



**HAL**  
open science

## Le repère céleste

Elisa Félicitas Arias

► **To cite this version:**

Elisa Félicitas Arias. Le repère céleste. Astrophysique [astro-ph]. Observatoire de Paris, 1990. Français. NNT: . tel-02094980

**HAL Id: tel-02094980**

**<https://hal.science/tel-02094980>**

Submitted on 10 Apr 2019

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

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

*Soules*

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

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

*présentée par :*

**Elisa Félicitas ARIAS**

*Sujet de thèse :*

**LE REPERE CELESTE : CONSTRUCTION DU REPERE PRIMAIRE  
EXTRAGALACTIQUE ET ACCESSIBILITE PAR HIPPARCOS**

Soutenue à l'Observatoire de Paris, le 18 juin 1990, devant le jury composé de :

François Barlier

Martine Feissel

Bernard Guinot

Jean Kovalevsky

Jean-François Lestrade

Yves Requième

Directeur de thèse

Rapporteur

Rapporteur

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

EN ASTRONOMIE FONDAMENTALE,  
MECANIQUE CELESTE ET GEODESIE

*présentée par :*

**Elisa Félicitas ARIAS**

*Sujet de thèse :*

**LE REPERE CELESTE : CONSTRUCTION DU REPERE PRIMAIRE  
EXTRAGALACTIQUE ET ACCESSIBILITE PAR HIPPARCOS**

Soutenue à l'Observatoire de Paris, le 18 juin 1990, devant le jury composé de :

François Barlier  
Martine Feissel  
Bernard Guinot  
Jean Kovalevsky  
Jean-François Lestrade  
Yves Requième

Directeur de thèse

Rapporteur

Rapporteur



## *Remerciements*

Mes plus sincères remerciements à Jean-François Lestrade pour m'avoir guidée au long de mon travail et pour avoir toujours apporté ses idées originales. Je lui suis très reconnaissante du temps qu'il a investi dans la correction de mon manuscrit et d'avoir consacré une partie significative de ses journées à l'aboutissement de cette thèse.

Je tiens à exprimer ma gratitude à Martine Feissel pour avoir rendu possible mon long séjour à l'Observatoire de Paris et pour m'avoir fait participer activement aux tâches du Service International de la Rotation Terrestre. Je la remercie aussi de fructueuses discussions qui m'ont été précieuses.

Je remercie Bernard Guinot de son soutien permanent et de la confiance qu'il m'a accordée.

Mes remerciements vont aussi à Yves Requième pour avoir accepté d'être rapporteur de cette thèse et à François Barlier et Jean Kovalevsky pour faire partie de mon jury.

Denise Bourquard a mis en place et entretient la base de données sur laquelle la plus grande part de ce travail a été effectué. Je lui suis reconnaissante du soin et de la diligence qu'elle a toujours apportés dans la mise au point et l'exécution des calculs. Je remercie également Najat Essaïfi pour son appui technique et Claude Mulhauser pour sa collaboration permanente.

Je voudrais dédier un paragraphe spécial à Lucette Castrique, ma compagne quotidienne le long des journées de travail. A elle va ma vive gratitude pour son dévouement dans la transcription de cette thèse et pour son aide constante et inconditionnelle.

Je remercie également tout le Bureau Central de l'IERS de l'accueil chaleureux qu'il m'a réservé.

Je remercie le Bureau des Longitudes, l'Observatoire de Paris, l'Institut Géographique National, le Bureau Central de l'IERS, le CNES, l'INSU et le CONICET (Argentine) dont le soutien matériel m'a permis de mener à bien cette thèse.

Finalement, je remercie ma mère de m'avoir toujours encouragée dans ma carrière professionnelle, même à distance.

# LE REPERE CELESTE : CONSTRUCTION DU REPERE PRIMAIRE EXTRAGALACTIQUE ET ACCESSIBILITE PAR HIPPARCOS

## SOMMAIRE

### I) INTRODUCTION GENERALE

Systèmes de référence célestes	1
I Concepts	1
1) Définitions	1
2) Construction des systèmes de référence célestes et terrestres	2
3) Systèmes de référence célestes	3
II Repère de référence céleste extragalactique (VLBI)	6
III Le système de référence stellaire	11
IV Le système de référence céleste HIPPARCOS	13
V Les étoiles radio et le raccordement des repères de référence HIPPARCOS et VLBI	16
VI Raccordement des systèmes de référence extragalactique VLBI et planétaire	19
Références bibliographiques du Chapitre I	22

### II) COMPARAISON ET COMBINAISON DES REPERES EXTRAGALACTIQUES

Comparaison des repères extragalactiques	25
- Introduction	25
- La méthode de comparaison des repères	27
- Les repères extragalactiques comparés. Description	33
- Résultats : rotations globales et déformations régionales	36
- Article 1 :	
"Comparison of VLBI celestial reference frames"	39
- Article 2 :	
"Global and regional astrometric comparison between two dense VLBI extragalactic reference frames"	47

## SOMMAIRE (FIN)

Combinaison des repères extragalactiques	61
- Article 3 :	
"The celestial system of the International Earth Rotation Service"	63
- Article 4 :	
"An extragalactic celestial reference frame consistent with the BIH Terrestrial System (1987)"	73
- Article 5 :	
"Implementation of the IERS Celestial Reference Frame"	83
Références bibliographiques du Chapitre II.	95
III) LA METHODE DES ARCS : ETUDE SUR UNE NOUVELLE ANALYSE DES DONNEES VLBI	
La méthode des arcs	97
- Introduction	97
- La technique VLBI	97
- Développement analytique de la méthode des arcs dans le système équatorial	103
- Développement analytique de la méthode des arcs dans un système lié à la base	109
- Références bibliographiques du Chapitre III.	118
IV) RACCORDEMENT DU REPERE CELESTE D'HIPPARCOS AU REPERE EXTRAGALACTIQUE VLBI	
- Introduction	119
- Le raccordement des repères de référence célestes VLBI et HIPPARCOS via les étoiles radio	121
- La méthode de raccordement	122
- La Simulation des données HIPPARCOS	127
- Les résultats du raccordement. Analyse des cas différents	133
- Références bibliographiques du Chapitre IV.	141
CONCLUSION GENERALE	143

## **I - INTRODUCTION GENERALE**

## SYSTEMES DE REFERENCE CELESTES

Après un exposé des concepts, nous examinons les principes de construction du repère de référence céleste primaire fondé sur les coordonnées équatoriales de sources radio extragalactiques mesurées au moyen de la technique d'interférométrie radio à très longue base VLBI (Very long Baseline Interferometry). Nous examinons aussi les principes de construction du repère de référence céleste secondaire du futur satellite astrométrique HIPPARCOS de l'ESA fondé sur les coordonnées d'étoiles mesurées par rapport à des plans origine arbitraires. Nous décrivons la méthode de raccordement de ces deux repères de référence célestes au moyen d'observations VLBI d'étoiles radio. Nous évoquons aussi le repère de référence secondaire dynamique-planétaire et les méthodes pour le raccorder aux deux précédents repères.

### I) Concepts

L'un des objectifs de l'astrométrie fondamentale est l'établissement de repères de référence célestes. Kovalevsky (1985) fait une revue complète des concepts et des méthodes qui conduisent de la définition du système de référence céleste à la réalisation de repères de référence célestes conventionnels. Nous citons très largement son article dans le paragraphe qui suit.

#### 1) Définitions.

Un système de référence est 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 ensemble physique. Il existe plusieurs systèmes de référence pour repérer la positions d'objets de types différents. Un système d'axes de coordonnées est une notion abstraite et n'est pas accessible en tant que tel. Il faut matérialiser le système de référence par un certain nombre de *points de référence* dont on a déterminé les coordonnées et éventuellement les mouvements. Le résultat de cette matérialisation est appelé "repère de référence". Cette distinction entre système et repère a été formalisée par Kovalevsky et Mueller (1981).

Pour décrire le mouvement d'un objet non ponctuel (la Terre), il est également nécessaire de définir un système de référence lié à l'objet. Par exemple, dans l'étude dynamique de la Terre, on est conduit à considérer simultanément *un système de référence céleste et un système de référence terrestre*. En pratique, la situation est plus complexe; même si le mouvement de la Terre peut être définie comme le mouvement du système de référence terrestre par rapport au système céleste, on a pris l'habitude d'introduire un *système terrestre intermédiaire* pour séparer l'ensemble précession-nutation de l'ensemble rotation de la Terre et mouvement du pôle (Kovalevsky et Yatskiv 1982). Ce système est arbitraire et n'a pas le caractère des systèmes fondamentaux.

## 2) Construction des systèmes de référence célestes et terrestres.

Suivant Kovalevsky (1985), entre l'idée générale qui est à la base de la construction d'un système de référence (terrestre ou céleste) et la réalisation du repère correspondant, il faut franchir les quatre étapes décrites ci-dessous. Une cinquième s'y ajoute parfois pour étendre le repère afin de le rendre encore plus accessible. Nous énumérons brièvement ces étapes:

i- *Conception* : c'est l'énoncé d'un principe qui donne une propriété générale que doit vérifier le système de référence. C'est en quelque sorte une définition toute théorique appelée "système de référence idéal".

ii- *Choix d'une structure physique*: on identifie l'ensemble physique sur lequel on fera porter la définition idéale. La propriété générale énoncée dans le système de référence idéal doit être vérifiée avec la meilleure approximation possible. On a alors le "système de référence" proprement dit.

iii- *Modélisation de la structure*: il faut associer un certain nombre de paramètres qui permettent de modéliser mathématiquement les propriétés physiques de la structure. En général, tous ces paramètres ne peuvent être ajustés sur les observations des objets d'une structure physique particulière et leurs valeurs dans le modèle sont, dans une certaine mesure, arbitraires. Ce système de référence est appelé alors "système de référence conventionnel".

iv- *Matérialisation ou réalisation du système*: en ajustant les paramètres du modèle ci-dessus aux observations du système matériel choisi, on obtient des positions et des mouvements d'un

certain nombre de points appartenant au modèle. Toutes les positions ainsi déterminées en fonction du temps constituent des repères dont les coordonnées sont connues à chaque instant dans le système de référence conventionnel. Rattacher tout autre objet à un ou plusieurs points permet de déterminer la position de l'objet dans le système de référence conventionnel. L'ensemble de ces fonctions du temps constituent l'ensemble des points de repères fondamentaux  $P_i$  qu'on appelle "repère de référence conventionnel".

v- *Extension éventuelle du repère de référence conventionnel*: le nombre de points de repères dont les positions ainsi déterminées forment le système de référence conventionnel peut ne pas être suffisant pour toutes les applications pratiques. Ces points fondamentaux peuvent aussi ne pas être accessibles à d'autres types d'instruments. On détermine pour cela les positions en fonction du temps de nouveaux points  $Q_i$  par rapport aux repères fondamentaux  $P_i$ . Ce sont des repères secondaires qui seront donc suffisamment nombreux et de types variés.

### 3) Systèmes de référence célestes.

Kovalevsky (1985) montre comment les étapes décrites ci-dessus s'appliquent à la construction des systèmes terrestres et célestes. Nous reprenons seulement la partie céleste de son article.

#### a) *Conception*:

L'idée intuitive qu'un système de référence céleste doit être un système sans rotation n'est pas facile à axiomatiser. Il y a deux grandes classes de systèmes célestes:

i<sub>1</sub>) *Définition dynamique*: en se plaçant en mécanique de Newton, on calcule le mouvement des planètes à partir d'équations différentielles de mouvement écrites dans un système de référence par rapport auquel il n'y a pas de termes d'accélération de rotation. En se plaçant en relativité générale, par rapport à un système de coordonnées définis par la métrique décrivant idéalement les propriétés de l'espace-temps, les planètes se meuvent selon des équations différentielles de mouvement qui diffèrent des équations de la mécanique de Newton de quantités de l'ordre de  $10^{-8}$  (en relatif) accessibles aux mesures aujourd'hui et dont on tient compte dans les éphémérides modernes. On a l'habitude de considérer que loin du système solaire la métrique est plate (de Minkowski) et que les coordonnées d'espace définissent alors des directions semblables au système de référence euclidien de la physique de Newton. En réalité, le système de coordonnées qui s'étend loin du système solaire est dominé par la courbure provoquée par le champ de gravitation de la Galaxie et au delà de celle-ci par la masse

et l'énergie remplissant l'Univers dans son ensemble. Le raccordement entre un système de référence local lié au système solaire et un système de référence galactique ou cosmologique reste un problème théorique non-résolu. Les variations très lentes des champs qui dominent à ces échelles laissent prévoir des phénomènes difficilement accessibles aux mesures mais la clarification de cette question apporterait sans doute beaucoup sur le plan du concept d'un système de référence en relativité générale.

i<sub>2</sub>) *Définition cinématique*: par rapport à un système de référence idéal, un ensemble de points de repère qui n'a pas de mouvement propre, n'a pas non plus de rotation globale. La signification physique de cette proposition est loin d'être claire pour des objets qui se situent aux confins de l'Univers observable comme les quasars. De plus, une rotation globale de l'Univers de  $10^{-13}$  rd/an ressort de l'interprétation de certaines observations de radioastronomie (Birch 1982). Néanmoins, cette proposition semble conduire à un concept opérationnel pour la construction du repère de référence extragalactique mais une réflexion est là aussi souhaitable.

b) *Choix d'une structure physique* :

i<sub>1</sub>) *Définition dynamique*: les mouvements des planètes est en général la base de la définition. On peut aussi utiliser le mouvement de la Lune ou d'un ensemble de satellites artificiels.

i<sub>2</sub>) *Définition cinématique*: les galaxies lointaines et les quasars sont les candidats les meilleurs pour servir de référence dans une telle définition. Par contre, les étoiles ont des mouvements propres qui rendent la méthode cinématique très délicate à appliquer avec succès.

c) *Modélisation de la structure* :

i<sub>1</sub>) *Définition dynamique*: le système choisi est défini par des valeurs adoptées pour un certain nombre de paramètres fondamentaux relatifs à la dynamique du système solaire et à la liaison entre le système céleste et le système terrestre intermédiaire. L'ensemble de ces quantités constitue le système UAI de constantes astronomiques. Elles ne suffisent pas à déterminer en détail le modèle mais les autres paramètres ont une influence négligeable sur la définition proprement dite du système de référence et sont laissés libres afin d'être déterminés lors de la réalisation du système. C'est en particulier le cas des conditions initiales pour les mouvements de la Terre, de la Lune et des planètes.

i<sub>2</sub>) *Définition cinématique*: les galaxies lointaines et les quasars sont suffisamment éloignés pour que si leurs vitesses transversales étaient égales à leurs vitesses d'éloignement, leurs mouvements propres seraient inobservables car inférieurs à  $10^{-5}$  secondes de degré par an. Ils

représentent donc un excellent modèle de points fixes dans l'Univers. De plus, des observations VLBI entre deux quasars angulairement proches mais ayant des décalages vers le rouge différents ont montré que leur mouvement relatif était  $< 20$  microsecondes de degré par an.

d) *Matérialisation* :

i<sub>1</sub>) *Définition dynamique*: la réalisation du système est assurée par une théorie numérique des mouvements des planètes et, en particulier, de la Terre. Les éphémérides constituent l'une des matérialisations du repère de référence céleste défini dynamiquement.

i<sub>2</sub>) *Définition cinématique*: des coordonnées équatoriales de quasars déterminées par interférométrie radio à très longue base (VLBI) matérialisent le système de référence cinématique le plus propre. L'origine des ascensions droites est choisie arbitrairement compte tenu que cette technique d'observation n'est pas sensible au mouvement de l'équinoxe.

Une stratégie d'observation appropriée et une nouvelle méthode de réduction des données VLBI devraient permettre de déterminer les coordonnées équatoriales à l'aide des longueurs d'arc mesurées entre sources radio célestes afin d'éliminer toute sensibilité aux erreurs d'orientation de la Terre supportant les antennes. Dans ce cas, il faut choisir arbitrairement trois coordonnées de deux sources (deux ascensions droites et une déclinaison par exemple) pour fixer les plans de référence. Par la suite en géodynamique, on pourrait s'appuyer sur ce repère de référence céleste pour déterminer l'orientation de la Terre par VLBI.

## II) Repère de référence céleste extragalactique (VLBI).

Un radio-télescope travaillant aux longueurs d'ondes centimétriques ( $\lambda$ ) a un pouvoir séparateur ( $\lambda / D = \text{diamètre du radio-télescope}$ ) bien moins intéressant qu'un télescope optique. Par exemple, le grand radio-télescope à structure unique du Max Planck Institute à Effelsberg en Allemagne Fédérale a un pouvoir séparateur:  $\lambda / D = 6\text{cm} / 100\text{m} = 2$  minutes de degré. Comme en radio-astrométrie la précision correspond à une fraction comprise en général entre 0.05 et 0.3 du pouvoir séparateur, il était difficile d'envisager de conduire des observations de ce type jusqu'à l'invention de l'interférométrie radio à synthèse d'ouverture par les britanniques Ryle et Hewish (1960). Cette technique met en jeu un réseau formé d'au moins deux radio-télescopes connectés directement par des câbles électriques à un corrélateur central et qui observent simultanément la même source radio céleste.

En négligeant certains phénomènes de propagation hertzienne, il est utile de concevoir les fronts d'onde successivement émis par la source comme régulièrement espacés dans "l'ether" et séparés d'une longueur d'onde. La phase relative du même front d'onde atteignant successivement les deux radio-télescopes est une fonction sinusoidale du temps de période diurne à cause de la rotation angulaire de la Terre. L'évolution de cette phase relative est mesurée par le corrélateur central et est comparée à un modèle qui contient essentiellement des paramètres géodésiques et astrométriques. Les retards instrumentaux dans les câbles de connection sont calibrés de façon à ce que chaque radio-télescope "agisse" en phase comme une petite surface élémentaire d'un grand radio-télescope. En pouvoir séparateur, mais pas en sensibilité bien sûr, on synthétise ainsi une surface paraboloidale d'un diamètre égale à la plus grande distance B entre les radio-télescopes du réseau. La première réalisation de ce type d'instrument est celle du "Cambridge-One-Mile-Telescope" à Cambridge (Grande-Bretagne) au Mullard Radio Astronomy Observatory. Il comprend 3 radio-télescopes de 18 mètres de diamètre à monture équatoriale répartis sur une base horizontale d'orientation Est-Ouest d'un mile (1.6 km) de long. A l'aide de cet interféromètre connecté, Elsmore et Mackay (1969) ont déterminé les positions de 78 sources radio avec des erreurs typiques de 1" à 2". Ces mesures furent conduites simultanément à 1407 et 408 MHz.

Plus tard, la technique VLBI (Very Long Baseline Interferometry) s'est développée aux Etats-Unis et au Canada dès que l'on a pu s'affranchir des câbles de connection entre les radio-télescopes et le corrélateur central en utilisant des horloges atomiques fournissant à chaque radio-télescope un échelon de temps et de fréquence suffisamment stable pour enregistrer sur bandes magnétiques les signaux radio captés et d'effectuer leur corrélation en différé. Alors, le pouvoir séparateur  $\lambda / D$  n'a plus été limitée que par le diamètre terrestre, ce qui correspond à un

interfrange de 0.001" à 6 cm. Les premières observations VLBI furent réalisées au Canada (Brotten *et al.* 1967) et aux Etats-Unis (Bare *et al.* 1967).

Le potentiel de la technique VLBI pour construire un repère de référence céleste radio avec une précision astrométrique de l'ordre du millième de seconde de degré a tout de suite été reconnu. Les premières positions VLBI de 35 sources radio extragalactiques ont été déterminées par Cohen et Shaffer (1971). Ils utilisèrent deux antennes du Deep Space Network de la NASA- JPL: l'antenne de 64 m à Goldstone, Californie, et l'antenne de 26 m, à Tidbinbilla, en Australie (base  $D = 10590$  km), à 2296 MHz, et des oscillateurs Rubidium comme horloges et étalons de fréquence à chacune de ces stations. Ils utilisent les retards d'alignement des signaux digitalisés sur bandes magnétiques des quantités non ambiguës et qui permettent de déterminer des positions avec des incertitudes comprises entre 1" et 3". Eslmore et Mackay (1969) atteignaient la même précision avec des bases plus courtes car ils utilisaient la phase qui est plus précise que le retard d'alignement. La question essentielle qui motivait cette expérience était de s'assurer qu'il existait bien des sources radio compactes à l'échelle de 0.001". Au début des années 70, dans leurs thèses de PhD, Hinteregger (1972) et Whitney (1974) développèrent la technique de synthèse de bande qui permit la détermination des positions de 7 sources radio extragalactiques avec une précision meilleure que 0.1" (Rogers *et al.* 1973). La synthèse de bande est devenue depuis la technique fondamentale pour l'astrométrie et la géodésie et permet d'atteindre une précision de l'ordre de 0.001" pour les coordonnées des sources radio célestes et de quelques centimètres pour les coordonnées des stations VLBI sur des bases intercontinentales. Depuis 10 ans des observations VLBI de sources radio extragalactiques ont été conduites au Jet Propulsion Laboratory, au Goddard Flight Space Center, au National Geodetic Survey et au Massachusetts Institute of Technology aux Etats-Unis dans le but d'établir un repère de référence céleste extragalactique fondé sur des positions mesurées au millième de seconde de degré près (Ma *et al.* 1981 ; Fanselow *et al.* 1981, Fanselow *et al.* 1984, Robertson *et al.* 1986).

Les coordonnées des radio sources sont déterminées à partir des retards de synthèse de bande et des fréquences de franges par la technique VLBI. Les déclinaisons VLBI sont absolues dans le sens où on n'utilise ni de positions de sources radio ni de positions des radio télescopes connues à l'avance. Les ascensions droites VLBI sont relatives à une origine arbitraire dans le plan équatorial de l'époque. La pratique courante est de fixer l'ascension droite d'une source radio ou bien d'appliquer une contrainte sur un ensemble de sources. L'ascension droite du quasar 3C273B (1226+023 dans la dénomination de l'UAI) déterminée par Hazard (1971) à partir des occultations par la Lune, et rapportée au système J2000.0 a été adoptée pour fixer le point zéro sur l'équateur. Cet objet fut choisi parce qu'il est la source radio la plus bril-

lante ( $m = 12.5$ ) mais ses cartes radio (Unwin *et al.* 1988 , Charlot 1990) ont montré qu'il présente une structure variable complexe. Ceci fait qu'il ne soit probablement pas résolu angulairement de la même façon par les différentes lignes de base VLBI, entraînant des incohérences entre les différentes réalisations du repère céleste extragalactique. La pratique de définir l'origine sur l'équateur en fixant l'ascension droite d'un seul objet commence actuellement à être remplacée en imposant une contrainte sur un ensemble de radio sources. Le National Geodetic Survey (Carter *et al.* 1989) fixe depuis 1988 la moyenne des ascensions droites de neuf sources radio; une réalisation récente du Goddard Space Flight Center (Ma *et al.* 1989) est alignée au repère FK5 en utilisant les positions optiques de 28 sources radio extragalactiques rapportées au système FK5. Le Jet Propulsion Laboratory fixe l'ascension droite et la déclinaison d'une source radio et la déclinaison d'une autre à leurs coordonnées dans le repère de référence céleste de Service International de la Rotation Terrestre (Steppe *et al.* 1989).

Un système de référence terrestre équatorial avec une origine non-tournante a été préconisé par Guinot (1979). Les propriétés et l'application de ce nouveau concept sont présentées in extenso par Capitaine *et al.* (1986). Par définition, cette origine ne tourne pas autour du pôle équatorial. Guinot (1979) introduit l'angle stellaire  $\theta$  qui est l'angle de rotation sidérale d'un méridien origine terrestre par rapport à l'origine non-tournante. La dérivée de  $\theta$  par rapport au temps donne directement la vitesse angulaire de la Terre par rapport au système de référence céleste fixe en supposant que le phénomène de précession-nutation soit bien modélisé. En parallèle à l'introduction de l'origine non-tournante, il faudrait remplacer le traitement classique de la précession et de la nutation et des coordonnées du pôle céleste dans l'espace (Capitaine *et al.* 1986, Capitaine 1990). Guinot (1979) choisit de poser le temps universel  $UT1 = h \times (\theta - \theta_0)$  avec la constante  $h$  telle que  $UT1$  reste proche de la durée du jour solaire. La détermination de  $UT1 - UTC$  par VLBI pourrait donc être une mesure directe de la vitesse angulaire de la Terre si on adoptait l'angle  $\theta$  au lieu de passer par le Soleil moyen de Newcomb dans la méthode de réduction des données VLBI héritée de la construction des repères de référence stellaires. La constante de la précession luni-solaire  $p_1$  qui reste le terme principal dans la relation entre les repères de référence céleste et terrestre conventionnels avec cette nouvelle définition est déterminée, par exemple, par Du Mont (1976) avec une incertitude de  $0.15''/\text{siècle}$ . L'accumulation des données VLBI depuis 10 ans devrait bientôt permettre d'améliorer cette valeur. Les observations laser-lune devraient aussi l'améliorer cette constante et la combinaison de deux types d'observation devrait conduire à bien séparer la précession des termes à longues périodes de la nutation (Charlot 1990).

Il en va de même pour le futur repère de référence stellaire HIPPARCOS qui, par construction, ne dépend ni du mouvement de l'équinoxe, ni même du phénomène de précession-nutation. Son raccordement au repère de référence VLBI à la précision du millième de seconde de degré au moyen d'observations VLBI d'étoiles radio devrait lui conférer les qualités de ce dernier.

Les repères de référence VLBI les plus élaborés ont été construits depuis une dizaine d'années aux Etats-Unis. Depuis 1978 le Jet Propulsion Laboratory conduit des observations avec les antennes du Deep Space Network situées en Californie, en Espagne et en Australie. L'analyse de ces données a permis d'établir un catalogue de positions de 189 sources réparties à peu près uniformément sur le ciel au nord de la déclinaison -45 degrés (Steppe *et al* 1984). La plupart de ces positions ont des incertitudes formelles  $< 2$  millièmes de seconde de degré et 55 sources ont des incertitudes formelles  $< 1$  milliseconde de degré. Plus de 350 000 retards VLBI ont été mesurés au Goddard Flight Space Center. Le catalogue RSC (GSFC) 89 R 01 comporte 64 sources au nord de -30 degrés de déclinaison dont 57 ont des incertitudes formelles  $< 0.001''$ . Plus de 170 000 observations réalisées depuis 1980 dans le cadre des projets MERIT (Monitor Earth Rotation and Intercompare Technics), POLARIS (Polar Motion Analysis by Radio Interferometry Surveying) et IRIS (International Radio Interferometry Surveying), et plus de 58 000 observations du CDP (Crustal Dynamics Project) de la NASA ont contribué à élaborer au National Geodetic Survey un catalogue de 50 radio sources au nord de -30 degrés avec des incertitudes formelles comparables à celles de GSFC (Carter *et al.* 1989). A partir de 1987, le Service International de la Rotation Terrestre IERS (International Earth Rotation Service) élabore et maintient le système de référence céleste combiné sur la base des positions VLBI de sources radio extragalactiques (Arias *et al.* 1988, IERS 1989). Le repère extragalactique RSC (IERS) 89 C 01 a été compilé à partir des repères extragalactiques individuels obtenus dans les solutions globales 1989 du Goddard Space Flight Center (GSFC), du Jet Propulsion Laboratory (JPL) et de l'U.S. National Geodetic Survey (NGS).

Un programme VLBI complémentaire appelé "Full Sky Survey" conduit au JPL a révélé que 1100 sources radio extragalactiques ayant des densités de flux supérieures à 0.5 Jansky sont suffisamment compactes pour être détectées en VLBI sur les bases intercontinentales du Deep Space Network à 2.3 GHz ( $\approx 65 \times 10^6$  longueurs d'onde). Ces observations ont permis de déterminer leurs positions avec des incertitudes de l'ordre de la seconde de degré (Morabito *et al.* 1981; Morabito *et al.* 1983; Preston *et al.* 1985), ce qui représente souvent un progrès notable par rapport aux positions optiques de ces objets extragalactiques peu brillants.

La détermination des positions de ces sources radio avec la technique VLBI permettra dans le futur de réaliser un repère extragalactique dense et précis au niveau de la milliseconde de degré.

Le potentiel astrométrique de la technique VLBI n'est pas encore atteint, les incertitudes sur les positions des sources, même au niveau du millième de seconde de degré, sont encore dominées par des erreurs systématiques dans l'instrumentation, dans la calibration de la troposphère et, pour une moindre part, de l'ionosphère et par les structures des sources radio (Charlot 1990). Malgré tout, la qualité astrométrique des repères de référence VLBI laisse penser, dès maintenant, que le repère de référence céleste primaire de l'avenir devrait être basé sur les positions VLBI de sources radio extragalactiques. Ces repères de référence réalisent au mieux le concept de système de référence équatorial non-tournant, et avec leur précision actuelle, ils n'ont pas d'équivalent.

### III) Le système de référence stellaire

Pendant des siècles on a supposé que les directions des étoiles fournissaient une référence naturelle non-tournante dans l'espace. Ceci a fait que le système de référence céleste primaire soit matérialisé par les positions et les mouvements propres à une époque donnée d'un ensemble d'étoiles. Dans le repère stellaire, la position de l'équateur est déterminée à partir des observations de distances zénitales d'étoiles. La détermination de l'équinoxe, par contre, nécessite des mesures des positions du soleil et d'autres objets du système solaire, et est en fait, très complexe, constituant un des "points faibles" des systèmes stellaires.

Le progrès des techniques d'observation en astrométrie montre que les systèmes de coordonnées rattachés aux catalogues stellaires fondamentaux sont loin d'être inertiels. A mesure que l'on réalise des observations stellaires de plus en plus décalées dans le temps permettant d'améliorer le système de mouvements propres, on détermine de petites rotations globales qui entraînent des changements des positions de l'équateur et de l'écliptique du catalogue, des mouvements propres et de la constante de la précession.

Le système de référence céleste conventionnel adopté par l'IAU en 1961 est le système de référence stellaire FK4 (Fourth Fundamental Catalogue) publié par Fricke et Kopff (1963). Ceci fait partie d'une série de catalogues fondamentaux allemands commencée au siècle dernier par Auwers (FC, 1879). Le premier catalogue fondamental contenait les positions et les mouvements propres de 539 étoiles fondamentales au nord de -10 degrés de déclinaison et était basé sur la valeur de la constante de la précession de Struve. Peters (1907) réalisa son extension à tout le ciel. Le nombre d'étoiles dans ce deuxième repère doublait celui du premier; les positions et les mouvements propres furent améliorés avec l'inclusion de nouvelles observations, et la constante de la précession de Newcomb fut adoptée. Le catalogue fondamental FK3 (Kopff 1937) contient 1535 étoiles qui fournissent une couverture du ciel plus homogène. Suite à la recommandation de l'UAI à l'occasion de l'Assemblée Générale de 1938, Fricke et Kopff ont entrepris la construction d'une nouvelle version du catalogue fondamental stellaire. Pour la première fois, en 1940 on a adopté un système de référence fondamental, avec la tâche de le maintenir et de l'améliorer sous les auspices de l'UAI.

Dans le système FK4 (Fricke et Kopff 1963), l'écliptique, la valeur de la précession et de l'obliquité sont dus à Newcomb, et la théorie de la nutation à Woolard. Le repère contient les 1535 étoiles du FK3, plus un catalogue supplémentaire de 1987 étoiles. Son plan fondamental est celui de l'équateur et le point zéro du catalogue est l'équinoxe à l'époque 1950.0.

Les erreurs possibles dans les valeurs adoptées des constantes entraînent des erreurs systématiques du FK4. Par exemple, à un instant donné, l'équinoxe moyen qui est l'intersection de l'équateur et de l'écliptique après avoir enlevé les perturbations périodiques correspondantes est déplacé de 0.525" en 1950 par rapport à l'équinoxe du catalogue FK4, et sa vitesse est de 1.275"/siècle (Williams *et al.* 1983). Des erreurs dans la valeur de la constante de la précession luni-solaire, de la précession planétaire et du mouvement de la ligne des équinoxes affecteraient les mouvements propres, en les rendant inadéquats pour la réalisation d'un système inertiel.

En 1972 l'UAI a adopté une résolution pour encourager l'amélioration du repère FK4, avec une révision simultanée du Système de Constantes Astronomiques et l'adoption d'une nouvelle époque standard. Le nouveau Système de Constantes a été adopté en 1976 (Duncombe *et al.* 1977), avec des nouvelles valeurs de la précession, de l'aberration et de l'obliquité de l'écliptique, plus la résolution d'introduire une nouvelle théorie de la nutation.

La précision moyenne des positions des étoiles du Fifth Fundamental Catalogue FK5 (Fricke *et al.* 1989) est de 0.02" et de leurs mouvements propres 0.0008"/an (Kovalevsky 1988). Dans les dernières années, les observations de sources radio extragalactiques réalisées avec la technique VLBI ont permis d'améliorer la valeur de la constante de la précession, et ont mis en évidence une dérive du système FK5. L'étude cinématique de notre galaxie est liée à la qualité du système de référence utilisé pour représenter les mouvements des étoiles. Les observations radio-interférométriques suggèrent l'existence d'une rotation résiduelle de l'ordre de 0.1"/siècle du système FK5. Cette erreur est significative si on la compare à la vitesse angulaire de rotation de la galaxie, qui est de l'ordre de 0.5"/siècle.

Les systèmes de référence stellaires, tel que le FK5, sont en réalité des systèmes hybrides. Ils peuvent être considérés dynamiques car ils sont définis à l'aide des mouvements des planètes, mais la matérialisation du système est faite au moyen des coordonnées des étoiles de manière cinématique.

#### IV) Le système de référence céleste HIPPARCOS

Le satellite HIPPARCOS de l'ESA (European Space Agency) a été lancé en août 1989 et devrait avoir une durée de vie de 30 mois. Son programme d'observation stellaire est le fruit d'une concertation entre astrophysiciens et astrométristes, les uns s'intéressant à l'évolution stellaire et à la dynamique de la Galaxie et les autres comptant sur HIPPARCOS pour construire une extension du repère de référence céleste extragalactique au domaine optique et faire rentrer les techniques astrométriques dans l'ère spatiale. L'instrument à bord du satellite devrait déterminer les positions, les mouvements propres et les parallaxes de 100 000 étoiles de magnitude  $<13$ . Le bilan d'erreurs montre que la précision astrométrique devrait être de l'ordre du millième de seconde de degré, c'est à dire un gain en précision d'un facteur 50 par rapport aux techniques d'observation traditionnelles au sol. L'idée d'un satellite consacré à l'astrométrie est due à Pierre Lacroûte qui soumit en 1967 au CNES une étude détaillée sur le principe de la mesure, toujours retenu aujourd'hui. Le CNES ne put y donner de suite dans le cadre des programmes nationaux. En 1973, Jean Kovalevsky présente le projet à l'ESA, qui décida d'évaluer son intérêt scientifique pour la communauté astronomique européenne et sa faisabilité technique. La décision de construire le satellite dans le cadre des programmes de l'ESA, fut acquise en 1981.

Outre l'aspect spatial, l'originalité du projet repose sur le principe de la mesure différentielle à grand angle qui permet d'éliminer les erreurs régionales affectant les mesures différentielles traditionnelles à petit angle. L'instrument à bord du satellite, le principe de mesure, la réduction des données brutes sont décrits dans Kovalevsky (1980; 1984).

L'instrument comprend un miroir complexe à deux surfaces planes qui réfléchit dans un télescope unique deux champs séparés par un angle fixe de  $70^\circ$  environ. Le télescope produit dans son plan focal une image qui est donc la superposition des deux champs. Dans ce plan, une grille composée de bandes alternativement opaques et transparentes module avec la rotation du satellite la lumière venant des étoiles d'un champ de  $54' \times 54'$ . Un dissecteur d'images placé derrière la grille détecte les photons ayant traversé une fenêtre de  $30'' \times 30''$  centrée successivement sur toutes les étoiles à mesurer dont on connaît une position approximative pendant le passage sur la grille. Le satellite balaie uniformément la voûte céleste pendant la mission. La loi de balayage qui a été retenue est une précession lente de l'axe de rotation du satellite qui décrira dix fois par an un cône d'axe dirigé vers le soleil et de demi-angle au sommet de  $36^\circ$ . Le satellite tournera sur lui-même avec une vitesse angulaire de  $150''/\text{sec.}$ , soit 10 rotations par jour. Pendant la mission, chaque étoile sera observée en moyenne 30 fois.

A partir de la courbe de lumière détectée à la sortie de la grille, de la vitesse de rotation du satellite et de son attitude, on peut calculer la projection  $C_{ij}$  de l'angle entre deux étoiles sur le grand cercle de référence (CT) perpendiculaire à l'axe de rotation du satellite (voir fig.1). La procédure de réduction comporte trois étapes principales:

- 1) la réduction sur les grands cercles moyens,
- 2) la reconstitution de la sphère stellaire et
- 3) la détermination des paramètres astrométriques.

La réduction sur les grands cercles moyens consiste à regrouper les observations effectuées pendant une ou deux rotations du satellite, c'est à dire quelques heures, en projetant les angles mesurés  $C_{ij}$  de tous les couples d'étoiles sur un même grand cercle moyen  $\Sigma$  ayant une origine  $L$  choisie arbitrairement. Kovalevsky (1980) donne, pour chaque couple d'étoiles, la relation entre la mesure  $C_{ij}$  et les deux inconnues  $C'_i$  et  $C'_j$  qui sont les distances angulaires à déterminer entre l'origine arbitraire  $L$  et la projection de chaque étoile du couple sur le grand cercle moyen  $\Sigma$  (voir figure 1)

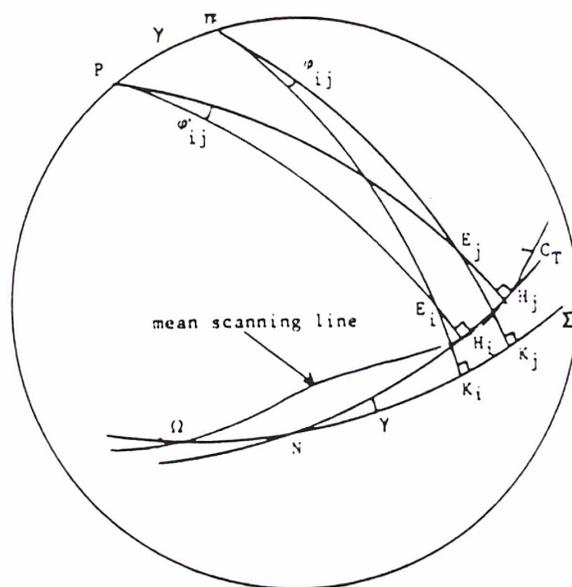


Fig. 1: Projection sur le grand cercle moyen  $\Sigma$  des observations élémentaires des étoiles  $E_i$  et  $E_j$  effectuées par le satellite HIPPARCOS (Kovalevsky 1980).

Il montre aussi que pour quelques heures d'observation, le nombre des équations est bien supérieur à celui des inconnues  $C'_i$  et  $C'_j$ . La valeur de l'angle  $\phi$  est nécessaire pour effectuer ces projections, elle est fonction de l'attitude du satellite dont la détermination est une phase critique du projet HIPPARCOS.

La reconstitution de la sphère stellaire consiste à se débarrasser des origines arbitraires sur chaque grand cercle pour calculer les coordonnées de chaque étoile à leurs époques d'observation dans un système de coordonnées proche d'un système écliptique. Des conditions de régularisation devront définir le système de coordonnées et la distribution des mouvements propres.

Enfin, à partir de ces coordonnées, les paramètres astrométriques, positions, mouvements propres et parallaxes seront calculées à l'aide d'un modèle physique tenant compte des phénomènes liés aux mouvements du satellite autour de la Terre et du Soleil et de la déflexion des rayons lumineux par le champ de gravitation du système solaire.

Le bilan d'erreur (ESA 1978) indiquent que les précisions devraient être de 1.5 millièmes de seconde de degré pour les positions, de 2 millièmes de seconde de degré par an pour les mouvements propres et de 2 millièmes de seconde de degré pour les parallaxes des étoiles de magnitude  $< 9$ . Tout le potentiel astrométrique d'un tel repère de référence stellaire ne sera acquis qu'après raccordement à un repère de référence céleste non-tournant, soit au système de référence VLBI, soit au système de référence dynamique planétaire, ou de façon avantageuse aux deux.

