and coordinate reference frames, Edinburgh (UK).
- Anderle,R.J., 1975, Long Term Consistency in Positions of Sites Determined from Doppler Satellite Observations, NSWC Technical Report 3433.
- Arias,F., 1989, Thèse de doctorat, en préparation.
- Arias,F., Feissel,M., Lestrade,J.F., 1988, An extragalactic celestial reference frame consistent with the BIH terrestrial system (1987), Rapport Annuel du BIH pour 1987, p. D113.
- Beuglass,L.K. et Anderle,R.J., 1972, Refined Doppler Satellite Determination of the Earth's Polar Motion, Geophysical Monograph Series Vol 15, American Geophysical Union.
- Blewitt,G., 1989, Carrier phase ambiguity resolution for the Global Positioning System applied to geodetic baselines of up to 2000 km, à paraître dans J. Geophys. Res.
- Bock,Y., 1982, The use of baseline measurements and geophysical models for the estimation of crustal deformations and the terrestrial reference system, OSU/DGS Report n° 337, Columbus.
- Bock,Y, Abbot,R.I., Counselmann,C.C., Gourevitch, S.A., King,R.W., 1985, Establishment of a three dimension geodetic control by interferometry with GPS: Processing of GPS phase observables, First International Symposium on Precise Positioning with the Global Positioning System, Rockville (USA), publié dans J. Geophys. Res., vol 90 PP. 7689-7703.
- Boucher,C., 1979a, Les transformations géométriques entre systèmes géodésiques, Rapport Technique n°3.
- Boucher,C., 1979b, Investigations on geodetic applications of satellite Doppler observations for control networks, International Geodetic Symposium on Satellite Doppler Positioning, Austin, USA.
- Boucher,C., 1981, Mouvement d'un satellite artificiel, Cours de Géodésie Spatiale, CC/G n° 11.
- Boucher,C., 1983, Géodésie Doppler sur satellite, conférences faites au B.N.G.C., Pékin, CC/G n° 8.
- Boucher,C., 1984, Les systèmes de référence. Cours de Technologie Spatiale du CNES "Mathématiques Spatiales", Toulouse.

- Boucher,C., 1985, Relativistic effects in geodynamics, IAU Symposium, Léninegrad.
- Boucher,C., 1986a, Celestial reference systems, NATO Meeting : EARTH ROTATION : solved and unsolved problems, Bonas, Gers, France.
- Boucher,C., 1986b, Terrestrial and inertial relativistic reference frames, GRGS, Rapport Technique n° 3.
- Boucher,C., 1988a, Analyse d'un logiciel de transformation, comparaison et combinaison de jeux de coordonnées, IT/G 57, IGN.
- Boucher,C., 1988b, Book on Reference Systems, Ch. 11, Intercomparaison of terrestrial reference frames, Kovalevsky et al (eds.), 1989.
- Boucher,C., 1989, Modélisation relativiste des systèmes de référence terrestres, Journées 1989 "système de référence spacio-temporels, Observatoire de Paris.
- Boucher,C. et Altamimi,Z., 1985, Towards an improved realization of the BIH terrestrial frame, The MERIT/COTES Report on Earth Rotation and Reference Frames, Vol.2, Mueller (ed.).
- Boucher,C. et Altamimi,Z., 1986a, The use of space techniques for the connection of geodetic datums, Adv. Space Res. Vol. 9, PP. 23-27.
- Boucher,C. et Altamimi,Z., 1986b, Status of the BIH terrestrial system, Babcock et Wilkins (eds.), The Earth's Rotation and Reference Frames for Geodesy and Geodynamic, pp 107-114.
- Boucher,C. et Altamimi,Z., 1987, Intercomparison of VLBI, LLR, SLR and GPS derived baselines on a global basis, EGS Meeting, Strasbourg.
- Boucher,C. et Altamimi,Z., 1989, The Initial IERS Terrestrial Reference Frame, IERS Technical Note n° 1.
- Boucher,C. et Altamimi,Z., Willis,P. 1988, Relation between BTS87, WGS84 and GPS activities, Rapport Annuel du BIH pour 1987 p. D-131.
- Boucher,C. et Feissel,M., 1983, Evolution of BIH activities for the definition, maintenance and dissemination of a Conventional Terrestrial System, GRGS, Rapport Technique n° 1.
- Boucher,C. et Feissel,M., 1984, Realization of the BIH Terrestrial System, Inten. Symp. on Space Techniques for Geodynamics, Sopron, Hongary.
- Brumberg,V.A., et Kopejkin,S.M., 1989, Relativistic theory of celestial reference frames, dans Kovalevsky et al (eds.), 1989.

- Calame, O., (ed.), 1982, High precision Earth rotation and Earth-Moon dynamics, IAU. Coll. n°63, Reidel.
- Calame, O., 1983, The lunar laser modelling at the CERGA, MERIT/COTES joint groups, 1983.
- Calame, O., Guinot, B., Kovalevsky, J. et Orszag, A., 1970, Déterminations géodésiques par télémétrie Terre-Lune, Astron. et Astrophys., 4, 18.
- Carter, W.E., Robertson, D.S., Fallon, F.W., 1987, Polar Motion and UT1 time series derived from VLBI observation, Rapport Annuel du BIH pour 1986.
- Carter, W.E., Robertson, D.S., Fallon, F.W., 1988, Polar Motion and UT1 time series derived from VLBI observation, Rapport Annuel du BIH pour 1987.
- Carter, W.E., Robertson, D.S., Fallon, F.W., 1989, Polar Motion and UT1 time series derived from VLBI observation, IERS Technical Note n° 1.
- Charlot, P., 1989, Structure des sources radio extragalactiques dans les observations VLBI d'astrométrie et de géodynamique, Thèse de doctorat, observatoire de Paris.
- Christodoulidis, D.C., D.E. Smith, R. Kolenkiewicz, S.M. Klosko, M.H. Torrence, P.J. Dunn, 1985, Observing tectonic plate motions and deformations from Satellite Laser Ranging, J. Geophys. Res. 90, 9249-9264.
- Dickey, J.O., 1989, Intercomparisons between kinematic and dynamical systems, Kovalevsky et al (eds.), 1989.
- DMA, 1987, Department of Defence World Geodetic System 1984. Its definition and relationships with local geodetic systems. DMA TR 8350.2.
- Feissel, M., 1980, Determination of the Earth rotation parameters by the Bureau International de l'Heure, 1962-1979, Bull. Géod. 54, n° 1.
- Feissel, M., 1982, Combination of Earth rotation parameters obtained in 1980 by various techniques, IAU Colloq. n° 63, Reidel.
- Feissel, M., 1983, Sur l'évaluation des irrégularités de la Rotation de la Terre. Thèse de doctorat d'Etat, Univ. de Paris 6.
- Feissel, M., 1989, Rotation de la Terre et systèmes de référence, Situation présente et évolution prévisible.