## V) Les étoiles radio et le raccordement des repères de référence HIPPARCOS et VLBI.

Les positions, mouvements propres et parallaxes de 100 000 étoiles HIPPARCOS devraient être d'une qualité astrométrique sans précédent comme il vient d'être dit. Cette précision exceptionnelle n'est cependant qu'intrinsèque à la sphère stellaire HIPPARCOS. Cette sphère n'est pas fixe, elle est, par exemple, entraînée par la rotation de la Galaxie à une vitesse angulaire de 7 millièmes de seconde de degré par an. Afin de stabiliser cette sphère, et si possible d'unifier les systèmes de coordonnées optiques et radio, il faut raccorder le repère HIPPARCOS au repère de référence extragalactique VLBI. Deux méthodes sont envisagées:

1) des mesures VLBI de positions (ascensions droites et déclinaisons) des étoiles radio qui sont suffisamment brillantes optiquement pour être observées par HIPPARCOS dans de bonnes conditions et qui sont donc des objets communs aux deux techniques;

2) des mesures des longueurs d'arc par le Space Telescope entre des étoiles HIPPARCOS et les composantes optiques de sources radio extragalactiques angulairement proches et appartenant au système de référence VLBI. La qualité astrométrique du repère de référence VLBI et son caractère non-tournant seront ainsi transférés à la sphère HIPPARCOS. Inversement, l'avantage de ce raccordement est la densification et l'accessibilité du système de référence VLBI qui ne comporte à présent que  $\approx 200$  sources radio extragalactiques bien positionnées pour tout le ciel et qui n'est pas accessible aux instruments optiques habituellement utilisés en astronomie car ces sources extragalactiques sont peu brillantes.

A l'aide de simulations, Froeschlé et Kovalevsky (1982) montrent qu'entre ces deux méthodes de raccordement, la plus efficace est celle basée sur les positions VLBI d'étoiles radio qui contraignent les deux systèmes le long de deux directions orthogonales de l'espace (ascensions droites et déclinaisons) alors que les mesures de longueurs d'arc avec le Space Telescope n'apportent que des relations uni-directionnelles. Cependant les densités de flux radio des étoiles sont de 50 à 100 fois plus faibles que celles des sources extragalactiques couramment observées au moyen de la technique VLBI. Ces étoiles radio sont donc difficilement détectables et leur potentiel astrométrique reste faible si l'on utilise la méthode classique VLBI de positionnement "absolu" par synthèse de bande. Le travail qui a été mené dans l'équipe de Robert A. Preston au Jet Propulsion Laboratory depuis 1981 a eu pour objectif de montrer que 1) des observations VLBI étaient possibles et 2) une précision astromé-

trique au niveau du millième de seconde de degré, compatible avec les objectifs scientifiques de la mission HIPPARCOS, est possible en menant des observations VLBI différentielles avec une source de référence de phase angulairement proche de l'étoile pour intégrer de façon cohérente plusieurs heures de données VLBI sur l'étoile.

La stratégie d'observation du satellite HIPPARCOS et la méthode de réduction discutée dans le paragraphe précédent devraient permettre d'éliminer toute erreur zonale ou régionale de la sphère stellaire HIPPARCOS. Par conséquent, le raccordement entre les repères HIPPARCOS et VLBI peut être considéré comme la localisation de deux sphères rigides et concentriques.

Les étoiles détectées dans le continuum radio sont au nombre de 275 d'après une compilation de Walter (1984). On peut les classer commodément en deux catégories: les émetteurs thermiques de flux radio quasi-permanents et les émetteurs non-thermiques de flux très variables. Le mécanisme responsable de l'émission thermique est le Bremsstrahlung dans une enveloppe circumstellaire de gaz ionisé par une étoile chaude en son centre. Ces enveloppes sont très grandes et leurs dimensions angulaires atteignent généralement au moins quelques 0.1". La technique VLBI aux longueurs d'onde centimétrique résoud angulairement ces objets qui ne sont donc pas utilisables. Ces étoiles sont observées par le VLA (Very Large Array dans le Nouveau Mexique) pour des raisons astrophysiques mais leur potentiel astrométrique pour le raccordement au millième de seconde de degré qui nous intéresse ici n'a pas été démontré. Initialement, nous n'avons donc retenu aucune étoile de ce type. Les phénomènes synchrotron, gyro-synchrotron, maser-cyclotron et probablement aussi des instabilités de plasma sont responsables de l'émission dite non-thermique de la deuxième catégorie d'étoiles radio. Par la nature même de ces mécanismes non-thermiques, il était habituellement supposé que les dimensions angulaires de leurs sources d'émission devaient être petites. Malgré leur inconvénient majeur d'avoir un niveau d'activité radio très variable et faible, elles ont été retenues comme bons candidats VLBI pour le raccordement. En plus de la dimension angulaire de source, les deux autres critères de sélection dans la liste initiale de Lestrade *et al.* (1982) ont été une magnitude  $< 11$  pour être observables par le satellite HIPPARCOS dans de bonnes conditions et une densité de flux supérieure à 10 mJy.

Des observations VLBI d'étoiles IR (Infra-Rouge) à masers OH ont été proposées pour effectuer le raccordement des systèmes HIPPARCOS et VLBI (Baudry, 1984). La source-maser OH la plus puissante de l'enveloppe circumstellaire de ces objets est due à l'amplification de l'émission thermique de l'étoile centrale (Norris 1982). Le maser OH le plus puissant est

donc situé sur la ligne de visée entre la Terre et l'étoile optique centrale. La parfaite coïncidence des directions des composantes radio et optique dans ce cas fait de ces étoiles des objets idéaux pour le raccordement. Ces étoiles IR/OH ont des densités de flux radio assez constantes et élevées mais un nombre limité d'entre elles sont suffisamment brillantes pour HIPPARCOS (environ 8). La détermination de positions VLBI de haute précision est difficile à 1.6 GHz (18 cm) car les modèles d'ionosphère à cette fréquence sont souvent défaillants. L'utilisation de ces objets pour le raccordement n'est cependant pas à écarter et des observations VLBI différentielles avec des sources extragalactiques angulairement proches seraient très utiles pour tester le potentiel astrométrique de ces objets. Des observations VLBI étoiles à masers H<sub>2</sub>O (raie à 22 GHz) et à masers SiO (raies à 43 GHz et 86 GHz) ont aussi été proposées, la technique VLBI commence seulement à être pratiquée à des longueurs d'onde aussi courtes et ces objets restent pour l'instant des cibles difficiles en astrométrie radio. De nouveaux instruments, notamment en Europe avec le projet IRAM, devraient rendre ces observations techniquement possibles dans un avenir proche.

## VI) Raccordement des systèmes de référence extragalactique VLBI et planétaire

Ce raccordement ne concerne pas le travail présenté dans cette thèse mais compte tenu de son importance et par souci d'être complet, nous nous y arrêtons brièvement.

Les corps naturels et artificiels du système solaire sont liés gravitationnellement entre eux et les lois de la dynamique permettent de prédire leurs mouvements dans un système de coordonnées choisi pratiquement non-tournant et centré au barycentre du système solaire. Ce système de référence planétaire est en général défini par le plan de l'écliptique et la ligne des équinoxes d'une époque. Les techniques radar, laser et oppler permettent de mesurer les mouvements de ces corps directement par rapport à ce repère de référence céleste sans s'appuyer sur un catalogue d'étoiles comme avec les méthodes plus classiques de l'astrométrie. Ainsi dans les éphémérides du JPL, les planètes inférieures sont essentiellement contraintes par des observations radar et la lune l'est par le laser. Les planètes Jupiter et Saturne ne sont encore que faiblement contraintes par les mesures Doppler faites lors des rencontres des sondes interplanétaires Voyager (Standish 1985) mais le seront de plus en plus à l'aide des nouvelles missions.

Le repère de référence dynamique planétaire a une grande importance pratique pour la navigation spatiale. Son raccordement au repère de référence extragalactique VLBI est poursuivi parce que:

- 1) l'orientation de la Terre est mesurée au mieux par rapport à ce dernier;
- 2) la navigation des sondes interplanétaires commence à être faite par des mesures VLBI différentielles de position de la sonde relativement à des sources extragalactiques angulairement proches et de positions bien connues dans le repère extragalactique VLBI;
- 3) les repères de référence planétaire et extragalactique sont dominés par des champs de gravitation très différents (celui à l'échelle du système solaire et celui à l'échelle cosmologique). Bien que la liaison de ces repères de référence dans le cadre de la physique relativiste ait à peine été étudiée, il est possible qu'une vitesse angulaire existe entre eux s'il y a des inhomogénéités dans la distribution de matière à l'échelle cosmologique (Teyssandier 1985).

Le raccordement de ces deux repères de référence est poursuivi au JPL par des mesures de positions d'objets du système solaire relativement à des sources extragalactiques qui leur sont angulairement proches. En particulier, nous rappellerons que:

1) les observations VLBI différentielles des "orbiters" de Mars, Viking, et de Venus, Pioneer, acquises entre 1980 et 1983 et analysées par Newhall, Preston and Esposito (1985), ont servi au raccordement entre le repère de référence extragalactique et celui défini par les planètes inférieures. Les écarts moyens entre les systèmes de référence extragalactique VLBI and planétaire du JPL sont de  $0.00'' \pm 0.04''$  en ascension droite et de  $0.01'' \pm 0.05''$  en déclinaison. Les incertitudes sont les écart-types calculés à partir des résultats de 11 sessions d'observations, elles sont plus grandes que les incertitudes issues de l'ajustement des données de chaque session individuellement ( $0.01''$  à  $0.02''$ ). La raison n'en est pas bien comprise, des erreurs systématiques dans les éphémérides et l'orbitographie des sondes par Doppler en sont probablement les premières causes. Le bon alignement des ascensions droites du repère extragalactique VLBI sur le repère de référence planétaire semble fortuit compte tenu du choix arbitraire de l'origine des ascensions droites VLBI. Cette origine est fixée avec l'ascension de la source radio 3C 273B qui a été déterminée par rapport au FK4 optiquement et par rapport au repère de référence planétaire par occultation de son émission radio par la Lune. Ces deux mesures indépendantes ne s'accordent qu'à  $0.2''$  près (Hazard *et al.* 1971).

2) les observations des satellites des grosses planètes par le VLA (Very Large Array) ont servi au raccordement du repère de référence extragalactique et de celui défini par les grosses planètes. Comme les liens gravitationnels entre les planètes inférieures et les grosses planètes sont faibles, les mesures mentionnées en 1) n'améliorent pas beaucoup ce dernier raccordement. Le VLA a détecté l'émission thermique du satellite Ganymède à 2 cm de longueur d'onde et l'analyse de ces données a fourni sa position par rapport aux deux sources extragalactiques proches NRA530 et 1519-273 en avril 1983. Ces sources radio ont des bonnes positions VLBI. Les satellites Europa et Callisto ont aussi été observés mais les données sont de moins bonne qualité. La position de Jupiter fut déduite de ces mesures à l'aide des éphémérides des satellites galiléens et comparée à la prédiction des éphémérides planétaires DE200. Les écarts sont de  $-0.18'' \pm 0.04''$  en ascension droite et de  $-0.06'' \pm 0.05''$  en déclinaison, ils sont interprétés comme des rotations entre les repères de référence extragalactique et des grosses planètes (Niell *et al.* 1985).

Le raccordement des repères de référence dynamique planétaire et cinématique extragalactique est aussi envisagé via les pulsars. Ces objets radio sont communs à la fois à la technique VLBI qui permet de déterminer leurs positions directement par rapport aux sources extragalactiques et à la technique de chronométrage de leurs pulsations qui permet de déterminer leurs positions directement par rapport à un repère de référence planétaire. Les pulsations du

pulsar milliseconde PSR1937+21 découvert en 1982 par Backer *et al.* (1982) sont chronométrées régulièrement à Arecibo avec une précision de datation comprise entre 0.1 et 1 microseconde. L'analyse de ces données acquises continûment pendant deux ans a permis la détermination de sa position avec une précision d'un millième de seconde de degré (Davis *et al.* 1985), ce qui est comparable à la précision des meilleures observations VLBI. Ce pulsar a une période dérivant très lentement et de façon très stable, ce qui en fait une horloge dont la stabilité à long terme (> 6 mois) semble meilleure que celle des horloges atomiques. Si un nombre suffisant de ce type de pulsars devient disponible, ils pourraient jouer en métrologie le double rôle d'espace, pour le raccordement, et de temps, comme horloge stable. Le pulsar milliseconde est le premier objet céleste où ces deux concepts sont intimement liés sur le plan des mesures comme ils le sont sur le plan conceptuel en relativité générale.

### Références bibliographiques du Chapitre I

- ARIAS, E.F., FEISSEL, M., LESTRADE, J.-F., 1988: *BIH Annual Report for 1987*, D-113.
- AUWERS, A. 1879 : *Publ. Astron. Gessellschaft XIV*.
- BACKER, D.C. *et al.*, 1982 : *Nature*, **300**.
- BARE, C., CLARK, B.G., KELLERMANN, K.I., COHEN, M.H., JAUNCEY, D.L., 1967 : *Science*, **157**, 189.
- BAUDRY, A., MAZURIER, J.M., REQUIEME, Y., 1983 : en "VLBI and Compact Radio Radio Sources", *Proceedings, IAU Symposium No 110*, Bologna, June 1983, edited by Fanti and Kellermann, Reidel Publisher.
- BIRCH, P., 1982 : *Nature*, **298**, 451.
- BROTEN, N.W., LEGG, T.H., LOCKE, J.L., McLEISH, C.W., RICHARDS, R.S. *et al.*, 1967 : *Science*, 156, 1592; *Nature*, **215**, 38.
- CAPITAINE, N., GUINOT, B., SOUCHAY, J., 1986 : *Cel. Mech.*, **39**, 283
- CAPITAINE, N., 1990 : *Cel. Mech.*, **48**, 127 .
- CARTER, W.E., ROBERTSON, D.S., FALLON, F.W., 1988 : *BIH Annual Report for 1987*, D-23.
- CARTER, W.E., ROBERTSON, D.S., FALLON, F.W., 1989 : *IERS Technical Note 2*, 35.
- CHARLOT, P., 1990 : *Astron. J.*, **99**, 1309.
- COHEN, M.H., SHAFFER, D.B., 1971 : *Astron. J.*, **76**, 91.
- DAVIS, M.M. *et al.*, 1985 : *Nature*, **315**, 547.
- DICKEY, J.O., WILLIAMS, J.G., NEWHALL, XX, YODER, C.F., 1983 : IUGG/IAG Symposium à Hamburg.
- DU MONT, B., 1976 : Dissertation, Heidelberg.
- DUNCOMBE, R.L., FRICKE, W., SEIDELMANN, P.K., WILKINS, G.A., 1977 : *IAU Transactions XVI B*, 56
- ELSMORE, B., MACKAY, C.D., 1969 : *MNRAS*, **146**, 361.
- ESA, 1978 : *European Space Agency, DP/PS(78)*, **13**, Paris, 26 April 1978.
- FANSELOW, J.L., SOVERS, O.J., THOMAS, J.B., BLETZACKER, F.R., KEARNS, T.J., COHEN, E.J., PURCELL, G.H., ROGSTAD, D.H., SKJERVE, L.J., YOUNG, L.E., 1981 : en "Reference Coordinate Systems for Earth Dynamics, *Proceedings, IAU Colloquium No 56*, edited by Gaposchkin and Kolaczek, Reidel Publisher, p. 351.
- FANSELOW, J.L., SOVERS, O.J., THOMAS, J.B., PURCELL, G.H., COHEN, E.J., ROGSTAD, D.H., SKJERVE, L.J., SPITZMESSER, D.J., 1984 : *Astron. J.*, **89**, 987.
- FRICKE, W., KOPFF, A., 1963 : *Veroff. Astron. Rechen-Inst., Heidelberg*, No 10.
- FRICKE, W., SCHWAN, H., LEDERLE, T., 1988 : Fifth Fundamental Catalogue (FK5), *Veroff. Astron. Rechen-Institut, Heidelberg*, No. 32.

- FROESCHLE, M., KOVALEVSKY, J., 1982 : *Astron. Astrophys.*, **116**, 89.
- GUINOT, B., 1979 : *Proceedings, Symposium IAU No 82, Time and Earth's Rotation*, edited by McCarthy and Pilkington, Riedel, p. 7.
- HALL, D.S., 1975 : en "Multiple Periodic Variable Stars", *IAU Coll. No 29*, Budapest.
- HAZARD, C., SUTTON, J., ARGUE, A.N., KENWORTHY, C.M., MORRISON, L.V., MURRAY, C.A., 1971 : *Nature*, **233**, 89.
- HINTEREGGER, H.F., 1972 : Ph D thesis.
- IERS, 1989 : *International Earth Rotation Service Annual Report for 1988*, II-9.
- KOPFF, A., 1937 : *Dritter Fundamentalkatalog (FK3) des Berliner Astronomischen Jahrbuchs*.
- KOVALEVSKY, J., 1980 : *Cel. Mech.*, **22**, 153.
- KOVALEVSKY, J., MUELLER, I.I., 1981 : en "Reference Coordinate Systems for Earth Dynamics", edited by E.M. Gaposchkin and B. Kolaczek, Reidel, 375.
- KOVALEVSKY, J., YATSKIV, Y., 1982 : *Proceedings of the 6th European Regional Meeting of the IAU*, Dubrovnik, Reidel, 149.
- KOVALEVSKY, J., 1984 : *Space Sci. Rev.*, **39**,1.
- KOVALEVSKY, J., 1985 : *Bulletin Astronomique de l'Observatoire Royal de Belgique*, Vol X No.2, 87.
- KOVALEVSKY, J., 1989 : *Reference Frames*, J. Kovalevsky, I. Mueller, B. Kolaczek (eds.), Kluwer, 15.
- LESTRADE, J.-F., PRESTON, R.A., SLADE, M.A., 1982 : *Very Long Baseline Interferometry Techniques*, Conf. CNES, Toulouse, France, Août 1982, edited by F. Biraud, Editions Cepadues, p. 199.
- LESTRADE, J.-F., PRESTON, R.A., REQUIEME, Y., RAPAPORT, M., MUTEL, R.L., 1985 : Proceedings of a colloquium on the European Astrometric Satellite HIPPARCOS - *Scientific Aspects of the Input Catalogue Preparation*, Aussois, 3-7, June 85, France.
- MA, C., CLARK, T.A., SHAFFER, D.B., 1981: *Bull. Am. Astron. Soc.*, **13**, 899.
- MA, C., 1989 : *IERS Technical Note 2*.
- MA, C., SHAFFER, D.B., DE VEGT, C., JOHNSTON, K.J., RUSSELL, J., 1990 : Precise radio source positions determined by Mark III VLBI: observations from 1979 to 1988 and tie to the FK5, *Astron.J.*, **99**, (4), 1284.
- MORABITO, D.D., PRESTON, R.A., SLADE, M.A., JAUNCEY, D.L., 1981 : *Astron. J.*, **87**, 517.
- MORABITO, D.D., PRESTON, R.A., SLADE, M.A., JAUNCEY, D.L., NICOLSON, G.D., 1983 : *Astron. J.*, **88**, 1138.

- NEWHALL, X X , PRESTON, R.A., ESPOSITO, P.B., 1985: *Proceedings, IAU Symposium No 109, Astrometric Techniques*, Gainesville, Fla, Jan. 1984, edited by H. Eichhorn, Reidel Publisher, 789.
- NIELL, A.E., FANSELOW, J.L., LIEWER, K.M., SOVERS, O.J., THOMAS, J.B., TREUHAFI, R.N., WALLACE, K.S., 1985: *Proceedings, IAU Symposium No 109, Astrometric Techniques*, Gainesville, Fla, Jan. 1984, edited by H. Eichhorn, Reidel Publisher, 163.
- NIELL, A.E., BERGE, G.L., CAMPBELL, J.K., ESPOSITO, P.B., MUHLEMAN, NEWHALL, XX, PRESTON, R.A., RUDY, STANDISH, E.M., 1985: *TDA Progress Report*, 42-84.
- NORRIS, R.P., 1982: *Very Long Baseline Interferometry Techniques*, Conf. CNES, Toulouse, France, Aout 1982, edited by F. Biraud, Editions Cepadues, p. 341.
- PETERS, 1907: *Veroff. Kgl. Astron. Rechen-Institut*, Berlin, No.33.
- PRESTON, R.A., MORABITO, D.M., WILLIAMS, J.G., FAULKNER, J., JAUNCEY, D.L., NICHOLSON, G.D., 1985 : *Astron.J.*, **90**, 1599.
- ROBERTSON, D.S., FALLON, F.W., CARTER, W.E., 1986 : *Astron.J.*, **91**, 6
- ROGERS, A.E.E., COUNSELMAN, C.C., HINTEREGGER, H.F., KNIGHT, C.A., ROBERTSON, D.S., SHAPIRO, I.I., WHITNEY, A.R., 1973 : *Astroph. J.*, **186**, 801.
- RYLE, M., HEWISH, A., 1960 : *MNRAS*, **120**, 220.
- STANDISH, E.M., 1985: *Proceedings of IAU Symposium No 109, Astrometric Techniques*, Gainesvilles, Fla, Jan. 1984, edited by H. Eichhorn, Reidel Publisher, 677.
- STEPPE, J.A., OLIVEAU, S.H., SOVERS, O.J., 1989 : *IERS Technical Note 2*.
- TEYSSANDIER, 1985 : communication personnelle.
- UNWIN, S.C., DAVIS, R.J., 1988 : IAU Symposium 129, *The Impact of VLBI on Astrophysics and Geophysics*, Reid and Moran (eds.), Reidel, 27.
- WHITNEY, A.R., 1974 : Ph D thesis.
- WALTER, H.G., 1984 : *HIPPARCOS Input Catalogue*, Astronomisches Rechen Institut, Heidelberg.
- WILLIAMS, J.G., DICKEY, J.O., MELBOURNE, W.G., STANDISH, E.M., 1983 : *Proceedings of the AIG Symposia, XVIII General Assembly, Hambourg, August 1983*.

**II - COMPARAISON ET COMBINAISON  
DES REPERES  
EXTRAGALACTIQUES**

## COMPARAISON DES REPERES EXTRAGALACTIQUES

### Introduction

La précision des positions des radio sources extragalactiques compactes a largement évolué depuis les années 70, grâce au développement de la technique de l'interférométrie à très grande ligne de base (VLBI).

La découverte des objets émettant dans des fréquences radio date de 1931, quand Jansky a détecté des signaux venant de l'espace, à des longueurs d'onde décimétriques, et quelques années plus tard quand Reber a achevé la première carte radio de notre galaxie. Dans les deux décennies suivantes on a identifié les émissions radio de quelques objets célestes (Cygnus A, Virgo A, Centaurus A, etc), et on a découvert qu'ils étaient associés à des galaxies. Il s'agissait d'objets très faibles en optique, mais la plupart de ces radio galaxies présentaient des lignes d'émission brillantes qui ont permis la détermination de leurs décalages vers le rouge. La recherche de nouvelles sources lointaines dans les années 60 prouva l'existence d'autres objets avec de fortes émissions radio qui n'étaient pas associés à des galaxies. Les observations de Hazard (1971) des occultations de la radio source quasi-stellaire 3C 273B par la Lune ont montré que cet objet était constitué d'une petite composante radio associée à un objet stellaire de magnitude 13 et d'une large composante associée à une élongation de l'étoile, à la manière de jet. Les lignes d'émission brillantes dans son spectre optique ont été identifiées aux séries de Balmer de l'hydrogène et le décalage vers le rouge fut estimé à 0.6. D'après l'étude d'autres objets avec des caractéristiques similaires, on les a désignés radio sources quasi-stellaires ou quasars et leur nature extragalactique a été reconnue.

Dans les années 60, les positions des radio sources extragalactiques avaient une précision au niveau de 10". L'évolution de la technique de la radio interférométrie a entraîné l'amélioration continue de la précision des observations ; l'interférométrie à éléments connectés fournissait des positions plus précises que la seconde de degré en 1970. Avec l'interférométrie à très grande ligne de base (VLBI) on a, de nos jours, des catalogues des positions des radio sources extragalactiques précises au niveau du millième de seconde de degré.

Les quasars et les noyaux des galaxies sont des objets compacts qui ont des diamètres angulaires de l'ordre de 0.001" que l'on peut observer avec des interféromètres à grande résolution. La plupart d'entre eux sont à des distances de quelques milliers de Mega parsecs et leurs décalages vers le rouge sont cosmologiques. Les mouvements propres de ces objets sont au delà de la précision actuelle des mesures VLBI, permettant de considérer qu'ils sont inexistant. Ces propriétés font que

les radio sources extragalactiques soient les objets les mieux adaptés pour définir un repère céleste de référence cinématiquement stable pour l'astrométrie.

Les coordonnées des radio sources définissent implicitement les directions des axes du repère céleste extragalactique. Dans les dix dernières années, les différents groupes qui conduisent des observations VLBI ont élaboré des catalogues de positions de radio sources extragalactiques avec une précision au niveau de 0.001". Néanmoins, il existe encore des incohérences entre les diverses réalisations du repère céleste extragalactique qui peuvent atteindre quelques millièmes de seconde de degré. Les modélisations adoptées, la distribution des sources et des réseaux des stations, les systèmes d'acquisition des données et les méthodes de réduction des données sont à l'origine de ces incohérences.

Dans l'analyse des données VLBI, on est obligé d'utiliser des modèles astronomiques et géodésiques. Pour modéliser le mouvement de la Terre par rapport à un système fixe dans l'espace on adopte un repère équatorial défini par l'équateur et l'équinoxe de J2000.0. Ce repère est défini par les modèles UAI 1976 de la précession, les séries UAI 1980 de la nutation et le mouvement orbital de la Terre dérivé des éphémérides planétaires. La précision atteinte par les observations VLBI des radio sources extragalactiques a permis de mettre en évidence des incohérences dans les modèles au niveau de quelques millièmes de seconde de degré. Herring *et al.* (1986) ont conclu que quelques termes dans les séries de la nutation ont des corrections qui peuvent atteindre 0.002". Les analyses (Sovers *et al.* 1990) semblent indiquer qu'il faudrait aussi appliquer une correction à la constante de la précession, mais les données dont on dispose à présent ne recouvrent pas encore une période d'observation assez longue pour qu'elle puisse être nettement séparée du terme principal de la nutation et il serait prématuré de corriger sa valeur actuelle. Les erreurs dans le modèle de la position du pôle céleste provoquent des rotations entre les repères célestes individuels définis par les catalogues de radio sources. Pour minimiser les effets de ces incohérences, des corrections à la position du pôle céleste donnée par les modèles UAI sont ajustées simultanément avec les paramètres astrométriques, géodésiques et d'orientation de la Terre.

Des effets de propagation des ondes radio électriques affectent les quantités observables VLBI. Les effets de l'ionosphère sont éliminés avec des observations à deux bandes de fréquence. La composante sèche de la troposphère est modélisable ; considérée en équilibre hydrostatique, des mesures de pression barométrique assurent une bonne estimation de ses effets. La composante humide, par contre, n'est pas facilement modélisable, et elle peut provoquer une erreur de quelques centimètres dans la mesure d'une base.

Dans le repère céleste de référence, il faut définir l'origine des ascensions droites sur

l'équateur. Ceci peut être accompli de façons différentes, soit en fixant l'ascension droite d'un objet, soit en appliquant une contrainte dans l'équateur à un ensemble d'objets sélectionnés. La pratique habituelle était de fixer l'ascension droite du quasar 3C 273B à la valeur B1950.0 de Hazard (1971) transformée à J2000.0 au moyen des modèles conventionnels de la précession et de la nutation. 3C 273B (1226+023 dans la notation de l'UAI) est une source radio proche du plan équatorial ; elle est assez brillante ( $m=12.5$ ) pour être observée en optique et est occultée par la Lune. Mais il s'agit d'une source superluminique complexe qui n'est pas résolue angulairement de la même façon par les différents réseaux, et ceci peut être à l'origine d'une partie des incohérences globales entre les repères extragalactiques individuels. Depuis 1988, l'U.S. National Geodetic Survey (NGS) a changé cette définition arbitraire de l'origine en fixant la moyenne des ascensions droites d'une dizaine de radio sources dans le traitement des observations (Carter *et al.* 1988). Dans une réalisation récente du repère extragalactique du Goddard Space Flight Center (Ma *et al.* 1989), l'origine sur l'équateur est fixé par les positions FK5 de 28 radio sources.

Les corrections relativistes tiennent compte du retard de propagation des radio ondes provoquée par des objets massifs du système solaire et des effets sur les horloges dans un système terrestre.

Dans ce chapitre, on présente la comparaison astrométrique de quelques repères de référence élaborés par les trois principaux groupes VLBI des U.S.A.: le Goddard Space Flight Center (GSFC), le Jet Propulsion Laboratory (JPL) et le U.S. National Geodetic Survey (NGS). On a cherché des incohérences globales et régionales entre les repères de référence extragalactiques individuels ; les premières se mettent en évidence par des différences d'orientations des axes des repères, et les secondes par les déformations régionales entre repères après avoir éliminé les rotations relatives.

### **La méthode de comparaison des repères**

La cohérence entre les repères célestes extragalactiques individuels est analysée sous des aspects différents :

- a) Les orientations relatives entre repères,
- b) l'analyse des erreurs dans les catalogues de radio sources,
- c) les déformations régionales entre repères.

a) *Les orientations relatives entre repères*

On associe à tout repère de référence un triplet de directions orthogonales dans l'espace qui constituent les axes du repère. Le choix de ces directions est arbitraire en principe. Compte tenu de la grande stabilité des positions des radio sources extragalactiques, on peut affirmer que ces directions sont fixes dans l'espace, mais, à cause des incohérences dont on a déjà parlé, elles sont différentes d'un repère à l'autre.

La technique VLBI détermine les coordonnées des radio sources extragalactiques dans le système équatorial le plus naturellement puisqu'elle est essentiellement sensible au plan de l'équateur. Dans chaque repère individuel, les axes  $x$ ,  $y$  définissent le plan de l'équateur du catalogue, l'axe  $x$  est dans la direction de l'origine arbitraire des ascensions droites VLBI, l'axe  $y$  lui est perpendiculaire dans le sens direct. L'axe  $z$  se dirige dans la direction du pôle céleste de rotation. Le centre est le barvcentre du système solaire.

L'orientation relative entre deux repères 1 et 2 ayant le même centre (il n'y a pas de translation), s'identifie à trois rotations directes  $A_1$ ,  $A_2$ ,  $A_3$  autour des axes  $x$ ,  $y$ ,  $z$  respectivement, tel qu'on le représente dans la Figure 2. Dans notre formulation, on fait l'hypothèse que l'orientation relative entre repères est représentée par de petits angles, de l'ordre de  $10^{-8}$  radians.

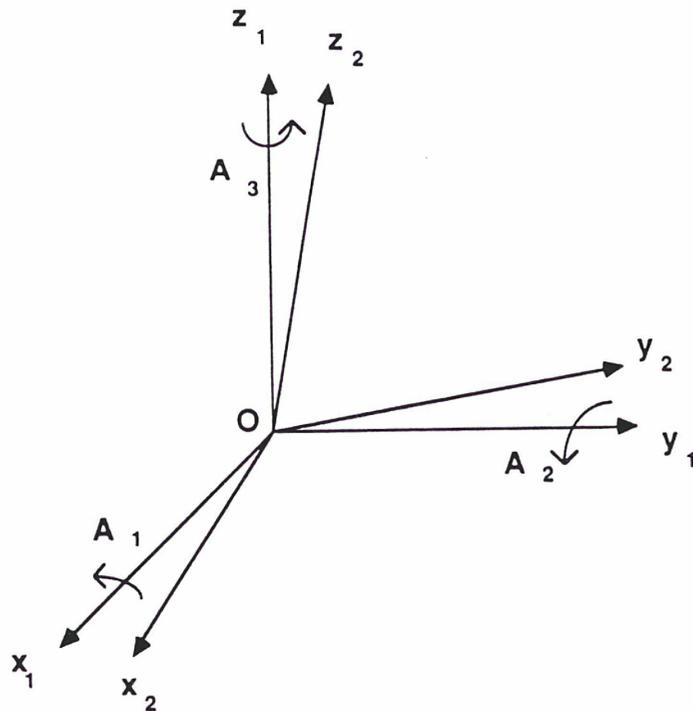


Figure 2. Orientation relative entre les axes de deux repères  
( $O x_1, y_1, z_1$ ) et ( $O x_2, y_2, z_2$ )

La transformation des coordonnées d'un point dans la direction  $\vec{V}_1$  dans le repère 1 et  $\vec{V}_2$  dans le repère 2 s'effectue avec la relation matricielle

$$\vec{V}_1 = [M] \vec{V}_2 \quad (1)$$

[M] est la matrice de rotation entre les axes des deux repères de référence. Cette matrice [M] est le résultat des trois rotations  $A_1, A_2, A_3$  représentées par les matrices [Mx], [My], [Mz] :

$$[Mx] = \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos A_1 & \sin A_1 \\ 0 & -\sin A_1 & \cos A_1 \end{vmatrix}$$

$$[My] = \begin{vmatrix} \cos A_2 & 0 & -\sin A_2 \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin A_2 & 0 & \cos A_2 \end{vmatrix}$$

$$[Mz] = \begin{vmatrix} \cos A_3 & \sin A_3 & 0 \\ -\sin A_3 & \cos A_3 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{vmatrix}$$

La matrice de rotation [M] est le produit des trois rotations individuelles autour des axes

$$[M] = [Mz].[My].[Mx]$$

$$[M] = \begin{vmatrix} \cos A_2 \cos A_3 & \cos A_1 \sin A_3 + \sin A_1 \sin A_2 \cos A_3 & \sin A_1 \sin A_3 - \cos A_1 \sin A_2 \cos A_3 \\ -\cos A_2 \sin A_3 & \cos A_1 \cos A_3 - \sin A_1 \sin A_2 \sin A_3 & \sin A_1 \cos A_3 + \cos A_1 \sin A_2 \sin A_3 \\ \sin A_2 & -\sin A_1 \cos A_2 & \cos A_1 \cos A_2 \end{vmatrix}$$

Les angles d'orientation relative  $A_1, A_2, A_3$  sont de l'ordre de quelques millièmes de seconde de degré et on peut les considérer comme des valeurs infinitésimales en radians. Dans ces conditions on peut développer les lignes trigonométriques dans la matrice de rotation [M] en séries de puissances des petits angles et négliger les termes de second ordre et supérieurs. Avec ces approximations, la matrice [M] adopte la forme simple :

$$[M] = \begin{vmatrix} 1 & A_3 & -A_2 \\ -A_3 & 1 & A_1 \\ A_2 & -A_1 & 1 \end{vmatrix} \quad (2)$$

L'évaluation de l'orientation relative entre repères se fait sur la base des sources communes. La même radio source a des coordonnées différentes dans les divers repères parce que leurs axes ne sont pas dans les mêmes directions.

En coordonnées équatorielles, les vecteurs  $\vec{V}_i$  ( $i=1,2$ ) ont des composantes  $(\cos\alpha_i \cos\delta_i, \sin\alpha_i \cos\delta_i, \sin\delta_i, )$ . La relation matricielle (1) se ramène à la forme analytique suivante :

$$\cos\alpha_1 \cos\delta_1 = \cos\alpha_2 \cos\delta_2 + A_3 \sin\alpha_2 \cos\delta_2 - A_2 \sin\delta_2 \quad (3a)$$

$$\sin\alpha_1 \cos\delta_1 = \sin\alpha_2 \cos\delta_2 - A_3 \cos\alpha_2 \cos\delta_2 + A_1 \sin\delta_2 \quad (3b)$$

$$\sin\delta_1 = \sin\delta_2 + A_2 \cos\alpha_2 \cos\delta_2 - A_1 \sin\alpha_2 \cos\delta_2 \quad (3c)$$

De ces trois équations, seulement deux sont indépendantes. Pour obtenir les expressions qui permettent d'évaluer des différences en ascension droite  $\Delta\alpha$  et de déclinaison  $\Delta\delta$  de la même source dans les deux repères, on a transformé les équations (3a), (3b), et (3c).

Si on multiplie (3a) par  $\sin\alpha_2$ , (3b) par  $\cos\alpha_2$  et on fait leur différence ; et si on multiplie (3a) par  $\cos\alpha_2$  et (3b) par  $\sin\alpha_2$  et on les ajoute, on obtient respectivement :

$$\cos\delta_1 \sin(\alpha_1 - \alpha_2) = A_1 \sin\delta_2 \cos\alpha_2 + A_2 \sin\delta_2 \sin\alpha_2 - A_3 \cos\delta_2 \quad (4)$$

$$\cos\delta_1 \cos(\alpha_1 - \alpha_2) = \cos\delta_2 + A_1 \sin\delta_2 \sin\alpha_2 - A_2 \sin\delta_2 \cos\alpha_2 \quad (5)$$

Les différences  $\Delta\alpha = \alpha_1 - \alpha_2$  et  $\Delta\delta = \delta_1 - \delta_2$  étant petites (de l'ordre des  $A_i$ ), on peut écrire

$$\sin(\alpha_1 - \alpha_2) = \Delta\alpha \quad \text{et} \quad \cos(\delta_1 - \delta_2) = 1.$$

Si maintenant on multiplie (3c) par  $\cos\delta_2$  et (5) par  $\sin\delta_2$  et on fait la différence, on a

$$\sin(\delta_1 - \delta_2) = -A_1 \sin\alpha_2 + A_2 \cos\alpha_2 \quad (6)$$

A partir des équations (4) et (6) on obtient :

$$\Delta\alpha = A_1 \sin\delta_2 \cos\alpha_2 \sec\delta_1 + A_2 \sin\delta_2 \sin\alpha_2 \sec\delta_1 - A_3 \cos\delta_2 \sec\delta_1 \quad (7a)$$

$$\Delta\delta = -A_1 \sin\alpha_2 + A_2 \cos\alpha_2 \quad (7b)$$

$(\alpha_1, \delta_1)$  et  $(\alpha_2, \delta_2)$  étant les coordonnées du même objet dans les repères 1 et 2 respectivement, on aura deux équations pour chaque source commune aux deux repères et trois

inconnues  $A_1$ ,  $A_2$  et  $A_3$ . Il faut, au moins, deux sources communes pour déterminer l'orientation relative entre deux repères de référence.

Les variances des différences des coordonnées  $\sigma\Delta_\alpha$ ,  $\sigma\Delta_\delta$  sont :

$$\begin{aligned}\sigma\Delta_\alpha^2 &= \sigma\alpha_1^2 + \sigma\alpha_2^2 \text{ en ascension droite,} \\ \sigma\Delta_\delta^2 &= \sigma\delta_1^2 + \sigma\delta_2^2 \text{ en déclinaison.}\end{aligned}\tag{8}$$

Dans ces expressions  $\sigma\alpha_1$ ,  $\sigma\delta_1$  et  $\sigma\alpha_2$ ,  $\sigma\delta_2$  sont les incertitudes des coordonnées de la source dans les repères 1 et 2.

Si les repères 1 et 2 ont  $N$  radio sources communes on aura  $2N$  équations d'observation en  $\Delta_\alpha$  et  $\Delta_\delta$  pour évaluer les angles d'orientation relative  $A_1$ ,  $A_2$ ,  $A_3$ . Le système est résolu avec un ajustement des moindres carrés pondérés avec des poids  $1/\sigma\Delta_\alpha^2$  ou  $1/\sigma\Delta_\delta^2$  selon que l'équation représente une différence d'ascension droite ou de déclinaison. Dans la pratique, les poids ont été normalisés à leur valeur moyenne pour tout le catalogue.

#### *b) L'analyse des erreurs dans les catalogues des radio sources*

Les incertitudes formelles dans les catalogues des radio sources ne sont pas nécessairement réalistes. Elles représentent la limite inférieure de l'erreur qui est dominée en réalité par les effets systématiques (la troposphère, par exemple).

L'analyse des erreurs dans les catalogues de radio sources extragalactiques a été faite sur la base des critères statistiques, notamment sur l'étude de la qualité de l'ajustement des moindres carrés. Pour déterminer la qualité de la solution des moindres carrés on fait des tests sur les résidus  $r_j$  après ajustement des rotations  $A_1$ ,  $A_2$  et  $A_3$ . On fait l'hypothèse que les incertitudes des mesures suivent une loi normale. La dispersion des données est caractérisée par leurs variances  $\sigma_j^2$ . Si  $\nu$  est le nombre de degrés de liberté, le paramètre

$$R = 1 \sum \frac{r_j^2}{\sigma_j^2}$$

qui souvent est appelé chi-2 réduit dans la littérature est un bon indicateur de la qualité de l'ajustement. Si l'ajustement est approprié pour représenter les données, la variance estimée  $s^2$  doit être en accord avec la variance des données, et ceci se traduit par une valeur de  $R$  proche de l'unité (Bevington, 1969).

Dans cette analyse, on a utilisé ce critère ( $R = \text{goodness-of-fit}$ ) pour juger et estimer les incertitudes formelles. Le paramètre  $R$  permet de déterminer si les erreurs sur les coordonnées des radio sources sont réalistes. La sous-estimation des incertitudes sera traduite par une valeur de  $R$  supérieure à l'unité ; si par contre, les erreurs sont sur-estimées,  $R$  sera inférieur à 1.

En fonction de la valeur de  $R$  on peut aussi recalculer les erreurs des coordonnées pour les rendre plus réalistes. Nous avons estimé l'incertitude  $\sigma$  réaliste à partir de sa valeur réelle  $\sigma_0$  avec l'application d'un facteur d'échelle  $E$  et d'une variance additive  $C$  comme suit :

$$\sigma = \sqrt{\sigma_0^2 E + C}$$

Avec les résidus après l'ajustement des moindres carrés, on évalue le paramètre  $R$ . Si ceci n'est pas l'unité, avec un processus itératif on évalue les constantes  $E$  et  $C$  qui le rendent égal à 1.

Dans notre cas particulier, on écrit les équations d'observation en fonction des différences des coordonnées et on les pondère avec les incertitudes réalistes. Les effets systématiques responsables de la mauvaise évaluation des erreurs n'agissent probablement pas de la même façon sur les deux coordonnées, et par conséquent, on évalue deux jeux des constantes,  $(E_\alpha, C_\alpha)$  pour les différences d'ascension droite et  $(E_\delta, C_\delta)$  pour les différences de déclinaison. Les équations (8) deviennent

$$\begin{aligned} \sigma\Delta_\alpha &= [(\sigma_{\alpha 1}^2 + \sigma_{\alpha 2}^2)E_\alpha + C_\alpha]^{1/2} && \text{en ascension droite} \\ \sigma\Delta_\delta &= [(\sigma_{\delta 1}^2 + \sigma_{\delta 2}^2)E_\delta + C_\delta]^{1/2} && \text{en déclinaison} \end{aligned} \tag{9}$$

### c) Les déformations régionales entre repères

En plus des rotations globales entre deux repères célestes VLBI, il peut exister des déformations régionales relatives dues aux caractéristiques des divers réseaux d'antennes, peut-être. Pour détecter de possibles biais régionaux dans les repères extragalactiques on a appliqué deux méthodes d'analyse différentes:

- a) La comparaison des arcs entre paires de radio sources communes à deux catalogues VLBI.
- b) La comparaison des positions des sources communes à deux catalogues après avoir enlevé la rotation globale.

a) La longueur de l'arc entre deux points de la sphère céleste est indépendante de l'orientation des axes du repère de référence dans lequel on exprime leurs coordonnées.

S'il n'y a pas de déformations régionales entre deux repères de référence, les arcs entre les mêmes paires de sources communes doivent être égaux dans les deux repères. La comparaison des arcs et la recherche des effets systématiques dans certaines zones du ciel permettent d'étudier la façon dont la distribution des réseaux agit sur la cohérence interne d'un repère.

b) Si deux repères de référence sont libres de leur rotation globale, les incohérences qui restent encore présentes sont d'origine régionale.

Une fois évalués les angles de rotation entre deux repères, on choisit un des deux comme référence et on tourne l'autre repère dessus. Maintenant les coordonnées des radio sources dans les deux catalogues sont exprimées dans le même repère et on peut les comparer pour chercher à déceler des incohérences régionales.

La distribution des directions des vecteurs rejoignant les positions des radio sources communes dans les deux repères de la Figure 2 indique la présence de déformations relatives dans certaines régions de la sphère céleste.

### **Les repères extragalactiques comparés. Description.**

Cinq repères VLBI individuels ont été utilisés dans les différentes comparaisons des catalogues qui sont présentées dans ce chapitre. Ils ont été élaborés au GSFC, JPL and NGS. La Table 1 présente les réalisations comparées et leurs caractéristiques principales. Les analyses incluent deux catalogues du GSFC, deux du JPL et un du NGS. Dans tous les cas, les positions des radio sources sont dans le système J2000.0 avec les modèles conventionnels UAI 1976 de la précession et la Théorie de la nutation UAI 1980. Elles ont été évaluées dans des solutions globales avec l'estimation d'autres paramètres (coordonnées des radio sources, coordonnées des stations, mouvement du pôle et correction à UT1, erreurs des horloges, corrections troposphériques, et, dans certaines solutions, des corrections de la position du pôle céleste donnée par les modèles). Les trois laboratoires utilisent des algorithmes qui sont en général cohérents avec les Standards MERIT (Melbourne *et al.* 1983), mais avec quelques caractéristiques particulières. Dans aucune solution on a considéré des effets de la structure des radio sources. Ceci peut introduire des effets systématiques de dépendance temporelle qui limitent la précision finale des repères célestes. Pour éliminer les effets de l'ionosphère, les données sont enregistrées à deux bandes de fréquences différentes S et X (2.3 et 8.4 GHz). N'étant pas sensible à l'écliptique, la technique du VLBI ne peut pas déterminer la direction des équinoxes, et il faut la fixer arbitrairement. Dans tous les repères comparés dans ce chapitre, l'origine des ascensions droites a été fixée en adoptant pour l'ascension droite du quasar 3C 273B (1226+023) sa valeur de Hazard (1971).

	REPÈRE	N	Ns (%)	Interv. de $\delta$	rms $\sigma$ (0.001")	corr. $\Delta\psi, \Delta\epsilon$	RESEAUX	REFERENCES
1.	RSC(GSFC) 84 R 01	44	6	-30°, +74°	0.9	non	CDP - POLARIS/IRIS	Ryan <i>et al.</i> (1985)
2.	RSC(GSFC) 88 R 06	294	42	-83°, +85°	2.0	non	CDP - POLARIS/IRIS	Ma (1988)
3.	RSC(JPL) 86 R 02	127	37	-45°, +85°	2.7	non	DSN	Sovers (1986)
4.	RSC(JPL) 88 R 02	142	36	-45°, +85°	3.4	oui	DSN	Sovers <i>et al.</i> (1988)
5.	RSC(NGS) 86 R 01	26	12	-6°, +79°	0.9	oui	POLARIS/IRIS	Robertson <i>et al.</i> (1986)

Table 1. Repères célestes extragalactiques comparés. N indique le nombre de sources dans chaque repère, Ns est le pourcentage de sources observées à des déclinaisons négatives.

CDP : Crustal Dynamics Project.

POLARIS : Polar Motion Analysis by Radio Interferometry Surveying.

IRIS : International Radio Interferometry Surveying

DSN : Deep Space Network.

La géométrie des réseaux impose des limitations à la distribution spatiale des radio sources observées et à la précision de la détermination des coordonnées. Les réseaux des stations dans l'hémisphère nord ne permettent pas d'observer des objets à hautes déclinaisons en-dessous de l'équateur céleste, au détriment de l'homogénéité du repère céleste. Par ailleurs, les lignes de base avec de longues composantes dans la direction est-ouest sont optimales pour la détermination des ascensions droites, mais peu sensibles aux déclinaisons surtout proches du plan équatorial. La détermination précise des déclinaisons des radio sources proches de l'équateur céleste exige des lignes de base avec de longues composantes dans la direction nord-sud.

Les programmes d'observations VLBI ont trois objectifs essentiels. Les projets POLARIS (Polar Motion Analysis and Radio Interferometric Surveying) et IRIS (International Radio Interferometric Surveying) du NGS ont pour objectif la détermination à long terme des variations de la rotation terrestre et de la nutation, et l'établissement des systèmes de référence céleste et terrestre (Carter et Robertson, 1984 et Carter *et al.* 1984). Les projets ont démarré en 1980 avec des observations avec une ligne de base aux Etats-Unis. Vers la fin de la période 1980-1985 les sessions d'observation incluaient quatre stations avec des lignes de base intercontinentales. Les stations POLARIS/IRIS opérées pour élaborer le catalogue RSC(NGS) 86 R 01 sont situées exclusivement dans l'hémisphère nord, la plupart des lignes de base dans la direction est-ouest. Ceci fait que seulement trois des 26 objets du repère soient dans l'hémisphère sud céleste ( $\delta > -6^\circ$ ) et que les sources proches de l'équateur aient des déclinaisons moins précises.

Le Crustal Dynamics Project (CDP) de la National Aeronautics and Space Administration (NASA) poursuit des recherches de géodynamique au sein du GSFC. Le CDP observe avec des lignes de base intercontinentales pour mesurer les mouvements des plaques tectoniques depuis 1979. Les données analysées au GSFC incluent les observations CDP et POLARIS/IRIS. Les stations et les sources observées sont presque en leur totalité dans l'hémisphère nord et l'orientation prédominante des lignes de base est est-ouest. Néanmoins, une station de l'Afrique du Sud a participé dans quelques sessions.

Le JPL conduit ses observations avec les stations du DSN (Deep Space Network) pour la navigation spatiale, l'étude des mouvements de la croûte terrestre et la détermination des positions précises des radio sources extragalactiques. Les deux lignes de base du DSN sont intercontinentales, leurs orientations prédominantes étant dans la direction est-ouest (Espagne-Californie) et nord-sud (Australie-Californie). La géométrie du réseau permet une assez bonne distribution des sources dans le ciel est un meilleur recouvrement de l'hémisphère sud.

Les repères élaborés au GSFC et au NGS ne sont pas complètement indépendants, car dans l'ajustement de paramètres réalisé au GSFC participent les observations des réseaux CDP et POLARIS/IRIS. Des trois laboratoires, le JPL est le seul à élaborer des catalogues des radio sources indépendantes des autres, basés exclusivement sur les observations du DSN.

Les incertitudes formelles des coordonnées des radio sources varient en fonction du nombre d'observations de chaque objet. Elles se rangent entre moins d'un millième de seconde de degré pour les sources avec un nombre abondant d'observations (>100) et le centième de seconde de degré pour les moins observées. La moyenne quadratique des erreurs formelles de chaque repère dans la Table 1 a été calculée sans tenir compte des sources avec des incertitudes supérieures à 0.01" qui peuvent être considérées comme points aberrants.

La direction du pôle céleste défini par les modèles conventionnels adoptés par l'UAI est affectée d'incohérences qui peuvent biaiser les directions des axes des repères extragalactiques de quelques 0.001". A partir des données VLBI obtenues pendant six ans Herring (1988) a évalué les corrections aux coefficients des sept termes principaux de la nutation avec des périodes d'une année ou moins. Pour diminuer l'effet des incohérences provoquées par la modélisation selon les conventions strictes de l'UAI, dans l'élaboration de quelques repères on a ajusté simultanément aux autres paramètres des corrections à la nutation en longitude et en obliquité données par le modèle.

### **Les résultats : rotations globales et déformations régionales**

Les comparaisons réalisés entre les repères de référence extragalactiques individuels sont présentés dans les deux articles qui suivent.

Dans Arias et Lestrade (1988), les analyses traitent trois repères (1, 3 et 5 dans la Table 1). On a modifié les incertitudes formelles avec un facteur d'échelle et une variance additive différents en ascension droite et en déclinaison. Sur la base des incertitudes modifiées on a pondéré les observations et on a évalué les angles d'orientation relative entre les trois paires de repères. Pour chercher de possibles déformations régionales relatives on a comparé les longueurs des arcs entre paires des sources communes à deux catalogues.

Dans Arias *et al.* (1990) on a sélectionné deux réalisations denses des repères de référence extragalactiques élaborées au GSFC et au JPL (catalogues 2 et 4 dans la Table 1).

Ces deux catalogues ont 122 sources communes, permettant d'élargir les analyses sur les déformations régionales. On a évalué leur orientation relative sans modifier les incertitudes formelles, car l'objectif ultime de cette étude est de détecter des biais locaux dans les repères. Les angles de rotation ont été utilisés pour rapporter les coordonnées des radio sources communes dans un même repère.

## Comparison of VLBI celestial reference frames

E.F. Arias<sup>1</sup>, M. Feissel<sup>2</sup>, and J.-F. Lestrade<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Bureau des Longitudes, 77, avenue Denfert-Rochereau, F-75014 Paris, France

<sup>2</sup> Bureau International de l'Heure, Observatoire de Paris, 61, avenue de l'Observatoire, F-75014 Paris, France

Received October 5, accepted November 25, 1987

**Summary.** Relative orientations between VLBI celestial reference frames are calculated on the basis of their common radio sources. Regional biases in the frames are studied by comparing the arc lengths between pairs of common sources.

**Key words:** VLBI – celestial reference frames – extragalactic radio sources

### 1. Introduction

During the last few years three groups, at the Jet Propulsion Laboratory (JPL), the Goddard Space Flight Center (GSFC) and the National Geodetic Survey (NGS) have published catalogues of precise positions of extragalactic radio sources derived from Very Long Baseline Interferometry (VLBI) observations. The radio source coordinates in these catalogues were computed in a global adjustment including parameters for the terrestrial reference frame, and the motions of the Earth. Each catalogue provides a realisation of the celestial reference frame. In a previous work, Arias et al. (1988) have evaluated the relative orientations of six recent VLBI catalogues obtained by these groups. The relative orientation between pairs of celestial reference frames was obtained by computing three differential rotations about the coordinate axes. The study included consideration of the stability of the solution when restricting the number of sources, and the introduction of an additive variance common to the right ascensions and declinations.

We report here an extensive comparison of three reference frames selected from the six ones previously mentioned. The rotation angles are determined by performing a more refined analysis of the formal astrometric uncertainties given in the catalogues.

Possible regional biases in the different frames are investigated by comparing the arclengths between sources common to pairs of catalogues.

### 2. The VLBI celestial reference frames analysed

Table 1 shows the three VLBI celestial reference frames selected. The catalogue labels are those which have been adopted by the Bureau International de l'Heure (Annual Report of the BIH for

**Table 1.** VLBI celestial reference frames compared. The column *N* provides the number of radio sources in each catalogue

Label	<i>N</i>	References
RSC(GSFC)84 R 01	44	Ryan and Ma (1985)
RSC(JPL)86 R 02	127	Sovers (1986)
RSC(NGS)86 R 01	26	Robertson, Fallon and Carter (1986)

1986). Radio source coordinates listed in the catalogues are calculated at epoch and equator of J2000.0. Formal errors in the positions of common sources are at the level of 0''.001. The origin on the equator is defined by setting the right ascension of the source 3C 273B to 12 h 29 m 06.6997 s at epoch J2000.0.

Radio source positions derived by NGS and GSFC are not fully independent, since observing sessions of the IRIS/POLARIS Program are included in the GSFC VLBI data analysis.

In Fig. 1 the distributions of extragalactic radio sources in the sky are plotted for the selected catalogues. Only JPL provides numerous coordinates below the equator, consequently, the number of common sources at negative declinations is rather limited.

### 3. Rotations

The relative orientation between two celestial reference frames is obtained by computing three differential rotations about the coordinate axes. A source common to both frames and of direction  $\vec{d}$  has two sets of coordinates, primed coordinates in catalogue 1 and double primed ones in catalogue 2. The transformation between these two celestial reference frames can be written as:

$$\begin{pmatrix} d'_x \\ d'_y \\ d'_z \end{pmatrix} = [M] \begin{pmatrix} d''_x \\ d''_y \\ d''_z \end{pmatrix} \quad (1)$$

where the rotation matrix *M* is

$$[M] = \begin{pmatrix} 1 & A_3 & -A_2 \\ -A_3 & 1 & A_1 \\ A_2 & -A_1 & 1 \end{pmatrix}.$$

A1, A2, A3 are the infinitesimal rotation angles about the *x*, *y* and *z* axis respectively, in the sense frame 2 towards frame 1.

The differences between the equatorial coordinates of a source common to the two catalogues are, to first order with respect to

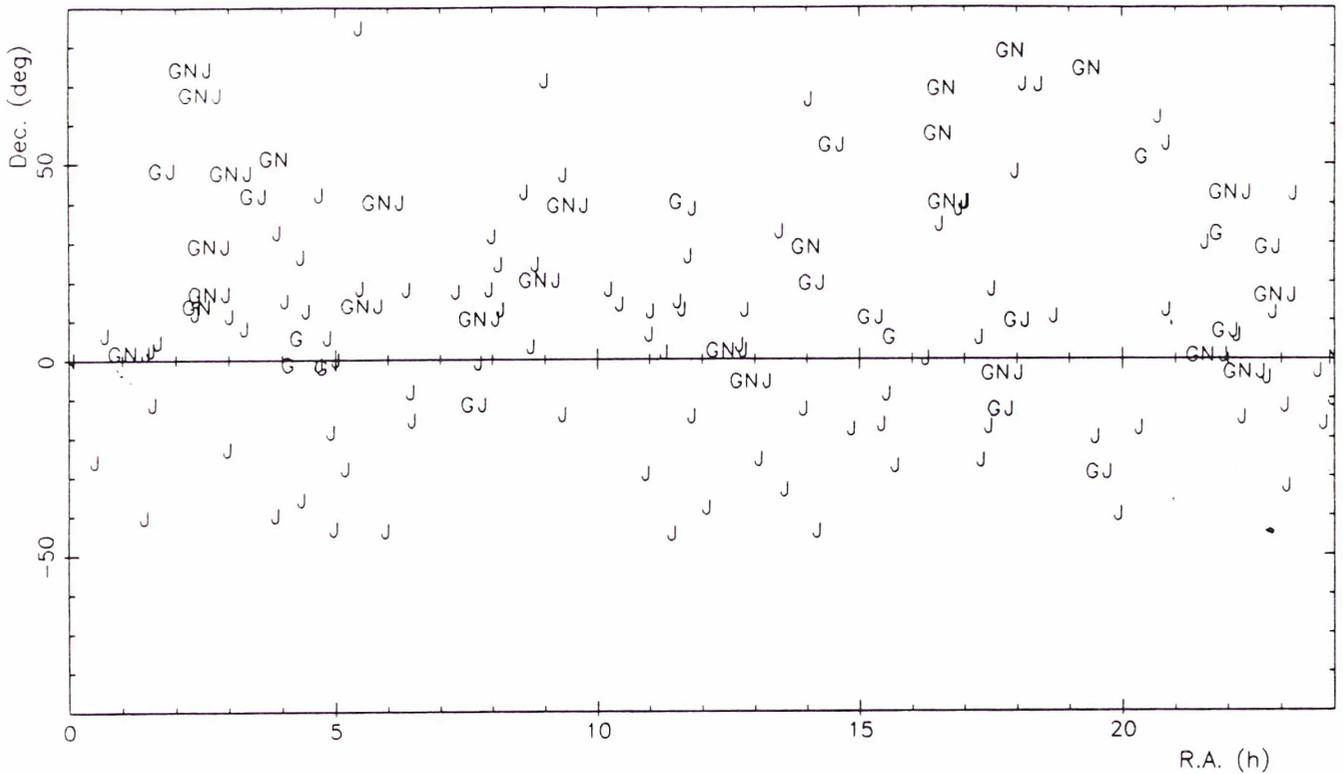


Fig. 1. Sky distribution of extragalactic sources with precise VLBI positions. G: RSC(GSFC) 84 R 01; J: RSC(JPL) 86 R 02; N: RSC(NGS) 86 R 01

A1, A2, A3:

$$\Delta x \cos \delta = (x' - x'') \cos \delta$$

$$= A1 \sin \delta \cos \alpha + A2 \sin \delta \sin \alpha - A3 \cos \delta \quad (2)$$

$$\Delta \delta = (\delta' - \delta'') = -A1 \sin \alpha + A2 \cos \alpha \quad (3)$$

The three unknowns A1, A2, A3 are determined by a weighted least squares fit. We have found the distribution of residuals to be normal by applying several tests: EDF statistics (statistics based on the Empirical Distribution Function), Kolmogorov – Smirnov statistics for samples larger to 50, and Shapiro – Wilks *W* statistics for sample sizes less than or equal to 50 (Bougeard, 1987). In order to analyse the realistic character of the uncertainties given in the catalogues, we have tested the goodness-of-fit, i.e., whether the formal errors globally reflect the scatter in the post-fit residuals. To insure a distribution of post-fit residuals which matches a normal distribution it is possible to use a goodness-of-fit criterion (Bevington, 1969):

$$R = \frac{1}{v} \sum \frac{r_i^2}{\sigma_i^2} \cong 1$$

where  $r_i$  are the residuals in the least squares solution,  $\sigma_i$  are the formal uncertainties in the data points and  $v$  is the number of degrees of freedom. In order to obtain a value of  $R$  close to unity, the variance of the source coordinates can be modified by applying additive variance  $C$  and scaling factor  $E$  to the formal errors published in the catalogues, according to:

$$\sigma_{\Delta x} = [(\sigma_x^2 + \sigma_x'^2)E_x + C_x]^{1/2}, \text{ for right ascension} \quad (4)$$

$$\sigma_{\Delta \delta} = [(\sigma_\delta^2 + \sigma_\delta'^2)E_\delta + C_\delta]^{1/2}, \text{ for declination.} \quad (5)$$

Table 2. Square root of the additive variances  $C_x$ ,  $C_\delta$  and scaling factors  $E_x$ ,  $E_\delta$  corresponding to the solution in Table 3. Units of  $C_x$  and  $C_\delta$ : 0''001

Frame 1–frame 2	$\sqrt{C_x}$	$\sqrt{C_\delta}$	$\sqrt{E_x}$	$\sqrt{E_\delta}$
RSC(NGS) 86 R 01– RSC(GSFC) 84 R 01	0.00	1.34	1.00	1.38
RSC(NGS) 86 R 01– RSC(JPL) 86 R 01	0.32	1.45	1.41	1.05
RSC(GSFC) 84 R 01– RSC(JPL) 86 R 02	1.00	1.05	1.22	1.76

Table 3. Differential rotations A1, A2, A3 (in the sense frame 2 towards frame 1) computed using the constants of Table 2.  $N$  is the number of sources common to each pair. Unit: 0''001

Frame 1–frame 2	A1	A2	A3	$N$
RSC(NGS) 86 R 01– RSC(GSFC) 84 R 01	-0.27 $\pm 0.16$	+0.30 $\pm 0.15$	+0.23 $\pm 0.06$	22
RSC(NGS) 86 R 01– RSC(JPL) 86 R 02	+0.53 $\pm 0.45$	+0.76 $\pm 0.47$	+1.39 $\pm 0.30$	15
RSC(GSFC) 84 R 01– RSC(JPL) 86 R 02	+0.13 $\pm 0.38$	-0.12 $\pm 0.38$	+0.73 $\pm 0.28$	28

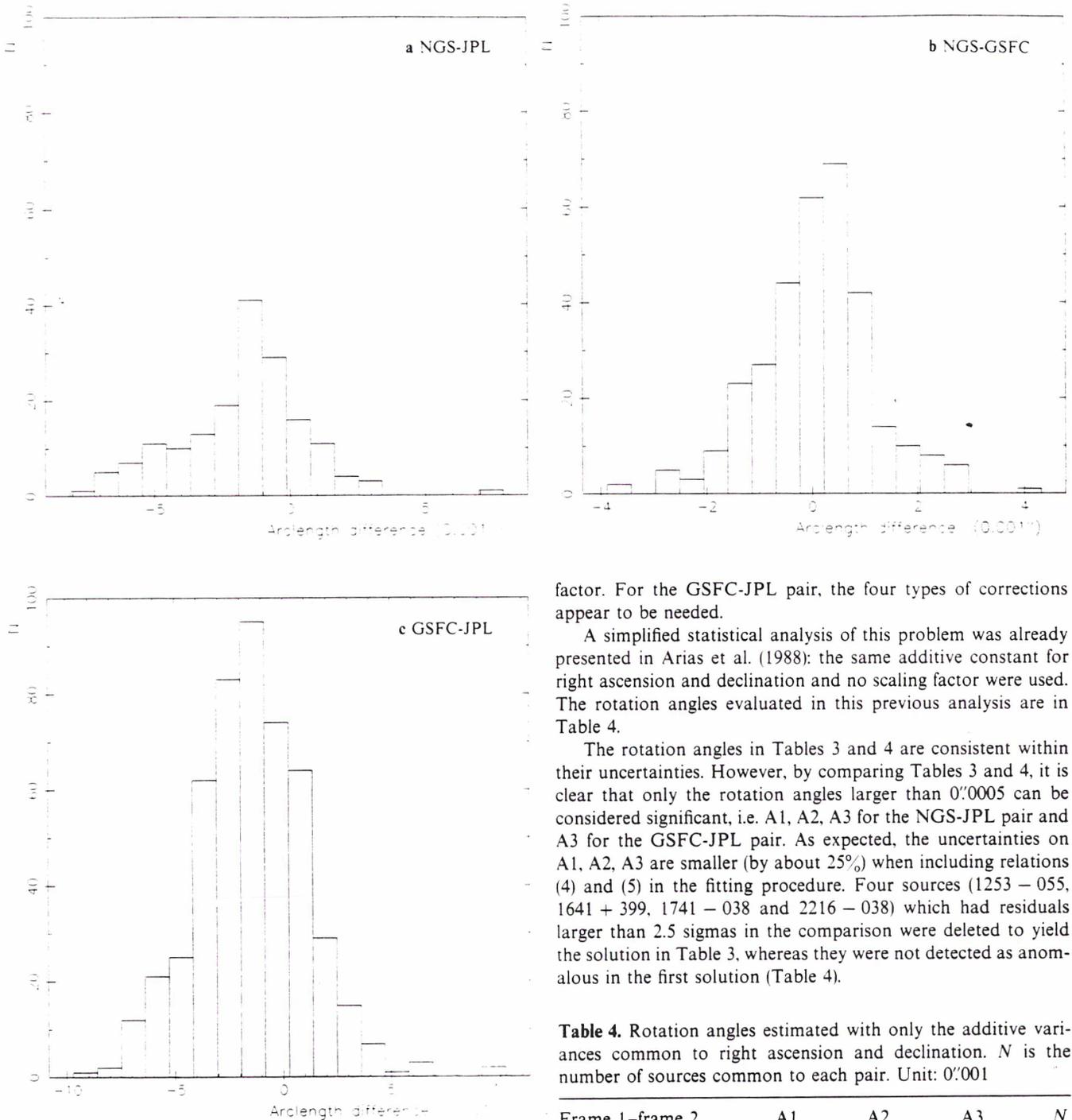


Fig. 2a-c. Histograms of arc length differences

The values of  $C_x, C_\delta, E_x, E_\delta$  are given in Table 2. The rotation angles listed in Table 3 were computed weighting the data points according to the modified formal errors.

Table 2 shows that for the NGS-GSFC pair it is necessary to modify the formal uncertainties in declination by an additive variance as well as a scaling factor, whereas the formal uncertainties in right ascension require no modification. For the NGS-JPL pair, the formal uncertainties in declination require an additive variance, and those in right ascension require a scaling

factor. For the GSFC-JPL pair, the four types of corrections appear to be needed.

A simplified statistical analysis of this problem was already presented in Arias et al. (1988): the same additive constant for right ascension and declination and no scaling factor were used. The rotation angles evaluated in this previous analysis are in Table 4.

The rotation angles in Tables 3 and 4 are consistent within their uncertainties. However, by comparing Tables 3 and 4, it is clear that only the rotation angles larger than  $0''.0005$  can be considered significant, i.e. A1, A2, A3 for the NGS-JPL pair and A3 for the GSFC-JPL pair. As expected, the uncertainties on A1, A2, A3 are smaller (by about 25%) when including relations (4) and (5) in the fitting procedure. Four sources (1253 - 055, 1641 + 399, 1741 - 038 and 2216 - 038) which had residuals larger than 2.5 sigmas in the comparison were deleted to yield the solution in Table 3, whereas they were not detected as anomalous in the first solution (Table 4).

Table 4. Rotation angles estimated with only the additive variances common to right ascension and declination.  $N$  is the number of sources common to each pair. Unit:  $0''.001$

Frame 1-frame 2	A1	A2	A3	$N$
RSC(NGS) 86 R 01-				
RSC(GSFC) 84 R 01	-0.06	+0.17	+0.45	26
	$\pm 0.12$	$\pm 0.12$	$\pm 0.09$	
RSC(NGS) 86 R 01-				
RSC(JPL) 86 R 02	+0.67	+0.53	+1.41	19
	$\pm 0.41$	$\pm 0.42$	$\pm 0.37$	
RSC(GSFC) 84 R 01-				
RSC(JPL) 86 R 02	+0.58	-0.15	+0.86	32
	$\pm 0.40$	$\pm 0.41$	$\pm 0.36$	

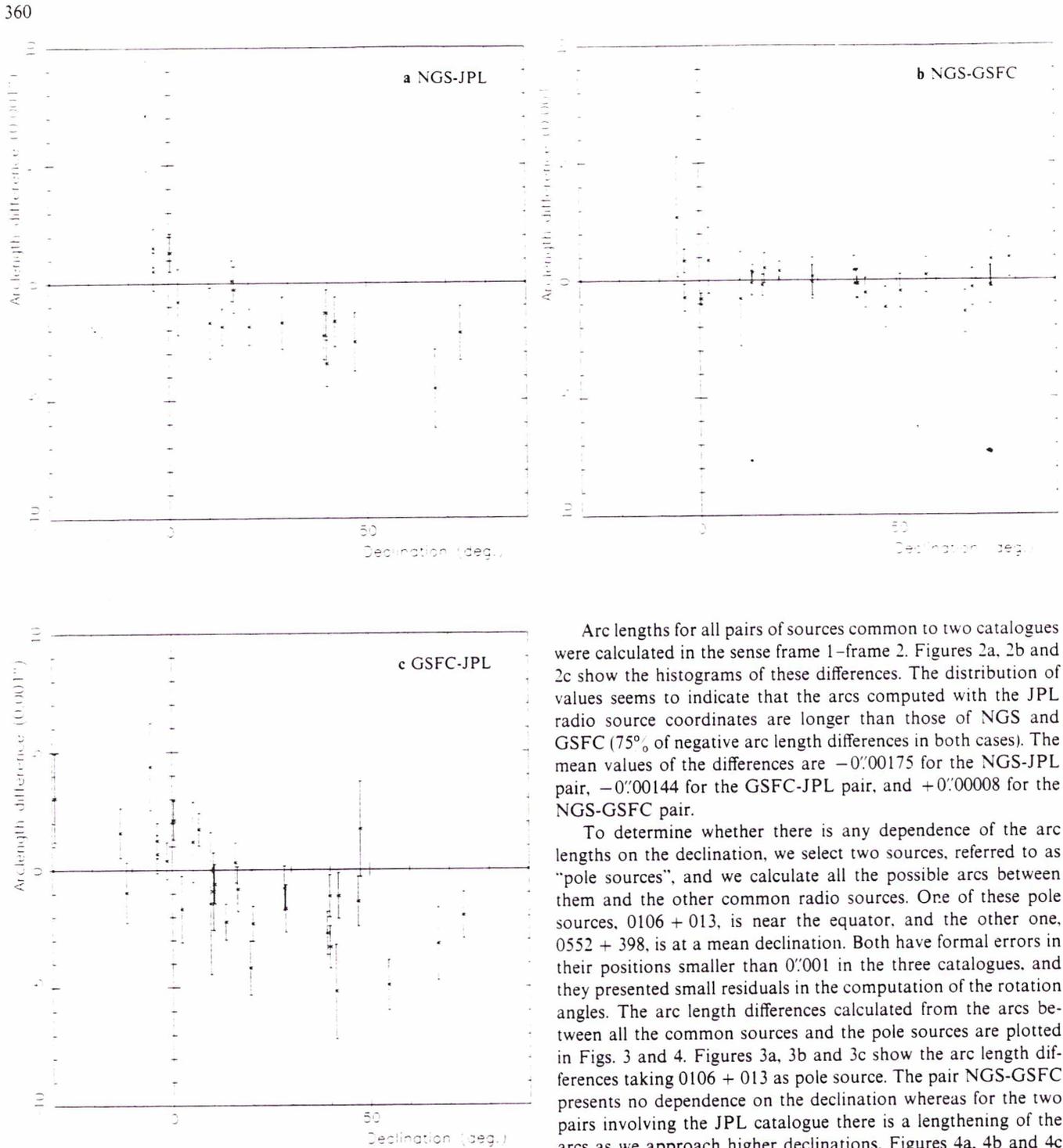


Fig. 3a–c. Arc length difference vs declination and their error bars, taking 0106 + 013 as pole source

#### 4. Regional biases

Comparison of arc lengths between sources common to two catalogues is a direct evaluation of the consistency of two reference frames because it is free from the global rotation offsets (A1, A2, A3). This comparison may reveal relative regional biases between the two frames.

Arc lengths for all pairs of sources common to two catalogues were calculated in the sense frame 1–frame 2. Figures 2a, 2b and 2c show the histograms of these differences. The distribution of values seems to indicate that the arcs computed with the JPL radio source coordinates are longer than those of NGS and GSFC (75% of negative arc length differences in both cases). The mean values of the differences are  $-0''.00175$  for the NGS-JPL pair,  $-0''.00144$  for the GSFC-JPL pair, and  $+0''.00008$  for the NGS-GSFC pair.

To determine whether there is any dependence of the arc lengths on the declination, we select two sources, referred to as “pole sources”, and we calculate all the possible arcs between them and the other common radio sources. One of these pole sources, 0106 + 013, is near the equator, and the other one, 0552 + 398, is at a mean declination. Both have formal errors in their positions smaller than  $0''.001$  in the three catalogues, and they presented small residuals in the computation of the rotation angles. The arc length differences calculated from the arcs between all the common sources and the pole sources are plotted in Figs. 3 and 4. Figures 3a, 3b and 3c show the arc length differences taking 0106 + 013 as pole source. The pair NGS-GSFC presents no dependence on the declination whereas for the two pairs involving the JPL catalogue there is a lengthening of the arcs as we approach higher declinations. Figures 4a, 4b and 4c show the arc length differences taking 0552 + 398 as pole source. As before, there is no dependence on the declination for the pair NGS-GSFC, and a lengthening of the arcs as we approach the equator for the other two pairs.

The radio source 1253 – 055 (deleted in the computation of the rotation angles of Table 3) presents the largest arc length differences. This is particularly clear when we take the pole source 0106 + 013 near the equator.

To check whether the lengthening of the arcs is a general bias or whether it is due to the sources selected as poles, we consider a zone of 5 degrees in declination on both sides of the equator.

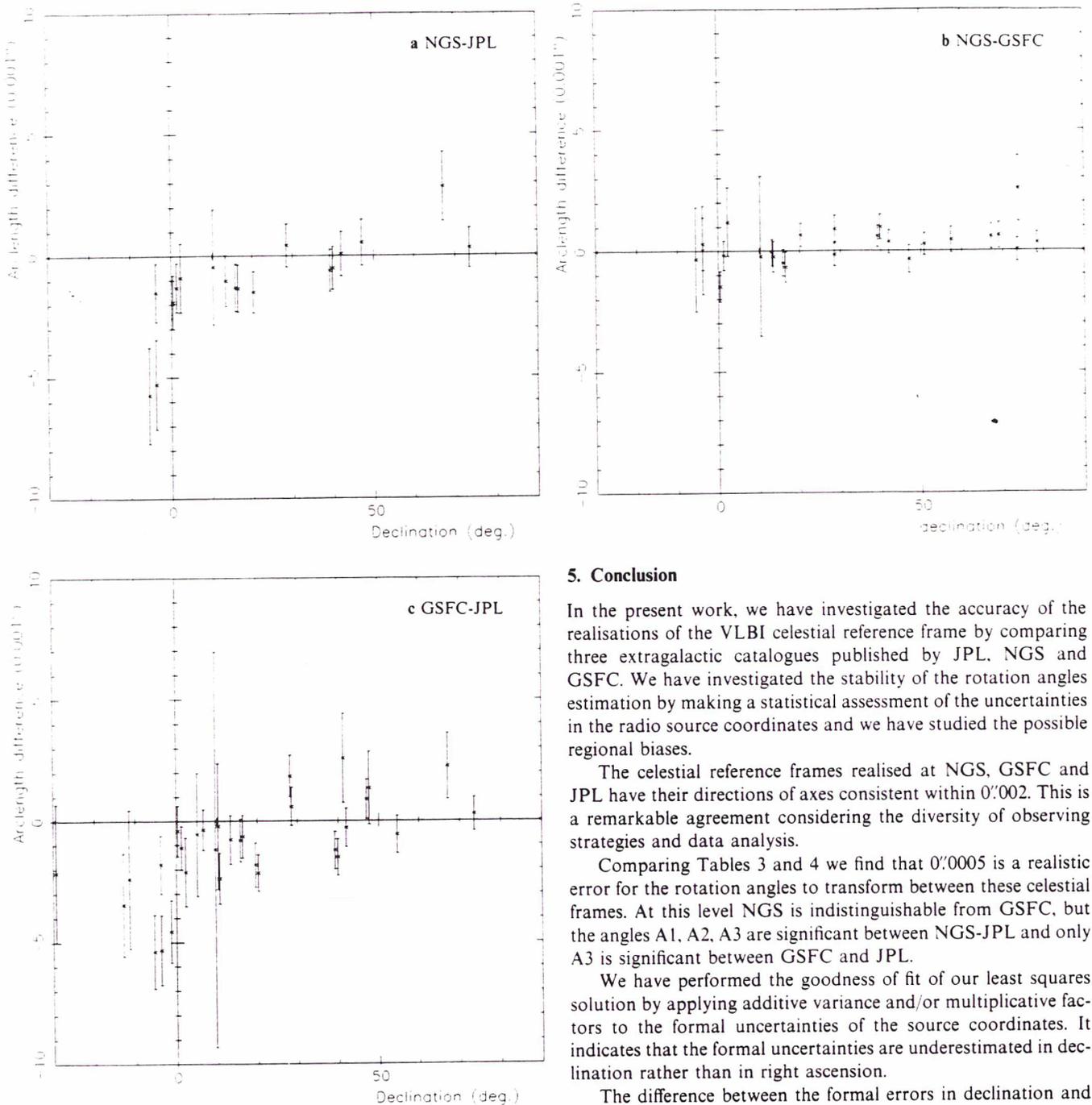


Fig. 4a–c. Arc length difference vs declination and their error bars, taking 0552 – 398 as pole source

All the sources in this zone are taken as poles to compute the arc lengths with all the sources common to the pairs of catalogues. The differences between the arc lengths for each pair are plotted in Figs. 5a, 5b, 5c. They show the same trends as in Figs. 3 and 4.

As a conclusion, no bias is revealed in the arc lengths between NGS and GSFC, whereas in the two pairs involving JPL there is a lengthening of the arcs between the equatorial zone and the higher positive declinations.

## 5. Conclusion

In the present work, we have investigated the accuracy of the realisations of the VLBI celestial reference frame by comparing three extragalactic catalogues published by JPL, NGS and GSFC. We have investigated the stability of the rotation angles estimation by making a statistical assessment of the uncertainties in the radio source coordinates and we have studied the possible regional biases.

The celestial reference frames realised at NGS, GSFC and JPL have their directions of axes consistent within  $0''.002$ . This is a remarkable agreement considering the diversity of observing strategies and data analysis.

Comparing Tables 3 and 4 we find that  $0''.0005$  is a realistic error for the rotation angles to transform between these celestial frames. At this level NGS is indistinguishable from GSFC, but the angles A1, A2, A3 are significant between NGS-JPL and only A3 is significant between GSFC and JPL.

We have performed the goodness of fit of our least squares solution by applying additive variance and/or multiplicative factors to the formal uncertainties of the source coordinates. It indicates that the formal uncertainties are underestimated in declination rather than in right ascension.

The difference between the formal errors in declination and the uncertainties modified on the basis of the goodness-of-fit criterion is near  $0''.001$ , which might be explained only in part by regional biases in the catalogues.

Possible regional deformations of the frames have been investigated. They are apparent only in the pairs of catalogues involving JPL and one of the other two frames, at the level of  $0''.002$ .

It is to be noted that the data used at JPL (Mark II, NASA Deep Space Network) are fully independent from the data shared by GSFC and NGS (Mark III, Crustal Dynamics Project and IRIS Networks). So the comparison between JPL and GSFC/NGS is likely to be the most relevant to appreciate the status of the art in VLBI astrometry.

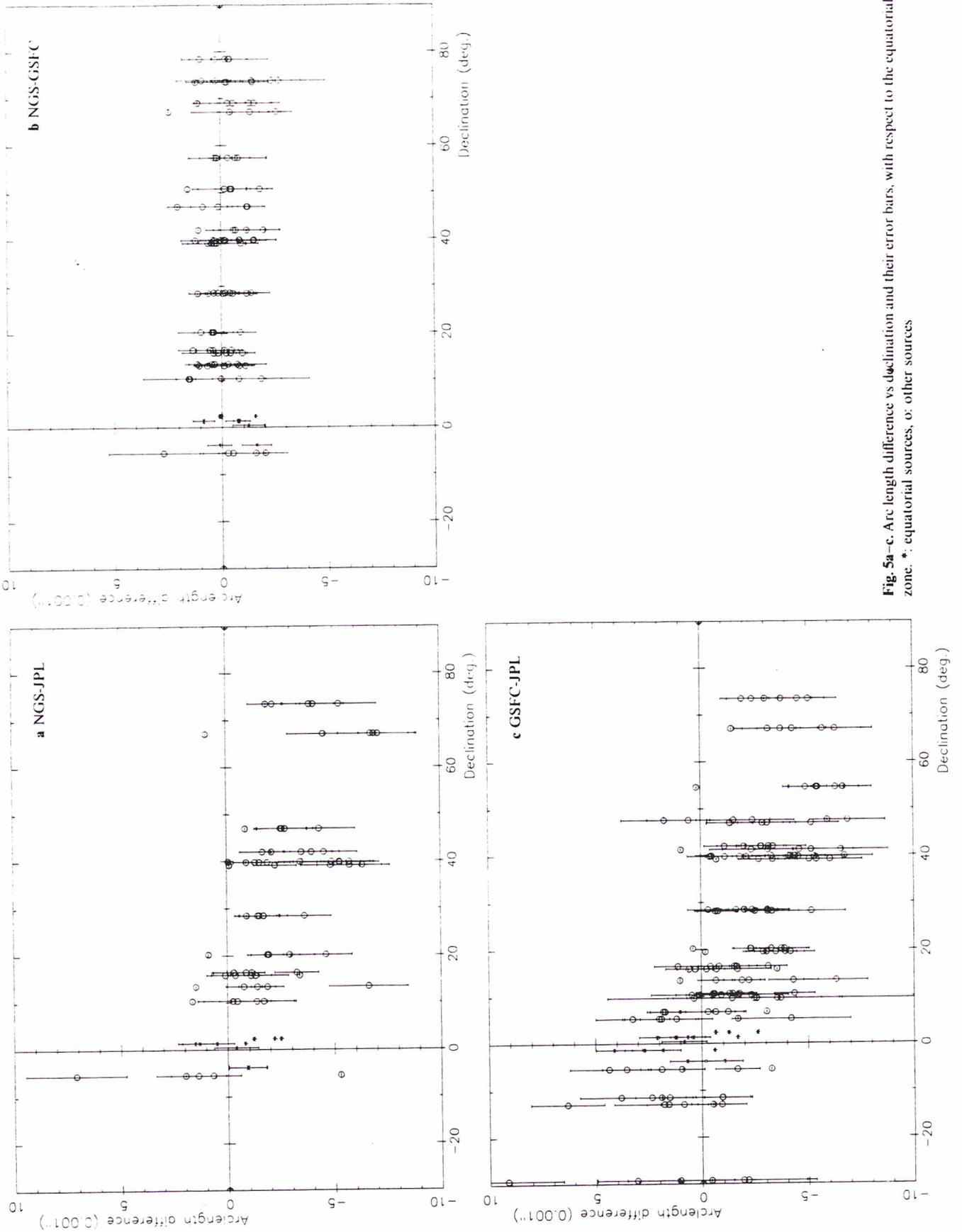


Fig. 5a-c. Arc length difference vs declination and their error bars, with respect to the equatorial zone. \*, equatorial sources, o: other sources

*Acknowledgements.* We thank M.L. Bougeard (Observatoire de Paris, Université Paris X) for fruitful discussions on statistics and for having performed the normality tests on our least squares residuals.