- Gambis, D. et Nouël, F., 1980, Determination of Polar Motion by Doppler Tracking of Artificial Satellite, Bull. Géod. 54, n° 1.
- Goad, C.C., 1980, Gravimetric Tidal Loading Computed from Integrated Green's Functions, J. Geophys. Res., 85, 2679-2683.
- GPS Bulletin, Commission VIII, International Coordination of Space Techniques for Geodesy and Geophysics (CSTG), Global Positioning System Subcommittee, vol. 2, n° 4, July-August 1989.
- Guinot, B., 1981, Comments on the terrestrial pole of reference, the origin of the longitudes and on the definition of UT1, IAU Colloquium n° 56 Reidel, 125.
- Guinot, B., 1984, Concepts of reference systems, IAU Meeting on astronomy, Gansville, USA.
- Guinot, B. et Lewandovsky, W., 1988, Accurate time comparisons and positioning by GPS over distance up to 1000 km, Bulletin Géodésique (à paraître).
- Hellings, R., 1986, Relativistic effects in astronomical timing measurements, Astron. J., 91, 650-659.
- Herring, T.A. et al., 1986, Geodesy by radio interferometry : evidence for contemporary plate motion, J. Geophys. Res., 91, 8341-8347.
- Hothem, L.D., Vincenty, T., Moose, R.E., 1982, Relationship between Doppler and other advanced geodetic system measurements based on global data. 3rd Inter. Geodetic Symp. on Satellite Doppler positioning, Las Cruces, USA.
- Hothem, L.D., Vincenty, T., Hoyle, D.B., 1983, Analyses of Doppler, Satellite Laser, VLBI and terrestrial coordinate systems, XVIII IUGG General Ass.
- IERS, 1989, Earth orientation and reference frame determinations, atmospheric excitation functions, up to 1988, Technical Note n° 2.
- Jordan, T.H. et Minster, B., 1988, Beyond plate tectonics : Looking at deformation with space geodesy, IAU Symposium 129, Reidel.
- Kolaczek, B. et Weiffenbach, G., (eds.) 1975, Reference coordinate systems for Earth Dynamics, Colloque UAI 26, Torun.
- Kovalevsky, J., 1985, Systèmes de référence Terrestres et Célestes, Bulletin Astronomique, Vol. X, N° 2, Observatoire Royal de Belgique.
- Kovalevsky, J., 1989, Stellar reference frames, dans Kovalevsky

et al (eds.), 1989.

- Kovalevsky, J. et Mueller, I.I., 1981, Comments on Conventional Terrestrial and Quasi Inertial Reference Systems, Gaposhkin et Kolaczek (eds.), 375.
- Lachapelle, G. et Kouba, J., 1980, Relationship between Terrestrial and Satellite Doppler systems, IAU Coll. 56.
- Le Cocq, C., 1983, Introduction à la géodésie spatiale, cours de l'Ecole Nationale des Sciences Géographiques, Saint Mandé.
- Lewandowski, W., Weiss, M., Davis, D., 1987, A calibration of GPS equipment at time and frequency standards laboratory in the USA and in Europe
- Ma, C., Clark, T.A., Rayan, J.W., 1985, Creation of a global geodetic network using Mark III VLBI, The MERIT/COTES Report on Earth Rotation and Reference Frames, Vol.2, Mueller (ed.).
- Ma, C., Himwich, W., Malama, A., 1988, Earth Orientation Results from NASA Crustal Dynamics Project, Rapport Annuel du BIH pour 1987.
- Ma, C., Himwich, W., Caprette, D., 1989, Earth and Sky Orientation Results from NASA Crustal Dynamics Project, IERS Technical Note n° 2, Observatoire de Paris.
- Martin, C.F., Torrence, M.H., Misner, C.W., 1985, Relativistic Effects on an Earth-Orbiting Satellite in the Barycentric Coordinate System, J. Geophys. Res., 90, 9403-9410.
- McCarthy, D.D. (ed.), 1989, IERS Standards, IERS Technical Note n° 3, Observatoire de Paris.
- Melbourne, W.G., 1980, Very Long Baseline Radio Interferometry, Project MERIT-A review of the techniques..., Wilkins (ed.), Roy. Greenwich Obs.
- Melbourne, W., Anderle, R., Feissel, M., King, R., McCarthy, D., Smith, D., Tapley, B., Vincente, R., 1983, Project MERIT Standards, Circ. 167, USNO Washington.
- Melbourne et al., 1985, Update 1, Circ. 167, USNO Washington.
- MERIT/COTES Joint Working Group, 1983, MERIT Campaign: Connection of Reference Frames.
- Minster, B. et Jordan, T.H., 1978, Present-day plate motions, J. Geophys. Res., 83, 5331.
- Misner, C.W., Thorne, K.S., Wheeler, J.A., 1973, Gravitation, Freeman, San Francisco.
- Molnar, P. et Stock, J., 1987, Relative motions of hotspots in

the Pacific, Atlantic and Indian Oceans since late Cretaceous time, Nature, Vol. 327.

- Morabito, D.D., Steppe, J.A., Eubanks, T.M., 1988, Earth Orientation Results from DSN VLBI at JPL, Rapport Annuel du BIH pour 1987.
- Mueller, I.I., 1969, Spherical and practical Astronomy as applied to Geodesy, Ungar Publ., New York.
- Mueller, I.I., Zhu, S.Y., Bock, Y., 1982, Ref. frame requirements and the MERIT Campaign, OSU/DGS, report n° 329, Columbus, Ohio, USA.
- Mueller, I.I., 1985a, Ref. coordinate systems and frames : concepts and realization, Bull. Geod. 59, 181-188.
- Mueller, I.I. (ed.), 1985b, Proceedings of the International Conference on Earth rotation and the terrestrial reference frame, Columbus, Ohio, USA.
- Newhall, X.X., Williams, J.G., Dickey, J.O., 1989, Earth rotation (UTO) from Lunar Laser Ranging, IERS Technical Note n° 2.
- Preston, R.A. et Lestrade, J.F., 1985, communication présentée au 2ème "Fast Thinkshop", Marseille, France.
- Rapports Annuels du BIH.
- Reigber, CH., 1989, Reference frames for artificial satellites of the Earth, Kovalevsky et al (eds.), 1989.
- Reigber, Ch., Schwintzer, P., Mueller, H., Barth, W., Massman, F.H., 1988, Earth Rotation and Station Coordinates from Laser Ranging to LAGEOS, Rapport Annuel du BIH pour 1987.
- Seppelin, T.O., 1974, The Department of Defense World Geodetic System 1972, The Canadian Surveyor 28(5), 496-506.
- Schutz, B.E., Tapley, R.J., Eanes, R.J., Watkins, M.M., 1989, Earth Rotation from LAGEOS Laser Ranging, IERS Technical Note n° 2.
- Smith, M.L., 1981, The theoretical description of the nutation of the Earth, Gaposchkin et Kolaczek (eds.), Reference coordinate systems for Earth dynamics, D. Reidel.
- Smith, D.E., Kolenkiewicz, R., Putney, B.H., Dunn, P.J., Klosko, S.M., Pavlis, E.C., Robbins, J.R., Torrence, M.H., Williamson, R.G., Fricke, S.M. 1989, A 12.2 year SLR EOP from LAGEOS Satellite Laser Ranging, SL7.1 (G44), IERS Technical Note n° 2.
- Steppe, J.A., Oliveau, S.H., Sovers, O.J., 1989, Earth rotation

parameters from DSN VLBI, IERS Technical Note n° 2.

- Tapley, B.D., Schutz, B.E., Eanes, R.J., 1985, Station Coordinates, and Earth Rotation from LAGEOS Laser Ranging : 1976-1984, J. Geophys. Res., 90, 9235-9248.
- Veillet, C., Pham-Van, J., 1989, Earth rotation (UT0) from Lunar Laser Ranging, IERS Technical Note n° 2.
- Wells, D.E., Beck, N., Delikaraoglou, D., Kleusberg, A., Krakiwsky, E., Lachapelle, G., Langley, R.B., Nakiboglou, M., Schwartz, K.P., Tranquilla, J.M., Vanicek, P., 1986, Guide to GPS positioning, Canadian GPS associates, University of New Brunswick.
- Williams, J.G., Newhall, X.X., Dickey, J.O., 1985, The coordinate frame of the Lunar Laser Ranging Network, The MERIT/COTES Report on Earth Rotation and Reference Frames, Vol.2, Mueller (ed.).
- Willis, P., 1987, Application de la technique GPS pour la localisation précise, Colloque de localisation en mer.
- Willis, P., 1989, Méthode de traitement de la phase GPS pour la localisation relative (statique et cinématique). Application à la géodésie, Thèse de doctorat, Observatoire de Paris.
- Willis, P. et Boucher, C., 1988a, Les applications du GPS à l'IGN, état actuel et perspectives.
- Willis, P. et Boucher, C., 1988b, Rattachement de marégraphes au système géodésique mondial BTS par les systèmes GPS et DORIS.

TABLE DES MATIERES

Remerciements.....	2
Lexique.....	3
Sigles et abréviations.....	4
<u>PRESENTATION</u>	6
<u>PREMIERE PARTIE: LES CONCEPTS DES SYSTEMES DE REFERENCE</u>	11
I.1. INTRODUCTION.....	12
I.2. CONCEPT.....	14
I.3. CHOIX DE LA STRUCTURE PHYSIQUE.....	15
I.4. MODELISATION DE LA STRUCTURE PHYSIQUE.....	16
I.4.1. Modélisation dans un cadre Newtonien.....	19
I.4.2. Modélisation dans un cadre relativiste.....	20
I.5. MATERIALISATION OU REALISATION D'UN SYSTEME DE REFERENCE.....	24
I.5.1. Repère de référence terrestre conventionnel.....	24
I.5.2. Repère de référence céleste conventionnel.....	26
I.6. EXTENSION DU REPERE DE REFERENCE CONVENTIONNEL.....	27
I.7. TRANSFORMATION GENERALE ENTRE SYSTEMES DE REFERENCE.....	29
I.7.1. Transformation entre systèmes terrestres.....	30
I.7.2. Transformation entre systèmes célestes.....	31
I.7.3. Passage du système céleste au système terrestre.....	32

DEUXIEME PARTIE: <u>LES TECHNIQUES DE MESURE ET LES SYSTEMES</u> <u>DE REFERENCE ASSOCIES</u>	37
II.1. L'INTERFEROMETRIE A TRES LONGUE BASE (VLBI).....	38
II.2. L'ASTROMETRIE OPTIQUE.....	44
II.3. TELEMETRIE LASER SUR LA LUNE.....	46
II.4. LES METHODES DE POSITIONNEMENT PAR SATELLITES ARTIFICIELS.....	49
II.4.1. Le Global Positioning System.....	55
II.4.2. Télémétrie laser.....	59
II.4.3. La méthode Doppler sur le système TRANSIT.....	63
II.5. LES TECHNIQUES TERRESTRES.....	66
TROISIEME PARTIE: <u>MODELISATION GENERALE EN VUE DES COMPARAISONS</u> <u>ET DES COMBINAISONS DE JEUX DE COORDONNEES</u>	70
III.1. INTRODUCTION.....	71
III.2. MODELISATION PHYSIQUE.....	72
III.3. MODELE D'ESTIMATION DES COORDONNEES DE STATIONS.....	73
III.3.1. Déformation du réseau de stations.....	73
III.3.2. Maintenance temporelle d'un système de référence terrestre.....	80
III.4. MODELE D'ESTIMATION POUR LES COMPARAISONS ET LES COMBINAISONS DE JEUX DE COORDONNEES.....	89
III.4.1. Liens locaux entre les stations d'observation.....	90
III.4.2. Comparaisons de jeux de coordonnées.....	91

III.4.3. Combinaisons de plusieurs jeux de coordonnées.....	92
III.4.4. Maintenance temporelle d'un système de référence terrestre combiné.....	93
III.4.5. Extension d'un repère de référence terrestre combiné.....	94
QUATRIEME PARTIE: <u>APPLICATIONS DANS LE CADRE DU SERVICE INTERNATIONAL DE LA ROTATION TERRESTRE</u>.....	96
IV.1. INTRODUCTION	97
IV.2. LES REALISATIONS DU SYSTEME DE REFERENCE TERRESTRE CONVENTIONNEL (SRTC).....	98
IV.2.1. Modélisations.....	98
IV.2.2. Les réalisations successives du BTS.....	102
IV.2.3. Le repère de référence terrestre initial de l'IERS (ITRF-0).....	106
IV.2.4. Le repère de référence terrestre de l'IERS pour 1988 (ITRF88).....	111
IV.2.5. Analyse des réalisations du SRTC.....	115
IV.2.6. Extension de l'ITRF88.....	122
IV.3. ANALYSE D'EFFETS LIES AU REPERE TERRESTRE.....	124
IV.3.1. Nombre et répartition géographique des colocations.....	124
IV.3.2. Modélisation du mouvement des sites.....	126
IV.4. AMELIORATIONS ET PERSPECTIVES FUTURES.....	142
<u>CONCLUSIONS</u>	143
<u>REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES</u>	148
<u>BIBLIOGRAPHIE</u>	149
Table des matières.....	156

Liste des illustrations.....160
Liste des tables.....161
ANNEXES.....163

LISTE DES ILLUSTRATIONS

Figure 1.	Objets célestes observés par les techniques spatiales.....	12
Figure 2.	Géométrie du VLBI.....	39
Figure 3.	Répartition des stations VLBI.....	41
Figure 4.	Géométrie de la technique laser Lune.....	46
Figure 5.	Eléments d'orbite d'un satellite artificiel de la Terre.....	50
Figure 6.	Répartition des stations GPS du réseau CIGNET.....	57
Figure 7.	Répartition des stations de télémétrie laser satellite.....	60
Figure 8.	Répartition des stations permanentes d'observation DOPPLER sur le système TRANSIT.....	64
Figure 9.	Passage de coordonnées géographiques aux coordonnées tridimensionnelles.....	67
Figure 10.	Distribution des 11 plaques tectoniques principales.....	77
Figure 11.	Schéma de la combinaison générale des mesures d'orientation de la Terre.....	101
Figure 12.	Répartition des sites du BTS en 1987.....	105
Figure 13.	Répartition des sites de l'ITRF88.....	113
Figure 14.	Différences de coordonnées du pôle entre deux séries laser satellite de paramètres de rotation de la Terre calculées par le DGFI.....	127
Figure 15.	Différence de paramètres de rotation de la Terre entre les séries VLBI issues des solutions annuelles et celles de la solution GSFC 89 R01.....	132
Figure 16.	Stations VLBI concernées par l'étude de leurs mouvements.....	138
Figure 17.	Différences de paramètres de rotation de la Terre entre deux séries VLBI GSFC 89 R01 et 89 R02 (stations IRIS-A uniquement).....	141
Figure 18.	Différences de paramètres de rotation de la Terre entre deux séries VLBI GSFC 89 R01 et 89 R02	141

LISTE DES TABLES

Table 1.	Techniques de mesure et définition des systèmes de référence terrestres associés.....	69
Table 2.	Exemples de variations de lignes de base dues aux mouvements de plaques tectoniques estimées par laser satellite et VLBI.....	78
Table 3.	Les composantes cartésiennes du vecteur rotation par plaque tectonique, données par les modèles AMO-2 et AM1-2 de Minster et Jordan.....	79
Table 4.	Quatre possibilités d'estimation des coordonnées de stations.....	88
Table 5.	Répartition par technique, des 64 sites du BTS87 sur les plaques tectoniques.....	103
Table 6.	Paramètres de transformation entre le BTS87 et les systèmes individuels.....	104
Table 7.	Paramètres de transformation entre l'ITRF-0 et les systèmes individuels.....	108
Table 8.	Coordonnées des 34 sites primaires de l'ITRF-0.....	109
Table 9.	Répartition par technique, des 96 sites de l'ITRF88 sur les plaques tectoniques principales.....	112
Table 10.	Paramètres de transformation entre l'ITRF88 et les systèmes individuels.....	114
Table 11.	Paramètres de transformation entre deux solutions VLBI.....	116
Table 12.	Paramètres de transformation entre deux solutions laser satellite.....	117
Table 13.	Paramètres de transformation entre une solution VLBI et une solution laser satellite.....	117
Table 14.	Paramètres de transformation entre une solution laser Lune et une solution laser satellite.....	118
Table 15.	Paramètres de rotation entre différents systèmes terrestres et les différences systématiques entre les paramètres de rotation de la Terre relatifs aux mêmes systèmes.....	120
Table 16.	Paramètres de transformation entre les différentes réalisations du SRTC de l'IERS.....	121
Table 17.	Paramètres de transformation entre l'ITRF88, NSWG 9Z2, et WGS84.....	123

Table 18.	L'effet de nombre et de la répartition géographique des colocations sur l'estimation des paramètres de transformation.....	125
Table 19.	Correction d'origine à appliquer aux jeux de coordonnées VLBI annuels pour tenir compte du mouvement de WESTFORD (AM0-2) dans la solution GLB480.....	129
Table 20.	Paramètre de transformation entre les solutions annuelles VLBI et la solution globale GLB480.....	129
Table 21.	Différences systématiques entre les paramètres d'orientation de la Terre donnés par les solutions annuelles VLBI et la solution globale GLB480.....	131
Table 22.	Différences de lignes de base, par rapport à Westford, entre la solution VLBI globale GLB480 et les solutions annuelles.....	133
Table 23.	Paramètres de transformation de l'ITRF88 vers les jeux de positions VLBI (GLB482) et leurs variations annuelles.....	139

ANNEXES

ANNEXE 1 - Fiches descriptives des systèmes de référence terrestres associés aux jeux de coordonnées.