#### References

- Arias, E.F., Lestrade, J.-F., Feissel, M.: 1988, *IAU Symposium 128*, Wilkins and Babcock (Eds.), Reidel, Dordrecht, p. 61
- Bevington, P.R.: 1969, *Data Reduction and Error Analysis for the Physical Sciences*, Ch. 10, McGraw-Hill Book Company.
- Bougeard, M.L.: 1987, *Astron. and Astrophys.* 183, 156–166.
- Robertson, D.S., Fallon, F.W., Carter, W.E.: 1986, *Astron. J.* 91, 6
- Ryan, J.W., Ma, C.: 1985, *Crustal Dynamics Project Data Analysis*, *NASA Technical Memorandum 86229*
- Sovers, O.J.: 1986, Private communication

## Global and regional astrometric comparison between two dense VLBI extragalactic reference frames

E.F. Arias<sup>1,3</sup> and J.-F. Lestrade<sup>1,2</sup>

1. International Earth Rotation Service / Central Bureau  
Observatoire de Paris  
61, Av. de l'Observatoire, 75014 - Paris, France
2. Observatoire de Paris / DERAD  
92195 - Meudon - Principal Cedex
3. La Plata Observatory and CONICET, Argentina

### Summary

An astrometric comparison of the two densest VLBI celestial reference frames produced by the Jet Propulsion Laboratory (JPL) and by the Goddard Space Flight Centre (GSFC) is presented. The comparison indicates that there are global rotations of 0.0015" between these two celestial frames which were produced with independent data and analysis. This comparison reveals also that there are regional deformations  $\leq 0.002''$  in the equatorial band of declination  $(-30^\circ, 30^\circ)$  whose origins are difficult to presently identify.

## 1) Introduction

Positions of compact extragalactic radio sources measured by the technique of Very Long Baseline Interferometry (VLBI) define a kinematically stable reference frame. The distances to these objects are large enough to make their apparent proper motions presently undetectable so that the astrometric accuracy of such a frame will suffer no degradation with time unlike stellar reference frames. During the last decade, different VLBI groups have independently produced several self-consistent VLBI celestial reference frames by determining radio coordinates of more than 200 sources with milliarcsecond precision or better. It is important to assess if this formal precision reveals the overall accuracy of the VLBI celestial frame or if there are still some inconsistencies between these different realisations arising from the modelizations, the distribution of sources and networks, the data acquisition hardware and the data reduction software.

Since VLBI measurements are only weakly sensitive to the ecliptic, the line of the equinoxes is usually not adopted as the origin of the right ascensions on the equator. To fix this origin, most VLBI groups have adopted a fixed value for the J2000.0 right ascension of the quasar 1226+023 (3C 273B) consistent with its B1950.0 right ascension given by Hazard *et al.*, (1971) relative to the optical FK4 catalogue and lunar ephemerides reference frame. This historical choice of a complex superluminal source for the right ascension origin along with other model parameters might be the cause of global rotations and misalignment between the different individual VLBI reference frames.

In most individual VLBI celestial frames, the distribution of radio sources is fairly uniformly covered above -40 degrees of declination. Source positions in the northern hemisphere are somewhat better determined than negative declination radio sources. Precision of source declinations near the equator depends strongly on the length of the North-South baseline components and on the strategies of observations. Lack of sensitivity of the VLBI technique to this declination range is noticeable with some networks which are predominantly oriented in the East-West direction. The noticeably different network geometries between CDP (Crustal Dynamics Program) and JPL might cause regional deformations in the VLBI celestial frames produced.

Inaccuracies of the conventional precession and nutation models have already been revealed by analysis of VLBI data. It has yielded corrections to the coefficients of the seven largest terms in the IAU 1980 nutation series with periods of one year or less (Herring, 1988,

Charlot, *et al.*, 1990). Daily corrections to the directions of the celestial pole defined by the models are generally solved for.

Two highly independent dense extragalactic reference frames elaborated at the Goddard Space Flight Center (GSFC) and at the Jet Propulsion Laboratory (JPL) are compared hereafter with the purpose of detecting the existence of relative global and regional inconsistencies between both frames. We have determined the relative orientation between the directions of the axes of the two frames, and possible regional deformations between them after removing the relative global rotations.

This comparison is the first step before combining VLBI catalogues in an optimum fashion to produce the International Earth Rotation Service Celestial Reference Frame. This reference frame is produced by selecting a set of extragalactic radio sources with the best determined positions. These primary sources are the fiducial points which define the directions of axes of the celestial frame. The Celestial Reference Frame of the International Earth Rotation Service (IERS) is elaborated following this criterium by compiling radio source positions determined at the GSFC, the JPL, the National Geodetic Survey (NGS) and USNO. The set of primary radio sources was selected based on source structure, number of observations and sky distribution by D.S. Robertson and W. Carter (1987). The initial realization of the IERS Celestial Reference Frame includes 23 primary sources; the positions of the other sources listed in the individual catalogues were rotated into the IERS frame to densify its realization (Arias *et al.*, 1988a). 16 of the 23 IERS primary sources are common to the JPL and GSFC frames we are analysing here.

## 2) The individual VLBI reference frames analysed

Comparisons of individual VLBI celestial frames are based on the differences between the coordinates of the common radio sources. For our study, we have selected the most dense versions of the GSFC and JPL VLBI catalogues. These catalogues have 122 sources in common and are briefly described in Table 1. In both catalogues, the origin on the equator has been fixed by adopting the J2000.0 right ascension of 1226+023 consistent with the B1950.0 value of Hazard. The frames are referred to J2000.0 by means of the standard IAU 1976 precession model and the IAU 1980 nutation model. However, to be free from inconsistencies due to the limited accuracy of these models, both individual frames had been established by including an adjustment of corrections to the direction of the celestial pole (nutation angles  $\Delta\psi \sin \epsilon$  and  $\Delta\epsilon$ ) in the parametrization of the model used to analyse the VLBI observations.

-----  
 Table 1. VLBI celestial reference frames analysed in this study. Catalogue names are given according to IERS notation. N is the number of sources in each frame.  
 -----

Individual frame	N	Declination range	References
RSC (GSFC) 88 R 06	294	-83° to +85°	Ma (1988)
RSC (JPL) 88 R 02	142	-45° to +85°	Sovers (1988)

-----

The catalogue RSC (GSFC) 88 R 06 (Ma, 1988) contains 294 compact extragalactic radio sources North of  $-83^\circ$ . It materializes the VLBI radio source catalogue with the most homogeneous distribution of objects, 42% of the total number of sources being south of the equator. The global solution includes Mark-III S/X band data from the Crustal Dynamics Program (a network with a dozen stations) and the US Naval Research Laboratory Mark-III X band data between stations in South Africa and Australia and Band Width Synthesis Mark-II S/X band data from the Deep Space Network stations. These networks include intermediate baselines ( $\approx 1000$  km) to long baselines ( $\approx 6000$  km). The rms of the formal uncertainties is  $0.002''$  when 16 radio sources with formal errors greater than  $0.01''$  are not considered. The GSFC celestial frame contains the 23 primary sources which define the axis directions of the initial IERS combined extragalactic reference frame (Arias *et al.*, 1988a). For these sources, the rms of the formal uncertainties is  $0.0005''$ .

The catalogue RSC (JPL) 88 R 02 (Sovers, 1988) contains 142 compact extragalactic radio sources North of declination  $-45^\circ$ . The global solution includes the data from the Deep Space Network consisting in two intercontinental VLBI baselines ( $\approx 10\,000$  km) predominantly oriented in the East-West direction (Spain-California) and in the North-South direction (Australia-California). The Band Width Synthesis Mark-II system spanning  $\approx 40$  MHz provide accurate VLBI delays and rates owing to the high signal-to-noise ratio obtained with the large radiotelescopes used (64 m / 70 m) and the low system temperature receivers ( $\leq 30$  °K). When 11 sources with formal errors greater than  $0.01''$  are not included, the rms formal uncertainty for the JPL frame is  $0.003''$ . The rms of the formal uncertainties of the 16 primary sources common to the IERS celestial reference frame is  $0.002''$ .

The inclusion of some of the JPL Mark II VLBI data in the solution of the GSFC catalogue RSC (GSFC) 88 R 06 make it only partially independent from the JPL catalogue RSC (JPL) 88 R 02. However, the Mark III data set of GSFC is so much larger than the Mark II data set of JPL (a few  $10^5$  VLBI observables versus less than  $10^4$  observables, respectively) that the degree of independence is very high.

Figures 1 and 2 plot the formal uncertainties in declination as a function of declination for GSFC and JPL frames respectively. The relatively large uncertainties of the source declinations  $-45^\circ$  are likely to be caused by the approximate correction used to model the ionosphere for the X band only observations conducted on the baseline between South-Africa and Australia. Our astrometric comparison is based on the 122 extragalactic radio sources common to both VLBI frames. For these objects, rms of the formal uncertainties is  $0.002''$  for GSFC frame and  $0.004''$  for JPL frame. This indicates that for the objects included in our comparison the accuracy of both frames is comparable.

### 3) Relative orientation of the JPL and GSFC VLBI celestial frames

Relative orientation between VLBI celestial reference frames is determined with the method described by Arias *et al.* (1988b). The angles  $A_1$ ,  $A_2$  and  $A_3$  are estimated around each coordinate axis to rotate in a global sense one frame unto the other. These angles have been chosen to follow the parametrization devised by Zhu and Mueller (1983) to compare in a consistent manner the terrestrial and celestial reference frames along with the Earth Orientation Parameters ( $x$ ,  $y$ , UT1-UTC). The estimation of  $A_1$ ,  $A_2$ ,  $A_3$  is made by a weighted least squares fit after differencing the coordinates of the common radio sources. Formal uncertainties of source coordinates quoted by each group have not been used as weights for the fit. To test the goodness of the least squares fit, we have estimated the parameter

$$R = \frac{1}{\nu} \sum (r_i^2 / \sigma_i^2) / \nu$$

where  $r_i$  represents the post fit residual of the radiosource coordinate differences,  $\sigma_i$  are the combined uncertainties of the coordinates of the source in both frames, and  $\nu$  the number of degrees of freedom.

To check the stability of the rotation when the number of common sources is changed, the relative orientation between GSFC and JPL frames was estimated on the basis of (a) the 122 common sources and (b) the 16 common IERS primary sources. Table 2 gives the global rota-

tion angles  $A_1$ ,  $A_2$ ,  $A_3$  between the GSFC and the JPL frames obtained for the solutions (a) and (b). No radio sources present post-fit residuals greater than 2.7 times the uncertainty of the least squares solution. The goodness of the fit is satisfactory for both solutions, as indicated by the values of  $R$ , 0.7 and 0.5 for solutions (a) and (b) respectively. The standard table of  $\chi^2$  distribution indicates that these values of  $R$  correspond to a probability of 0.99 that the post-fit residuals follow a gaussian distribution for both solutions. The angles  $A_1$ ,  $A_2$ ,  $A_3$  estimated with 122 and 16 common sources are consistent within 1.7 times the respective uncertainties. Four radio sources have coordinate differences larger than four times their combined formal uncertainties: 0859-140, 0201+113, 0859+470 and 2030+547; 0201+113 and 0859-140. They have relatively low astrometric precision positions in the JPL reference frame. No significant changes (less than  $0.2\sigma$ ) are observed in the rotation angles  $A_1$ ,  $A_2$ ,  $A_3$  when these four radio sources are deleted from the least square solution (a).

The values of the global rotation angles in Table 2 show that the directions of axes of the celestial frames realized by GSFC and JPL are consistent within  $0.0015''$ . The largest of the three angles is  $A_3$  (around the celestial pole), and it might reflect different sensitivity of the two VLBI networks to the complex structure of the source 3C 273B used to fix arbitrarily the origin of the VLBI right ascensions in both frames and presents an extended structure with a superluminal motion which shifts the radio centroid of the source on a time scale of a few months (e.g. Charlot, 1990).

-----  
 Table 2. Relative orientation between individual frames.  $A_1$ ,  $A_2$  and  $A_3$  are the global rotation angles between GSFC and JPL VLBI celestial frames. Unit :  $0.001''$ .  
 -----

	122 common sources (a)	16 common IERS primary sources (b)
$A_1$	$-0.81 \pm 0.19$	$-1.34 \pm 0.34$
$A_2$	$-0.21 \pm 0.18$	$-0.89 \pm 0.35$
$A_3$	$-1.20 \pm 0.09$	$-1.44 \pm 0.15$

-----

#### 4) Relative regional deformations of the JPL and GSFC VLBI reference frames

We present an Aitoff equal area projection (Figure 3) with vectors representing the position differences of the 122 common sources in both frames, after the global rotation angles of table 2 have been removed (angles (a)). Circles indicate the radio source positions in the JPL extragalactic reference frame, and the arrows indicate the directions towards the respective GSFC positions. The magnitudes of the arrows are the modules of the coordinate difference vectors scaled up by the factor  $10^7$  to make them visible on the figure.

By inspection of the orientation of the vectors in Figure 3, flows of arrows are apparent on the sky projection and are an indication of relative regional deformations between the two VLBI frames investigated. The region limited by the ranges of RA 20h to 24h, and of declination  $-15^\circ$  to  $30^\circ$  (Zone I in the figure) shows that the GSFC radio sources have positions systematically north of those in the JPL frame, while right ascensions are very consistent. The mean value of the declination differences in Zone I is  $0.0015''$ . The same effect can be observed in Zones IV (0h to 4h and  $-30^\circ$  to  $+30^\circ$ ). The radio source 0201+113 has an abnormal difference in declination of  $0.052''$  and a specific investigation is required. If we do not consider this extraordinary value, the mean declination difference in these two zones is  $0.0019''$  while the mean RA difference is  $0.00006''$ . In fact, zones I and IV show the same systematic biases wrapped around the celestial sphere of Figure 3. The extragalactic sources in the region of the sky from 20h to 4h and from  $-30^\circ$  to  $+30^\circ$  (zones I and IV) have their positions affected by a systematic mean bias of  $0.0016''$  in declination, whereas no bias is found in right ascension ( $0.00007''$ ). Both right ascension and declination present systematic biases in Zone II of Figure 3. Right ascensions in GSFC are larger than in JPL, while declinations are smaller. The mean deformation in this region is  $+0.0022''$  in right ascension and  $-0.0008''$  in declination. Regional systematic effects are also visible in the Zone III (16h to 20h,  $-30^\circ$  to  $+30^\circ$ ). Here, right ascensions in GSFC are smaller than in JPL, and declinations are larger. The mean values of right ascension and declination differences are  $-0.0017''$  and  $+0.0017''$  respectively. These results are summarized in Table 3.

Table 3. Regional systematic biases of VLBI positions between the two catalogues analysed. Unit : 0.001".

Zone	[RA]	[DEC]	$\langle \Delta\alpha \rangle$	$\langle \Delta\delta \rangle$
I	20h ; 24h	-15° ; +30°	0.00	+1.5
II	see Figure 3		+2.20	-0.8
III	16h ; 20h	-30° ; +30°	-1.70	+1.7
IV	20h ; 4h	-30° ; +30°	+0.06	+1.9

## 5) Conclusions

The analysis of two VLBI reference frames elaborated at GSFC and JPL with an homogeneous distribution of radio sources on the sky have allowed an accurate determination of the global rotation between these frames and allowed us to detect the existence of relative regional deformations.

Our comparison indicates that the two extragalactic celestial reference frames have their directions of axes consistent within 0.0015". The largest rotation angle is  $A_3$ , around the celestial pole, possibly due to the arbitrary choice of a single radio source to fix the origin on the equator. The different VLBI networks used by GSFC and JPL have a different sensitivity to this effect. This usual practice of selecting 3C 273B for the right ascension origin by most VLBI groups is likely to be abandoned for a more satisfactory scheme in the near future. For example, since 1988, the U.S. National Geodetic Survey (NGS) contains the right ascensions of about ten radio sources to fix the origin on the equator and GSFC and USNO/NRL have recently adopted optical positions of 28 radio sources to fix the orientation of their new reference frames (Ma *et al.*, 1989).

After removing the global misalignment between the VLBI frames, regional deformations may remain. The distribution of the vector differences between GSFC and JPL radio source positions in Figure 3 indicates that there exist some regions of the celestial sphere with systematic position biases no larger than  $\approx 0.002''$ . These regional inconsistencies might be due to a combination 1) of the independent VLBI networks used, geometry and instrumen-

tation 2) of the observing strategies used to constrain the atmospheric model, and 3) of the parametrization and model used in the analysis of the VLBI observables.

We conclude that the relative global and regional deformations between the two extragalactic reference frames RSC (GSFC) 88 R 06 and RSC (JPL) 88 R 02 elaborated independently at GSFC and JPL are  $\leq 0.002''$ . The adoption of a well defined scheme to fix the origin of the right ascensions should force the alignment between the direction of axes of individual frames in the near future. Eventually, a unique celestial reference frame could be derived from a common solution with the VLBI data sets of GSFC (a few  $10^5$  observables) and JPL ( $\approx 10^4$  observables) but where the latter observables would be properly weighted. This could improve the geometry of the VLBI network with the long North-South component of the Australia-California baseline of the DSN used by JPL and the merging of different observing strategies should be beneficial.

#### Acknowledgements

The authors are indebted to Drs. C. Ma and O.J. Sovers for providing the data analysed in this study and to Dr. M. Feissel for her constant encouragement.

## References

- Arias, E.F., Feissel, M. and Lestrade, J.-F. (1988a). "An extragalactic celestial reference frame consistent with the BIH Terrestrial System (1987)". *Annual Report of the BIH for 1987*, D-113.
- Arias, E.F., Feissel, M. and Lestrade, J.-F. (1988b). "Comparison of VLBI extragalactic celestial reference frames". *Astron. Astrophys.* **199**, 357-363.
- Charlot, Sovers, O.J. Williams, J.G., Newhall, XX, in preparation.
- Charlot, P. (1990). "14 extragalactic radio sources mapped at 2.3 and 8.4 GHz with a 24-hours Crustal Dynamics Program VLBI experiment". *Astron. Astrophys.*, **229**, 1, 51.
- Hazard, C., Sutton, J., Argue, A.W., Kenworthy, C.M., Morrison, L.V. and Murray, C.A. (1971). *Nature Phys. Sci.* **233**, 89.
- Herring, T.A. (1988). "VLBI studies of the nutations of the Earth", in *The Impact of VLBI on Astrophysics and Geophysics*, 371-375.
- Ma, C. (1988). Private communication.
- Ma, C., Shaffer, D.B., de Vegt, C, Johnston, K.J. and Russell, J. (1989). "A Radio Reference Frame.I. Precise Radio Source Positions determined by Mark III VLBI: Observations from 1979 to 1988 and Tie to the FK5". **99**,(4), 1284.
- Robertson D.S., Carter, W. (1987). IERS Memorandum, December 1987.
- Sovers, O.J. (1988). Private communication.
- Zhu, S.-Y. and Mueller, I.I. (1983). "Effects of adopting new Precession, Nutation and Equinox Corrections on the Terrestrial Reference Frame". *Bull. Géod.* **57**, 29.

## Figure Captions

Figure 1. Formal uncertainties in declination as a function of declination for radio sources in the GSFC reference frame RSC (GSFC) 88 R 06.

Figure 2. Formal uncertainties in declination as a function of declination for radio sources in the JPL reference frame RSC (JPL) 88 R 02.

Figure 3. Aitoff equal area projection of the position differences of radio sources common to GSFC and JPL frames. Circles represent the JPL positions and arrows indicate the directions to GSFC positions after removing the global rotations between the two frames. The scale of the vector module is shown in the figure.

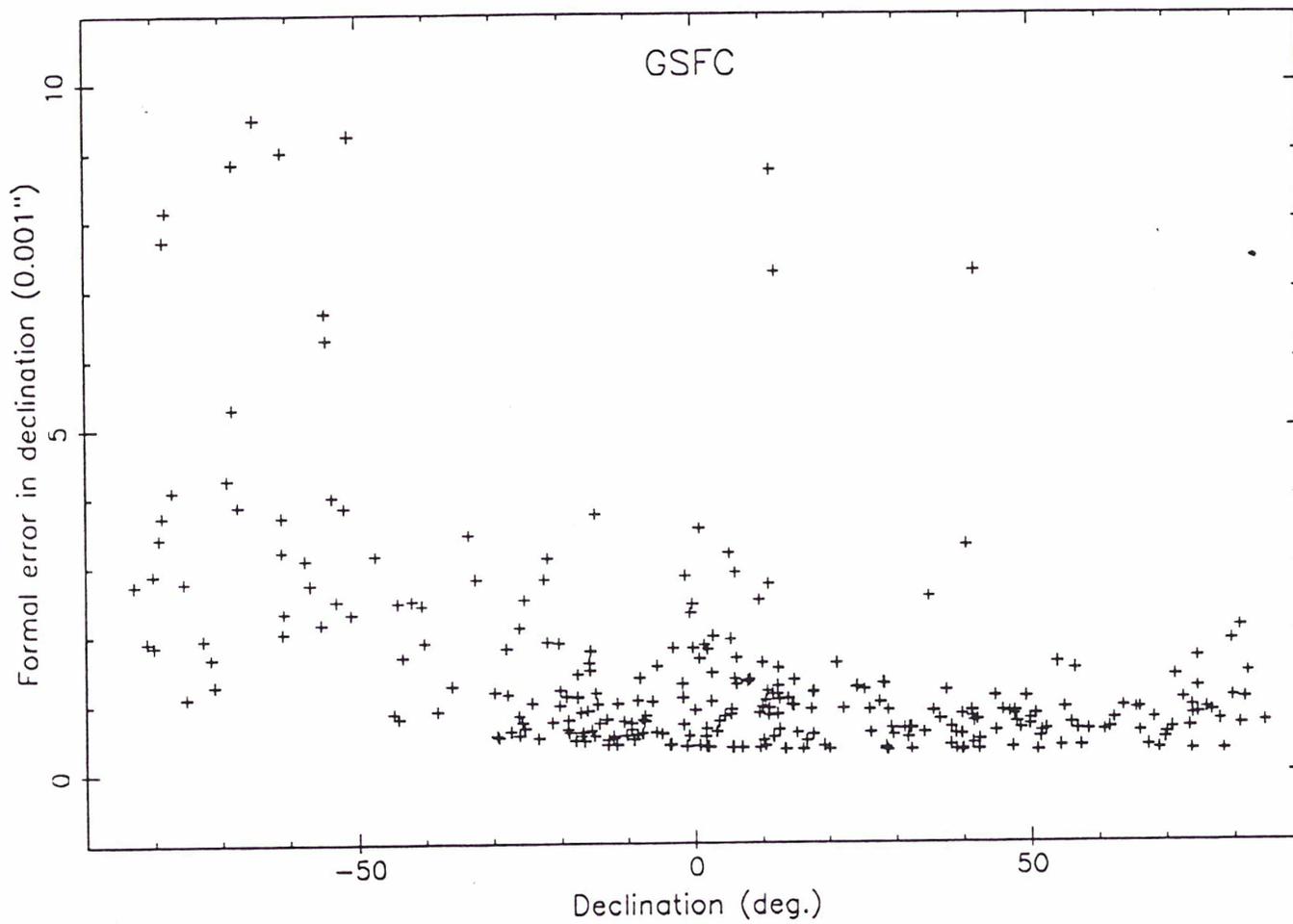


Fig. 1

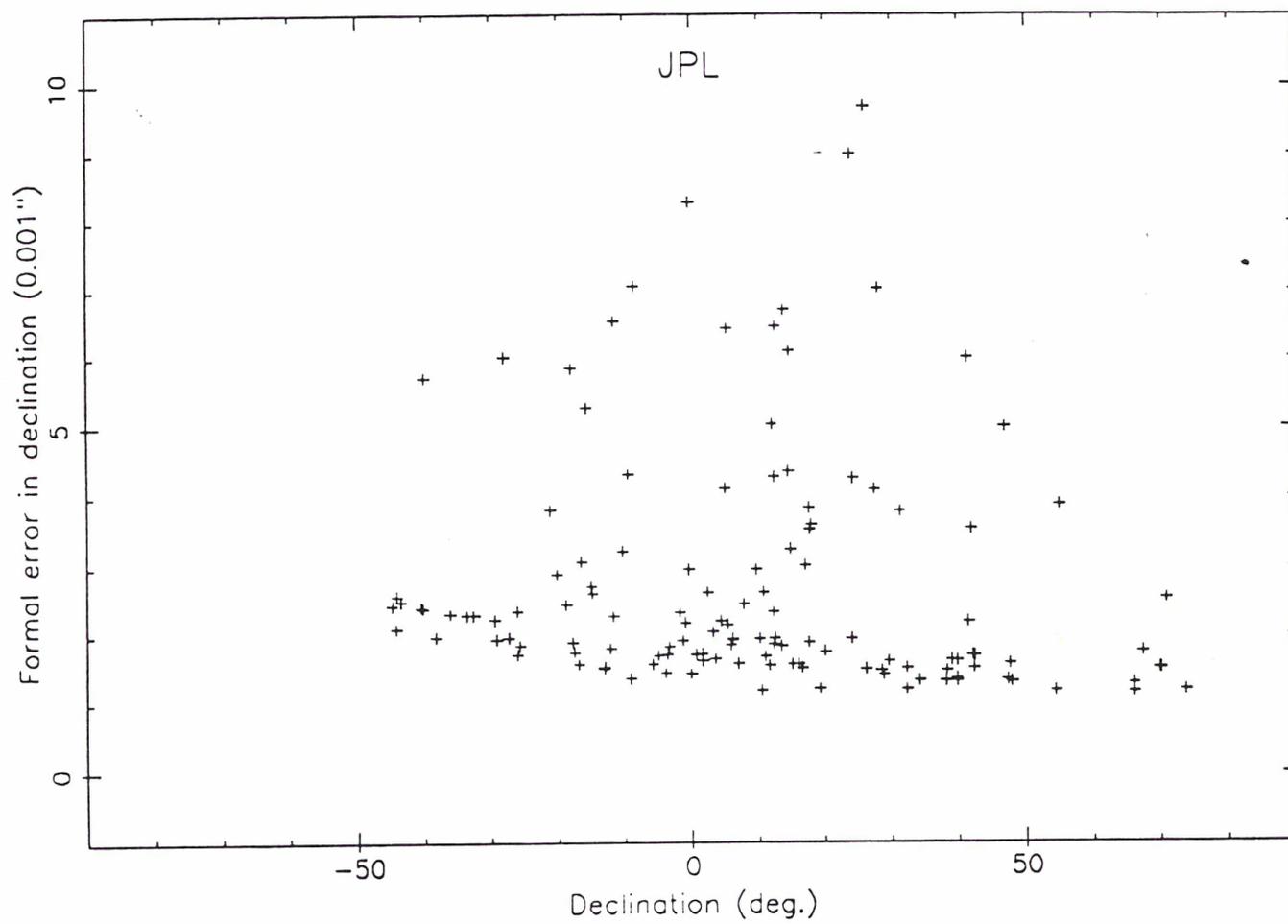


Fig. 2

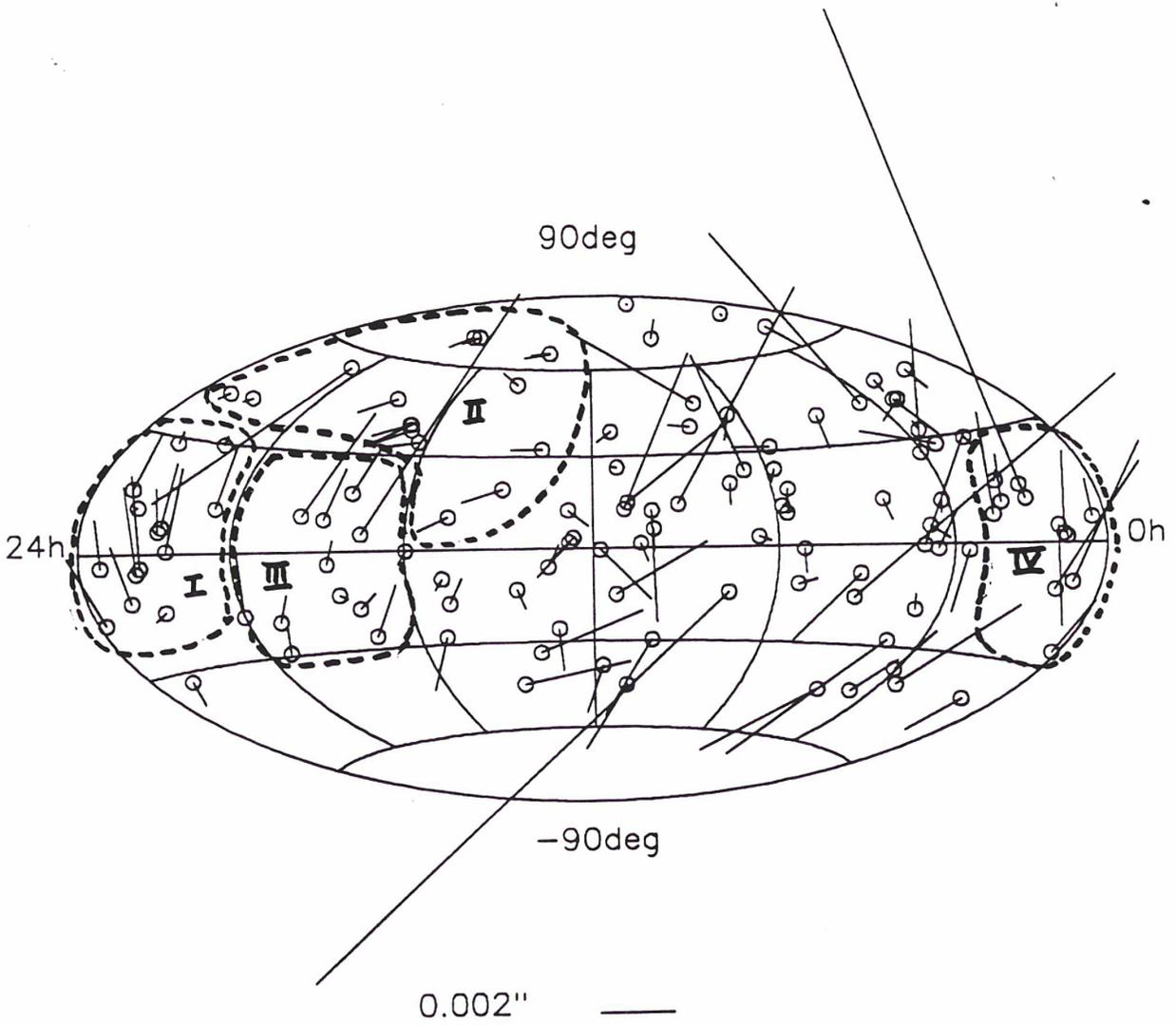


Fig. 3

## COMBINAISON DES REPERES EXTRAGALACTIQUES

Nous exposons dans les articles qui suivent la méthode de combinaison des repères extragalactiques adoptée au Service International de la Rotation Terrestre, IERS (Arias et Feissel, 1990). Dans Arias, Feissel, Lestrade (1988), nous présentons le repère céleste extragalactique de l'IERS élaboré en 1987.

Finalement, nous présentons (IERS 1989), la dernière réalisation du repère céleste extragalactique de l'IERS.

**THE CELESTIAL SYSTEM  
OF THE INTERNATIONAL EARTH ROTATION SERVICE**

E.F. Arias  
Central Bureau of IERS - La Plata Observatory/CONICET

M. Feissel  
Central Bureau of IERS - Observatoire de Paris/URA 1125 du CNRS  
Observatoire de Paris - 61, avenue de l'Observatoire, F-75014 Paris

**Abstract.** The celestial system of the International Earth Rotation Service (IERS) is materialized by the J2000.0 positions of more than 250 extragalactic compact radio sources observed by VLBI. The source coordinates are evaluated from the combination of individual celestial frames obtained by the Goddard Space Flight Center, the Jet Propulsion Laboratory and the U.S. National Geodetic Survey.

The combination model and the maintenance algorithm are described. To free the IERS celestial frame from inconsistencies due to the inaccuracy of the IAU conventional models for precession and nutation, it is implemented on individual frames which have been obtained in parallel to the adjustment of corrections to the direction of the celestial pole.

The IERS celestial reference frame is consistent with FK5 at a few milliarcsecond level. To be made denser and more accessible for astronomical uses, it will be related to the HIPPARCOS stellar frame.

## INTRODUCTION

Between 1978 and 1980, several multibaseline VLBI observation programs were initiated for space navigation, geophysics and astronomy ; the Deep Space Network (DSN) is operated by the Jet Propulsion Laboratory (JPL), the Crustal Dynamics Project (CDP) is operated by NASA, and the International Radio-Interferometric Surveying (IRIS) program is operated by agencies in the United States and other countries. A common requirement for the scientific use of these observations is the establishment of an accurate celestial reference system, materialized by a reference frame, i.e., a catalog of positions of extragalactic radio sources and a set of astronomical and geophysical models (Ma, 1989).

The current practice in the analysis of VLBI observations consists of a global adjustment of the terrestrial coordinates of the observing stations, the celestial coordinates of the radio sources and the series of the Earth Orientation Parameters (EOP) which relate the terrestrial to the celestial frame as a function of time. These adjustments are performed over the complete period of observations.

The International Earth Rotation Service (IERS) was established in 1987 by the IAU and the IUGG and it started operation on 1988 January 1st (IAG, 1988). It replaces the International Polar Motion Service (IPMS) and the earth-rotation section of the Bureau International de l'Heure (BIH). IERS is a member of the Federation of Astronomical and

Geophysical Data Analysis Services (FAGS). It is responsible for defining and maintaining a conventional terrestrial reference system based on observing stations that use the high-precision techniques in space geodesy ; defining and maintaining a conventional celestial reference system based on extragalactic radio sources, and relating it to other celestial reference systems ; and determining the earth orientation parameters connecting these systems, i.e., the terrestrial and celestial coordinates of the pole and universal time.

Several laboratories contribute to the work of IERS by analysing the above mentioned VLBI observations on the basis of common models and constants. The Central Bureau of IERS performs a global combination of these results with similar ones obtained by laser ranging to the Moon (LLR) and to artificial satellites (SLR). By the nature of the observing techniques, the celestial frame realized in this global analysis is based solely on VLBI, while the terrestrial frame and the EOP include a large contribution of satellite geodesy (IERS, 1989).

This paper first describes the IERS System in some detail. The implementation by the Central Bureau of the system maintenance process is then outlined, with application to the most recent realization of the celestial frame. Finally the link to FK5 and the future extension to the HIPPARCOS stellar frame are discussed.

## THE IERS REFERENCE SYSTEM

The IERS Reference System is composed of several parts : the IERS standards, the IERS reference frames, and the corresponding series of the Earth Orientation Parameters, which are consistent with one another at a few milliarcsecond level.

### *IERS Standards*

The IERS standards used in 1988 are the MERIT Standards (Melbourne et al., 1983) including Update No 1 ; the IERS Standards (1989) are under preparation (McCarthy, 1989). They consist of a set of constants and models used by the IERS Analysis Centres for VLBI, LLR and SLR, and by the Central Bureau in the combination of results. The values of the constants are adopted from recent analyses ; in some cases they differ from the current IAU and IAG conventional ones. The models represent, in general, the state of the art in the field concerned.

### *IERS Reference Frames*

The IERS reference frames consist of the IERS Terrestrial Reference Frame (ITRF) and IERS Celestial Reference Frame (ICRF) ; both frames are realized through lists of coordinates of fiducial points : terrestrial sites or compact extragalactic radio sources.

*Terrestrial frame.* The origin of the ITRF is located at the center of mass of the Earth, with an uncertainty of 10cm. The length unit is the metre (SI). The IERS Reference Pole and Reference Meridian are consistent with the corresponding directions in the BIH Terrestrial System (BTS) within 0.003". The BIH reference pole was adjusted to the Conventional International Origin (CIO) in 1967; it was then kept stable independently until 1987. The uncertainty of the tie of the BIH reference pole with the CIO was 0.03" (Boucher and Feissel, 1984).

*Celestial frame.* Guinot (1979) proposed that the definition of the celestial reference frame be attached to the directions of extragalactic sources. The maintainance of the frame would then be based on the stability of the set of the selected objects, no attempt being made to re-adjust the origins of the frame. The recommendations of the IAU/TUGG Working group MERIT (Wilkins and Mueller, 1986), endorsed by the IAU in 1985, follow the same lines. The analyses of the Central Bureau of IERS implement these recommendations.

The origin of the ICRF is at the barycentre of the solar system. The direction of the polar axis is the one given for epoch J2000.0 by the IAU 1976 Precession and the IAU 1980 Theory of Nutation. The origin of right ascensions is such that the right ascension of 3C 273 is 12h 29m 6.6997s. The initial definition was based on 23 radio sources available in three VLBI reference frames derived by the Goddard Space Flight Center (GSFC), JPL and the U.S. National Geodesy Survey (NGS) from observations from 1978 through 1987; it is described by Arias *et al.* (1988).

### ***The Earth Orientation Parameters***

The IERS Earth Orientation Parameters (EOP) are the parameters which describe the rotation of the ITRF to the ICRF as a function of time, in conjunction with the conventional precession and nutation models. They model the unpredictable part of the Earth's motion. They consist of five parameters : the coordinates of the terrestrial pole ( $x$ ,  $y$ ) ; universal time (UT1), related to the Greenwich mean sidereal time (GMST) by a conventional relationship (Aoki *et al.*, 1982) ; the offsets in longitude and in obliquity ( $d\psi$ ,  $d\epsilon$ ) of the celestial pole with respect to its position defined by the conventional IAU precession/nutation models.

Shortly after the adoption of the IAU 1980 Theory of Nutation (Seidelmann, 1982), the VLBI observations started to show evidence of inaccuracies in some of its components, reaching 0.01" in the principal term, 0.005" in the annual term and 0.001" in several other terms in longitude, some of the obliquity components also have inaccuracies of 0.001 - 0.002" ; in addition, the precession constant might require a correction of about 0.003"/year (Herring *et al.* 1986). In the analysis of observations, these model deficiencies would propagate unevenly in the source positions, giving rise to local systematic errors and to misorientation of the frame, both at the level of several milliarcseconds. To avoid these effects, the VLBI analyses in the framework of IERS include the estimation of  $d\psi$ ,  $d\epsilon$ , for each session. Such solutions entail fixing *a priori* the values of  $d\psi$  and  $d\epsilon$  for one date ; the numerical values chosen reflect themselves in the orientation of the derived celestial frame (an alternative procedure is the direct adjustment of corrections to some of the terms of the models).

### **MAINTENANCE OF THE IERS CELESTIAL REFERENCE FRAME**

The initial realization of the IERS Celestial Reference Frame, RSC(IERS) 88 C 01, (Arias *et al.*, 1988) included a total of 228 extragalactic radio sources.

In the normal process of IERS global analyses, the ICRF can be re-evaluated whenever new information is available. This is a maintainance process, in which strict rules are applied, with the aim of insuring the consistency of the direction of axes with the initial definition, while improving the accuracy of the existing sources and extending the frame to new sources. The practical implementation which led to RSC(IERS) 89 C 01, published in the IERS Annual Report for 1988, is described below.