- 1- Technique : VLBI
 - 2- Centre d'analyse : NGS National Geodetic Survey / USA
 - 3- Solution : SSC(NGS) 89 R 01
 - 4- Software :
 - 5- Echelle : Corrections relativistes
 - 6- Correction permanente des marées terrestres : No
 - 7- Modèle de mouvement de plaques : AMO-2
 - 8- Vitesse de la lumière (c) : 299 792 458 m/s
 - 9- Constante géogravitationnelle (GM) :
 - 10- Epoque de référence : 1984.0
 - 11- Paramètres ajustés : X, Y, Z sauf Westford
 - 12- Origine : coordonnées de l'antenne de Westford
 - 13- Orientation : IRIS
 - 14- Evolution temporelle : AMO-2
-

- 1- Technique : VLBI
 - 2- Centre d'analyse : GSFC Goddard Space Flight Center / USA
 - 3- Solution : SSC(GSFC) 89 R 01 GLB480
 - 4- Software : CALC 6.0, GLOBL/SOLVE
 - 5- Echelle : SSB
 - 6- Correction permanente des marées terrestres : No
 - 7- Modèle de mouvement de plaques : AMO-2
 - 8- Vitesse de la lumière (c) : 299 792 458 m/s
 - 9- Constante géogravitationnelle (GM) :
 - 10- Epoque de référence : 1989.0
 - 11- Paramètres ajustés : X, Y, Z sauf Westford
 - 12- Origine : coordonnées de Westford de 17/10/1980
 - 13- Orientation : circulaire D du BIH à la date de 6/11/1986
 - 14- Evolution temporelle: AMO-2
-

- 1- Technique : VLBI
- 2- Centre d'analyse : GSFC Goddard Space Flight Center / USA
- 3- Solution : SSC(GSFC) 89 R 02 GLB482
- 4- Software : CALC 6.0, GLOBL/SOLVE
- 5- Echelle : SSB
- 6- Correction permanente des marées terrestres : No
- 7- Modèle de mouvement de plaques : AMO-2
- 8- Vitesse de la lumière (c) : 299 792 458 m/s
- 9- Constante géogravitationnelle (GM) :
- 10- Epoque de référence : 1979 - 1989
- 11- Paramètres ajustés : X, Y, Z, Vx, Vy, Vz sauf Westford
- 12- Origine : coordonnées de Westford de 17/10/1980
- 13- Orientation : circulaire D du BIH à la date de 6/11/1986
- 14- Evolution temporelle: Westford se déplace selon AMO-2. L'azimuth de Westford-Richmond varie selon AMO-2. Vitesses ajustées, sauf pour certaines stations n'ayant pas assez d'obsevsations.

- 1- Technique : VLBI
 - 2- Centre d'analyse : GSFC Goddard Space Flight Center / USA
 - 3- Solution : SSC(GSFC) 89 R 03 GLB484
 - 4- Software : CALC 6.0, GLOBL/SOLVE
 - 5- Echelle : SSB
 - 6- Correction permanente des marées terrestres : No
 - 7- Modèle de mouvement de plaques : AMO-2
 - 8- Vitesse de la lumière (c) : 299 792 458 m/s
 - 9- Constante géogravitationnelle (GM) :
 - 10- Epoque de référence : 1979 - 1989
 - 11- Paramètres ajustés : X, Y, Z, Vx, Vy, Vz sauf Westford
 - 12- Origine : coordonnées de Westford de 17/10/1980
 - 13- Orientation : circulaire D du BIH à la date de 6/11/1986
 - 14- Evolution temporelle: Westford se déplace selon AMO-2. L'azimuth de Westford-Richmond varie selon AMO-2. Vitesses ajustées, sauf pour certaines stations n'ayant pas assez d'observations. Les vitesses ajustées sont des vitesses horizontales, sauf pour les stations de Fort Davis et Kashima.
-

- 1- Technique : VLBI
 - 2- Centre d'analyse : GSFC Goddard Space Flight Center / USA
 - 3- Solutions : GLB557, GLB558, GLB559, GLB560, GLB561
 - 4- Software : CALC 6.0, GLOBL/SOLVE
 - 5- Echelle : SSB
 - 6- Correction permanente des marées terrestres : No
 - 7- Modèle de mouvement de plaques :
 - 8- Vitesse de la lumière (c) : 299 792 458 m/s
 - 9- Constante géogravitationnelle (GM) :
 - 10- Epoques de référence : 84.5, 85.5, 86.5, 87.5, 88.5
 - 11- Paramètres ajustés : X, Y, Z sauf Westford
 - 12- Origine : coordonnées de Westford de 17/10/1980
 - 13- Orientation : solution GLB480
 - 14- Evolution temporelle: positions annuelles
-

- 1- Technique : VLBI
 - 2- Centre d'analyse : JPL Jet Propulsion Laboratory / USA
 - 3- Solution : SSC(JPL) 89 R 02
 - 4- Software: MASTERFIT
 - 5- Echelle : SSB
 - 6- Correction permanente des marées terrestres : No
 - 7- Modèle de mouvement de plaques : AMO-2
 - 8- Vitesse de la lumière (c) : 299 792 458 m/s
 - 9- Constante géogravitationnelle (GM) :
 - 10- Epoque de référence : 1985.0
 - 11- Paramètres ajustés : X, Y, Z
 - 12- Origine : Coordonnées de DSS-14 au 01/01/1985
 - 13- Orientation : Valeurs a priori et incertitudes d'après Eubanks (1988)
 - 14- Evolution temporelle : AMO-2
-

- 1- Technique : VLBI
 - 2- Centre d'analyse : NAO
 - 3- Solution : SSC(NAOMZ) 89 R 01
 - 4- Software :
 - 5- Echelle : SSB
 - 6- Correction permanente des marées terrestres : No
 - 7- Modèle de mouvement de plaques : AMO-2
 - 8- Vitesse de la lumière (c): 299 792 458 m/s
 - 9- Constante géogravitationnelle (GM) :
 - 10- Epoque de référence : 1984.0
 - 11- Paramètres ajustés : X,Y,Z
 - 12- Origine : système IRIS
 - 13- Orientation : IRIS
 - 14- Evolution temporelle : AMO-2
-

- 1- Technique : VLBI
 - 2- Centre d'analyse : SO Shanghai Observatory / Chine
 - 3- Solution : SSC(SO) 89 R 01
 - 4- Software :
 - 5- Echelle : SSB
 - 6- Correction permanente des marées terrestres : No
 - 7- Modèle de mouvement de plaques : No
 - 8- Vitesse de la lumière (c) : 299 792 458 m/s
 - 9- Constante géogravitationnelle (GM) :
 - 10- Epoque de référence :
 - 11- Paramètres ajustés : X,Y,Z
 - 12- Origine : Coordonnées de Haystack
 - 13- Orientation :
 - 14- Evolution temporelle :
-

- 1- Technique : Laser Satellite (SLR)
- 2- Centre d'analyse : CSR Center of Space Research / USA
- 3- Solution : SSC(CSR) 89 L 01
- 4- Software :
- 5- Echelle : LE
- 6- Correction permanente des marées terrestres : No
- 7- Modèle de mouvement de plaques : AM1-2
- 8- Vitesse de la lumière (c): 299 792 458 m/s
- 9- Constante géogravitationnelle (GM): 398600.4404 km**3/s**2
- 10- Epoque de référence : 1988.0
- 11- Paramètres ajustés : X,Y,Z
- 12- Origine : Géocentrique
- 13- Orientation : IERS, et en fixant la longitude de la station (7086)
- 14- Evolution temporelle : AM1-2

- 1- Technique : Laser Satellite (SLR)
 - 2- Centre d'analyse : GSFC Goddard Space Flight Center / USA
 - 3- Solution : SSC(GSFC) 89 L 01
 - 4- Software :
 - 5- Echelle : LE
 - 6- Correction permanente des marées terrestres : No
 - 7- Modèle de mouvement de plaques : AM0-2
 - 8- Vitesse de la lumière (c): 299 792 458 m/s
 - 9- Constante géogravitationnelle (GM): 398600.4408 km**3/s**2
 - 10- Epoque de référence : 15/01/1983
 - 11- Paramètres ajustés : X,Y,Z
 - 12- Origine : Géocentrique
 - 13- Orientation : En fixant la latitude et la longitude de la station 7105 et la latitude de 7210
- 14- Evolution temporelle : AM0-2
-

- 1- Technique : Laser Satellite (SLR)
 - 2- Centre d'analyse : DUT Delft University of Technology
 - 3- Solution : SSC(DUT) 89 L 01
 - 4- Software :
 - 5- Echelle : LE
 - 6- Correction permanente des marées terrestres : No
 - 7- Modèle de mouvement de plaques : AM1-2
 - 8- Vitesse de la lumière (c): 299 792 458 m/s
 - 9- Constante géogravitationnelle (GM): 398600.4359 km**3/s**2
 - 10- Epoque de référence : 1987.0
 - 11- Paramètres ajustés : X,Y,Z, et Vx,Vy,Vz des stations en méditerranées ainsi que Simosato et Monument Peak
 - 12- Origine : Géocentrique
 - 13- Orientation : En fixant la longitude de la station 7105 et des valeurs a priori du Bulletin B de l'IERS
- 14- Evolution temporelle : AM1-2 + estimation des variations de coordonnées des stations citées plus hauts
-

- 1- Technique : Laser Satellite (SLR)
 - 2- Centre d'analyse : SO Shanghai Observatory / Chine
 - 3- Solution : SSC(SO) 88 L 01
 - 4- Software : SHORDE I
 - 5- Echelle : LE
 - 6- Correction permanente des marées terrestres : No
 - 7- Modèle de mouvement de plaques : AM1-2
 - 8- Vitesse de la lumière (c): 299 792 458 m/s
 - 9- Constante géogravitationnelle (GM): 398600.4404 km**3/s**2
 - 10- Epoque de référence : 1988.0
 - 11- Paramètres ajustés : X,Y,Z
 - 12- Origine : Géocentrique
 - 13- Orientation :
 - 14- Evolution temporelle : AM1-2
-

- 1- Technique : Laser Satellite (SLR)
 - 2- Centre d'analyse : ZIPE Zentralinstitut fur Physik der Erde / DDR
 - 3- Solution : SSC(ZIPE) 89 L 01
 - 4- Software : TOTSDAM-5
 - 5- Echelle : LE
 - 6- Correction permanente des marées terrestres : No
 - 7- Modèle de mouvement de plaques : AMO-2
 - 8- Vitesse de la lumière (c): 299 792 458 m/s
 - 9- Constante géogravitationnelle (GM):
 - 10- Epoque de référence : 1984.0
 - 11- Paramètres ajustés : X,Y,Z
 - 12- Origine : Géocentrique
 - 13- Orientation : En fixant la latitude et la longitude de la station 7210 et la latitude de 7105
 - 14- Evolution temporelle : AMO-2
-

- 1- Technique : Laser Lune (LLR)
 - 2- Centre d'analyse : JPL Jet Propulsion Laboratory / JPL
 - 3- Solution : SSC(JPL) 89 M 01
 - 4- Software :
 - 5- Echelle : SSB
 - 6- Correction permanente des marées terrestres : No
 - 7- Modèle de mouvement de plaques : AMO-2
 - 8- Vitesse de la lumière (c): 299 792 458 m/s
 - 9- Constante géogravitationnelle (GM) :
 - 10- Epoque de référence : 1988.0
 - 11- Paramètres ajustés : X, Y, Z
 - 12- Origine : Géocentrique
 - 13- Orientation : IERS
 - 14- Evolution temporelle : AMO-2
-

- 1- Technique : Laser Lune (LLR)
 - 2- Centre d'analyse : CERGA Centre d'Etude et Recherches de Géodynamique et Astrométrie/ France
 - 3- Solution : SSC(CERGA) 89 M 01
 - 4- Software :
 - 5- Echelle : SSB
 - 6- Correction permanente des marées terrestres : No
 - 7- Modèle de mouvement de plaques :
 - 8- Vitesse de la lumière (c): 299 792 458 m/s
 - 9- Constante géogravitationnelle (GM):
 - 10- Epoque de référence :
 - 11- Paramètres ajustés : X,Y,Z
 - 12- Origine : Géocentrique
 - 13- Orientation : IERS
 - 14- Evolution temporelle :
-

- 1- Technique : Laser Lune (LLR)
 - 2- Centre d'analyse : UTXMO Mcdonald Observatory University of Texas
 - 3- Solution : SSC(UTXMO) 89 M 01
 - 4- Software :
 - 5- Echelle : SSB
 - 6- Correction permanente des marées terrestres : No
 - 7- Modèle de mouvement de plaques : AMO-2
 - 8- Vitesse de la lumière (c): 299 792 458 m/s
 - 9- Constante géogravitationnelle (GM) :
 - 10- Epoque de référence : 1984.0
 - 11- Paramètres ajustés : X,Y,Z
 - 12- Origine : Géocentrique
 - 13- Orientation : CSR LGN7689
 - 14- Evolution temporelle : AMO-2
-

- 1- Technique : Laser Lune (LLR)
 - 2- Centre d'analyse : SO Shanghai Observatory / Chine
 - 3- Solution : SSC(SO) 89 M 01
 - 4- Software :
 - 5- Echelle : SSB
 - 6- Correction permanente des marées terrestres : No
 - 7- Modèle de mouvement de plaques :
 - 8- Vitesse de la lumière (c): 299 792 458 m/s
 - 9- Constante géogravitationnelle (GM):
 - 10- Epoque de référence :
 - 11- Paramètres ajustés : X,Y,Z
 - 12- Origine : Géocentrique
 - 13- Orientation : IERS
 - 14- Evolution temporelle :
-

ANNEXE 2 - STATION COORDINATES IN ITRF88 FOR EPOCH 1988.0
(voir le Rapport Annuel de l'IERS pour 1988)