The adjustment of the celestial reference frame is one part in a process which also embodies the terrestrial frame and the series of EOP over several years. This approach makes it possible to compare the corresponding elements in the various solutions, thus providing an external check of the consistency of the models used. In the case of the celestial frames, the model for comparisons is a three-angle rotation (see below). The consistency checks are based on a comparison of rotation angles between frames with systematic differences between time series of universal time and of the celestial pole offsets (Altamimi *et al.* 1989). The results of the comparisons characterize the link of the individual systems with the IERS System.

### *Classification of contributing catalogs*

The individual frames which are to contribute to the *maintenance* of axes are selected according to the consistency of their link to the IERS System, and to their density and precision. Another class of frames, still dense and precise but less consistent with the IERS System, is used to *densify* the combined frame when it contains additional sources. Finally, the less dense and consistent frames are only *compared* to the combined one. The individual frames available for the 1989 analysis are described in Table 1.

Table 1 - Individual reference frames : number of sources (n), rms formal uncertainty (s) and declination interval (d). Unit for s : 0.001".(1)

Frame	Total n	Primary n s	Secondary n s	Complem. n s	declination limits (°)
<b>Maintenance</b>					
RSC(GSFC)	89 R 01 64	20 0.2	36 0.6	8 0.8	-30,+81
RSC(JPL)	89 R 02 189	16 2.5	173 2.7	- -	-45,+85
RSC(NGS)	89 R 01 50	20 0.2	30 0.7	- -	-30,+79
<b>Densification</b>					
RSC(JPL)	89 R 03 195	- -	173 4.2	4 15.0	-45,+85
<b>Comparison</b>					
RSC(NAOMZ) (2)	89 R 01 20	10 -	10 -	- -	- 4,+79
RSC(SHA) (3)	89 R 01 14	6 -	8 -	- -	0,+79

(1) The classification of sources is explained in the text.

(2) NAOMZ : National Astronomical Observatory, Mizuzawa (Japan)

(3) SHA : Shanghai Observatory (China).

### *Classification of sources*

The individual catalogues include well observed pointlike sources, with small uncertainties in their coordinates, and other sources, less observed or having sizeable structure, with coordinates of greater uncertainty. It is therefore necessary to select carefully the *primary sources* to be used in the maintenance of the frame. The 23 primary sources in the initial definition of the IERS frame were selected on the basis of structure, sky coverage, time stability and number of observations (Carter, 1987).

Radio sources common to at least two of the frames used for the maintenance or densification, but not in the primary list, are defined as *secondary sources*, while those belonging to only one individual frame are the *complementary sources*. Neither secondary nor complementary sources are used to define the directions of axes of the combined frame; only their positions relative to it are evaluated.

For the implementation of RSC(IERS) 89 C 01, the list of primary sources was re-examined. For this purpose, a preliminary combined frame was calculated with axes aligned on the initial definition by use of the 23 initial primary sources ; then the differences in coordinates in the two frames 88 C 01 and 89 C 01 for all common sources were compared to their standard errors derived from the combination. Former primary sources were kept in this category only if their change in coordinates was smaller than twice their standard error ; former secondary sources with a change in coordinates less than their standard error were upgraded to the primary status.

Following these criteria, four radio sources were deleted from the primary list : 0212+735, 0454-234, 1034-293 and 1803+784, and a new one was included: 1749+096. The sources 0212+735 and 1803+784 showed right ascension differences of  $2.9\sigma$  and  $3.5\sigma$  respectively, confirmed by structure in right ascension observed in their maps (Charlot, 1989).

### *The combination model*

The differences between catalogs are expressed in a direct trirectangle coordinate system with the x-axis and z-axis in the respective directions to the origin of right ascensions and pole of the IERS celestial frame. The model currently used considers a three-angle rotation matrix, assuming no systematic local deformation ; the validity of the latter assumption is a part of the examination of the results.

Let  $A_1(i)$ ,  $A_2(i)$ ,  $A_3(i)$  be the rotation angles between the combined reference frame and the individual frame  $i$  ;  $\alpha_{ij}$ ,  $\delta_{ij}$  are the coordinates of the source  $j$  in the frame  $i$ , and  $\alpha_{cj}$ ,  $\delta_{cj}$  its coordinates in the combined celestial reference frame. The respective equations of observation in right ascension and declination are :

$$\begin{aligned} + A_1(i) \operatorname{tg} \delta_{ij} \cos \alpha_{ij} + A_2(i) \operatorname{tg} \delta_{ij} \sin \alpha_{ij} - A_3(i) + \alpha_{cj} &= \alpha_{ij} \\ - A_1(i) \sin \alpha_{ij} + A_2(i) \cos \alpha_{ij} + \delta_{cj} &= \delta_{ij} \end{aligned} \quad (1)$$

The combination is performed in three steps.

- 1- Using only the three frames selected for the maintenance of the system, the coordinates of the primary sources in the combined frame and the relative orientations  $A_1(i)$ ,  $A_2(i)$ ,  $A_3(i)$  between it and the three individual frames are evaluated in a weighted least squares fit. The directions of axes of the combined frame are constrained to be aligned with the axes of RSC(IERS) 88 C 01.
- 2- The orientation of the densification frame relative to the combined frame is evaluated on the basis of the primary radio sources available in it.
- 3- The coordinates of secondary and complementary sources in the combined frame are obtained by applying to the individual frames the rotation angles derived in steps (1) and (2).

In the three steps, the equations of observation are weighted according to the formal uncertainties of the individual coordinates ; the formal uncertainties in the individual source positions below 0.00025" have been set to this value.

### *RSC(IERS) 89 C 01*

The combination described above led to the positions of 209 compact extragalactic radio sources of which 20 are primary, 177 secondary and 12 complementary. The formal uncertainties of the primary sources are in the range 0.0002" to 0.0004", which is consistent with the formal uncertainties in the individual frames. They agree well with the respective values for RSC(IERS) 88 C 01 given in the BIH Annual Report for 1987. For the secondary sources belonging only to JPL frames, we have adopted as formal uncertainty the largest value in the individual frames ; for the other secondary sources, the consistency between coordinates in the individual frames ranges from 0.0003" to 0.02".

57 additional extragalactic sources had coordinates in RSC(IERS) 88 C 01, whereas they were not present in the frames of Table 1 ; they can be considered as a complement of the new realization. The 266 sources of RSC(IERS) 89 C 01, including this complementary list, are plotted in Figure 1. Its extension south of its present limit, -45°, on the basis of recent observations (Ma, 1989), is planned.

The rotation angles of the frames of Table 1 to RSC(IERS) 89 C 01 are given in Table 2. The major part in these angles reflects the fact that the *a priori* fixing of the values of  $d\psi$  and  $d\epsilon$  for one of the observing sessions is made independently in the various analyses. After taking out the corresponding biases, the disagreement of the maintenance frames axes with the IERS one is under 0.0005", except for still unexplained discrepancies in the celestial pole offsets in longitude angles at the level of 0.005".

Comparisons between the individual frames, and between them and the combined one, show that local systematic deformations of the IERS celestial frame can be expected to be lower than 0.002" (Arias and Lestrade, 1989).

Table 2 - Relative orientation between the individual frames and RSC(IERS) 89 C 01. The rotation angles  $A_1$ ,  $A_2$ ,  $A_3$  transform the coordinates from the individual VLBI frames to the combined frame. N is the number of common radio sources. Unit : 0.001".

Individual frame	N	$A_1$	$A_2$	$A_3$
<b>Maintenance</b>				
RSC(GSFC) 89 R 01	64	$+1.28 \pm 0.09$	$+2.46 \pm 0.10$	$-0.15 \pm 0.07$
RSC(JPL) 89 R 02	162	$-0.04 \pm 0.06$	$-1.15 \pm 0.07$	$+0.07 \pm 0.04$
RSC(NGS) 89 R 01	50	$+0.31 \pm 0.10$	$-0.07 \pm 0.10$	$-0.24 \pm 0.08$
<b>Densification</b>				
RSC(JPL) 89 R 03	176	$+0.76 \pm 0.08$	$-3.03 \pm 0.08$	$+0.72 \pm 0.24$
<b>Comparison</b>				
RSC(NAOMZ) 89 R 01	20	$-1.30 \pm 0.37$	$-2.08 \pm 0.37$	$-0.19 \pm 4.06$
RSC(SHA) 89 R 01	14	$-1.85 \pm 0.41$	$-5.19 \pm 0.38$	$-1.63 \pm 4.33$

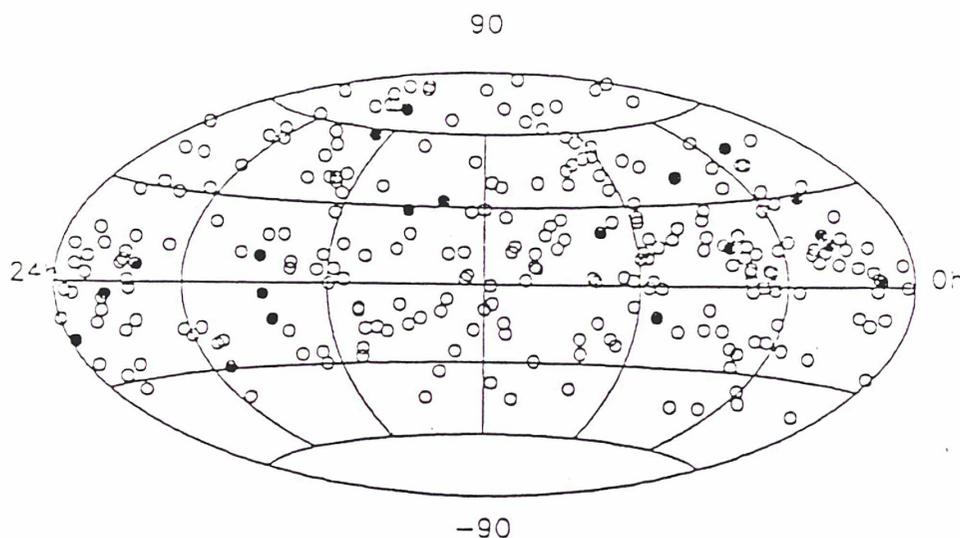


Figure 1. Sky distribution of the 266 radio sources of RSC(IERS) 89 C 01.  
Dark circles represent the primary sources.

#### EXTENSION OF THE IERS CELESTIAL REFERENCE FRAME TO GALACTIC FRAMES

The densest VLBI reference frames presently available contain a few hundreds of sources. The extragalactic frame is considered the best realization of a quasi-inertial reference frame because of its properties : it is kinematically stable (nuclei of galaxies and quasars being at cosmological distances, their apparent proper motions can be considered nonexistent), and its precision is at the milliarcsecond level. Nevertheless, it has two disadvantages relative to the stellar frames :

- a) it does not supply a large number of fiducial points (200-300 sources), and
- b) extragalactic radio sources are very faint objects ( $m > 13$ ) which are not optically observable, thus it is accessible only with the VLBI technique.

The observations of the astrometric satellite HIPPARCOS will contribute to the densification and accessibility of the extragalactic frame, if the satellite can accomplish its *nominal* mission. On the other hand, the astrometric qualities of the HIPPARCOS frame will be exploited only if it is linked to a quasi-inertial frame of similar precision. The HIPPARCOS reconstructed sphere will be affected by the galactic rotation at a rate of about  $0.007''/\text{year}$  (Lestrade *et al.* 1985). Being derived from a space telescope, its reference system will not be linked to the terrestrial equator and the ecliptic. For stars brighter than  $m = 9$ , the expected mean precision is  $0.002''$  in the positions and  $0.002''/\text{year}$  in the proper motions. It will observe about 120 000 stars brighter than  $m = 13$ .

Several possibilities have been envisaged to make the HIPPARCOS reference frame inertial (Mignard, 1989) :

- To link it to the VLBI frame by radio stars. Radio stars are members of our galaxy. Most are quite bright optically. The satellite HIPPARCOS has over one thousand of them in its observational program. They provide a direct link between the radio and optical frames.

- The Hubble Space Telescope (HST) will determine relative positions between extragalactic objects and nearby HIPPARCOS stars. There are 92 extragalactic objects for the HST and 173 HIPPARCOS "Super High priority" stars at small angular distances to link them. 52 radio sources in RSC(IERS) 89 C 01 had already been selected for the HIPPARCOS/ST proposal, giving prospect for a good link by this route (Argue, 1989).

Until the HIPPARCOS stellar frame becomes available, the IERS celestial frame can be made accessible by considering the rotation angles between it and the FK5 stellar frame (Fricke *et al.* 1988). The uncertainty of individual positions is evaluated to  $\pm 0.05''$  for the present epoch by Ma *et al.*, (1989) and Morrison *et al.* (1989) have shown that regional systematic errors are present in the FK5 at the level  $0.05'' - 0.10''$ . A preliminary evaluation, based on a comparison of 28 quasar positions brought to the FK5 frame through the AGK3RN catalog (Ma *et al.*, 1989) with the IERS ones, indicates that the rotation angle of the IERS celestial frame to the FK5 frame in the equator is  $-0.005''$  and that the polar axes of the two frames are consistent within  $0.04''$ , with an uncertainty of about  $0.02''$  due to the noise in the optical positions of quasars.

## SUMMARY

The current realization of the IERS Celestial Reference Frame contains 266 extragalactic sources of which 76 have position uncertainties smaller than  $0.001''$  and 117 sources are between  $0.001''$  and  $0.003''$ . The algorithm by which it is maintained insures the consistency of the successive versions at the best level achievable with the existing data ( $0.1\text{mas}$  in 1989). It allows the continuous improvement of the accuracy and distribution of the frame as new data become available.

Through the global IERS analysis, the IERS Celestial Reference Frame is indirectly related to the dynamical celestial reference frames used in satellite geodesy and Lunar Laser Ranging, and it is related directly to the IERS Terrestrial Reference Frame at the milliarcsecond level.

The IERS Celestial Reference Frame is the realization of a quasi-inertial frame at the level of  $0.002''$  in the individual source positions. The FK5 is another realization at the level of  $0.05 - 0.10''$ . The axes of two frames are in agreement within  $0.04''$ . Future connexion with the HIPPARCOS stellar frame through VLBI observations of radio stars and/or Hubble Space Telescope observations of quasars should extend the accessibility of the IERS celestial frame to optical observation of stars at the level of  $0.002''$ , if the nominal HIPPARCOS mission is achieved.

*Acknowledgment.* We are grateful to Chopo Ma and J.G. Williams for enlightening discussion of our work. This work was carried out during a stay of the first author at Paris Observatory and Bureau des Longitudes.

## REFERENCES

- ALTAMIMI, Z., ARIAS, E.F., BOUCHER, C., FEISSEL, M., 1989 : Earth Orientation determinations : some tests of consistency. *IAG Symposium 105*. Wilkins (ed.).
- AOKI, S., GUINOT, B., KAPLAN, G.H., KINOSHITA, H., MCCARTHY, D.D., SEIDELMANN, P.K.: 1982 : The new definition of Universal Time. *Astron. and Astrophys.* **105**, 359.
- ARIAS, E.F., FEISSEL, M., LESTRADE, J.-F.: 1988. An extragalactic celestial reference frame consistent with the BIH Terrestrial System (1987). *BIH Annual Report for 1987*, p.D-113. Observatoire de Paris.
- ARIAS, E.F., and LESTRADE, J.-F., 1989 : Extended astrometric comparisons between two dense VLBI extragalactic reference frames elaborated at the GSFC and the JPL. Submitted to *Astron. and Astrophys.*
- ARGUE, N., 1989 : The strategy adopted for linking HIPPARCOS to an extragalactic reference frame. *This volume*.
- BOUCHER, C., and FEISSEL, M., 1984 : Realization of the BIH Terrestrial System. *Proc. Internat. Symp. on Space Techniques for Geodynamics*, Somogyi and Reigber (eds). Res. Inst. of the Hungarian Acad. of Sci. (Sopron, Hungary), Vol. **1**, 235.
- CARTER, W.E., 1987 : IERS memorandum, 1 December 1987.
- CHARLOT, P., 1989 : 14 extragalactic radio sources mapped at 2.3 and 8.4 GHz with a 24 hour Crustal Dynamics Program VLBI experiment. *Astron. and Astrophys.* (in press).
- FRICKE, W., SCHWAN, H. and LEDERLE, T., 1988 : *Fifth Fundamental Catalogue (FK5)*, Part 1, Veröffentlichungen ARI, Heidelberg.
- GUINOT, B., 1979 : Basic problems in the kinematics of the rotation of the Earth, *IAU Symposium 82*, McCarthy and Pilkington (eds.), Reidel.
- HERRING, T.A., GWINN, C.R., and SHAPIRO, I.I., 1986 : Geodesy by radio interferometry : study of the forced nutation of the Earth, 1, Data analysis. *J. Geophys. Res.* **91**, 4745.
- IAG, 1988 : *Geodesist's Handbook*, Bull. Géod., **62**, 337.
- IERS, 1989 : *Annual Report for 1988*, Observatoire de Paris.
- LESTRADE, J.-F., PRESTON, R.A., MUTEL, R.L., NIELL, A.E. and PHILLIPS, R.B., 1988 : Linking the HIPPARCOS Catalog to the VLBI Inertial Reference System, high angular resolution structures and VLBI positions of 10 radio stars, *The Second F.A.S.T. Thinkshop*, J. Kovalevsky (ed).
- MA, C., SHAFFER, D.B., DE VEGT, C., JOHNSTON, K.J., and RUSSELL, J., 1989 : Precise radio source positions determined by Mark III VLBI : observations from 1979 to 1988 and a tie to the FK5, *Astron. J.* (in press).
- MA, C., 1989 : The realization of an inertial reference frame from VLBI. *This volume*.
- MCCARTHY (ed.), 1989 : IERS Standards. *IERS Technical Note No 3*, Observatoire de Paris.
- MELBOURNE, W. (ed.), 1983 : Project MERIT Standards. *USNO Circular 167*.
- MIGNARD, F., 1989 : HIPPARCOS and reference frames. *This volume*.
- MORRISON, L.V., GIBBS, P., HELMER, L., FABRICIUS, C., REQUIEME, Y., RAPAPORT, M., 1989 : *Proc. IAU Colloquium 100*, Reidel, in press.
- SEIDELMANN, P.K., 1982 : IAU 1980 Theory of nutation : the final report of IAU working group on nutation. *Celest. Mech.* **27**, 79.
- WILKINS, G.A., and MUELLER, I.I., 1986 : Joint summary report of the IAU/IUGG Working Groups MERIT and COTES, *Bull. Geod.* **60**, 85.

**DISCUSSION**

- J. Hughes : For how many sources, especially primary sources, have you maps ?
- F. Arias : In addition to the two sources mentioned, the Charlot (1989) paper includes maps of 0229+131, 0234+285, 0528+134, 0552+398, 0851+202, 1404+286, all of them being primary sources.
- N. Argue : I have examined the IERS Catalogue. I do not have the actual figures with me, but my recollection is that there are some 50-60 sources on the Hubble Space Telescope selection for linking to HIPPARCOS.
- F. Arias : There are 52 radio sources in the IERS Celestial Reference Frame which have been selected for the HIPPARCOS/Hubble Space Telescope link.
- G. Westerhout : Are you planning to introduce a new version of the celestial reference frame each year?
- F. Arias : The analysis will be done every year, but a new version will be computed only when justified by the expected improvement in quality or extension of the frame.
- H. Walter : You process several independent observation catalogues. To which extent have these catalogues been reduced in compliance with the current IAU conventions of astronomical constants ?
- F. Arias : The most questionable part of IAU conventions in this work is the precession and nutation models. While these models are used in the individual data analyses to refer the frames to the J2000.0 System, the selected individual frames had been obtained by adjusting for each session the celestial pole offsets, which frees the frames from related systematic errors.

AN EXTRAGALACTIC CELESTIAL REFERENCE FRAME CONSISTENT WITH  
THE BIH TERRESTRIAL SYSTEM (1987)

Arias E.F.(1) - International Earth Rotation Service (IERS)  
Bureau des Longitudes - 77, avenue Denfert-Rochereau, F-75014 Paris

Feissel M. - International Earth Rotation Service (IERS)  
Observatoire de Paris - 61, avenue de l'Observatoire, F-75014 Paris

Lestrade J.-F. - International Earth Rotation Service (IERS)  
Bureau des Longitudes - 77, avenue Denfert-Rochereau, F-75014 Paris

(1) Consejo Nacional de Investigaciones Cientificas Tecnicas de la Republica  
Argentina and La Plata Observatory.

A reference frame of 228 extragalactic compact radio sources (north of  $-45^\circ$ ), has been compiled on the basis of four individual extragalactic reference frames obtained by the Goddard Space Flight Center (GSFC), the Jet Propulsion Laboratory (JPL) and the U.S. National Geodetic Survey (NGS). The analysis is based on earlier studies (Arias et al., 1988). The combined reference frame, RSC(IERS)88 C 01, and the four individual frames are described in Table 1. They include three classes of objects, primary, secondary and complementary sources, as defined in the text.

Table 1 - Individual and compiled reference frames : number of sources (n) and rms formal uncertainty (s). Unit for s : 0.001"

Frame	Total n	Primary n s	Secondary n s	Complem. n s	Reference
1 RSC(GSFC)88 R 01	56	23 0.4	33 1.7		Ma et al.(1988)
2 RSC(JPL) 88 R 02	142	16 1.8	64 3.5	62 4.2	Sovers et al.(1988)
3 RSC(NGS) 88 R 01	37	23 0.4	14 1.0		Carter and Robertson (1988)
4 RSC(GSFC)88 R 02	166		52 2.0	67 2.0	Ma (1988)
RSC(IERS)88 C 01	228	23	76	129	this study

The four individual reference frames are referred to J2000 by means of standard IAU 1976/1980 precession and nutation models. However, they were all adjusted with corrections to the coordinates of the celestial pole as defined by these models. The corresponding corrections to the models are analysed by Sovers and Edwards (1988).

The direction of axes of the combined celestial reference frame is defined by the coordinates adopted for a list of selected compact radio sources. The selection of objects is based on geometrical and physical considerations such as structure, sky coverage, time stability and number of observations. The 23 radio sources in this list (Carter, 1987) are the primary sources of the combined celestial reference frame. The coordinates adopted for the primary sources are evaluated from the combination of catalogues (1), (2) and (3) in Table 1.

Radio sources common to at least two of the four individual frames which are not in the primary list provide the secondary sources of the combined frame, while those belonging to only one individual frame are the complementary sources. Neither secondary nor complementary sources are used to define the directions of axes of the combined frame, only their positions relative to it have been evaluated. It should be noted that the celestial frame (4) had been obtained by adopting the ERP from BIH Circular D and that the station positions had been adjusted in each experiment (Ma, 1988). Therefore, the radio sources in this catalogue are used only for densification.

The compilation of the combined frame has been performed in two steps :

1 - The coordinates of the primary sources in the combined frame and the relative orientations,  $A1(i)$ ,  $A2(i)$ ,  $A3(i)$ , between it and the four individual frames ( $i = 1, 2, 3, 4$ ) are evaluated with a weighted least squares fit. The directions of the axes are fixed by the following constraints :

$$A1(1) + A1(2) + A1(3) = 0$$

$$A2(1) + A2(2) + A2(3) = 0$$

$$A3(1) + A3(2) + A3(3) = 0$$

2 - The coordinates of secondary and complementary sources in the combined frame are obtained by applying to the four individual frames the rotation angles derived in step (1).

In the two steps, the formal errors in the individual source positions below 0.00025" have been constrained to this limit value.

The relative orientations between the four catalogues in Table 1 and the combined frame are shown in Table 2. They are evaluated on the basis of common sources.

Table 2 - Relative orientations between the individual and the combined reference frames in the sense combined-individual.  
N is the number of common sources. Unit : 0.001".

Individual frame	N	A1	A2	A3
RSC(GSFC)88 R 01	56	-1.53 +/- 0.07	-0.92 +/- 0.07	-0.20 +/- 0.06
RSC(JPL) 88 R 02	142	+0.37 +/- 0.16	-0.49 +/- 0.14	+0.36 +/- 0.07
RSC(NGS) 88 R 01	37	-0.19 +/- 0.09	+0.82 +/- 0.09	-0.52 +/- 0.08
RSC(GSFC)88 R 02	166	-2.66 +/- 0.04	-0.01 +/- 0.04	-0.37 +/- 0.03

The orientation between the combined extragalactic reference frame is consistent with the earlier defined BIH celestial frame within 0.002".

The coordinates of the 228 sources in the combined frame RSC(IERS)88 C 01 are listed in Table 3. The formal uncertainties of the primary sources are in the range 0.0002" to 0.0004", which is consistent with the formal uncertainties in the individual frames. For the secondary sources, the consistency between coordinates in the individual frames ranges from 0.001" to 0.010".

#### REFERENCES

- Arias, E.F., Boucher, C., Feissel, M. and Lestrade, J.-F.: 1988. Realisation of a celestial system based on VLBI geodynamics programs. IAU Colloquium 100, Eichhorn (ed.). In press.
- Carter, B.: 1987. IERS Memorandum, December 1987.
- Carter, B. and Robertson, D.: 1988. BIH Annual Report for 1987, p. D-23.
- Ma, C. et al.: 1988. BIH Annual Report for 1987, p. D-9.
- Ma, C.: 1988. Private communication.
- Sovers, O.J. and Edwards, C.D.: 1988. Precession and long-term nutation from VLBI observations, BIH Annual Report for 1987, p. D-109.
- Sovers, O.J.: 1988. BIH Annual Report for 1987, p. D-17.

Table 3 -

## RADIO SOURCE COORDINATES

RSC(IERS) 88 C 01

SOURCE	STS (1)	CAT (2)	RIGHT ASCENSION			DECLINATION			UNCERTAINTY (3)	
			H	M	S	°	'	"	S	"
0008-264	C	2	0	11	1.246952	-26	12	33.37618	0.000127	0.00236
0016+731	C	4	0	19	45.786339	73	27	30.01765	0.000131	0.00062
0019+058	C	2	0	22	32.441303	6	8	4.27010	0.000044	0.00195
0048-097	S	2	0	50	41.317371	-9	29	5.20893	0.000494	0.00378
0104-408	C	2	1	6	45.108429	-40	34	19.95762	0.000211	0.00242
0106+013	P	1 2 3	1	8	38.771097	1	35	0.31868	0.000012	0.00028
0111+021	C	2	1	13	43.145177	2	22	17.31639	0.000140	0.00264
0113-118	C	2	1	16	12.522568	-11	36	15.43691	0.000471	0.00655
0119+041	S	2	1	21	56.861647	4	22	24.73579	0.000022	0.00344
0133+476	S	2	1	36	58.594782	47	51	29.10216	0.000154	0.00087
0138-097	C	4	1	41	25.832072	-9	28	43.67290	0.000046	0.00056
0149+218	C	4	1	52	18.059056	22	7	7.70011	0.000070	0.00099
0201+113	C	2	2	3	46.657336	11	34	45.36466	0.000134	0.02206
0202+149	S	2	2	4	50.413995	15	14	11.04460	0.000021	0.00089
0202+319	C	4	2	5	4.925406	32	12	30.09643	0.000045	0.00068
0212+735	P	1 2 3	2	17	30.813295	73	49	32.62218	0.000055	0.00026
0224+671	S	1 2 3 4	2	28	50.051340	67	21	3.03063	0.000201	0.00174
0229+131	P	1 3	2	31	45.894089	13	22	54.71736	0.000013	0.00027
0234+285	P	1 2 3	2	37	52.405705	28	48	8.99041	0.000014	0.00026
0235+164	P	1 2 3	2	38	38.930124	16	36	59.27599	0.000012	0.00035
0237-233	C	2	2	40	8.174916	-23	9	15.73693	0.000878	0.01213
0239+108	C	2	2	42	29.171004	11	1	0.72965	0.000052	0.00169
0256+075	C	2	2	59	27.076756	7	47	39.64306	0.000050	0.00246
0259+121	C	2	3	2	30.540663	12	18	56.84138	0.003960	0.05987
0300+470	P	1 2 3	3	3	35.242244	47	16	16.27625	0.000022	0.00029
0309+411	S	2	3	13	1.962262	41	20	1.18350	0.000334	0.00346
0316+413	S	1 2	3	19	48.160099	41	30	42.10516	0.000018	0.00215
0326+277	S	2	3	29	57.669423	27	56	15.49989	0.000153	0.00220
0332-403	C	2	3	34	13.654803	-40	8	25.39372	0.000182	0.00240
0333+321	S	2	3	36	30.107638	32	18	29.34329	0.000016	0.00167
0336-019	S	2	3	39	30.937829	-1	46	35.80353	0.000011	0.00389
0338-214	C	4	3	40	35.607765	-21	19	31.17040	0.000199	0.00080
0342+147	C	2	3	45	6.416620	14	53	49.56229	0.000203	0.00326
0355+508	S	1	3	59	29.747205	50	57	50.16354	0.000110	0.00073
0400+258	C	2	4	3	5.586573	26	0	1.50130	0.000726	0.00969
0402-362	C	2	4	3	53.750038	-36	5	1.90711	0.000144	0.00232
0406+121	S	2	4	9	22.008779	12	17	39.84811	0.000018	0.00240
0414-189	C	4	4	16	36.544533	-18	51	8.33829	0.000074	0.00088
0420-014	S	1	4	23	15.800732	-1	20	33.06272	0.000080	0.00085
0420+417	C	2	4	23	56.009757	41	50	2.72077	0.000237	0.00355

Table 3 - (Cont.)

## RADIO SOURCE COORDINATES

RSC(IERS) 88 C 01

SOURCE	STS	CAT	RIGHT ASCENSION			DECLINATION			UNCERTAINTY (3)	
			H	M	S	°	'	"	S	"
	(1)	(2)								
0422+004	C	4	4	24	46.842076	0	36	6.33035	0.000054	0.00128
0425+048	C	2	4	27	47.570298	4	57	8.33386	0.000237	0.00413
0430+052	S	1 2	4	33	11.095517	5	21	15.62024	0.000083	0.00330
0434-188	S	2	4	37	1.482706	-18	44	48.61110	0.000072	0.00182
0438-436	C	2	4	40	17.179986	-43	33	8.59620	0.000187	0.00250
0440-003	C	2	4	42	38.660938	-0	17	43.41878	0.000524	0.00830
0440+345	C	2	4	43	31.597140	34	41	5.65708	0.002139	0.02926
0451-282	C	2	4	53	14.646484	-28	7	37.31654	0.000471	0.00601
0454-234	P	i 3	4	57	3.179268	-23	24	52.01849	0.000017	0.00031
0458-020	C	4	5	1	12.809888	-1	59	14.25401	0.000025	0.00123
0458+138	C	2	5	1	45.264458	13	56	7.32143	0.009927	0.16098
0454+844	S	2	4	8	42.362989	84	32	4.54452	0.000562	0.00251
0506+101	C	2	5	9	27.441413	10	11	44.84905	0.003977	0.06217
0507+179	C	2	5	10	2.368978	18	0	41.58837	0.000207	0.00361
0528+134	P	1 2 3	5	30	56.416779	13	31	55.15033	0.000012	0.00026
0529+075	C	4	5	32	38.983733	7	32	40.88386	0.374867	2.96000
0537-441	C	2	5	38	50.361343	-44	5	8.93025	0.000190	0.00258
0536+145	C	2	5	39	42.366120	14	33	45.56705	0.000251	0.00437
0544+273	C	2	5	47	34.149150	27	21	56.84662	0.000269	0.00411
0552+398	P	1 2 3	5	55	30.805629	39	48	49.16557	0.000016	0.00026
0556+238	C	2	5	59	32.033191	23	53	53.93238	0.000628	0.00900
0600+177	C	2	6	3	9.130541	17	42	16.81024	0.000198	0.00385
0605-085	S	2	4	7	59.699236	-8	34	49.97729	0.000085	0.00397
0607-157	C	2	6	9	40.950151	-15	42	40.67572	0.000327	0.00528
0642+214	C	2	6	45	24.097901	21	21	51.21623	0.001628	0.01449
0642+449	C	4	6	46	32.026025	44	51	16.59035	0.000055	0.00057
0648-165	C	4	6	50	24.581907	-16	37	39.72336	0.000028	0.00051
0657+172	C	2	7	0	1.525675	17	9	21.70502	0.000163	0.00303
0707+476	C	4	7	10	46.104877	47	32	11.14419	0.000068	0.00072
0716+714	C	4	7	21	53.448386	71	20	36.36505	0.000182	0.00108
0723-008	S	2	4	25	50.639970	-0	54	56.54372	0.000041	0.00249
0727-115	P	1 2 3	7	30	19.112481	-11	41	12.59939	0.000013	0.00029
0735+178	S	2	4	38	7.393837	17	42	19.00032	0.000018	0.00375
0736+017	C	4	7	39	18.033918	1	37	4.61948	0.000043	0.00055
0738+313	C	2	7	41	10.703352	31	12	0.23214	0.000378	0.00380
0742+103	S	1 2 3 4	7	45	33.059532	10	11	12.69298	0.000073	0.00264
0743-006	C	4	7	45	54.082276	-0	44	17.53825	0.000052	0.00185
0745+241	C	2	7	48	36.109401	24	0	24.11360	0.000058	0.00195
0748+126	S	2	7	50	52.045787	12	31	4.83012	0.000056	0.00070
0749+540	C	4	7	53	1.384649	53	52	59.63902	0.000113	0.00119

Table 3 - (Cont.)

## RADIO SOURCE COORDINATES

RSC(IERS) 88 C 01

SOURCE	STS	CAT	RIGHT ASCENSION			DECLINATION			UNCERTAINTY (3)		
			H	M	S	°	'	"	S	"	
	(1)	(2)									
0754+100	C	4	7	57	6.642930	9	56	34.85250	0.000032	0.00072	
0804+499	C	4	8	8	39.666397	49	50	36.53044	0.000062	0.00069	
0808+019	C	4	8	11	26.707239	1	46	52.22172	0.000059	0.00165	
0812+367	C	4	8	15	25.944872	36	35	15.14860	0.000049	0.00109	
0814+425	S	2	4	8	18	15.999781	42	22	45.41421	0.000049	0.00247
0820+560	C	4	8	24	47.236346	55	52	42.66995	0.000089	0.00067	
0823+033	S	2	4	8	25	50.338396	3	9	24.52240	0.000096	0.00071
0823-223	C	4	8	26	1.573447	-22	30	27.20786	0.000505	0.00553	
0827+243	C	2	8	30	52.086427	24	10	59.81949	0.000287	0.00427	
0828+493	C	4	8	32	23.216891	49	13	21.03880	0.000108	0.00143	
0834-201	C	4	8	36	39.215279	-20	16	59.50323	0.000061	0.00166	
0833+585	C	4	8	37	22.409672	58	25	1.84566	0.000111	0.00069	
0836+710	S	2	4	8	41	24.365654	70	53	42.17360	0.000607	0.00064
0851+202	P	1 2 3	8	54	48.874929	20	6	30.64118	0.000012	0.00027	
0859-140	S	2	4	9	2	16.830886	-14	15	30.87458	0.000670	0.01178
0859+470	C	2	9	3	3.989968	46	51	4.13590	0.000489	0.00500	
0906+015	C	4	9	9	10.091449	1	21	35.61753	0.000097	0.00243	
0917+449	C	4	9	20	58.458530	44	41	53.98714	0.000066	0.00086	
0919-260	C	4	9	21	29.353935	-26	18	43.38416	0.000145	0.00091	
0917+624	C	4	9	21	36.231184	62	15	52.18084	0.000091	0.00069	
0923+392	S	1 2 3 4	9	27	3.013966	39	2	20.85323	0.000056	0.00098	
0952+179	C	2	9	54	56.823659	17	43	31.22962	0.000770	0.01264	
0953+254	S	1	4	9	56	49.875478	25	15	16.04861	0.000036	0.00025
0954+658	C	4	9	58	47.245146	65	33	54.81711	0.000090	0.00070	
1004+141	C	2	10	7	41.498677	13	56	29.59522	0.000481	0.00671	
1020+400	C	4	10	23	11.565611	39	48	15.38538	0.000167	0.00152	
1034-293	P	1 2 3	10	37	16.079780	-29	34	2.81147	0.000021	0.00038	
1038+064	C	2	10	41	17.162579	6	10	16.92458	0.000037	0.00193	
1040+123	C	2	10	42	44.606007	12	3	31.26077	0.000355	0.00504	
1055+018	S	2	4	10	58	29.605208	1	33	58.82488	0.000049	0.00035
1104-445	C	2	11	7	8.693816	-44	49	7.61410	0.000219	0.00244	
1111+149	S	2	4	11	13	58.695466	14	42	26.95249	0.000029	0.00201
1116+128	C	2	11	18	57.301627	12	34	41.71641	0.000303	0.00647	
1123+264	S	2	4	11	25	53.711953	26	10	19.97931	0.000136	0.00033
1124-186	C	4	11	27	4.392460	-18	57	17.44078	0.000031	0.00056	
1127-145	C	2	11	30	7.052338	-14	49	27.38379	0.000142	0.00262	
1128+385	S	2	4	11	30	53.282656	38	15	18.54616	0.000131	0.00061
1144+402	S	1	4	11	46	58.297991	39	58	34.30436	0.000034	0.00021
1144-379	C	2	11	47	1.370498	-38	12	11.02053	0.000111	0.00198	
1148-001	C	2	11	50	43.870893	-0	23	54.20470	0.000077	0.00297	

Table 3 - (Cont.)

## RADIO SOURCE COORDINATES

RSC(IERS) 88 C 01

SOURCE	STS	CAT		RIGHT ASCENSION			DECLINATION			UNCERTAINTY (3)	
		(1)	(2)	H	M	S	°	'	"	S	"
1150+812	C		4	11	53	12.499369	80	58	29.15434	0.000217	0.00060
1156+295	C		4	11	59	31.833849	29	14	43.82687	0.000045	0.00074
1213-172	C		4	12	15	46.751754	-17	31	45.40200	0.000044	0.00087
1216+487	C		4	12	19	6.414814	48	29	56.16516	0.000073	0.00073
1219+285	S	1	4	12	21	31.690615	28	13	58.49900	0.000016	0.00097
1222+037	S		2 4	12	24	52.421887	3	30	50.29367	0.000056	0.00027
1226+023	S	1 2 3 4		12	29	6.699722	2	3	8.59894	0.000009	0.00040
1228+126	S		2 4	12	30	49.423299	12	23	28.04488	0.000089	0.00054
1244-255	S		2 4	12	46	46.801997	-25	47	49.28696	0.000227	0.00021
1252+119	C		4	12	54	38.255550	11	41	5.89658	0.000101	0.00145
1253-055	S	1 2 3 4		12	56	11.166532	-5	47	21.52434	0.000050	0.00188
1308+326	P	1 2 3		13	10	28.663878	32	20	43.78304	0.000015	0.00026
1313-333	C		2	13	16	7.985892	-33	38	59.17149	0.000199	0.00230
1334-127	S		2 4	13	37	39.782771	-12	57	24.69164	0.000020	0.00164
1342+662	C		2	13	43	45.959969	66	2	25.74230	0.000258	0.00129
1342+663	S		2 4	13	44	8.680029	66	6	11.64145	0.000273	0.01649
1349-439	C		2	13	52	56.535085	-44	12	40.38851	0.000230	0.00210
1354+195	S	1 2	4	13	57	4.436683	19	19	7.37166	0.000021	0.00088
1354-152	C		4	13	57	11.244996	-15	27	28.78526	0.000036	0.00055
1404+286	P	1 3		14	7	0.394402	28	27	14.68967	0.000015	0.00027
1413+135	C		4	14	15	58.817660	13	20	23.70547	0.000673	0.04258
1418+546	S	1 2	4	14	19	46.597453	54	23	14.78604	0.000104	0.00142
1430-178	C		2	14	32	57.690134	-18	1	35.24408	0.000392	0.00585
1502+106	S	1 2	4	15	4	24.979816	10	29	39.19899	0.000010	0.00117
1504+377	C		4	15	6	9.530026	37	30	51.13124	0.000069	0.00090
1504-166	S		2 4	15	7	4.787002	-16	52	30.26482	0.000030	0.00330
1510-089	S		2 4	15	12	50.532967	-9	5	59.82903	0.000003	0.00190
1511-100	C		4	15	13	44.893416	-10	12	0.26352	0.000037	0.00049
1514-241	C		4	15	17	41.813306	-24	22	19.47334	0.000173	0.00099
1519-273	S		2 4	15	22	37.676010	-27	30	10.78398	0.000101	0.00101
1538+149	C		4	15	40	49.491602	14	47	45.88380	0.000033	0.00108
1548+056	S	1	4	15	50	35.269255	5	27	10.44893	0.000000	0.00061
1555+001	S		2 4	15	57	51.434012	-0	1	50.41493	0.000032	0.00115
1606+106	C		4	16	8	46.203212	10	29	7.77473	0.000027	0.00084
1607+268	S	1	4	16	9	13.320196	26	41	28.95469	0.000006	0.00026
1611+343	S		2 4	16	13	41.064306	34	12	47.90798	0.000013	0.00170
1614+051	C		2	16	16	37.557858	4	59	32.72093	0.001370	0.01782
1622-253	C		4	16	25	46.891753	-25	27	38.32345	0.000043	0.00071
1624+416	C		4	16	25	57.669799	41	34	40.62965	0.000053	0.00059
1622-297	C		4	16	26	6.020566	-29	51	26.96675	0.000277	0.00141

Table 3 - (Cont.)