DOMES NUMBER	NAME	CDP NUM.	NETWORK (*)	X M	Y M	Z M	SX M	SY M	SZ M	PLATE
10002S001	GRASSE	SLR 7835	11 12 13 14 15 16	4581691.833	556159.364	4389359.359	0.017	0.017	0.020	EURA
10002S002	GRASSE	LLR 7845	7 8 9 10 16	4581692.411	556195.837	4389354.921	0.017	0.017	0.020	EURA
10402S002	ONSALA	VLBI 7213	1 2 3 5 6 16	3370606.212	711917.364	5349830.593	0.016	0.016	0.018	EURA
10503S001	METSAHOVI	SLR 7805	11 12 14	2892595.189	1311808.232	5512610.046	0.082	0.077	0.066	EURA
11001S002	GRAZ	SLR 7839	11 12 13 14 15 16	4194426.742	1162693.866	4647246.513	0.017	0.017	0.020	EURA
12302S002	RIGA	SLR 1884	11	3183895.748	1421496.352	5322803.965	0.260	0.296	0.204	EURA
12602M002	DIONYSOS	SLR 7515	11 12 13 15	4595216.478	2039435.340	3912629.487	0.022	0.023	0.025	EURA
12612M001	ASKITES	SLR 7510	11 12 13 15	4353444.963	2082666.296	4156506.624	0.023	0.023	0.024	EURA
12613M001	ROUMELLI	SLR 7517	11 12 13 15	4728694.720	2174373.380	3674572.939	0.022	0.023	0.025	EURA
12614M001	KARITSA	SLR 7520	11 12	4596042.658	1733476.838	4055720.820	0.024	0.023	0.026	EURA
12615M001	KATAVIA	SLR 7512	11 12 13 15	4573400.071	2409322.241	3723881.752	0.024	0.025	0.026	EURA
12616M001	XRISOKALARIA	SLR 7525	11 12 13 15	4745949.575	1905705.969	3799169.044	0.025	0.025	0.027	EURA
12706M001	LAMPEDUSA	SLR 7544	11 12 13	5072832.042	1130886.261	3684836.938	0.029	0.033	0.030	EURA
12711M002	BOLOGNA	SLR 7546	11	4461399.739	919566.760	4449510.480	0.017	0.017	0.021	EURA
12711S001	BOLOGNA	VLBI 7230	1 2 3 16	4461370.208	919596.664	4449559.036	0.017	0.017	0.020	EURA
12718M002	TRIESTE	SLR 7550	11 12	4336738.607	1071271.506	4537911.017	0.035	0.044	0.034	EURA
12725M002	CAGLIARI	SLR 7545	11 12	4893398.107	772673.330	4004140.960	0.021	0.024	0.025	EURA
12734M004	MATERA	SLR 7541	11 12 16	4641990.352	1393042.300	4133231.825	0.021	0.022	0.022	EURA
12734M005	MATERA	SLR 7540	11 16	4641984.633	1393057.743	4133233.429	0.034	0.034	0.031	EURA
12734S001	MATERA	SLR 7939	11 12 13 14 15 16	4641965.111	1393069.919	4133262.199	0.018	0.018	0.021	EURA
13201S002	CHILBOLTON	VLBI 7215	1 2 3	4008310.238	-100650.905	4943794.630	0.017	0.016	0.019	EURA
13212S001	HERSTMONCEUX	SLR 7840	11 12 13 14 15 16	4033463.868	23662.322	4924305.017	0.016	0.016	0.018	EURA
13407S001	MADRID	VLBI 1563	4	4849092.789	-360180.671	4115109.012	0.020	0.026	0.039	EURA
13407S003	MADRID	VLBI 1561	2 3 4	4849245.350	-360278.306	4114884.400	0.026	0.020	0.039	EURA
13407S010	MADRID	VLBI 1565	2 3 4	4849336.868	-360488.967	4114748.675	0.017	0.017	0.020	EURA
13504M002	KOOTWIJK	SLR 8833	11 12 14 16	3899237.894	396769.174	5015055.219	0.024	0.024	0.023	EURA
13504S001	KOOTWIJK	SLR 7833	11 12 16	3899224.133	396742.861	5015073.844	0.036	0.037	0.029	EURA
14001S001	ZIMMERWALD	SLR 7810	11 12 13 14 15 16	4331283.633	567549.501	4633139.933	0.017	0.017	0.020	EURA
14005M002	MONTE GENEROSO	SLR 7590	12	4390309.928	696752.021	4560835.910	0.020	0.021	0.022	EURA
14106S001	POTSDAM	SLR 1181	11 12 13 14 16	3800621.329	882005.337	5028859.563	0.035	0.034	0.028	EURA
14201S002	WETTZELL	SLR 7834	11 12 13 14 15 16	4075530.090	931781.263	4801618.163	0.017	0.016	0.019	EURA
14201S004	WETTZELL	VLBI 7224	1 2 3 5 6 16	4075540.094	931735.121	4801629.231	0.017	0.017	0.019	EURA
14201S007	WETTZELL	SLR 7599	11	4075517.456	931754.086	4801630.283	0.068	0.072	0.048	EURA
14201S010	WETTZELL	SLR 7596	11 16	4075585.305	931837.756	4801559.286	0.017	0.017	0.019	EURA
14209S001	EFFELSBURG	VLBI 7203	1 2 3	4033947.668	486990.366	4900430.656	0.017	0.016	0.020	EURA
20702S001	BAR GIYYORA	SLR 7530	11 12 13 16	4443968.450	3121946.855	3334695.439	0.021	0.021	0.025	AFRC
20801M001	DIYARBAKIR	SLR 7575	11 12 13	3848636.047	3251760.949	3898909.199	0.042	0.041	0.038	EURA
20802M001	YOZGAT	SLR 7585	11 12 13	4029730.727	2802093.336	4062067.986	0.045	0.053	0.035	EURA
20803M001	MELENGICLICK	SLR 7580	11 12 13	4247620.557	2778639.006	3851607.493	0.033	0.037	0.031	EURA
20804M001	YIGILCA	SLR 7587	11 12 13	4117362.044	2517076.852	4157679.019	0.036	0.032	0.030	EURA
21605S001	SHANGHAI	SLR 7837	11 12 14 16	-2831087.785	4676203.453	3275172.733	0.025	0.023	0.034	EURA
21605S008	SHANGHAI	VLBI 7226	2 3	-2847698.089	4659872.892	3283958.756	0.139	0.120	0.109	EURA
21605S009	SHANGHAI	VLBI 7227	2 3	-2831686.661	4675733.850	3275327.727	0.022	0.021	0.032	EURA
21701S001	KASHIMA	VLBI 1856	1 2 3 5 16	-3997892.267	3276581.277	3724118.258	0.020	0.019	0.030	EURA
21726S001	SIMOSATO	SLR 7838	11 12 13 14 15 16	-3822388.405	3699363.434	3507573.079	0.020	0.019	0.031	EURA
30101S001	HELWAN	SLR 7831	11 12 13	4728283.664	2879670.468	3156894.214	0.070	0.082	0.072	AFRC
30302S001	JOHANNESBURG	VLBI 7232	1 2 3	5085442.883	2668263.355	-2768697.313	0.032	0.032	0.028	AFRC
40104S001	ALGONQUIN	VLBI 7282	2 3	918034.914	-4346132.254	4561971.080	0.011	0.013	0.014	NOAM

40105M001	PENTICTON	VLBI 7283	2 3	-2058840.342	-3621286.402	4814420.696	0.019	0.027	0.031	NOAM
40118M001	WHITEHORSE	VLBI 7284	3	-2215213.553	-2209261.634	5540292.525	0.014	0.014	0.019	NOAM
40127M001	YELLOWKNIFE	VLBI 7285	2 3	-1224124.438	-2689530.641	5633555.275	0.013	0.017	0.024	NOAM
40400M001	PASADENA	SLR 7896	11 12	-2493211.855	-4655229.592	3565574.444	0.012	0.013	0.014	PCFC
40400M003	PASADENA	VLBI 7263	1 3	-2493305.916	-4655197.647	3565519.319	0.012	0.013	0.014	PCFC
40403M001	PALOS VERDES	VLBI 7268	3	-2525452.726	-4670035.741	3522886.735	0.015	0.021	0.018	PCFC
40404M001	PEARBLOSSOM	VLBI 7254	3	-2464070.851	-4649425.695	3593905.675	0.013	0.017	0.016	PCFC
40405M001	GOLDSTONE	SLR 7085	11 16	-2353394.117	-4641529.636	3676899.165	0.012	0.013	0.014	NOAM
40405M002	GOLDSTONE	SLR 7115	11 12 16	-2350861.563	-4655546.341	3660997.826	0.011	0.012	0.013	NOAM
40405M006	GOLDSTONE	SLR 7265	11 12 16	-2356475.657	-4646618.352	3668424.702	0.012	0.012	0.013	NOAM
40405M010	GOLDSTONE	VLBI 7287	3	-2356494.038	-4646607.742	3668426.601	0.012	0.015	0.015	NOAM
40405M013	GOLDSTONE	SLR 7288	11 12	-2356494.024	-4646607.728	3668426.610	0.013	0.013	0.014	NOAM
40405S001	GOLDSTONE	VLBI 1514	4 16	-2353621.142	-4641341.620	3677052.298	0.017	0.017	0.018	NOAM
40405S003	GOLDSTONE	VLBI 1512	4	-2350443.703	-4651980.922	3665630.946	0.017	0.017	0.018	NOAM
40405S009	GOLDSTONE	VLBI 7222	1 2 3 16	-2356170.912	-4646755.942	3668470.572	0.011	0.011	0.013	NOAM
40405S014	GOLDSTONE	VLBI 1513	2 3 4 16	-2351129.064	-4655477.151	3660956.883	0.011	0.012	0.013	NOAM
40405S019	GOLDSTONE	VLBI 7231	3 4 16	-2353538.691	-4641649.607	3676670.012	0.012	0.012	0.013	NOAM
40406M001	SAN FRANCISCO	VLBI 7252	3	-2707704.796	-4257609.652	3888374.153	0.012	0.014	0.015	PCFC
40407M001	PINYON FLATS	VLBI 7256	3	-2369635.878	-4761324.979	3511116.118	0.012	0.014	0.015	NOAM
40408S002	FAIRBANKS	VLBI 7225	1 2 3 5 16	-2281547.096	-1453645.052	5756993.189	0.013	0.014	0.015	NOAM
40410M001	POINT REYES	VLBI 7251	3	-2732333.031	-4217634.946	3914491.019	0.013	0.014	0.015	PCFC
40412M001	AUSTIN	SLR 7890	12	-754162.052	-5459061.292	3200744.007	0.297	0.263	0.328	NOAM
40416M001	YAKATAGA	VLBI 7277	3	-2529744.135	-1942091.323	5505027.938	0.015	0.015	0.020	NOAM
40417M002	PATRICK AFB	SLR 7069	11 12	917958.979	-5548370.301	2998776.567	0.118	0.068	0.099	NOAM
40419M001	KODIAK	VLBI 7278	3	-3026940.106	-1575911.808	5370362.472	0.014	0.015	0.020	NOAM
40420M002	VANDENBERG AFB	VLBI 7223	1 2 3 16	-2678094.680	-4525450.860	3597410.125	0.011	0.012	0.013	NOAM
40420M004	VANDENBERG AFB	SLR 7887	12 16	-2668867.969	-4530742.661	3598684.824	0.016	0.016	0.017	NOAM
40421M001	NOME	VLBI 7279	3	-2658150.370	-693821.901	5737236.609	0.020	0.017	0.029	NOAM
40423M001	SANDPOINT	VLBI 7280	3	-3425461.860	-1214669.150	5223858.264	0.017	0.015	0.023	NOAM
40424S001	KAUAI	VLBI 1311	1 2 3 16	-5543845.989	-2054564.206	2387813.760	0.016	0.016	0.021	PCFC
40425M001	SOURDOUGH	VLBI 7281	3	-2419993.406	-1664228.772	5643538.267	0.013	0.014	0.017	NOAM
40427M001	FORT ORD	VLBI 7266	3	-2697026.695	-4354393.361	3788077.572	0.013	0.014	0.015	PCFC
40428M001	SANTA PAOLA	VLBI 7255	3	-2554476.600	-4608627.431	3582138.263	0.015	0.022	0.019	PCFC
40430M001	BLACK BUTTE	VLBI 7269	3	-2306306.886	-4787914.494	3515736.398	0.012	0.015	0.015	NOAM
40431M001	DEADMAN LAKE	VLBI 7267	3	-2336819.581	-4732587.015	3570329.950	0.015	0.021	0.018	NOAM
40432M001	ELY	VLBI 7286	3	-2077236.234	-4486712.764	4018753.727	0.011	0.014	0.014	NOAM
40433M001	QUINCY	SLR 7051	11 12 16	-2516893.119	-4198845.119	4076411.480	0.012	0.012	0.013	NOAM
40433M002	QUINCY	SLR 7109	11 12 13 14 15 16	-2517234.693	-4198556.292	4076569.642	0.011	0.012	0.013	NOAM
40433M004	QUINCY	VLBI 7221	1 3	-2517230.804	-4198595.278	4076531.234	0.011	0.012	0.013	NOAM
40433M005	QUINCY	SLR 7886	11 12 16	-2517242.304	-4198550.986	4076570.258	0.012	0.012	0.013	NOAM
40434M002	MOUNT HOPKINS	SLR 7888	11 12	-1936744.279	-5077639.149	3331993.840	0.025	0.020	0.022	NOAM
40434S001	MOUNT HOPKINS	SLR 7921	11 12	-1936760.115	-5077707.220	3331922.463	0.020	0.017	0.020	NOAM
40436M002	SAN DIEGO	SLR 7062	11 12	-2428825.853	-4799750.539	3417272.718	0.017	0.016	0.016	PCFC
40436M003	SAN DIEGO	SLR 7035	11	-2428826.611	-4799754.355	3417267.032	0.013	0.018	0.018	PCFC
40437M001	MAMMOTH LAKES	VLBI 7259	3	-2448246.712	-4426738.390	3875435.883	0.016	0.026	0.023	NOAM
40438M001	BEAR LAKE	SLR 7082	11 12	-1735997.107	-4425048.266	4241430.405	0.021	0.020	0.020	NOAM
40439M001	OWENS VALLEY	SLR 7114	11 12 16	-2410422.378	-4477802.762	3838686.665	0.012	0.012	0.013	NOAM
40439M004	OWENS VALLEY	SLR, VLBI 7853	3 11	-2410421.157	-4477800.491	3838690.287	0.012	0.012	0.013	NOAM
40439S002	OWENS VALLEY	VLBI 7207	1 2 3 16	-2409600.671	-4478349.596	3838603.172	0.011	0.011	0.013	NOAM
40440M001	WESTFORD	SLR 7091	11 12 14 16	1492453.772	-4457278.814	4296815.883	0.011	0.011	0.014	NOAM
40440S002	WESTFORD	VLBI 7205	1 2 3 16	1492404.908	-4457266.552	4296881.691	0.011	0.011	0.013	NOAM
40440S003	WESTFORD	VLBI 7209	1 2 3 5 6 16	1492206.770	-4458130.543	4296015.461	0.011	0.011	0.013	NOAM
40441S001	GREENBANK	VLBI 7204	1 2 3	882880.046	-4924482.343	3944130.614	0.011	0.011	0.013	NOAM
40442M001	FORT DAVIS	LLR 7086	9 11 12 14 15 16	-1330125.273	-5328526.693	3236150.236	0.011	0.011	0.013	NOAM
40442M005	FORT DAVIS	SLR 7885	11 12 16	-1330125.273	-5328526.690	3236150.235	0.012	0.012	0.014	NOAM