## RADIO SOURCE COORDINATES

RSC(IERS) 88 C 01

SOURCE	STS	CAT			RIGHT ASCENSION			DECLINATION			UNCERTAINTY (3)		
					H	M	S	°	'	"	S	"	
	(1)	(2)											
1633+382	S	1	2	4	16	35	15.492957	38	8	4.49980	0.000031	0.00157	
1637+574	P	1	3		16	38	13.456370	57	20	23.97927	0.000030	0.00027	
1638+398	S	2	4		16	40	29.632767	39	46	46.02609	0.000019	0.00008	
1642+690	P	1	3		16	42	7.848629	68	56	39.75634	0.000049	0.00026	
1641+399	S	1	2	3	4	16	42	58.809988	39	48	36.99224	0.000045	0.00111
1652+398	C		4		16	53	52.216849	39	45	36.60914	0.000048	0.00056	
1656+053	S	2	4		16	58	33.447404	5	15	16.44337	0.000313	0.00736	
1657-261	S	2	4		17	0	53.154243	-26	10	51.72463	0.000127	0.00385	
1706-174	C	2			17	9	34.345524	-17	28	53.36851	0.000070	0.00175	
1717+178	C	2			17	19	13.048610	17	45	6.43207	0.000190	0.00354	
1730-130	P	1	2	3	17	33	2.705776	-13	4	49.54713	0.000012	0.00028	
1732+389	C		4		17	34	20.578425	38	57	51.44154	0.000107	0.00105	
1738+476	C	2			17	39	57.128946	47	37	58.35876	0.000107	0.00158	
1739+522	C		4		17	40	36.977890	52	11	43.40683	0.000059	0.00057	
1741-038	P	1	2	3	17	43	58.856149	-3	50	4.61487	0.000013	0.00032	
1743+173	C		4		17	45	35.208141	17	20	1.42352	0.000079	0.00128	
1749+701	S	1	2	4	17	48	32.840221	70	5	50.76659	0.000090	0.00145	
1749+096	S	1	2	4	17	51	32.818585	9	39	0.72870	0.000067	0.00290	
1803+784	P	1	3		18	0	45.683831	78	28	4.01800	0.000085	0.00026	
1807+698	S	2	4		18	6	50.680541	69	49	28.10755	0.000159	0.00156	
1821+107	C	2			18	24	2.855433	10	44	23.76667	0.000075	0.00264	
1823+568	C		4		18	24	7.068317	56	51	1.49072	0.000059	0.00053	
1845+797	S	1	4		18	42	8.989578	79	46	17.12707	0.000155	0.00086	
1842+681	C		4		18	42	33.641531	68	9	25.22804	0.000128	0.00065	
1908-201	S	2	4		19	11	9.652956	-20	6	55.10999	0.000117	0.00185	
1920-211	C	2			19	23	32.189834	-21	4	33.33367	0.000276	0.00382	
1921-293	P	1	2	3	19	24	51.055980	-29	14	30.11896	0.000017	0.00035	
1923+210	S	1	4		19	25	59.605361	21	6	26.16046	0.000005	0.00149	
1928+738	S	1	3	4	19	27	48.494713	73	58	1.56926	0.000123	0.00099	
1933-400	C	2			19	37	16.217323	-39	58	1.55338	0.000571	0.00572	
1954+513	C		4		19	55	42.738271	51	31	48.54599	0.000067	0.00064	
1958-179	S	2	3	4	20	0	57.090480	-17	48	57.67276	0.000149	0.00253	
2007+777	C		4		20	5	30.998292	77	52	43.24754	0.000191	0.00058	
2005+403	C		4		20	7	44.944745	40	29	48.60826	0.000205	0.00234	
2008-159	C		4		20	11	15.710991	-15	46	40.25393	0.000037	0.00131	
2021+614	C		4		20	22	6.681725	61	36	58.80454	0.000084	0.00057	
2021+317	C		4		20	23	19.017438	31	53	2.30125	0.000108	0.00216	
2030+547	C	2			20	31	47.958386	54	55	3.14539	0.000340	0.00390	
2029+121	C	2			20	31	54.994320	12	19	41.33588	0.000106	0.00235	
2037+511	S	1	4		20	38	37.034710	51	19	12.66291	0.000060	0.00015	

Table 3 - (Cont.)

## RADIO SOURCE COORDINATES

RSC(IERS) 88 C 01

SOURCE	STS	CAT		RIGHT ASCENSION			DECLINATION			UNCERTAINTY (3)	
		(1)	(2)	H	M	S	°	'	"	S	"
2113+293	S	2	4	21	15	29.413392	29	33	38.36672	0.000022	0.00131
2121+053	P	1	3	21	23	44.517383	5	35	22.09406	0.000013	0.00029
2128-123	S	1	3 4	21	31	35.261753	-12	7	4.79536	0.000031	0.00111
2134+004	S	1 2 3 4		21	36	38.586335	0	41	54.21444	0.000089	0.00212
2136+141	C		4	21	39	1.309352	14	23	35.99301	0.000047	0.00094
2144+092	C		4	21	47	10.163024	9	29	46.67278	0.000035	0.00090
2145+067	S	1 2	4	21	48	5.458689	6	57	38.60509	0.000040	0.00223
2149+056	C		2	21	51	37.875446	5	52	12.95288	0.000056	0.00186
2155-152	S	1 2 3 4		21	58	6.281876	-15	1	9.32786	0.000035	0.00058
2200+420	S	1 2 3 4		22	2	43.291270	42	16	39.97967	0.000075	0.00093
2201+315	S	1	4	22	3	14.975788	31	45	38.27096	0.000000	0.00075
2210-257	C		4	22	13	2.367326	-25	29	28.27558	0.045507	0.63310
2216-038	P	1 2 3		22	18	52.037737	-3	35	36.87796	0.000013	0.00034
2223-052	S		4	22	25	47.259402	-4	57	1.39064	0.000038	0.00192
2227-088	C		4	22	29	40.084409	-8	32	54.43422	0.000025	0.00081
2230+114	S		4	22	32	36.408987	11	43	50.90388	0.000051	0.00051
2234+282	S	1 2	4	22	36	22.470849	28	28	57.41428	0.000061	0.00102
2243-123	S		4	22	46	18.232036	-12	6	51.27690	0.000108	0.00114
2245-328	C		2	22	48	38.686030	-32	35	52.18696	0.000163	0.00230
2251+158	S	1 2 3 4		22	53	57.747911	16	8	53.56096	0.000033	0.00123
2253+417	C		2	22	55	36.707559	42	2	52.53321	0.000102	0.00171
2255-282	C		4	22	58	5.963131	-27	58	21.25413	0.000258	0.00113
2320-035	C		2	23	23	31.953883	-3	17	5.02442	0.000046	0.00183
2328+107	C		4	23	30	40.852295	11	0	18.71022	0.000055	0.00124
2331-240	C		4	23	33	55.148889	-23	43	39.43135	0.035680	0.48780
2345-167	P	1 2 3		23	48	2.608529	-16	31	12.02029	0.000014	0.00032
2352+495	C		4	23	55	9.458160	49	50	8.34288	0.000168	0.00134
2355-106	C		2	23	58	10.882821	-10	20	8.61648	0.000188	0.00323

## Notes.

- 1 - Status of the source (see text).  
P : primary ; S : secondary ; C : complementary.
- 2 - Individual catalogue in which the source is available.  
1 : RSC(GSFC)88 R 01                      2 : RSC(JPL) 88 R 02  
3 : RSC(NGS) 88 R 01                      4 : RSC(GSFC)88 R 02
- 3 - Estimation of the uncertainties :

Primary sources : formal uncertainty derived from the adjustment (step 1).  
 Secondary sources : formal uncertainty derived from the adjustment (step 2),  
 taking into account the uncertainties of the rotation angles.  
 Complementary sources : based on the original catalogues uncertainties, taking  
 also into account the uncertainties of the rotation angles.

## Rapport Annuel de l'IERS pour 1988 (1989)

## 3 - IMPLEMENTATION OF THE IERS CELESTIAL REFERENCE FRAME

A reference frame of 209 extragalactic compact radio sources (North of  $-45^\circ$ ) has been compiled on the basis of individual extragalactic reference frames obtained in the 1989 global solutions at the Goddard Space Flight Center (GSFC), the Jet Propulsion Laboratory (JPL) and the U.S. National Geodetic Survey (NGS). Table II-3 describes the six individual VLBI reference frames submitted to the IERS by the various laboratories to be included in this Annual Report. The last line gives the combined extragalactic reference frame, RSC(IERS) 89 C 01. The radio source catalogues numbered from (1) to (4) in Table II-3 contributed to the implementation of the combined reference frame. Like its previous realisation, RSC(IERS) 89 C 01 contains three categories of objects : primary, secondary and complementary radio sources.

Table II-3 - Individual and compiled reference frames : number of sources (n), rms formal uncertainty (s) and declination interval (d). Unit for s : 0.001".

Frame	Total n	Primary n s	Secondary n s	Complem. n s	declination limits ( $^\circ$ )
(1) RSC (GSFC) 89 R 01	64	20 0.2	36 0.6	8 0.8	-30, +81
(2) RSC (JPL) 89 R 02	189	16 2.5	173 2.7	- -	-45, +85
(3) RSC (NGS) 89 R 01	50	20 0.2	30 0.7	- -	-30, +79
(4) RSC (JPL) 89 R 03	195	- -	173 4.2	4 15.0	-45, +85
RSC (NAOMZ) 89 R 01	20	- -	- -	- -	-04, +79
RSC (SHA) 89 R 01	14	- -	- -	- -	0, +79
RSC (IERS) 89 C 01	209	20 -	177 -	12 -	-45, +85

The four individual reference frames are referred to J2000.0 by means of standard IAU 1976/1980 precession and nutation models. To free the IERS celestial frame from inconsistencies due to the inaccuracy of these models, the four individual frames had been obtained in parallel to an adjustment of corrections to the direction of the celestial pole.

#### The method of combination

The directions of axes of the IERS celestial reference frame are defined by the coordinates adopted for a list of selected radio sources (see below). The equatorial coordinates of these sources in the combined frame and the relative orientations between the individual and the combined frames are solved for together by means of a weighted least squares fit. The combination is based on the sources common to at least two individual VLBI frames.

If  $A_1(i)$ ,  $A_2(i)$ ,  $A_3(i)$  are the rotation angles between the combined reference frame and the individual frame  $i$ ,  $\alpha_{ij}$ ,  $\delta_{ij}$  are the coordinates of the source  $j$  in the frame  $i$ , and  $\alpha_{jc}$ ,  $\delta_{jc}$  its coordinates in the combined celestial reference frame, the respective equations of observation in right ascension and declination are :

$$\begin{aligned} A_1(i) \operatorname{tg} \delta_{ij} \cos \alpha_{ij} + A_2(i) \operatorname{tg} \delta_{ij} \sin \alpha_{ij} - A_3(i) + \alpha_{jc} &= \alpha_{ij} \\ - A_1(i) \sin \alpha_{ij} + A_2(i) \cos \alpha_{ij} + \delta_{jc} &= \delta_{ij} \end{aligned} \quad (1)$$

Weights are assigned according to formal uncertainties in the individual VLBI reference frames.

#### The implementation of the combined frame

The axes of the combined celestial reference frame are aligned to the directions of axes of RSC(IERS)88 C 01 combined extragalactic reference frame (Arias et al. 1988). They are defined by the coordinates adopted for a list of selected compact radio sources.

The selection of objects is based on geometrical and physical considerations (structure, sky coverage, time stability and number of observations). The 20 sources in this list are the *primary sources* of the combined celestial reference frame. The list of primary sources to be included in this version of the IERS celestial reference frame was elaborated starting from the 1988 list of 23 objects (Carter, 1987). For this purpose a preliminary version of the RSC(IERS) 89 C 01 celestial reference frame has been performed, following the steps of the previous realisation (Arias et al. 1988), and it has been compared to the RSC(IERS) 88 C 01 reference frame. We have kept only the primary sources from the previous list which had changed their coordinates less than twice their uncertainty in the least squares solution, and we have added new sources with coordinate differences smaller than  $1\sigma$ . Following these criteria, four radio sources were deleted from the primary list : 0212+735, 0454-234, 1034-293 and 1803+784, and a new one was included: 1749+096 ; 0212+735 and 1803+784 showed right ascension differences of  $2.9\sigma$  and  $3.5\sigma$  respectively, confirmed by a structure in right ascension observed in their maps (Charlot, 1989). The coordinates adopted for the 20 primary sources are evaluated from the combination of the catalogues (1), (2) and (3) in Table II-3.

Radio sources common to at least two of the four individual frames (1), (2), (3), (4) in Table II-3, which are not in the primary list are defined as the *secondary sources* of the combined frame, while those belonging to only one individual frame are the *complementary sources*. Neither secondary nor complementary sources are used to define the directions of axes of the combined frame, only their positions relative to it have been evaluated. The celestial frame (4) of Table II-3 participates in the calculation of the coordinates of secondary and complementary sources ; it has been included only to densify the combined celestial reference frame.

RSC(IERS) 89 C 01 is compiled as follows.

- 1- The coordinates of the primary sources in the combined frame and the relative orientations  $A_1(i)$ ,  $A_2(i)$ ,  $A_3(i)$  between it and the three individual frames ( $i=1, 2, 3$ ) are evaluated with a weighted least squares fit. The directions of axes are constrained to be aligned with the axes of RSC(IERS) 88 C 01.
- 2- The orientation of the JPL densification frame (4) relative to the combined frame is evaluated on the basis of common primary radio sources.
- 3- The coordinates of secondary and complementary sources in the combined frame are obtained by applying to the four individual frames the rotation angles derived in steps (1) and (2).

In the three steps, the formal errors in the individual source positions below  $0.00025''$  have been set to this value.

*The results : Tables C-1, C-2, and C-3.*

The relative orientations between the four catalogues (1), (2), (3), (4) in Table II-3 and the combined extragalactic reference frame, evaluated on the basis of common radio sources, are shown in Table C-1, page II-33.

RSC(IERS) 89 C 01 is materialized by the positions of 209 compact extragalactic radio sources from which 20 are primary, 177 secondary and 12 complementary. Figure C-1, page II-42 shows the sky distribution of the primary radio sources defining the direction of axes of the combined frame. The coordinates of the 209 sources in RSC(IERS) C 01 are listed in Table C-3, page II-34. The formal uncertainties of the primary sources are in the range  $0.0002''$  to  $0.0004''$ , which is consistent with the formal uncertainties in the individual frames. They agree well with the respective values for RSC(IERS) 88 C 01 given in the BIH Annual Report for 1987. For the secondary sources belonging only to JPL frames, we have adopted as formal uncertainty the largest value in the individual frames ; for the other secondary sources, the consistency between coordinates in the individual frames ranges from  $0.0003''$  to  $0.02''$ .

The coordinates of the 57 extragalactic sources in RSC(IERS) 88 C 01 which are no longer present in this last realisation are listed in Table C-4 ; they can be considered as a complement of RSC(IERS) 89 C 01. The 266 sources of the IERS celestial reference frame, including this complement list are plotted in Figure C-2.

## 6 - TABLES AND FIGURES

Table C-1 - Relative orientation between the four individual frames included in the combination and RSC(IERS) 89 C 01. The rotation angles A1, A2, A3 transform the coordinates from the individual VLBI frames to the combined frame. N is the number of common radio sources. Unit : 0.001".

Individual frame	N	A1	A2	A3
RSC(GSFC) 89 R 01	64	+1.28±0.09	+2.46±0.10	-0.15±0.07
RSC(JPL) 89 R 02	162	-0.04±0.06	-1.15±0.07	+0.07±0.04
RSC(NGS) 89 R 01	50	+0.31±0.10	-0.07±0.10	-0.24±0.08
RSC(JPL) 89 R 03	176	+0.76±0.08	-3.03±0.08	+0.72±0.24

Table C-2 - Relative orientations between the two individual frames not included in the combination and RSC(IERS) 89 C 01. The rotation angles A1, A2, A3 transform the coordinates from the individual VLBI frames to the combined frame. N is the number of common radio sources. Unit : 0.001".

Individual frame	N	A1	A2	A3
RSC(NAOMZ) 89 R 01	20	-1.30±0.37	-2.08±0.37	-0.19±4.06
RSC(SHA) 89 R 01	14	-1.85±0.41	-5.19±0.38	-1.63±4.33

TABLE C-3 - Source coordinates in the IERS Celestial Reference Frame

RADIO SOURCE COORDINATES						RSC(IERS) 89 C 01				
SOURCE	STS	CAT	RIGHT ASCENSION			DECLINATION			UNCERTAINTY (3)	
			(1)	(2)	H M S	°	'	"	S	"
0008-264	S	2 4	0 11	1.246746	-26 12	33.37719	0.000108	0.00177		
0013-005	C	4	0 16	11.088946	- 0 15	12.55644	0.010554	3.04109		
0016+731	C	1	0 19	45.786119	73 27	30.01489	0.000255	0.00104		
0019+058	S	2 4	0 22	32.441207	6 8	4.26937	0.000039	0.00146		
0048-097	S	1 2 4	0 50	41.317306	- 9 29	5.21248	0.000042	0.00351		
0104-408	S	2 4	1 6	45.108038	-40 34	19.95914	0.000157	0.00167		
0106+013	P	1 2 3	1 8	38.771096	1 35	0.31861	0.000010	0.00017		
0111+021	S	2 4	1 13	43.145065	2 22	17.31514	0.000102	0.00185		
0112-017	S	2 4	1 15	17.099911	- 1 27	4.58823	0.000275	0.07488		
0113-118	S	2 4	1 16	12.521872	-11 36	15.43258	0.000127	0.00221		
0119+115	S	2 4	1 21	41.595028	11 49	50.41097	0.000057	0.00844		
0119+041	S	2 4	1 21	56.861603	4 22	24.73749	0.000053	0.00157		
0133+476	S	2 4	1 36	58.594819	47 51	29.10018	0.000063	0.00066		
0146+056	S	2 4	1 49	22.370953	5 55	53.55325	0.000137	0.02717		
0149+218	S	2 4	1 52	18.059016	22 7	7.69865	0.000065	0.00591		
0201+113	S	2 4	2 3	46.657118	11 34	45.38864	0.000070	0.01175		
0202+149	S	2 4	2 4	50.413936	15 14	11.04322	0.000040	0.00084		
0212+735	S	1 2 3 4	2 17	30.812934	73 49	32.61986	0.000397	0.00155		
0221+067	S	2 4	2 24	28.427621	6 59	23.47355	0.000330	0.05426		
0224+671	S	1 2 3 4	2 28	50.051194	67 21	3.02726	0.000358	0.00222		
0229+131	P	1 2 3	2 31	45.894086	13 22	54.71727	0.000011	0.00017		
0234+285	P	1 2 3	2 37	52.405711	28 48	8.99050	0.000011	0.00016		
0235+164	P	1 2 3	2 38	38.930129	16 36	59.27588	0.000010	0.00021		
0237-233	S	2 4	2 40	8.174664	-23 9	15.73858	0.000879	0.01204		
0239+108	S	2 4	2 42	29.170897	11 1	0.72709	0.000044	0.00097		
0256+075	S	2 4	2 59	27.076663	7 47	39.64040	0.000047	0.00202		
0259+121	S	2 4	3 2	30.546728	12 18	56.79338	0.000616	0.06229		
0300+470	P	1 2 3	3 3	35.242242	47 16	16.27593	0.000014	0.00018		
0306+102	S	2 4	3 9	3.623563	10 29	16.33430	0.000143	0.02616		
0309+411	S	2 4	3 13	1.962187	41 20	1.18137	0.000114	0.00158		
0316+413	S	1 2 3 4	3 19	48.159944	41 30	42.10234	0.000127	0.00141		
0326+277	S	2 4	3 29	57.669293	27 56	15.49834	0.000203	0.00259		
0332-403	S	2 4	3 34	13.654645	-40 8	25.39734	0.000157	0.00169		
0333+321	S	2 4	3 36	30.107589	32 18	29.34183	0.000050	0.00078		
0336-019	S	2 4	3 39	30.937787	- 1 46	35.80251	0.000060	0.00132		
0342+147	S	2 4	3 45	6.416440	14 53	49.55911	0.000113	0.00184		
0355+508	S	1 3	3 59	29.747001	50 57	50.16064	0.000104	0.00102		
0400+258	S	2 4	4 3	5.586560	26 0	1.49774	0.000725	0.00959		
0402-362	S	2 4	4 3	53.749893	-36 5	1.91155	0.000115	0.00151		
0406-127	C	4	4 9	5.772579	-12 38	48.18431	0.003109	0.04762		

TABLE C-3 - (CONT.)

RADIO SOURCE COORDINATES

RSC(IERS) 89 C 01

SOURCE	STS	CAT		RIGHT ASCENSION			DECLINATION			UNCERTAINTY (3)	
		(1)	(2)	H	M	S	°	'	"	S	"
0406+121	S	2	4	4	9	22.008718	12	17	39.84709	0.000041	0.00112
0420-014	S	1 2 3 4	4	4	23	15.800665	- 1	20	33.06523	0.000036	0.00084
0420+417	S	2	4	4	23	56.009747	41	50	2.71669	0.000223	0.00331
0425+048	S	2	4	4	27	47.570327	4	57	8.32852	0.000125	0.00227
0430+052	S	1 2	4	4	33	11.095423	5	21	15.62119	0.000056	0.00116
0434-188	S	2	4	4	37	1.482648	-18	44	48.61270	0.000070	0.00150
0438-436	S	2	4	4	40	17.179896	-43	33	8.60076	0.000150	0.00161
0440-003	S	2	4	4	42	38.660930	- 0	17	43.42274	0.000519	0.00805
0440+345	S	2	4	4	43	31.635299	34	41	6.66049	0.000136	0.00340
0446+112	S	2	4	4	49	7.671010	11	21	28.61679	0.000114	0.01537
0451-282	S	2	4	4	53	14.646269	-28	7	37.31976	0.000361	0.00443
0454-234	S	1 3	4	4	57	3.179239	-23	24	52.01917	0.000020	0.00029
0458+138	S	2	4	5	1	45.270894	13	56	7.20985	0.000213	0.00987
0459+060	S	2	4	5	2	15.445515	6	9	7.58668	0.000557	0.13161
0500+019	S	2	4	5	3	21.197032	2	3	4.69888	0.000338	0.08830
0502+049	S	2	4	5	5	23.184654	4	59	42.76840	0.000254	0.04866
0454+844	S	2	4	5	8	42.363518	84	32	4.54313	0.000419	0.00066
0506+101	S	2	4	5	9	27.457099	10	11	44.59937	0.000071	0.00179
0507+179	S	2	4	5	10	2.369142	18	0	41.58049	0.000075	0.00182
0511-220	S	2	4	5	13	49.113310	-21	59	16.07674	0.001359	0.01919
0528+134	P	1 2 3	4	5	30	56.416780	13	31	55.15035	0.000010	0.00017
0537-441	S	2	4	5	38	50.361292	-44	5	8.93517	0.000172	0.00172
0537-158	S	2	4	5	39	32.005992	-15	50	30.25467	0.009722	0.15640
0536+145	S	2	4	5	39	42.366059	14	33	45.56185	0.000062	0.00169
0544+273	S	2	4	5	47	34.149073	27	21	56.84263	0.000087	0.00192
0552+398	P	1 2 3	4	5	55	30.805632	39	48	49.16548	0.000011	0.00016
0556+238	S	2	4	5	59	32.033143	23	53	53.92519	0.000069	0.00142
0600+177	S	2	4	6	3	9.130288	17	42	16.80997	0.000081	0.00203
0605-085	S	2	4	6	7	59.699165	- 8	34	49.97831	0.000420	0.00622
0607-157	S	2	4	6	9	40.950062	-15	42	40.67898	0.000341	0.00521
0611+131	S	2	4	6	13	57.688722	13	6	45.25881	0.000361	0.02618
0642+214	S	2	4	6	45	24.099431	21	21	51.20430	0.000077	0.00249
0657+172	S	2	4	7	0	1.525515	17	9	21.70119	0.000060	0.00129
0722+145	S	2	4	7	25	16.808430	14	25	13.65470	0.000323	0.03457
0723-008	S	2	4	7	25	50.639919	- 0	54	56.54428	0.000049	0.00119
0727-115	P	1 2 3	4	7	30	19.112473	-11	41	12.59954	0.000010	0.00017
0735+178	S	2	4	7	38	7.393739	17	42	18.99910	0.000037	0.00082
0738+313	S	2	4	7	41	10.703306	31	12	0.22808	0.000105	0.00146
0742+103	S	1 2 3 4	4	7	45	33.059454	10	11	12.69358	0.000040	0.00293
0743+259	S	2	4	7	46	25.874154	25	49	2.13749	0.000125	0.00756

TABLE C-3 - (CONT.)

## RADIO SOURCE COORDINATES

RSC(IERS) 89 C 01

SOURCE	STS	CAT		RIGHT ASCENSION			DECLINATION			UNCERTAINTY (3)			
		(1)	(2)	H	M	S	°	'	"	S	"		
0745+241	S	2	4	7	48	36.109235	24	0	24.11123	0.000044	0.00092		
0748+126	S	2	4	7	50	52.045714	12	31	4.82863	0.000039	0.00092		
0754+100	S	2	4	7	57	6.642895	9	56	34.85245	0.000276	0.03702		
0805-077	S	2	4	8	8	15.537233	-7	51	9.90133	0.001002	0.01347		
0814+425	S	1	2	4	8	18	15.999529	42	22	45.41615	0.000097	0.00173	
0823+033	S	1	2	4	8	25	50.338282	3	9	24.52307	0.000048	0.00228	
0827+243	S	2	4	8	30	52.086304	24	10	59.81726	0.000285	0.00395		
0836+710	S	2	4	8	41	24.365591	70	53	42.17349	0.000376	0.00206		
0851+202	P	1	2	3	8	54	48.874933	20	6	30.64118	0.000010	0.00016	
0859-140	S	2	4	9	2	16.830759	-14	15	30.87186	0.000275	0.00437		
0859+470	S	2	4	9	3	3.990214	46	51	4.13690	0.000280	0.00447		
0912+029	S	2	4	9	14	37.913935	2	45	59.12357	0.000676	0.18364		
0920-397	S	2	4	9	22	46.418142	-39	59	35.06506	0.000733	0.00626		
0923+392	S	1	2	3	4	9	27	3.013747	39	2	20.85457	0.000063	0.00204
0925-203	S	2	4	9	27	51.824475	-20	34	51.23220	0.000524	0.00634		
0952+179	S	2	4	9	54	56.823526	17	43	31.22899	0.000770	0.01255		
0953+254	C	1		9	56	49.875302	25	15	16.04984	0.000073	0.00216		
1004+141	S	2	4	10	7	41.498565	13	56	29.59453	0.000483	0.00659		
1012+232	S	2	4	10	14	47.065330	23	1	16.57245	0.000182	0.01099		
1022+194	S	2	4	10	24	44.809612	19	12	20.40669	0.000269	0.02598		
1034-293	S	1	2	3	4	10	37	16.079723	-29	34	2.80946	0.000066	0.00136
1038+064	S	2	4	10	41	17.162462	6	10	16.92412	0.000034	0.00111		
1040+123	S	2	4	10	42	44.605886	12	3	31.26065	0.000356	0.00486		
1042+071	S	2	4	10	44	55.911186	6	55	38.27746	0.000239	0.04055		
1044+719	S	2	4	10	48	27.619902	71	43	35.93746	0.000211	0.00105		
1055+018	S	1	2	3	4	10	58	29.605152	1	33	58.82709	0.000017	0.00207
1104-445	S	2	4	11	7	8.694028	-44	49	7.61575	0.000202	0.00187		
1111+149	S	2	4	11	13	58.695412	14	42	26.95291	0.000470	0.00597		
1116+128	S	2	4	11	18	57.301520	12	34	41.71683	0.000303	0.00637		
1123+264	S	2	4	11	25	53.711843	26	10	19.97995	0.000036	0.00067		
1127-145	S	2	4	11	30	7.052589	-14	49	27.38741	0.000088	0.00170		
1128+385	S	2	4	11	30	53.282522	38	15	18.54714	0.000050	0.00078		
1144+402	S	1	3	11	46	58.297872	39	58	34.30748	0.000040	0.00133		
1144-379	S	2	4	11	47	1.370618	-38	12	11.02083	0.000090	0.00140		
1145-071	S	2	4	11	47	51.553627	-7	24	41.02836	0.000311	0.05982		
1148-001	S	2	4	11	50	43.870821	-0	23	54.20481	0.000077	0.00279		
1150+812	C	1		11	53	12.499025	80	58	29.15679	0.000001	0.00108		
1156-094	S	2	4	11	59	12.712903	-9	40	52.06579	0.001803	0.02611		
1156+295	C	1		11	59	31.833871	29	14	43.83097	0.000060	0.00200		
1219+285	C	1		12	21	31.690552	28	13	58.50303	0.000007	0.00210		

TABLE C-3 - (CONT.)

## RADIO SOURCE COORDINATES

RSC(IERS) 89 C 01

SOURCE	STS	CAT		RIGHT ASCENSION			DECLINATION			UNCERTAINTY (3)	
		(1)	(2)	H	M	S	°	'	"	S	"
1222+037	S	2	4	12	24	52.421837	3	30	50.29495	0.000035	0.00114
1226+023	S	1 2 3 4		12	29	6.699662	2	3	8.60177	0.000023	0.00172
1228+126	S	2	4	12	30	49.423261	12	23	28.04620	0.000308	0.00417
1244-255	S	2	4	12	46	46.802043	-25	47	49.28564	0.000064	0.00145
1253-055	S	1 2 3 4		12	56	11.166444	-5	47	21.52100	0.000071	0.00280
1302-102	S	2	4	13	5	33.014808	-10	33	19.43009	0.000214	0.03408
1308+326	P	1 2 3		13	10	28.663870	32	20	43.78292	0.000011	0.00017
1313-333	S	2	4	13	16	7.985890	-33	38	59.17023	0.000151	0.00185
1334-127	S	1 2	4	13	37	39.782684	-12	57	24.68947	0.000057	0.00190
1342+662	S	2	4	13	43	45.959427	66	2	25.74466	0.000127	0.00079
1342+663	S	2	4	13	44	8.679513	66	6	11.64338	0.000104	0.00054
1349-439	S	2	4	13	52	56.535154	-44	12	40.38703	0.000197	0.00179
1354+195	S	1 2 3 4		13	57	4.436648	19	19	7.37466	0.000042	0.00173
1354-152	S	2	4	13	57	11.244949	-15	27	28.78377	0.000159	0.02606
1404+286	P	1	3	14	7	0.394408	28	27	14.68968	0.000011	0.00017
1406-076	S	2	4	14	8	56.481189	-7	52	26.65118	0.000586	0.10233
1418+546	S	1 2 3 4		14	19	46.597474	54	23	14.78887	0.000145	0.00173
1430-178	S	2	4	14	32	57.690343	-18	1	35.24539	0.000292	0.00412
1445-161	S	2	4	14	48	15.054494	-16	20	24.59902	0.000378	0.05199
1502+106	S	1 2 3 4		15	4	24.979772	10	29	39.20091	0.000043	0.00089
1504-166	S	2	4	15	7	4.786951	-16	52	30.26562	0.000039	0.00134
1510-089	S	2	4	15	12	50.532924	-9	5	59.82788	0.000033	0.00110
1511-100	S	2	4	15	13	44.893376	-10	12	0.26216	0.000361	0.05811
1514-241	S	2	4	15	17	41.813297	-24	22	19.47203	0.000563	0.05303
1519-273	S	2	4	15	22	37.675897	-27	30	10.78272	0.000097	0.00153
1532+016	S	2	4	15	34	52.453035	1	31	4.33356	0.000378	0.09764
1548+056	S	1 2 3 4		15	50	35.269222	5	27	10.45062	0.000134	0.02241
1555+001	S	2	4	15	57	51.433936	-0	1	50.41234	0.000034	0.00106
1611+343	S	2	4	16	13	41.064274	34	12	47.90952	0.000042	0.00068
1614+051	S	2	4	16	16	37.556878	4	59	32.73678	0.000084	0.00266
1633+382	S	1 2 3 4		16	35	15.493031	38	8	4.50160	0.000114	0.00073
1637+574	P	1	3	16	38	13.456331	57	20	23.97916	0.000017	0.00017
1638+398	S	2	4	16	40	29.632749	39	46	46.02727	0.000048	0.00062
1642+690	P	1	3	16	42	7.848610	68	56	39.75618	0.000026	0.00017
1641+399	S	1 2 3 4		16	42	58.810042	39	48	36.99483	0.000137	0.00083
1655+077	C		4	16	58	9.011382	7	41	27.54267	0.000049	0.00121
1656+053	S	2	4	16	58	33.447203	5	15	16.44537	0.000116	0.00269
1657-261	S	2	4	17	0	53.154181	-26	10	51.72497	0.000063	0.00148
1706-174	S	2	4	17	9	34.345389	-17	28	53.36425	0.000062	0.00150
1717+178	S	2	4	17	19	13.048569	17	45	6.43546	0.000188	0.00336

TABLE C-3 - (CONT.)

## RADIO SOURCE COORDINATES

RSC(IERS) 89 C 01

SOURCE	STS	CAT		RIGHT ASCENSION			DECLINATION			UNCERTAINTY (3)	
		(1)	(2)	H	M	S	°	'	"	S	"
1730-130	P	1	2 3	17	33	2.705762	-13	4	49.54710	0.000010	0.00017
1738+476	S		2 4	17	39	57.128968	47	37	58.36262	0.000059	0.00081
1739+522	C	1		17	40	36.978101	52	11	43.40740	0.000102	0.00016
1741-038	P	1	2 3	17	43	58.856127	- 3	50	4.61538	0.000010	0.00018
1749+701	S	1	2 4	17	48	32.840370	70	5	50.76888	0.000383	0.00108
1749+096	P	1	2 3	17	51	32.818572	9	39	0.72913	0.000013	0.00022
1803+784	S	1	2 3 4	18	0	45.684744	78	28	4.01831	0.000635	0.00090
1807+698	S		2 4	18	6	50.680558	69	49	28.10954	0.000106	0.00057
1821+107	S		2 4	18	24	2.855283	10	44	23.77045	0.000046	0.00196
1908-201	S		2 4	19	11	9.652904	-20	6	55.10817	0.000066	0.00148
1920-211	S		2 4	19	23	32.189737	-21	4	33.33103	0.000067	0.00150
1921-293	P	1	2 3	19	24	51.055967	-29	14	30.11910	0.000012	0.00019
1923+210	S	1	2 3 4	19	25	59.605362	21	6	26.16194	0.000030	0.00226
1928+738	S	1	3	19	27	48.495191	73	58	1.56897	0.000262	0.00112
1933-400	S		2 4	19	37	16.217010	-39	58	1.55010	0.000567	0.00558
1936-155	S		2 4	19	39	26.657713	-15	25	43.04597	0.000091	0.01354
1958-179	S	1	2 3 4	20	0	57.090326	-17	48	57.67276	0.000106	0.00088
2008-159	S		2 4	20	11	15.710961	-15	46	40.25409	0.000084	0.01256
2021+614	S		2 4	20	22	6.681878	61	36	58.80493	0.000208	0.00249
2030+547	S		2 4	20	31	47.958663	54	55	3.14576	0.000294	0.00301
2029+121	S		2 4	20	31	54.994255	12	19	41.33901	0.000069	0.00154
2037+511	C	1		20	38	37.034928	51	19	12.66111	0.000097	0.00134
2113+293	S	1	2 4	21	15	29.413450	29	33	38.36547	0.000049	0.00173
2121+053	P	1	3	21	23	44.517376	5	35	22.09416	0.000011	0.00018
2128-123	S	1	2 3 4	21	31	35.261622	-12	7	4.79643	0.000142	0.00258
2131-021	S		2 4	21	34	10.309555	- 1	53	17.22140	0.000218	0.05896
2134+004	S	1	2 3 4	21	36	38.586265	0	41	54.21242	0.000068	0.00143
2145+067	S	1	2 3 4	21	48	5.458633	6	57	38.60231	0.000030	0.00164
2149+056	S		2 4	21	51	37.875381	5	52	12.95439	0.000049	0.00117
2155-152	S		2 3 4	21	58	6.281805	-15	1	9.32755	0.000010	0.00130
2200+420	S	1	2 3 4	22	2	43.291391	42	16	39.97754	0.000054	0.00253
2201+315	C	1		22	3	14.975802	31	45	38.26834	0.000047	0.00148
2216-038	P	1	2 3	22	18	52.037720	- 3	35	36.87814	0.000010	0.00019
2223-052	S		2 4	22	25	47.259270	- 4	57	1.39082	0.000039	0.00105
2227-088	S		2 4	22	29	40.084361	- 8	32	54.43518	0.000090	0.01841
2229+695	C		4	22	30	36.469579	69	46	28.08032	0.000235	0.00104
2230+114	S		2 4	22	32	36.408872	11	43	50.90383	0.000035	0.00079
2234+282	S	1	2 3 4	22	36	22.470839	28	28	57.41067	0.000014	0.00266
2243-123	S		2 4	22	46	18.231908	-12	6	51.27683	0.000045	0.00118
2245-328	S		2 4	22	48	38.685790	-32	35	52.18682	0.000129	0.00168

TABLE C-3 - (CONT.)

RADIO SOURCE COORDINATES						RSC(IERS) 89 C 01								
SOURCE	STS	CAT				RIGHT ASCENSION			DECLINATION		UNCERTAINTY (3)			
		(1)	(2)			H	M	S	°	'	"	S	"	
2251+158	S	1	2	3	4	22	53	57.747895	16	8	53.55845	0.000018	0.00179	
2253+417	S		2		4	22	55	36.707775	42	2	52.53344	0.000062	0.00111	
2254+074	S		2		4	22	57	17.303409	7	43	12.22520	0.000205	0.03685	
2254+024	S		2		4	22	57	17.563405	2	43	17.41929	0.000199	0.05312	
2318+049	S		2		4	23	20	44.856453	5	13	49.97900	0.000091	0.02237	
2320-035	S		2		4	23	23	31.953713	-	3	17	5.02370	0.000040	0.00117
2335-027	S		2		4	23	37	57.338706	-	2	30	57.55279	0.000428	0.11418
2345-167	P	1	2	3		23	48	2.608507	-16	31	12.02044	0.000011	0.00019	
2355-106	S		2		4	23	58	10.882401	-10	20	8.61243	0.000056	0.00135	

## Notes.

1 - Status of the source (see text).

P : primary ; S : secondary ; C : complementary.

2 - Individual catalogue in which the source is available.

1 : RSC(GSFC) 89 R 01            2 : RSC(JPL) 89 R 02  
 3 : RSC(NGS) 89 R 01            4 : RSC(JPL) 89 R 03

3 - Estimation of the uncertainties :

Primary sources : formal uncertainty derived from the adjustment (step 1).

Secondary sources : formal uncertainty derived from the adjustment (step 3),  
 taking into account the uncertainties of the rotation angles.  
 For sources in frames (2) and (4) we have adopted the largest  
 value of the formal uncertainty in the two individual frames.

Complementary sources : based on the original catalogues uncertainties,  
 taking also into account the uncertainties of the rotation  
 angles.

TABLE C-4 - Source coordinates in the IERS Celestial Reference Frame.  
Complement to RSC(IERS) 89 C 01.

SOURCE	RIGHT ASCENSION			DECLINATION			SIGMA R.A.	SIGMA D.	
	H	M	S	°	'	"	S	"	
0138-097	1	41	25.832034	-	9	28	43.67435	0.000046	0.00056
0202+319	2	5	4.925366	32	12	30.09498	0.000045	0.00068	
0338-214	3	40	35.607745	-	21	19	31.17170	0.000199	0.00080
0414-189	4	16	36.544515	-	18	51	8.33947	0.000074	0.00088
0422+004	4	24	46.842038	0	36	6.32920	0.000054	0.00128	
0458-020	5	1	12.809853	-	1	59	14.25501	0.000025	0.00123
0529+075	5	32	38.983686	7	32	40.88302	0.374867	2.96000	
0642+449	6	46	32.025896	44	51	16.58993	0.000055	0.00057	
0648-165	6	50	24.581898	-	16	37	39.72376	0.000028	0.00051
0707+476	7	10	46.104736	47	32	11.14391	0.000068	0.00072	
0716+714	7	21	53.448065	71	20	36.36484	0.000182	0.00108	
0736+017	7	39	18.033878	1	37	4.61938	0.000043	0.00055	
0743-006	7	45	54.082240	-	0	44	17.53831	0.000052	0.00185
0749+540	7	53	1.384479	53	52	59.63901	0.000113	0.00119	
0804+499	8	8	39.666246	49	50	36.53053	0.000062	0.00069	
0808+019	8	11	26.707199	1	46	52.22183	0.000059	0.00165	
0812+367	8	15	25.944763	36	35	15.14873	0.000049	0.00109	
0820+560	8	24	47.236167	55	52	42.67014	0.000089	0.00067	
0823-223	8	26	1.573450	-	22	30	27.20766	0.000505	0.00553
0828+493	8	32	23.216743	49	13	21.03904	0.000108	0.00143	
0834-201	8	36	39.215277	-	20	16	59.50297	0.000061	0.00166
0833+585	8	37	22.409480	58	25	1.84593	0.000111	0.00069	
0906+015	9	9	10.091410	1	21	35.61799	0.000097	0.00243	
0917+449	9	20	58.458404	44	41	53.98767	0.000066	0.00086	
0919-260	9	21	29.353942	-	26	18	43.38362	0.000145	0.00091
0917-524	9	21	36.230976	62	15	52.18138	0.000091	0.00069	
0954+658	9	58	47.244927	65	33	54.81786	0.000090	0.00070	
1020+400	10	23	11.565510	39	48	15.38626	0.000167	0.00152	
1124-186	11	27	4.392443	-	18	57	17.43962	0.000031	0.00056
1213-172	12	15	46.751730	-	17	31	45.40068	0.000044	0.00087
1216+487	12	19	6.414733	48	29	56.16649	0.000073	0.00073	
1252+119	12	54	38.255508	11	41	5.89798	0.000101	0.00145	
1413+135	14	15	58.817625	13	20	23.70691	0.000673	0.04258	
1504+377	15	6	9.530012	37	30	51.13262	0.000069	0.00090	
1538+149	15	40	49.491576	14	47	45.88510	0.000033	0.00108	
1606+106	16	8	46.203185	10	29	7.77594	0.000027	0.00084	
1607+268	16	9	13.320186	26	41	28.95590	0.000006	0.00026	
1622-253	16	25	46.891688	-	25	27	38.32230	0.000043	0.00071
1624+416	16	25	57.669815	41	34	40.63080	0.000053	0.00059	
1622-297	16	26	6.020495	-	29	51	26.96560	0.000277	0.00141

TABLE C-4 - (CONT.)

SOURCE	RIGHT ASCENSION			DECLINATION			SIGMA R.A.	SIGMA D.
	H	M	S	°	'	"	S	"
1652+398	16	53	52.216869	39	45	36.61017	0.000048	0.00056
1732+389	17	34	20.578452	38	57	51.44237	0.000107	0.00105
1743+173	17	45	35.208130	17	20	1.42429	0.000079	0.00128
1823+568	18	24	7.068417	56	51	1.49128	0.000059	0.00053
1845+797	18	42	8.990051	79	46	17.12752	0.000155	0.00086
1842+681	18	42	33.641724	68	9	25.22849	0.000128	0.00065
1954+513	19	55	42.738356	51	31	48.54598	0.000067	0.00064
2007+777	20	5	30.998705	77	52	43.24747	0.000191	0.00058
2005+403	20	7	44.944790	40	29	48.60818	0.000205	0.00234
2021+317	20	23	19.017461	31	53	2.30107	0.000108	0.00216
2136+141	21	39	1.309337	14	23	35.99237	0.000047	0.00094
2144+092	21	47	10.163001	9	29	46.67210	0.000035	0.00090
2210-257	22	13	2.367251	-25	29	28.27640	0.045507	0.63310
2255-282	22	58	5.963058	-27	58	21.25517	0.000258	0.00113
2328+107	23	30	40.852269	11	0	18.70905	0.000055	0.00124
2331-240	23	33	55.148828	-23	43	39.43254	0.035680	0.48780
2352+495	23	55	9.458180	49	50	8.34162	0.000168	0.00134

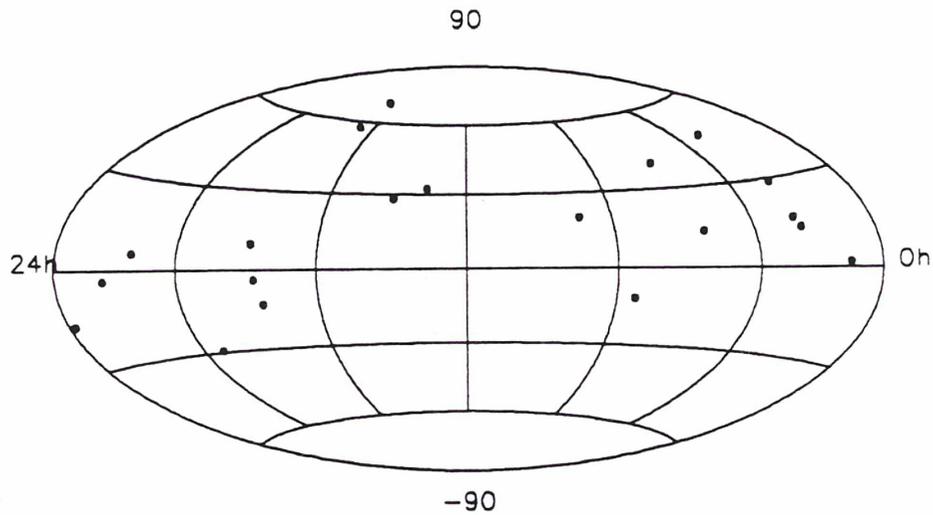


Figure C-1. Sky distribution of the 20 primary radio sources of RSC(IERS) 89 C 01.

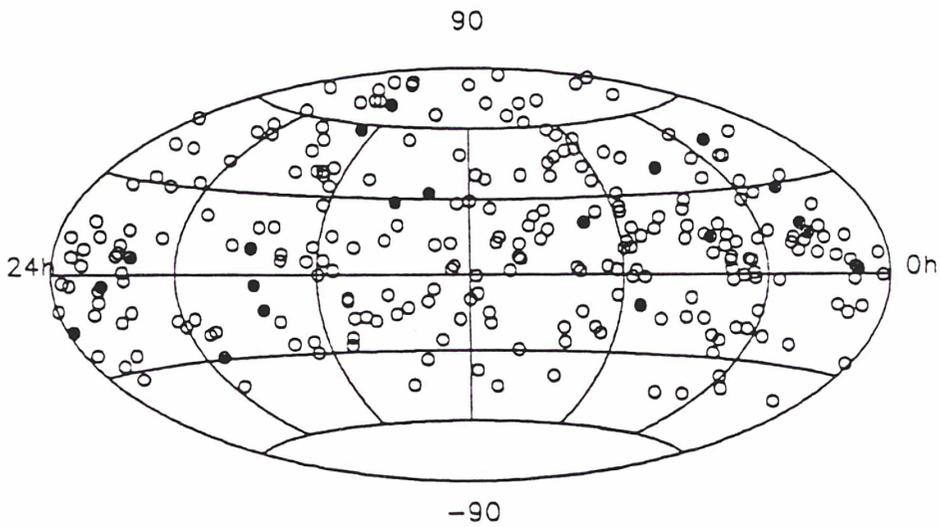


Figure C-2. Sky distribution of the 209 radio sources of RSC(IERS) 89 C 01 and its extension of the 57 sources of the complementary list in Table C-2.

## Références bibliographiques du Chapitre II

- ARIAS, E.F., FEISSEL, M., LESTRADE, J.-F., 1988 : *Astron. Astroph.* , **199**, 357.
- ARIAS, E.F., FEISSEL, M., LESTRADE, J.-F., 1988 : *BIH Annual Report for 1987*, D-113.
- ARIAS, E.F., FEISSEL, M., 1990 : in "Inertial Coordinate System on the Sky", IAU Symp. No 141, p. 114, Kluwer.
- ARIAS, E.F., LESTRADE, J.-F., 1990 : Global and regional astrometric comparison between two dense VLBI extragalactic reference frames (à paraître à *Astron. Astrophys.*).
- BEVINGTON, P.R., 1969 : *Data Reduction and Error Analysis for the Physical Sciences*, McGraw Hill Book Company.
- CARTER, W.E., ROBERTSON, D.S., 1984: *International Symposium on Space Techniques for Geodynamics, Proceedings I*, Research Institute of the Hungarian Academy of Sciences, 214.
- CARTER, W.E., ROBERTSON, D.S., PETTEY, J.E., TAPLEY, B.D., SCHUTZ, B.E., EANES, R.J., LUFENG, M. 1984: *Science* , **224**, 957.
- CARTER, W.E., ROBERTSON, D.S., FALLON, F.W., 1988: *BIH Annual Report for 1987*, D-23.
- HAZARD, C., SUTTON, J., ARGUE, A.N., KENWORTHY, C.M., MORRISON, L.V., MURRAY, C.A., 1971 : *Nature*, **233**, 89.
- HERRING, T., GWINN, C., SHAPIRO, I., 1986 : *J. Geophys. Res.*, **91**, 4745.
- HERRING, T., 1988 : *The Impact of VLBI on Astrophysics and Geophysics*, 371.
- IERS 1989 : *International Earth Rotation Service Annual Report for 1988*, II-9.
- MA, C., 1988 : Private communication.
- MA, C., SHAFFER, D.B., De VEGT, C., JOHNSTON, K.J., RUSSELL, J., 1990 : Precise radio source positions determined by MarkIII VLBI : observations from 1979 to 1988 and tie to the FK5, *Astron.J.*, **99**, (4), 1284.
- MELBOURNE, W., ANDERLE, R., FEISSEL, M., KING, R., MCCARTHY, D., SMITH, D., TAPLEY, B., VICENTE, R., 1983 : *U.S. Naval Obs. Circ.*, Nr 167.
- ROBERTSON, D.S., FALLON, F.W., CARTER, W.E., 1986 : *Astron.J.*, **91**, 6.
- RYAN, J.W., MA, C., 1985 : Crustal Dynamics Project Data Analysis, *NASA Technical Memorandum 86229*.
- SOVERS, O.J., 1986 : Private communication.
- SOVERS, O.J., EDWARDS, C.D., JACOBS, C.S., LANYI, G.J., TREUHAFT, R.N., 1988 : *BIH Annual Report for 1987*, D-17.

**III - LA MÉTHODE DES ARCS :  
ÉTUDE SUR UNE NOUVELLE ANALYSE  
DES DONNÉES VLBI**

## LA MÉTHODE DES ARCS

### Introduction

Dans l'analyse classique des observables VLBI, les repères céleste et terrestre sont construits simultanément. On détermine directement les coordonnées des sources radio, les coordonnées des stations et des paramètres d'orientation de la Terre ainsi que des corrections à la nutation à l'aide d'une solution globale de moindres carrés avec les retards et les vitesses de frange VLBI.

Nous explorons une nouvelle approche dans laquelle nous cherchons à construire le repère céleste indépendamment de la construction du repère terrestre et de l'orientation de la Terre dans l'espace. Pour cela, il faut adopter une stratégie d'observation qui consiste à observer "idéalement" deux sources radio de séparation arbitraire dans le ciel avec deux paires de radio télescopes aux extrémités d'une base VLBI.

Nous montrons comment construire une nouvelle observable en partant des retards et des vitesses de frange mesurés classiquement par le corrélateur VLBI. Un ensemble d'observations de ce type peut permettre de déterminer les coordonnées sphériques de toutes les sources par rapport à un plan et une origine arbitraires.

La méthode des arcs appliquée à des observations VLBI a été explorée par Dravskikh et al. (1975a, 1975b, 1978).

### La technique VLBI

La technique de la radio interférométrie à très grande base (Very Long Baseline Interferometry, VLBI) permet de déterminer les directions de radio sources à l'aide de télescopes séparés de plusieurs milliers de kilomètres pour arriver à des résolutions angulaires de l'ordre d'une fraction de seconde d'arc. Les signaux provenant d'une source radio sont enregistrés séparément à chaque station sur bande magnétique, avec des marques de temps. Chaque station est équipée d'un standard de fréquence horaire très stable. La stabilité des horloges assure la cohérence des signaux entre les deux radio télescopes. Dans un temps ultérieur, les bandes sont transportées au corrélateur pour leur corrélation.

La quantité directement mesurée est la différence de phase entre les signaux enregistrés aux deux antennes. On mesure aussi la dérivée temporelle de la phase interférométrique, d'où on obtient les mesures de fréquence de frange ("fringe rate"). La phase (ambiguë) et la fréquence de frange (pas précises) sont des quantités difficilement exploitables en géodésie et en astrométrie. On a développé la technique de synthèse de bande, qui consiste à réaliser des observations à large bande de radio fréquences pour déterminer le retard de groupe ("group delay").

### La géométrie de l'interféromètre

La Figure 1 schématise un radio interféromètre.  $\hat{i}_s$  représente le vecteur unitaire dans la direction à la radio source et  $\vec{B}$  est le vecteur de base qui rejoint l'antenne de référence à l'antenne lointaine.

Le retard géométrique d'arrivée du signal aux deux antennes est donné par l'expression

$$\tau_g = (\vec{B} \cdot \vec{\sigma}) / c \quad (10)$$

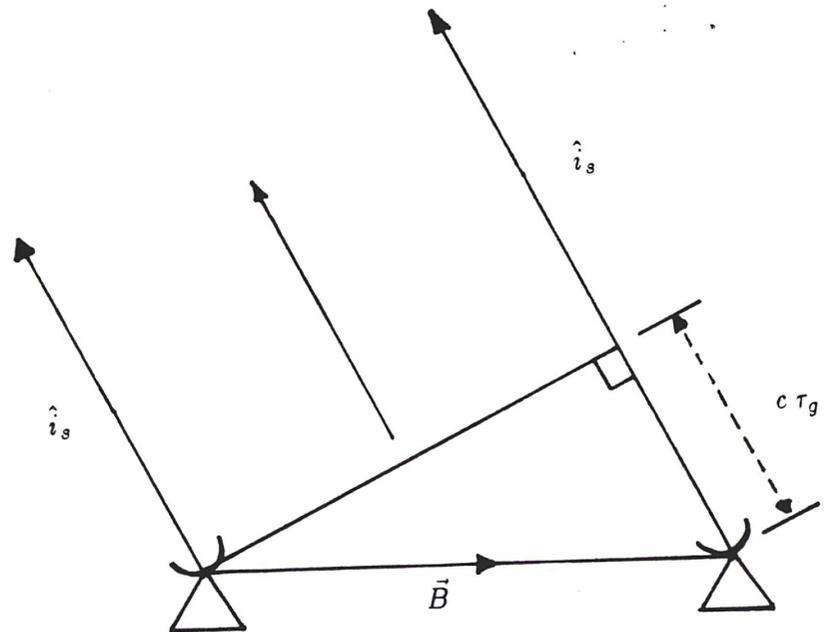


Figure 3. Géométrie de l'interféromètre

Dans un cas idéal le retard est d'origine entièrement géométrique. On suppose que les radio télescopes sont à la même hauteur dans une atmosphère plane non stratifiée qui fait que les retards atmosphériques additionnels soient égaux pour les deux stations. On suppose aussi qu'il n'y a pas de contributions instrumentales au retard (horloges parfaites, retard de câble nul, etc).

Si on exprime la direction à la radio source  $\vec{\sigma}$  en coordonnées équatorielles célestes, le retard prend la forme analytique :

$$\tau_g = - \frac{B}{c} \{ \sin \delta_b \sin \delta_s + \cos \delta_b \cos (L_s - L_b) \} \quad (11)$$

où  $L_s, \delta_s$  sont l'angle horaire et la déclinaison de la radio source et  $L_b, \delta_b$  l'angle horaire et la déclinaison du vecteur de ligne de base B.

Si  $\omega$  est la fréquence d'observation, la phase relative  $\phi$  ("interferometer fringe phase") des signaux reçus aux extrémités de la ligne de base est

$$\phi = \omega \tau_g \quad (12)$$

A cause de la rotation terrestre une des antennes se déplace plus rapidement que l'autre, produisant un décalage Doppler en fréquence entre les signaux reçus aux deux antennes. En résultat, la phase relative change à une vitesse  $F_R$  connue comme la fréquence de frange ("fringe rate")

$$F_R = \frac{d\phi}{dt} = \omega \frac{B}{c} \cos \delta_b \cos \delta_s \sin (L_s - L_b) \frac{dL_s}{dt} \quad (13)$$

La résolution angulaire de l'interféromètre dans la direction de la source est représentée par le changement de phase en fonction de l'angle horaire  $\theta$  de la source. Si  $B_T$  est la composante de la base dans la direction normale à la source, on a

$$\frac{d\phi}{d\theta} = - \frac{\omega}{c} B_T \quad (14)$$

La projection de la ligne de base sur le plan d'incidence du front d'onde a des composantes  $u, v$  dans les directions des ascensions droites et des déclinaisons, respectivement

$$u = \frac{\omega}{c} B \cos \delta_b \sin (L_s - L_b) \quad (15)$$

$$v = \frac{\omega}{c} B \{ \sin \delta_b \cos \delta_s - \cos \delta_b \sin \delta_s \cos (L_s - L_b) \} \quad (16)$$

A mesure que la Terre tourne, la projection de la ligne de base décrit dans le plan  $(u, v)$ , une ellipse avec son centre à  $(0, (\omega/c)B \sin \delta_b \cos \delta_s)$ , excentricité  $\cos \delta_s$  et demi grand-axe égal à la composante équatoriale de la base.



### *Les quantités observées*

La quantité observable fondamentale est la mesure de la différence de temps d'arrivée du signal radio provenant d'une source lointaine et atteignant successivement les deux antennes. Cette mesure est le *retard*, et sa dérivée temporelle, la *vitesse de retard*. Ces deux quantités permettent la détermination des coordonnées de la base, des coordonnées des sources radio observées, des paramètres d'orientation de la Terre, des paramètres de propagation atmosphérique, des corrections des horloges et des corrections aux modèles adoptés.

Le retard géométrique  $\tau_g$  est la composante principale du retard observé. Le retard mesuré avec la technique VLBI peut s'exprimer complètement comme la somme de plusieurs composantes:

$$\tau = \tau_g + \tau_{ion} + \tau_{tro} + \tau_{st} + \tau_{rel} + \tau_{ins} + \tau_{hor}$$

La contribution de l'atmosphère au retard est donnée par ses deux composantes : le retard ionosphérique  $\tau_{ion}$  et le retard troposphérique  $\tau_{tro}$ . C'est justement l'adoption des modèles de propagation qui pose les plus grandes difficultés théoriques et pratiques. Le retard ionosphérique est produit à cause des effets des particules chargées dans l'ionosphère. Il peut être calibré si l'on fait des observations simultanées à deux fréquences. Habituellement ceci est fait à 2.3 et 8.4 GHz (bandes S et X respectivement). Le retard troposphérique est le résultat de deux contributions, celles des composantes sèche et humide de la troposphère. La composante sèche, qui peut atteindre 7 nsec au zénith est calibrée grâce aux mesures de la pression, de la température et de l'humidité relative au sol qui sont injectés dans un modèle d'atmosphère adopté. Les effets de la composante humide sont, au plus, de 10% de ceux de la composante sèche, mais leurs variations temporelles et spatiales sont beaucoup plus importantes. C'est la partie du modèle la plus difficile à évaluer correctement. A présent on met au point les radiomètres à vapeur d'eau qui permettront de calibrer le retard troposphérique et de réduire l'incertitude actuelle qui est de 1 à 10cm. La modélisation imparfaite de l'atmosphère est responsable des erreurs accidentelles et systématiques dans les déclinaisons et dans la longueur des bases.

Le retard  $\tau_{st}$  provoqué par la structure des sources radio avec des morphologies complexes peut atteindre des valeurs de l'ordre du millième de seconde de degré.

Les effets relativistes  $\tau_{rel}$  tiennent compte de la déflexion des ondes radio à proximité des objets massifs du système solaire et de ses effets sur les horloges dans un système terrestre.

$\tau_{ins}$  est le retard instrumental dû au temps de propagation du signal dans les câbles qui relient le récepteur et l'enregistreur. Le retard des horloges  $\tau_{hor}$  est provoqué par l'écart relatif entre les horloges des stations.

L'équation (10) représente le retard géométrique. Une expression plus complète de cette équation serait :

$$\tau_g = -\frac{([P] [N] [X] [Y] [U] (\vec{B}_{terr} + \delta\vec{B}(t))) \cdot \hat{i}_s}{c}$$

$\hat{i}_s$  est le vecteur unitaire dans la direction de la source dans un système de référence céleste inertiel. L'expression entre accolades représente le vecteur de base dans ce même système.  $\vec{B}_{terr}$  est le vecteur de base exprimé dans un système de référence terrestre fixe par rapport à la croûte de la Terre et  $\delta\vec{B}(t)$  est la variation de ses composantes due à l'effet de marée terrestre, au mouvements des plaques tectoniques et dérives des continents. [P], [N] sont les matrices de la précession et de la nutation, [X], [Y], [U] sont les matrices qui tiennent compte des paramètres d'orientation de la Terre : coordonnées polaires (x, y) et UT1-UTC.

Dans un système inertiel, le vecteur  $\hat{i}_s$  à la radio source est fixe, et le vecteur  $\vec{B}$ , dans une première approximation, tourne à une vitesse angulaire constante  $\vec{\Omega}$ , qui est la vitesse angulaire de rotation de la Terre. En conséquence,  $\tau_g$  décrit une sinusoïde diurne d'expression

$$\tau_g = K_1 \sin(\Omega t + \phi) + K_2 \quad (17)$$

A cette équation on ajoute deux constantes  $c_0$  et  $c_1$  qui représentent les différences d'époque et de marche de l'horloge entre les deux sites, d'où il résulte :

$$\tau_g = K_1 \sin(\Omega t + \phi) + K_2 + c_0 + c_1 t \quad (18)$$

Si le vecteur  $\vec{\Omega}$  est considéré connu, il y a donc quatre paramètres indépendants à déterminer :

$$K_1, \phi, (K_2 + c_0) \text{ et } c_1.$$

Les composantes polaire et équatoriale du vecteur de base étant  $\vec{B}_{eq}$  et  $\vec{B}_{pol}$ , le retard géométrique peut s'écrire

$$\tau_g = - \vec{B}_{eq} \cdot \hat{s} - \vec{B}_{pol} \cdot \hat{s} \quad (19)$$

(c = 1)

Puisque  $\vec{B}_{pol}$  est parallèle au vecteur  $\vec{\Omega}$ , sa dérivée temporelle est nulle, et

$$\dot{\tau}_g = - \dot{\vec{B}}_{eq} \cdot \hat{s}. \quad (20)$$

Cette équation montre que la vitesse de retard n'est pas sensible à la composante polaire de la ligne de base.

En dérivant par rapport au temps l'équation (18) on obtient :

$$\dot{\tau}_g = \Omega K_1 \cos(\Omega t + \phi) + c_1, \quad (21)$$

expression qui contient trois paramètres indépendants  $K_1$ ,  $\phi$ ,  $c_1$ .

Cette dernière observable VLBI n'introduit pas de paramètre supplémentaire aux quatre de l'équation (18). Par conséquent, en mesurant le retard  $\tau(t)$  et  $d\tau/dt$  pour une seule source radio, on détermine ces quatre paramètres. Il y a cinq inconnues liées à la géométrie du système dans l'équation (11) : les deux coordonnées de la source radio, les trois composantes  $B_x$ ,  $B_y$ ,  $B_z$  de la base auxquelles il faut ajouter les termes des horloges : leur décalage constant  $c_0$  et leur dérive mutuelle,  $c_1$  soit sept inconnues au total. En observant trois sources, il y a 11 inconnues : les 7 paramètres cités ci-dessus plus deux ascensions droites et deux déclinaisons supplémentaires. Cependant, les observations VLBI de sources extragalactiques ne sont que très faiblement sensibles au mouvement de l'écliptique avec l'aberration orbitale, la ligne des équinoxes est donc mal déterminée et ne peut pas être prise naturellement comme origine des ascensions droites comme dans un repère de référence céleste défini dynamiquement tel que le FK5. L'ascension droite d'une des trois sources radio observées est, par conséquent, fixée arbitrairement et sert d'origine dans le plan de l'équateur. Le nombre d'inconnues est finalement de 10. Comme en observant trois sources radio on obtient trois mesures indépendantes de  $c_0$ ,  $K_1$  et  $\phi$  et une seule mesure pour  $c_1$ , on a donc 10 quantités mesurées au total. On voit donc qu'à l'aide des expressions de  $c_0$ ,  $c_1$ ,  $K_1$  et  $\phi$  données en fonction des composantes  $B_x$ ,  $B_y$ ,  $B_z$  de la base et des coordonnées  $\alpha_s$ ,  $\delta_s$  des sources radio on peut écrire un système de 10 équations.

tions avec 10 inconnues résolvable. On obtient donc les déclinaisons absolues dans le sens indiqué ci-dessus et les ascensions droites relatives des 3 sources radio et les 3 composantes de la base séparant les deux antennes. On s'affranchit donc du mouvement de l'équinoxe dans la construction du repère extragalactique VLBI.

## Développement analytique de la méthode des arcs dans le système équatorial

### *Rappel de trigonométrie sphérique*

Dans la suite on utilisera très souvent les formules fondamentales de la trigonométrie sphérique. On les présente ici appliquées au triangle sphérique ABC de la Figure 4 pour les repérer plus facilement quand on en aura besoin dans les déductions.

$$\cos a = \cos b \cos c + \sin b \sin c \cos A \quad (\text{F1})$$

$$\sin a \cos c = \sin b \cos c - \cos b \sin c \cos A \quad (\text{F2})$$

$$\sin a / \sin A = \sin b / \sin B = \sin c / \sin C \quad (\text{F3})$$

$$\cos C = -\cos B \cos A + \sin B \sin A \cos c \quad (\text{F4})$$

$$\sin C \cos a = \sin B \cos A + \cos B \sin A \cos c \quad (\text{F5})$$

L'équation (F1) permet de calculer la longueur de l'arc  $a$  entre deux points BC de la sphère.

Dans la Figure 5, P représente l'intersection du pôle du système avec la sphère céleste et  $(\alpha_1, \delta_1)$ ,  $(\alpha_2, \delta_2)$  sont les coordonnées équatorielles des deux sources radio ; B,  $S_1$  et  $S_2$  sont les intersections du vecteur ligne de base  $\vec{B}$  et des vecteurs unitaires  $\vec{\sigma}_1$ ,  $\vec{\sigma}_2$  dans les directions aux radio sources avec la sphère céleste. Si on fait les remplacements correspondants dans l'équation (F1) on obtient l'expression de l'arc A entre  $S_1$  et  $S_2$  :

$$\cos A = \sin \delta_1 \sin \delta_2 + \cos \delta_1 \cos \delta_2 \cos (\alpha_1 - \alpha_2) \quad (22)$$

Nous nous proposons maintenant d'exprimer l'arc A de l'équation (22) directement en fonction des quantités observées VLBI : le retard  $\tau$  et la vitesse de retard  $\dot{\tau}$  dans un cas de géométrie simple où:

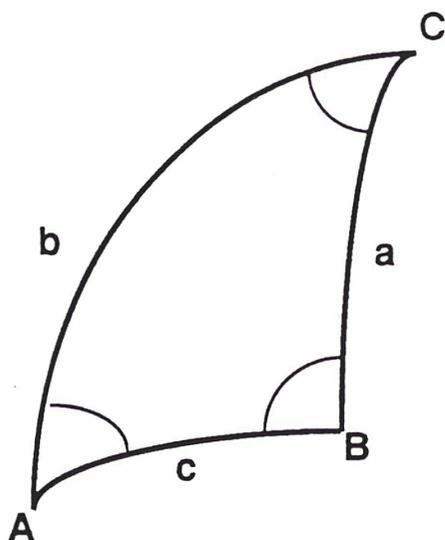


Figure 4. Triangle sphérique élémentaire

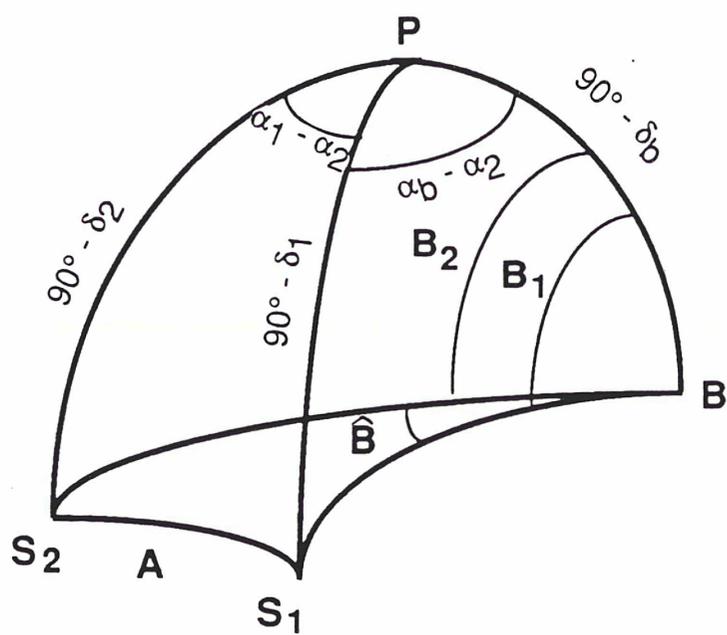


Figure 5. Positions relatives des sources radio  $S_1$ ,  $S_2$  et du vecteur de base  $\vec{B}$  dans la sphère céleste.



Le vecteur de base  $\vec{B}$  reste fixe dans le système S' solidaire de la Terre en rotation, mais il a des composantes variables dans le système S. La déclinaison  $\delta_b$  de la base est la même dans les deux systèmes car leurs axes polaires sont coïncidents, mais son ascension droite  $\alpha_b$  exprimée dans le système fixe dans l'espace varie avec le temps dans la forme  $\alpha_b = \alpha_{b0} + \alpha_G(t)$ , où  $\alpha_{b0}$  est l'ascension droite de la base à 0h du temps sidéral de Greenwich.

Le vecteur unitaire  $\vec{\sigma}$  dans la direction de la source radio reste fixe dans le système fixe dans l'espace S, mais ses composantes changent en fonction du temps avec  $\alpha_G$  dans le système solidaire à la Terre S'.

Si l'on cherche l'expression du retard dans le système fixe dans l'espace S on devra exprimer les composantes de  $\vec{\sigma}$  et de  $\vec{B}$  dans le même système et les remplacer dans l'équation (10), comme suit

$$\begin{aligned}\vec{B} &= (|\vec{B}| \cos \alpha_b(t) \cos \delta_b, |\vec{B}| \cos \alpha_b(t) \sin \delta_b, |\vec{B}| \sin \delta_b) \\ \vec{\sigma} &= (\cos \alpha_s \cos \delta_s, \sin \alpha_s \cos \delta_s, \sin \delta_s) \\ \tau_g &= -\frac{|\vec{B}|}{c} [\cos \delta_b \cos \delta_s \cos(\alpha_b - \alpha_s) + \sin \delta_b \sin \delta_s]\end{aligned}$$

La dérivée temporelle de  $\tau_g$  donne une expression pour la vitesse de retard

$$\dot{\tau}_g = -\frac{|\vec{B}|}{c} [\cos \delta_b \cos \delta_s \sin(\alpha_b - \alpha_s) \frac{\delta \alpha_b(t)}{\delta t}] \quad (23)$$

Pour chacune des deux sources il y a deux équations, une pour le retard et l'autre pour sa vitesse. Le résultat est le système :

$$\tau_1 = -\frac{|\vec{B}|}{c} \{ \cos \delta_b \cos \delta_1 \cos(\alpha_b - \alpha_1) + \sin \delta_b \sin \delta_1 \} \quad (24a)$$

$$\tau_2 = -\frac{|\vec{B}|}{c} \{ \cos \delta_b \cos \delta_2 \cos(\alpha_b - \alpha_2) + \sin \delta_b \sin \delta_2 \} \quad (24b)$$

$$\dot{\tau}_1 = \frac{|\vec{B}|}{c} \frac{\delta \alpha_G}{\delta t} (\cos \delta_b \cos \delta_1 \sin(\alpha_b - \alpha_1)) \quad (24c)$$

$$\dot{\tau}_2 = \frac{|\vec{B}|}{c} \frac{\delta \alpha_G}{\delta t} (\cos \delta_b \cos \delta_2 \sin(\alpha_b - \alpha_2)) \quad (24d)$$

Les quantités observées sont  $\tau_1, \tau_2, \dot{\tau}_1, \dot{\tau}_2$ ;  $|\vec{B}|$  et  $\delta\alpha_G/\delta t$  sont considérés comme paramètres connus. Aux équations (24) on doit ajouter (22) pour la longueur de l'arc entre les radio sources de coordonnées  $(\alpha_1, \delta_1)$ , et  $(\alpha_2, \delta_2)$ .

Analysons l'interprétation géométrique des quantités  $\tau_g$  et  $\dot{\tau}_g$  sur la Figure 5. Si on applique les expressions (F) aux quatre triangles sphériques  $PS_1S_2$ ,  $PBS_1$ ,  $PBS_2$  et  $BS_1S_2$  on obtient les identités suivantes, utiles à caractériser géométriquement les quantités observées :

$$\tau_i = \frac{|\vec{B}|}{c} \cos BS_i$$

$$\dot{\tau}_i = \frac{|\vec{B}|}{c} \frac{\delta\alpha_G \cos\delta_b \sin BS_i \sin B_i}{\delta t}$$

On a donc, pour la paire de sources observée simultanément avec deux antennes, cinq équations de la forme :

$$\tau_1 = f(\alpha_1, \delta_1, \alpha_b, \delta_b, |\vec{B}|)$$

$$\tau_2 = f(\alpha_2, \delta_2, \alpha_b, \delta_b, |\vec{B}|)$$

$$\dot{\tau}_1 = g(\alpha_1, \delta_1, \alpha_b, \delta_b, |\vec{B}|, \frac{\delta\alpha_G}{\delta t})$$

$$\dot{\tau}_2 = g(\alpha_2, \delta_2, \alpha_b, \delta_b, |\vec{B}|, \frac{\delta\alpha_G}{\delta t})$$

$$\cos A = h(\alpha_1, \delta_1, \alpha_2, \delta_2)$$

On veut exprimer l'arc entre la paire de sources radio en fonction des quantités directement observées avec la technique VLBI. Nous allons nous servir des équations (24) pour introduire dans l'expression (22) les retards et les vitesses de retard observés. En même temps, nous allons essayer d'éliminer tous les paramètres autres que les observables VLBI.

Au moyen de développements algébriques, nous avons réussi à trouver pour la longueur de l'arc entre les deux sources radio observées avec une ligne de base l'expression qui suit

$$\begin{aligned} \cos A = & \frac{\tau_1 \tau_2 c^2}{|\vec{B}|^2} + \frac{\dot{\tau}_1 \dot{\tau}_2 c^2}{|\vec{B}|^2 \left(\frac{\delta \alpha_{ij}}{\delta t}\right)^2} \sec^2 \delta_b + \left\{ \left( \frac{\tau_1 \tau_2 c^2}{|\vec{B}|^2} \right)^2 (\sec^2 \delta_b + \operatorname{tg}^2 \delta_b) - \right. \\ & \left( \frac{\tau_1 c}{|\vec{B}|} \right)^2 - \left( \frac{\tau_2 c}{|\vec{B}|} \right)^2 + \sec^2 \delta_b \left( \frac{\tau_1 \dot{\tau}_2 c^2}{|\vec{B}|^2 \frac{\delta \alpha_{ij}}{\delta t}} \right)^2 + \sec^2 \delta_b \left( \frac{\dot{\tau}_1 \tau_2 c^2}{|\vec{B}|^2 \frac{\delta \alpha_{ij}}{\delta t}} \right)^2 + \\ & \left. \sec^4 \delta_b \left( \frac{\dot{\tau}_1 \dot{\tau}_2 c^2}{|\vec{B}|^2 \left(\frac{\delta \alpha_{ij}}{\delta t}\right)^2} \right)^2 - \sec^2 \delta_b \left( \frac{\dot{\tau}_1 c}{|\vec{B}| \frac{\delta \alpha_{ij}}{\delta t}} \right)^2 - \sec^2 \delta_b \left( \frac{\dot{\tau}_2 c}{|\vec{B}| \frac{\delta \alpha_{ij}}{\delta t}} \right)^2 \right\}^{1/2} \quad (25) \end{aligned}$$

Dans cette équation on a éliminé les coordonnées équatorielles des radio sources et l'ascension droite de la ligne de base, mais il a été impossible de se débarrasser de sa déclinaison  $\delta_b$ . Evaluons l'ordre de grandeur des termes de l'équation (25) pour des valeurs réalistes adoptées pour les paramètres. Pour une ligne de base de  $10^4$  km, le retard est de l'ordre de  $3 \times 10^{-2}$  sec et la vitesse de retard de l'ordre de  $2 \times 10^{-6}$  sec/sec. Pour la vitesse de propagation du signal et la vitesse de rotation de la Terre on adopte les valeurs :

$$\begin{aligned} c &= 3 \times 10^5 \text{ km/sec} \\ \Omega_0 &= 7 \times 10^{-5} \text{ rad/sec} \end{aligned}$$

Si on écrit (25) sous la forme :

$$\cos A = \sum_{i=1}^{10} T_i$$

ses termes ont les valeurs suivantes :

$$\begin{aligned} T_1 &= 8 \times 10^{-1} & T_6 &= 6 \times 10^{-1} \sec^2 \delta_b \\ T_2 &= 7 \times 10^{-1} \sec^2 \delta_b & T_7 &= 6 \times 10^{-1} \sec^2 \delta_b \\ T_3 &= 6 \times 10^{-1} (\sec^2 \delta_b + \operatorname{tg}^2 \delta_b) & T_8 &= 5 \times 10^{-1} \sec^4 \delta_b \\ T_4 &= -9 \times 10^{-1} & T_9 &= -9 \times 10^{-1} \sec^2 \delta_b \\ T_5 &= -9 \times 10^{-1} & T_{10} &= -9 \times 10^{-1} \sec^2 \delta_b \end{aligned}$$

( $T_3 \dots T_{10}$  sont affectés de la racine carrée).

La dépendance de la sécante de la déclinaison de la ligne de base fait de celle-ci une formule peu utile. Son éventuelle utilisation impliquerait l'adoption d'une valeur a priori de  $\delta_b$  et la résolution de l'équation (25) avec une méthode itérative. Mais elle n'est pas applicable à tous les cas, car elle diverge pour les lignes de base Nord-Sud ou à hautes déclinaisons.

Pour éliminer cette difficulté, on va étudier un autre algorithme qui évite toute dépendance des coordonnées et de la rotation de la Terre. Le système équatorial qu'on a utilisé ci-dessus pour exprimer les observations n'est pas le mieux adapté à nos propos. Etant donné que la longueur de l'arc entre deux radio sources est une quantité invariante par rapport au système de coordonnées, on peut exprimer les équations dans n'importe quel système choisi arbitrairement.

### Développement analytique de la méthode des arcs dans un système lié à la base

#### *Cas du retard géométrique seul*

Nous allons indiquer avec  $\hat{e}$  le vecteur unitaire dans la direction du vecteur de base  $\vec{B}$ . Pour représenter les observations nous allons choisir un système défini par les directions du vecteur  $\hat{e}$  et du vecteur vitesse angulaire de rotation terrestre  $\vec{\omega}$ . Les directions  $\hat{i}_1, \hat{i}_2, \hat{i}_3$  des axes peuvent être, par exemple :

$$\hat{i}_1 = \hat{e} \quad \hat{i}_2 = \vec{\omega} \wedge \hat{e} \quad \hat{i}_3 \perp \hat{i}_1 \text{ et } \hat{i}_3 \perp \hat{i}_2$$

Dans ce nouveau système, l'orientation du vecteur unitaire  $\sigma$  dans la direction à la radio source est définie par ses cosinus-directeurs  $\alpha, \beta, \gamma$ , tel qu'on le montre dans la figure 7.

$$\begin{aligned} \alpha &= \hat{e} \cdot \vec{\sigma} \\ \beta &= (\vec{\omega} \wedge \hat{e}) \cdot \vec{\sigma} \\ \gamma &= \sqrt{1 - \alpha^2 - \beta^2} \end{aligned} \tag{26}$$

On commencera par analyser le cas le plus simple, celui où le retard est dû entièrement à la géométrie du problème, en négligeant les autres effets. Puis on considèrera toutes les composantes du retard, c'est à dire, le retard géométrique plus les effets instrumentaux et du milieu de propagation du signal.