40442M006	FORT DAVIS	LLR 7080	9 11	-1330020.943	-5328401.912	3236480.778	0.014	0.013	0.015	NOAM
40442S001	FORT DAVIS	LLR 7086	7 8 10 13 16	-1330120.917	-5328532.323	3236146.681	0.012	0.012	0.014	NOAM
40442S002	FORT DAVIS	LLR 7206	7 16	-1330781.249	-5328755.638	3235697.666	0.012	0.012	0.014	NOAM
40442S003	FORT DAVIS	VLBI 7216	1 2 3 5 6 16	-1324210.876	-5332023.186	3232118.347	0.011	0.011	0.013	NOAM
40442S014	FORT DAVIS	LLR 7080	7 8 10	-1330021.287	-5328403.253	3236481.464	0.029	0.029	0.032	NOAM
40445M001	MAUI	LLR 7210	9 11 12 13 14 15 16	-5466006.492	-2404427.982	2242187.465	0.015	0.016	0.020	PCFC
40445M002	MAUI	SLR,VLBI 7120	2 3 11 12 16	-5465998.468	-2404408.584	2242228.391	0.015	0.016	0.020	PCFC
40445S002	MAUI	LLR 7210	10	-5466003.737	-2404426.628	2242197.700	0.128	0.138	0.141	PCFC
40445S005	MAUI	LLR 7210	7 8 16	-5466006.974	-2404428.195	2242188.468	0.016	0.016	0.021	PCFC
40449M001	OCOTILLO	VLBI 7270	3	-2335601.052	-4832244.345	3434392.324	0.066	0.063	0.076	NOAM
40451M101	WASHINGTON	SLR 7101	11 12 16	1131240.379	-4831179.777	3994148.426	0.011	0.011	0.014	NOAM
40451M102	WASHINGTON	SLR 7102	11 12 16	1130686.688	-4831353.061	3994110.863	0.011	0.011	0.014	NOAM
40451M103	WASHINGTON	SLR 7103	11 12 16	1130685.735	-4831348.735	3994116.303	0.011	0.011	0.014	NOAM
40451M104	WASHINGTON	SLR 7104	11 12 16	1131095.912	-4831196.975	3994170.693	0.011	0.011	0.014	NOAM
40451M105	WASHINGTON	SLR 7105	11 12 13 14 15 16	1130719.802	-4831350.601	3994106.465	0.011	0.011	0.014	NOAM
40451M111	WASHINGTON	SLR 7899	11 16	1131364.838	-4831168.824	3994128.877	0.011	0.011	0.014	NOAM
40451M112	WASHINGTON	SLR 7063	11 12 16	1130714.855	-4831367.765	3994087.340	0.011	0.011	0.014	NOAM
40451M114	WASHINGTON	SLR 7125	11 12 16	1130745.863	-4831368.098	3994077.082	0.020	0.016	0.017	NOAM
40451M116	WASHINGTON	SLR 7130	11 16	1130735.369	-4831324.636	3994132.300	0.063	0.059	0.060	NOAM
40489S001	HAT CREEK	VLBI 7218	1 2 3 16	-2523969.864	-4123506.412	4147752.566	0.011	0.012	0.013	NOAM
40490S001	MARYLAND POINT	VLBI 7217	1 2 3	1106629.471	-4882907.230	3938086.901	0.012	0.015	0.016	NOAM
40491M002	FLAGSTAFF	SLR 7891	11 12	-1923976.667	-4850871.786	3658574.882	0.012	0.015	0.015	NOAM
40491M003	FLAGSTAFF	VLBI 7261	1 3	-1923992.600	-4850854.575	3658589.253	0.012	0.015	0.014	NOAM
40492M001	VERNAL	SLR 7892	11 12	-1631484.662	-4589133.937	4106749.523	0.021	0.022	0.019	NOAM
40492M002	VERNAL	VLBI 7290	1 3	-1631473.227	-4589128.978	4106759.861	0.012	0.017	0.016	NOAM
40493M001	YUMA	SLR,VLBI 7894	1 3 11 12	-2196777.850	-4887337.120	3448425.200	0.012	0.013	0.013	NOAM
40496M001	PLATTEVILLE	SLR 7112	11 12 14 16	-1240678.160	-4720463.436	4094480.594	0.011	0.011	0.012	NOAM
40496M002	PLATTEVILLE	VLBI 7258	1 2 3 16	-1240708.053	-4720454.400	4094481.619	0.011	0.011	0.012	NOAM
40497M001	MONUMENT PEAK	SLR 7110	11 12 13 14 15 16	-2386277.917	-4802354.383	3444881.439	0.011	0.011	0.013	PCFC
40497M002	MONUMENT PEAK	SLR 7220	11 12 16	-2386292.191	-4802347.509	3444880.849	0.012	0.012	0.013	PCFC
40497M003	MONUMENT PEAK	SLR,VLBI 7274	1 3 11	-2386289.328	-4802346.588	3444883.962	0.012	0.012	0.013	PCFC
40499M002	RICHMOND	SLR 7295	11	961319.042	-5674091.018	2740489.497	0.013	0.012	0.015	NOAM
40499S001	RICHMOND	VLBI 7219	1 2 3 6 16	961258.165	-5674090.088	2740533.709	0.012	0.012	0.015	NOAM
40504M001	MAZATLAN	SLR 7122	11 12 13 14 15 16	-1660089.271	-5619100.459	2511637.837	0.012	0.012	0.015	NOAM
40505M001	CABO SAN LUCAS	SLR 7882	11 12 14	-1997241.713	-5528041.218	2468355.198	0.021	0.019	0.021	PCFC
40701S001	SANTIAGO DE CUBA	SLR 1953	11	1474548.697	-5811242.442	2168944.978	0.110	0.079	0.111	NOAM
41604S001	NATAL	SLR 7929	11 12	5186468.039	-3653856.193	-654321.921	0.024	0.029	0.030	SOAM
41703M001	EASTER ISLAND	SLR 7061	12 16	-1884983.840	-5357606.849	-2892852.706	0.108	0.087	0.100	NAZC
41703M002	EASTER ISLAND	SLR 7097	11 12 13 16	-1884984.377	-5357608.210	-2892853.483	0.025	0.025	0.021	NAZC
41705M001	SANTIAGO	SLR 7400	11 12	1769699.825	-5044612.975	-3468260.102	0.029	0.029	0.023	SOAM
41706M001	CERRO TOLOLO	SLR 7401	11 12	1815517.189	-5213464.927	-3187999.466	0.026	0.027	0.023	SOAM
42202S001	AREQUIPA	SLR 7907	11 12 13 14 15 16	1942792.009	-5804077.744	-1796919.359	0.021	0.023	0.022	SOAM
42501M001	BERMUDA	SLR 7067	11 12	2308538.595	-4874079.987	3393628.534	0.070	0.047	0.066	NOAM
43602M002	GRAND TURK	SLR 7068	12	1920482.885	-5619478.306	2318914.312	0.516	0.285	0.328	NOAM
50103S001	CANBERRA	VLBI 1543	4 16	-4460894.496	2682361.621	-3674748.766	0.034	0.032	0.038	INDI
50103S003	CANBERRA	SLR 7943	11 12 16	-4447548.848	2677134.080	-3694996.708	0.030	0.029	0.033	INDI
50103S005	CANBERRA	VLBI 1542	4	-4460981.126	2682413.711	-3674582.465	0.034	0.032	0.038	INDI
50103S007	CANBERRA	SLR 7843	11 12 14 15 16	-4446476.747	2678127.028	-3696251.789	0.030	0.029	0.033	INDI
50103S010	CANBERRA	VLBI 1545	2 3 4	-4460935.126	2682765.716	-3674381.790	0.032	0.030	0.033	INDI
50107M001	YARRAGADEE	SLR 7090	11 12 13 14 15 16	-2389006.558	5043329.273	-3078525.410	0.031	0.029	0.035	INDI
50503M001	AMERICAN SAMOA	SLR 7096	11 12	-6100045.902	-996203.193	-1568976.387	0.025	0.028	0.031	PCFC
50505M001	KWAJALEIN ATOLL	SLR 7092	11 12	-6143447.268	1364700.174	1034163.089	0.022	0.021	0.030	PCFC
50505S003	KWAJALEIN ATOLL	VLBI 4968	1 2 3	-6143536.499	1363997.200	1034707.332	0.021	0.020	0.030	PCFC
92202M002	MOTU HIUMOO	SLR 7121	11 12 15 16	-5345865.301	-2958246.682	-1824623.854	0.022	0.022	0.024	PCFC
92202M003	MOTU HIUMOO	SLR 7123	11 12 15	-5345865.396	-2958246.779	-1824623.991	0.024	0.024	0.024	PCFC

(*) 1 : SSC(NGS) 89 R 01 2 : SSC(GSFC) 89 R 01 3 : SSC(GSFC) 89 R 033 4 : SSC(JPL) 89 R 02
5 : SSC(NAOMZ)89 R 01 6 : SSC(SO) 89 R 01 7 : SSC(JPL) 89 M 01 8 : SSC(CERGA)89 M 01
9 : SSC(UTXMO)89 M 01 10 : SSC(SO) 86 M 01 11 : SSC(CSR) 89 L 02 12 : SSC(GSFC) 89 L 01
13 : SSC(ZIPE) 89 L 01 14 : SSC(SO) 88 L 01 15 : SSC(DUT) 89 L 01 16 : ITRF-0