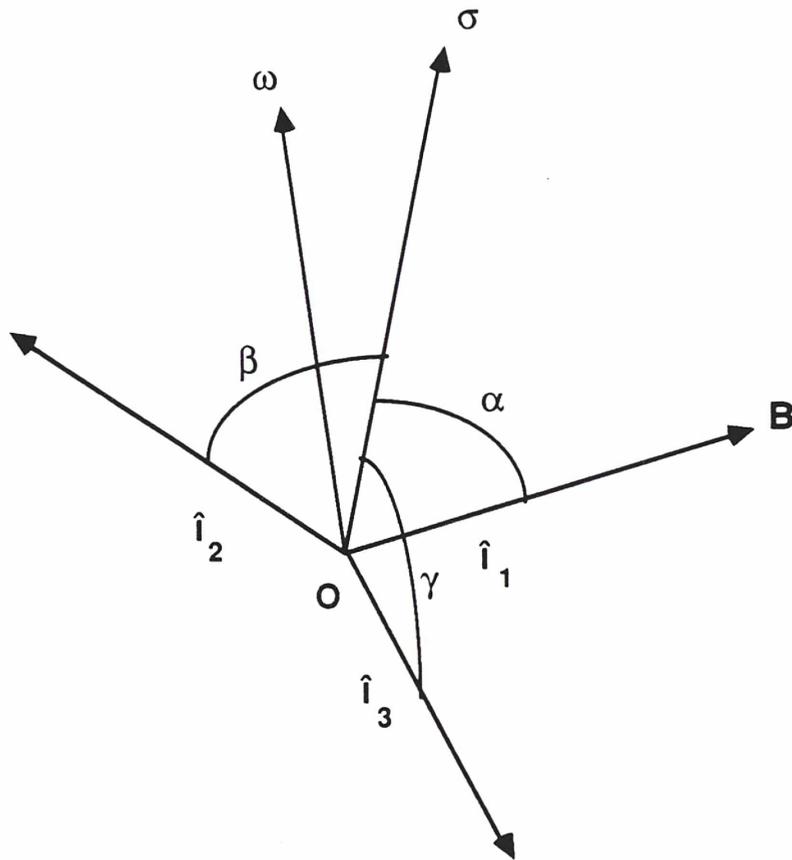


Figure 7. Système de référence défini par les directions de vecteurs de base  $\vec{B}$  et de vitesse angulaire de rotation terrestre  $\vec{\omega}$ .

Nous restons dans les cas de géométrie simple où l'on ne considère que la composante géométrique du retard et on néglige les effets du mouvement du pôle, de UT1-UTC, de la précession et de la nutation.

Le retard géométrique  $\tau_g$  et la vitesse de retard  $\dot{\tau}_g$  sont exprimés par les équations

$$\tau_g = \frac{|\vec{B}|}{c} (\hat{e} \cdot \vec{\sigma}) \quad (27)$$

$$\dot{\tau}_g = \Omega \frac{|\vec{B}|}{c} (\vec{\omega} \wedge \hat{e}) \cdot \vec{\sigma}$$

où  $\Omega$  représente le module du vecteur vitesse de rotation terrestre.

Tel qu'on l'a fait dans le paragraphe précédent, nous allons exprimer la longueur de l'arc entre deux sources radio observées simultanément aux extrémités de la base  $\vec{B}$  en fonction des quantités déterminées directement avec la technique VLBI :  $\tau_g$  et  $\dot{\tau}_g$ .

Dans nos hypothèses, nous allons considérer que la longueur de la ligne de base  $B$  et le module de la vitesse de rotation de la Terre sont inconnus, mais qu'on a des valeurs a priori  $B_0$  et  $\Omega_0$ .

$$B = B_0 (1 + \Delta B) \qquad \Omega = \Omega_0 (1 + \Delta \Omega) \qquad (28)$$

où  $\Delta B$  et  $\Delta \Omega$  sont de petites corrections sans dimension qui feront partie des inconnues de notre problème.

Les équations (26) donnent les cosinus-directeurs du vecteur  $\vec{\sigma}$  dans le système dans lequel on rapporte les observations. A l'aide des expressions (27) pour le retard géométrique et la vitesse de retard, et tenant compte des identités (28), on écrit les cosinus-directeurs  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$  en fonction des quantités observées  $\tau_g$ ,  $\dot{\tau}_g$  et des nouvelles inconnues  $\Delta B$ ,  $\Delta \Omega$

$$\alpha = c \tau_g / [B_0(1+\Delta B)]$$

$$\beta = c \dot{\tau}_g / [B_0 \Omega_0 (1+\Delta B)(1+\Delta \Omega)]$$

$$\gamma = \sqrt{1 - \alpha^2 - \beta^2}$$

$\Delta B$  et  $\Delta \Omega$  étant de petites quantités (de l'ordre de  $\approx 10^{-8}$ ),  $(1 + \Delta B)^{-1}$  et  $[(1 + \Delta B)(1 + \Delta \Omega)]^{-1}$  peuvent être développés seulement au premier ordre en  $\Delta B$  et  $\Delta \Omega$ . Ceci fait, on a :

$$\alpha = c \tau_g (1 - \Delta B) / B_0 \qquad (29a)$$

$$\beta = c \dot{\tau}_g (1 - \Delta B - \Delta \Omega) / B_0 \Omega_0 \qquad (29b)$$

Pour simplifier la notation, nous allons adopter trois variables auxiliaires  $x$ ,  $y$ ,  $z$ . Ces variables sont calculées à partir du retard et de la vitesse de frange et avec les valeurs initiales adoptées pour la longueur de la ligne de base ( $B_0$ ) et le module de la vitesse de rotation de la Terre ( $\Omega_0$ ).

$$x = c \tau_g / B_0$$

$$y = c \dot{\tau}_g / B_0 \Omega_0$$

$$z = \sqrt{1 - x^2 - y^2}$$

Avec les nouvelles variables  $x, y, z$ , en négligeant les seconds ordres dans les petites quantités  $\Delta B, \Delta \Omega$  on dérive l'expression du cosinus-directeur  $\gamma$  :

$$\gamma = z + \Delta B ((1 - z^2)/z) + \Delta \Omega (y^2/z) \quad (29c)$$

Aux extrémités de la ligne de base  $\vec{B}$  on observe simultanément deux sources radio dans les directions  $\vec{\sigma}_1$  et  $\vec{\sigma}_2$ . Dans le système de référence adopté, ces directions sont définies par leur cosinus-directeurs  $\alpha_1, \beta_1, \gamma_1$  et  $\alpha_2, \beta_2, \gamma_2$  respectivement.

En fonction des cosinus-directeurs, l'arc  $A$  entre la paire de source radio s'exprime par

$$\cos A = \alpha_1 \alpha_2 + \beta_1 \beta_2 + \gamma_1 \gamma_2$$

Lorsqu'on connaît des valeurs à priori des coordonnées des sources radio observées, on peut toujours évaluer une longueur de l'arc et l'adopter comme valeur initiale  $A_0$ . Par conséquent, nous allons inclure dans nos inconnues la petite correction  $\Delta A$  à la valeur initiale de l'arc entre les deux radio sources. La correction  $\Delta A$  s'écrit sous la forme

$$\Delta A \sin A_0 = \cos A_0 - \cos A,$$

et, en remplaçant  $\cos A$  en fonction des cosinus-directeurs,

$$\Delta A \sin A_0 = \cos A_0 - (\alpha_1 \alpha_2 + \beta_1 \beta_2 + \gamma_1 \gamma_2) \quad (30)$$

A l'aide des équations (29a), (29b) et (29c) on réécrit l'expression entre parenthèses de (30) et on a facilement

$$\Delta A \sin A_0 = \cos A_0 + C_1 + C_2 \Delta B + C_3 \Delta \Omega \quad (31)$$

$$C_1 = 2 (x_1 x_2 + y_1 y_2 + z_1 z_2) - (z_1/z_2) - (z_2/z_1)$$

$$C_2 = 2 y_1 y_2 - (z_1/z_2) y_2 - (z_2/z_1) y_1$$

$$C_3 = - (x_1 x_2 + y_1 y_2 + z_1 z_2)$$

$C_1$ ,  $C_2$  et  $C_3$  sont bien des fonctions des quantités connues (mesurées à priori), comme nous nous l'étions proposé.

### *Cas du retard complet*

Dans la suite, nous allons chercher une expression pour l'arc entre deux sources radio observées dans les mêmes conditions du cas précédent, c'est à dire, les deux objets sont observés simultanément aux extrémités d'une ligne de base  $\vec{B}$ , et le système de référence adopté est défini par les directions du vecteur unitaire de base  $\hat{e}$  et du vecteur vitesse angulaire de rotation terrestre  $\vec{\omega}$ . Mais cette fois-ci, nous allons nous placer dans un cas plus général en tenant compte de toutes les composantes du retard d'arrivée du signal entre les deux antennes.

Tel qu'on l'a déjà dit, le retard géométrique est la partie principale du retard, mais il n'est pas sa seule composante. Si on considère les effets des retards instrumentaux, troposphérique et ionosphérique, le retard  $\tau$  adopte la forme :

$$\tau = \tau_g + p(t) + q_0 + q \Delta t \quad (32)$$

où  $p$  est un paramètre qui varie avec le temps et qui tient compte des phénomènes de propagation du signal,  $q_0$  est le décalage constant entre les deux horloges et  $q$  est aussi un paramètre constant qui représente leur dérive mutuelle.

La dérivée temporelle de l'expression (32) donne la vitesse de retard

$$\dot{\tau} = \dot{\tau}_g + \dot{p} + q \quad (33)$$

Si on remplace dans ces deux dernières équations les expressions du retard géométrique et de sa dérivée données par les équations (27), le retard total s'écrit

$$\tau = (B/c) (\hat{e} \cdot \vec{\sigma}) + p + q_0 + q \Delta t \quad (34a)$$

$$\dot{\tau} = \Omega (B/c) (\vec{\omega} \wedge \hat{e}) \cdot \vec{\sigma} + \dot{p} + q \quad (34b)$$

Les cosinus directeurs  $\alpha, \beta, \gamma$  de la direction à la radio source  $\vec{\sigma}$  définis par les expressions (26) adoptent maintenant la forme

$$\begin{aligned}\alpha &= (c/B_0)(1-\Delta B) (\tau - p - q_0 - q\Delta t) \\ \beta &= (c/\Omega_0 B_0) (1-\Delta B - \Delta\Omega) (\dot{\tau} - \dot{p} - q) \\ \gamma &= \sqrt{1-\alpha^2 - \beta^2}\end{aligned}$$

avec  $\Delta B$ ,  $\Delta\Omega$ ,  $p$  ( $\approx 10^{-11}$  sec/sec),  $q_0$  ( $\approx 10^{-6}$  sec),  $q$  ( $\approx 10^{-11}$  sec/sec) et  $\dot{p}$  ( $\approx 10^{-14}$  sec/sec) qui peuvent être considérées de petites quantités, on n'a considéré que leurs premiers ordres.

Faisons un nouveau changement de variables qui est fonction des quantités connues seulement :

$$\begin{aligned}X &= c\tau / B_0 \\ Y &= c\dot{\tau} / B_0 \Omega_0 \\ Z &= \sqrt{1-x^2 - y^2} \\ P &= cp/B_0 \\ Q_0 &= cq_0/B_0 \\ Q &= cq/B_0 \Omega_0 \\ \dot{P} &= c\dot{p}/B_0 \Omega_0\end{aligned}$$

et exprimons les cosinus directeurs de la direction à la source en fonction de celles-ci :

$$\alpha = (1 - \Delta B) X - P - Q_0 - Q - \Omega_0 \Delta t \quad (35a)$$

$$\beta = (1 - \Delta B - \Delta\Omega) Y - \dot{P} - Q \quad (35b)$$

$$\gamma = Z + \Delta B \frac{(1-Z^2)}{Z} + \Delta\Omega \frac{Y^2}{Z} + \frac{XP}{Z} + \frac{Y\dot{P}}{Z} + \frac{XQ_0}{Z} + \frac{Q}{Z} (Y + X\Omega_0 \Delta t) \quad (35c)$$

Dans ces trois dernières équations  $X$ ,  $Y$ ,  $Z$  sont des variables connues, exprimées en fonction des quantités observées VLBI et des valeurs adoptées  $B_0$ ,  $\Omega_0$ ;  $P$  et  $\dot{P}$  sont aussi connus lorsque  $p$  et  $\dot{p}$  ont des valeurs théoriques tirées du modèle de propagation adopté.  $\Delta B$ ,  $\Delta\Omega$ ,  $Q_0$ ,  $Q$  sont les inconnues à déterminer.

Nous indiquons avec les indices 1 et 2 les paramètres associés aux sources dans les directions  $\vec{\sigma}_1$  et  $\vec{\sigma}_2$  respectivement. Nous allons maintenant remplacer dans l'équation (30) les cosinus-directeurs exprimés par les identités (35), ce qui donne l'équation suivante pour la correction  $\Delta A$  à la valeur adoptée  $A_0$  de l'arc entre les deux sources radio :

$$\Delta A \sin A_0 = \cos A_0 + C_1 \Delta B + C_2 Q_0 + C_3 Q + C_4 \Delta\Omega + C_5 P + C_6 \dot{P} + C_7 \quad (36)$$

Pour obtenir cette identité on a négligé les seconds ordres et supérieurs dans les petites quantités  $\Delta B$ ,  $\Delta\Omega$ ,  $p$ ,  $q_0$ ,  $q$ ,  $\dot{p}$ .

Pour simplifier l'écriture, on a introduit sept constantes  $C_i$  définies par

$$C_1 = 2(X_1 X_2 + Y_1 Y_2 + Z_1 Z_2) - (Z_1/Z_2) - (Z_2/Z_1)$$

$$C_2 = 1 + X_2 - (Z_1/Z_2) X_2 - (Z_2/Z_1) X_1$$

$$C_3 = C_2 \Omega_0 \Delta t + Y_1 + Y_2 - (Z_1/Z_2) - (Z_2/Z_1) Y_1$$

$$C_4 = 2 Y_1 Y_2 - Y_2^2 (Z_1/Z_2) - Y_1^2 (Z_2/Z_1)$$

$$C_5 = 1 + X_2 - (Z_1/Z_2) X_2 - (Z_2/Z_1) X_1 = C_2$$

$$C_6 = Y_1 + Y_2 - Y_2 (Z_1/Z_2) - Y_1 (Z_2/Z_1) = -C_3 - C_2 \Omega_0 \Delta t$$

$$C_7 = X_1 X_2 - Y_1 Y_2 - Z_1 Z_2$$

La précision théorique de la méthode est limitée par la grandeur des termes négligés dans les approximations. Nous les avons évalués pour déterminer l'erreur commise. Nous avons adopté les valeurs suivantes pour les paramètres connus :

$c$	=	3	x	$10^5$	km/sec
$\dot{\tau}$	=	2	x	$10^{-2}$	sec
$\tau$	=	1.5	x	$10^{-6}$	sec/sec
$B_0$	=	1	x	$10^4$	km
$\Omega_0$	=	7	x	$10^{-5}$	rad/sec
$\Delta t$	=	1	x	$10^3$	sec
$q_0$	=	1	x	$10^{-6}$	sec
$q$	=	1	x	$10^{-11}$	sec/sec
$p$	=	7	x	$10^{-9}$	sec
$\dot{p}$	=	1.5	x	$10^{-14}$	sec/sec
$\Delta B$	=	1	x	$10^{-8}$	
$\Delta\Omega$	=	0.5	x	$10^{-8}$	

La Table 2 présente les ordres des termes négligés dans l'expression de l'arc de l'équation (36), calculés à partir des valeurs données ci-dessus.

Table 2. Ordre de grandeur des termes négligés dans l'arc donné par l'équation (36).

Terme	Effet dans l'arc A (")
$\Delta\Omega^2 y^2$	$4 \times 10^{-4}$
$Q_0^2$	$2 \times 10^{-4}$
$Q^2$	$5 \times 10^{-6}$
$2 Q_0 Q \Omega_0 \Delta t$	$4 \times 10^{-6}$
$2 P Q_0$	$3 \times 10^{-6}$
$2 \Delta B \times Q_0$	$8 \times 10^{-8}$
$2 \dot{P} Q \Omega_0 \Delta t$	$3 \times 10^{-8}$
$Q^2 \Omega_0^2 D t^2$	$3 \times 10^{-8}$
$2 \Delta B y Q$	$2 \times 10^{-8}$
$2 P Q$	$1 \times 10^{-8}$
$p^2$	$8 \times 10^{-9}$
$2 \Delta\Omega y Q$	$6 \times 10^{-9}$
$2 \Delta B \times Q \Omega_0 \Delta t$	$1 \times 10^{-9}$
$2 \Delta B \times P$	$5 \times 10^{-10}$
$2 \Delta B y \dot{P}$	$2 \times 10^{-11}$
$\Delta B^2 x^2$	$8 \times 10^{-12}$
$\Delta B^2 y^2$	$8 \times 10^{-12}$
$\dot{p}^2$	$8 \times 10^{-12}$
$2 \Delta\Omega y \dot{P}$	$8 \times 10^{-12}$

D'après la valeur totale des termes négligés dans les approximations on peut assurer mieux que le millième de seconde de degré. La contribution majeure provient du terme en  $\Delta\Omega^2(4 \times 10^{-4})$ , c'est à dire, du module de la vitesse de rotation terrestre.

Si l'on considère que les paramètres des horloges  $q_0$  et  $q$ , et les paramètres atmosphériques sont connus, l'équation (36) contient 3 inconnues : la correction  $\Delta A$  à la longueur de l'arc adoptée comme valeur initiale, la correction  $\Delta B$  à la longueur de la base  $B_0$  et la correction  $\Delta\Omega$  au module  $\Omega_0$  du vecteur vitesse de rotation terrestre.

Ayant observé  $K$  paires de sources, l'équation (36) pourrait nous permettre d'écrire autant d'équations d'observation et résoudre un système où il y aurait  $K$  inconnues  $\Delta A_i$  et deux inconnues  $\Delta B$  et  $\Delta\Omega$ . Il est préférable de paramétriser le système avec un nombre minimum

d'inconnues et pour cela de transformer les K corrections d'arc  $\Delta A_i$  en corrections à des coordonnées sphériques des sources correspondantes.

Dans un système de coordonnées sphériques arbitraire, que nous notons  $\psi$  et  $\epsilon$ , l'arc entre deux sources de coordonnées  $(\psi_1, \epsilon_1)$  et  $(\psi_2, \epsilon_2)$  s'écrit :

$$\cos A = \sin \epsilon_1 \sin \epsilon_2 + \cos \epsilon_1 \cos \epsilon_2 \cos (\psi_1 - \psi_2)$$

Si on différencie cette équation,

$$\begin{aligned} -\sin A_0 \Delta A = & [ \cos \epsilon_1^\circ \sin \epsilon_2^\circ - \sin \epsilon_1^\circ \cos \epsilon_2^\circ \cos (\psi_1^\circ - \psi_2^\circ) ] \Delta \epsilon_1 + \\ & [ \sin \epsilon_1^\circ \cos \epsilon_2^\circ - \cos \epsilon_1^\circ \sin \epsilon_2^\circ \cos (\psi_1^\circ - \psi_2^\circ) ] \Delta \epsilon_2 - \\ & [ \cos \epsilon_1^\circ \sin \epsilon_2^\circ \sin (\psi_1^\circ - \psi_2^\circ) ] (\Delta \psi_1 - \Delta \psi_2) \end{aligned}$$

Les termes entre crochets sont des fonctions des coordonnées  $(\psi_i^\circ, \epsilon_i^\circ)$ ,  $i=1,2$  dont des valeurs connues a priori sont adoptées. L'équation (36) est donc linéaire par rapport à  $\Delta \epsilon_1$ ,  $\Delta \epsilon_2$ ,  $\Delta \psi_1$ ,  $\Delta \psi_2$ . On écrit donc

$$\sin A_0 \Delta A = f_1 \Delta \epsilon_1 + f_2 \Delta \epsilon_2 + f_3 (\Delta \psi_1 - \Delta \psi_2) \quad (37)$$

Avec cette nouvelle paramétrisation, les inconnues sont les corrections  $\Delta \psi_1, \Delta \psi_2, \Delta \epsilon_1, \Delta \epsilon_2$ , aux coordonnées à priori des sources radio, plus les deux corrections  $\Delta B, \Delta \Omega$ . A l'aide des équations (36) et (37), nous pouvons construire un système d'équations d'observation tel que :

$$\begin{aligned} f_1 \Delta \epsilon_1 + f_2 \Delta \epsilon_2 + f_3 (\Delta \psi_1 - \Delta \psi_2) = \\ \cos A_0 + C_1 \Delta B + C_2 Q_0 + C_3 Q + C_4 \Delta \Omega + C_5 P + C_6 \dot{P} + C_7 \end{aligned}$$

Dans ce système de coordonnées sphériques arbitraire, nous fixons les origines en adoptant des valeurs à priori pour trois coordonnées. Pour N sources radio observées avec une ligne de base, correspondant à  $N(N-1)/2$  arcs, on a  $2N-3$  inconnues ( $\Delta \psi, \Delta \epsilon$ ) puisque l'on a fixé trois coordonnées pour les origines. En plus, on a les deux inconnues  $\Delta B$  et  $\Delta \Omega$ , donc un total de  $2N-1$  inconnues dans le système construit avec ces observations.

En conclusion, nous avons montré qu'il était possible d'écrire un système d'équations d'observation indépendant de l'orientation de la base et du vecteur vitesse de rotation de la Terre, et où les inconnues sont des coordonnées sphériques des sources radio. Ceci dans le cas d'une géométrie simple. Il faudra généraliser l'étude en adoptant une géométrie complète dans la modélisation des retards individuels  $\tau_1$  et  $\tau_2$ .

**Références bibliographiques du Chapitre III**

- DRAVSKIKH, A.F., KRASINSKY, G.A., FINKELSTEIN, A.M., 1975a : *Soviet Astron. Lett.*, Vol. 1,3, 110.
- DRAVSKIKH, A.F., FINKELSTEIN, A.M., KRASINSKY, G.A., 1975b : *Astroph. and Space Science*, 38, 255.
- DRAVSKIKH, A.F., FINKELSTEIN, A.M., KREINOVICH, V. JA. 1978 : *IAU Colloquium* 48, 143.

**IV - RACCORDEMENT DU REPERE CELESTE D'HIPPARCOS  
AU REPERE EXTRAGALACTIQUE VLBI**

## Introduction

Le repère celeste du satellite HIPPARCOS sera matérialisé par les coordonnées et les mouvements propres de 120000 étoiles réduites par rapport à des plans arbitraires de référence. S'agissant d'un instrument spatial, son système de référence naturel n'est pas lié aux plans de l'équateur terrestre et de l'écliptique auxquels sont sensibles en général les mesures astrométriques faites au sol. De plus, le repère HIPPARCOS est entraîné par la rotation galactique, à raison de  $0.007''/\text{an}$ , et, par conséquent, il ne peut pas servir à établir un repère de référence inertiel.

La précision astrométrique du repère de référence du satellite HIPPARCOS sera de plus d'un ordre de grandeur supérieure à celle atteinte par l'astronomie optique au sol. La précision estimée pour la mission HIPPARCOS initiale est de l'ordre de  $0.002''$  pour les positions et les parallaxes et de  $0.002''/\text{an}$  et pour les mouvements propres, pour des objets de magnitude visuelle  $m \leq 9$ , avec une dégradation vers les magnitudes limites de satellite (12 ou 13). Néanmoins, cette précision est intrinsèque à la sphère HIPPARCOS même, et elle sera pleinement réalisée que si ce repère de référence devient inertiel par raccordement à un autre repère stable et non-tournant.

La technique VLBI permet de déterminer les coordonnées des sources radio extragalactiques dans un repère équatorial avec une précision de l'ordre de  $0.001''$ . N'étant pas animés de mouvements propres apparents, les quasars et les noyaux des galaxies matérialisent le repère céleste le plus stable construit jusqu'à présent. Pour que la sphère HIPPARCOS acquière pleinement ses qualités astrométriques, elle devra être raccordée à un repère de précision comparable, comme le repère extragalactique donc.

Les quasars sont des objets bien adaptés pour définir un système de directions stable dans l'espace. Situés à des distances extragalactiques, on a montré que leurs mouvements propres sont indétectables au niveau de 20 micro secondes de degré/an dans un cas particulier mais très probablement représentatif (la paire 3C345/NRA512 : Bartel et al.1986). Le fait de présenter des structures quasi-ponctuelles dans le domaine optique rend les quasars très bien adaptés aux mesures astrométriques précises, mais comme ce sont des objets très faibles pour le satellite HIPPARCOS, ils ne pourront pas en réalité être observés pour "calibrer" les mouvements propres des étoiles. La source radio la plus brillante est le quasar 3C 273B ( $m=12.5$ ), mais, généralement les objets extragalactiques ont des magnitudes supérieures à 17. Il a donc fallu trouver des objets intermédiaires permettant de lier le repère HIPPARCOS au repère extragalactique.

Ce raccordement permettra

- d'arrêter la rotation du repère de référence produit par le satellite HIPPARCOS,
- de densifier le repère extragalactique dans le domaine optique,
- d'unifier les systèmes de coordonnées radio et optique afin de comparer directement les images des objets célestes obtenues en radio et optique avec la même résolution angulaire (Hubble Space Telescope, AT, Very Large Array).

Froeschlé et Kovalevsky (1982) présentent trois méthodes pour raccorder HIPPARCOS au repère VLBI:

- a) au moyen des étoiles radio brillantes qui sont des objets communs aux techniques HIPPARCOS et VLBI.
- b) au moyen d'observations de quasars avec la technique VLBI et d'étoiles avec le satellite, et en mesurant leurs séparations angulaires à l'aide du Hubble Space Telescope (HST),
- c) au moyen des étoiles HIPPARCOS connectées par le HST à des objets extragalactiques dont l'émission radio est soit inexistante soit trop faible pour des observations VLBI précises (remarquons que cette dernière méthode ne réalise pas l'unification des repères radio et optique).

La méthode (a) présente l'avantage que les étoiles utilisées pour raccorder les deux repères sont des objets communs aux deux techniques et donc directement observés en VLBI et par le satellite HIPPARCOS, sans objets ni observations intermédiaires. Ces objets communs sont des étoiles optiquement brillantes et détectables en radio. Leurs positions et leurs mouvements propres peuvent être déterminés dans le repère stable VLBI. Leurs magnitudes visuelles ne doivent pas être plus grandes que 11 pour garantir de bonnes conditions d'observation par le satellite HIPPARCOS. Elles doivent avoir une composante dont l'échelle angulaire ne doit pas dépasser 0.001" pour être utilisables avec la haute résolution angulaire de la technique VLBI. La densité de flux radio doit être au moins de quelques mJy pour la sensibilité du VLBI. En plus, leurs composantes optique et radio doivent coïncider à 0.002" près. Ce sont ces critères qui ont permis d'établir la liste initiale de 22 radio étoiles adaptées pour le raccordement (Lestrade, Preston, Slade, 1982). Walter (1977) avait déjà proposé une liste de  $\approx 30$  étoiles brillantes détectées en radio pour le raccordement des repères radio et optique. Toutes n'ont pas été retenues car certaines présentaient une structure radio étendue.

Dans les méthodes (b) et (c), le HST réalisera des mesures de distances angulaires à plusieurs époques entre des objets brillants (étoiles de  $4 < m < 12$ ) et des objets faibles (quasars de  $13 < m < 18$ ) dans un champ réduit, de l'ordre de 20'. Remarquons que dans la méthode (a), ce sont deux coordonnées qui sont mesurées par le VLBI pour chaque étoile de raccordement et non une distance angulaire comme avec le HST. La précision attendue de telles distances angulaires est de l'ordre de 0.002" (Hemenway et al. 1985), ce qui conduira à établir un raccordement de précision comparable aux précisions des positions mesurées dans chaque système, des étoiles par HIPPARCOS et des sources extragalactiques par VLBI. Pour que le HST atteigne une précision optimale, les sources extragalactiques devront être ponctuelles et de magnitudes entre 10 et 17. Il se trouve que toutes les sources extragalactiques qui répondent à ces critères ne sont pas détectables en radio et donc pas observables avec la technique VLBI.

### **Le raccordement des repères de référence célestes VLBI et HIPPARCOS via les étoiles radio**

Ce raccordement consiste à lier le repère stellaire HIPPARCOS au repère extragalactique VLBI au moyen des observations des radio étoiles avec les deux techniques.

Quelques étoiles brillantes de notre galaxie émettent aux longueurs d'onde radio centimétriques et peuvent être observées au moyen des techniques de la radioastronomie. Il y a environ 300 étoiles qui ont des propriétés optiques et radio très diverses. Trois mécanismes principaux sont responsables de leurs émissions radio: les processus thermique (Bremsstrahlung), non-thermique incohérent et cohérent. Des trois types d'émission, il n'y a que les radio étoiles à émission non-thermique qui, ayant des sources de taille angulaire de l'ordre de 0.001", sont adaptées au raccordement astrométrique au moyen de la technique VLBI qui a une résolution angulaire de 0.001". Lestrade et al. (1982) ont dressé une liste de 22 étoiles radio candidates au raccordement HIPPARCOS - VLBI, la plupart appartenant à la classe des systèmes binaires serrés RSCVn (RS Canum Venaticorum). Il s'agit des systèmes binaires avec des séparations angulaires de 0.004" au plus qui ont des densités de flux radio très faibles (en général  $< 50$  mJy). Leur émission radio varie en intensité à l'échelle de quelques minutes à quelques heures, et elles présentent une polarisation circulaire variable atteignant parfois un degré élevé. Ces objets sont observables par la technique VLBI avec le système d'acquisition des données VLBI Mark III qui est plus sensible que le système Mark II.

18 étoiles de la liste de Lestrade et al. (1982) ont été observées. Quatre étoiles (ALGOL, HR 5110,  $\lambda$  And et  $\sigma$  CrB) sont dans le FK4 et dans le FK5. Elles ont déjà servi à un raccordement préliminaire entre les systèmes radio-VLBI et optique-FK5 par comparaison aux positions optiques du cercle méridien automatique de Bordeaux (Lestrade et al 1985).

Des étoiles à masers OH ont aussi été proposées et étudiées aux longueurs d'onde radio et à l'aide du cercle méridien automatique de Bordeaux pour le raccordement d'HIPPARCOS (Baudry et al. 1983).

### La méthode de raccordement

Aucune méthodologie n'a encore été définitivement arrêtée pour le raccordement d'HIPPARCOS au repère VLBI. Nous nous plaçons dans la perspective où les données du satellite HIPPARCOS seront réduites indépendamment des coordonnées VLBI des étoiles radio et que le raccordement se fait à la fin du processus de réduction propre aux mesures HIPPARCOS et comme étape ultime autonome.

Le raccordement se fait au moyen des observations des étoiles radio communes aux deux techniques. Dans la formulation mathématique suivante, chaque objet est caractérisé par des coordonnées pour ses positions et ses mouvements propres en VLBI et en optique qui sont différents parce que les axes des deux repères ne sont pas alignés.

En absence de déformations régionales, on peut exprimer mathématiquement le lien entre deux repères qui ont la même origine par une simple rotation. Si l'orientation relative des repères évolue linéairement dans le temps, le lien se fait au moyen d'une rotation globale à une époque choisie arbitrairement, représentée par une matrice  $[R]$ , et en plus, d'une matrice  $[\dot{R}]$  qui représente la vitesse angulaire de rotation d'un repère par rapport à l'autre.

Pour chacune des étoiles radio  $i$  de l'ensemble des  $N$  étoiles de raccordement, la technique VLBI fournit le vecteur  $\vec{\sigma}_{vi}$  construit à l'aide des cosinus - directeurs des coordonnées, à une époque  $t_{vi}$  d'observation de l'étoile, et le mouvement propre  $\dot{\vec{\sigma}}_{vi}$  associé. De même, les observations du satellite donnent les coordonnées et le vecteur cosinus - directeur  $\vec{\sigma}_{Hi}$  à une époque  $t_{Hi}$  d'observation, et le mouvement propre  $\dot{\vec{\sigma}}_{Hi}$  associé.

A un instant  $t_i$ , les relations de raccordement des deux repères données pour une étoile radio commune sont:

$$\vec{\sigma}_{vi}(t_i) = [R(t_i)] \cdot \vec{\sigma}_{Hi}(t_i) \quad (38)$$

$$\dot{\vec{\sigma}}_{vi} = [R(t_i)] \cdot \dot{\vec{\sigma}}_{Hi} + [\dot{R}] \vec{\sigma}_{Hi}(t_i) \quad (39)$$

L'orientation relative des deux repères à une époque initiale est représentée par trois rotations  $A_1, A_2, A_3$  autour des axes d'un des repères; la vitesse angulaire de rotation est alors représentée par les trois dérivées  $\dot{A}_1, \dot{A}_2, \dot{A}_3$ .

Les relations vectorielles (38) et (39) fournissent quatre équations d'observation indépendantes en coordonnées. Puisqu'il y a six inconnues (les trois angles de rotation et leurs dérivées temporelles respectives), deux étoiles radio suffiraient pour avoir une solution. Néanmoins, on cherche une solution avec un nombre supérieur d'étoiles par la méthode des moindres carrés pondérés.

Le système de coordonnées équatoriales est choisi pour notre étude car c'est le système naturel pour le repère extragalactique VLBI. Dans le consortium FAST, c'est au contraire le système de coordonnées écliptiques qui a été choisi pour faire la réduction des données HIPPARCOS. Si pour exprimer les positions et les mouvements propres on adopte le système équatorial céleste Oxyz, l'angle  $A_1$  représente une rotation autour de l'origine des ascensions droites, l'angle  $A_2$  est une rotation autour de l'axe à  $90^\circ$  sur l'équateur, et l'angle  $A_3$  est une rotation autour du pôle céleste.

En coordonnées équatorielles sphériques, les vecteurs cosinus directeur d'une étoile et de son mouvement propre s'écrivent

$$\vec{\sigma} = \begin{vmatrix} \cos\alpha \cos\delta \\ \sin\alpha \cos\delta \\ \sin\delta \end{vmatrix} \quad (40)$$

$$\dot{\vec{\sigma}} = \begin{vmatrix} -\sin\alpha \cos\delta \mu\alpha - \cos\alpha \sin\delta \mu\delta \\ \cos\alpha \cos\delta \mu\alpha - \sin\alpha \sin\delta \mu\delta \\ \cos\delta \mu\delta \end{vmatrix} \quad (41)$$

Les positions et les mouvements propres VLBI sont déterminés à des époques particulières pour chaque étoile radio, qui ne coïncident pas en général avec les époques individuelles des observations du satellite HIPPARCOS de la même étoile. On a donc des observations qui peuvent être exprimées sous forme de  $\vec{\sigma}_{vi}(t_{vi})$ ,  $\dot{\vec{\sigma}}_{vi}$  et  $\vec{\sigma}_{Hi}(t_{hi})$ ,  $\dot{\vec{\sigma}}_{Hi}$  pour les N étoiles radio obser-

vées avec les deux techniques ( $i=1,\dots,N$ ). On cherche les matrices  $[R]$  à une époque arbitraire  $t_0$  et  $[\dot{R}]$ . A l'époque  $t_0$ , les vecteurs  $\vec{\sigma}_{vi}$  et  $\vec{\sigma}_{Hi}$  s'écrivent:

$$\vec{\sigma}_{vi}(t_0) = \vec{\sigma}_{vi}(t_{vi}) + (t_0 - t_{vi}) \dot{\vec{\sigma}}_{vi} \quad (42)$$

$$\vec{\sigma}_{Hi}(t_0) = \vec{\sigma}_{Hi}(t_{Hi}) + (t_0 - t_{Hi}) \dot{\vec{\sigma}}_{Hi} \quad (43)$$

A l'aide des équations (42) et (43), les relations (38) et (39) deviennent pour l'époque  $t_0$ :

$$\vec{\sigma}_{vi}(t_{vi}) + (t_0 - t_{vi}) \dot{\vec{\sigma}}_{vi} = [R_{t_0}] \{ \vec{\sigma}_{Hi}(t_{Hi}) + (t_0 - t_{Hi}) \dot{\vec{\sigma}}_{Hi} \} \quad (44)$$

$$\dot{\vec{\sigma}}_{vi} = [R_{t_0}] \dot{\vec{\sigma}}_{Hi} + [\dot{R}] \{ \vec{\sigma}_{Hi}(t_{Hi}) + (t_0 - t_{Hi}) \dot{\vec{\sigma}}_{Hi} \} \quad (45)$$

On choisit de paramétrer la matrice  $[R(t_0)]$  à l'aide de trois rotations individuelles successives autour de chaque axe. Ces trois rotations sont représentées par les matrices  $[R_x]$ ,  $[R_y]$ ,  $[R_z]$ .

$$[R_x] = \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos A_1 & \sin A_1 \\ 0 & -\sin A_1 & \cos A_1 \end{vmatrix}$$

$$[R_y] = \begin{vmatrix} \cos A_2 & 0 & -\sin A_2 \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin A_2 & 0 & \cos A_2 \end{vmatrix}$$

$$[R_z] = \begin{vmatrix} \cos A_3 & \sin A_3 & 0 \\ -\sin A_3 & \cos A_3 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{vmatrix}$$

Du produit de ces trois matrices, on obtient la matrice de rotation

$$[R] = [R_z] [R_y] [R_x]$$

$$[R] = \begin{vmatrix} \cos A_2 \cos A_3 & \cos A_1 \sin A_3 + \sin A_1 \sin A_2 \cos A_3 & \sin A_1 \sin A_3 - \cos A_1 \sin A_2 \cos A_3 \\ -\cos A_2 \sin A_3 & \cos A_1 \cos A_3 - \sin A_1 \sin A_2 \sin A_3 & \sin A_1 \cos A_3 + \cos A_1 \sin A_2 \sin A_3 \\ \sin A_2 & -\sin A_1 \cos A_2 & \cos A_1 \cos A_2 \end{vmatrix} \quad (46)$$

En principe, cette matrice devrait être utilisée pour raccorder le système de coordonnées écliptiques d'HIPPARCOS au système de coordonnées équatorielles VLBI. Cependant, il sera sans doute plus simple de transformer les coordonnées écliptiques d'HIPPARCOS par une transformation conventionnelle pour les convertir en coordonnées équatorielles d'abord. De cette façon les angles  $A_1, A_2, A_3$  seront de petites quantités de l'ordre de quelques dizaines de millièmes de seconde de degré ( $\approx 10^{-7}$  rad), et on peut approximer  $\cos A_i \approx 1$ ,  $\sin A_i \approx A_i$  et négliger les ordres supérieurs dans les petits angles  $A_1, A_2, A_3$ . Avec ces approximations, la matrice  $[R(t_0)]$  devient:

$$[R(t_0)] = \begin{vmatrix} 1 & A_3 & -A_2 \\ -A_3 & 1 & A_1 \\ A_2 & -A_1 & 1 \end{vmatrix} \quad (47)$$

$[\dot{R}]$  est la matrice d'éléments  $\dot{A}_1, \dot{A}_2, \dot{A}_3$  qui exprime la vitesse angulaire relative des deux repères. On fait l'hypothèse que cette vitesse est constante. On déduit donc,

$$[\dot{R}] = \begin{vmatrix} 0 & \dot{A}_3 & -\dot{A}_2 \\ -\dot{A}_3 & 0 & \dot{A}_1 \\ \dot{A}_2 & -\dot{A}_1 & 0 \end{vmatrix} \quad (48)$$

On introduit (40), (41), (47) et (48) dans les équations (44) et (45) pour les exprimer en coordonnées équatorielles sous la forme suivante:

$$\begin{vmatrix} \cos\alpha_{vi} \cos\delta_{vi} \\ \sin\alpha_{vi} \cos\delta_{vi} \\ \sin\delta_{vi} \end{vmatrix} + \Delta t_{vi} \begin{vmatrix} -\sin\alpha_{vi} \cos\delta_{vi} \mu\alpha_{vi} - \cos\alpha_{vi} \sin\delta_{vi} \mu\delta_{vi} \\ \cos\alpha_{vi} \cos\delta_{vi} \mu\alpha_{vi} - \sin\alpha_{vi} \sin\delta_{vi} \mu\delta_{vi} \\ \cos\delta_{vi} \mu\delta_{vi} \end{vmatrix} =$$

$$\begin{vmatrix} 1 & A_3 & -A_2 \\ -A_3 & 1 & A_1 \\ A_2 & -A_1 & 1 \end{vmatrix} \cdot \begin{vmatrix} \cos\alpha_{Hi} \cos\delta_{Hi} + (-\sin\alpha_{Hi} \cos\delta_{Hi} \mu\alpha_{Hi} - \cos\alpha_{Hi} \sin\delta_{Hi} \mu\delta_{Hi}) \Delta t_{Hi} \\ \sin\alpha_{Hi} \cos\delta_{Hi} + (\cos\alpha_{Hi} \cos\delta_{Hi} \mu\alpha_{Hi} - \sin\alpha_{Hi} \sin\delta_{Hi} \mu\delta_{Hi}) \Delta t_{Hi} \\ \sin\delta_{Hi} + \cos\delta_{Hi} \mu\delta_{Hi} \Delta t_{Hi} \end{vmatrix} \quad (49)$$

$$\begin{vmatrix} -\sin\alpha_{vi} \cos\delta_{vi} \mu\alpha_{vi} - \cos\alpha_{vi} \sin\delta_{vi} \mu\delta_{vi} \\ \cos\alpha_{vi} \cos\delta_{vi} \mu\alpha_{vi} - \sin\alpha_{vi} \sin\delta_{vi} \mu\delta_{vi} \\ \cos\delta_{vi} \mu\delta_{vi} \end{vmatrix} =$$

$$\begin{vmatrix} 1 & A_3 & -A_2 \\ -A_3 & 1 & A_1 \\ A_2 & -A_1 & 1 \end{vmatrix} \cdot \begin{vmatrix} -\sin\alpha_{Hi} \cos\delta_{Hi} \mu\alpha_{Hi} - \cos\alpha_{Hi} \sin\delta_{Hi} \mu\delta_{Hi} \\ \cos\alpha_{Hi} \cos\delta_{Hi} \mu\alpha_{Hi} - \sin\alpha_{Hi} \sin\delta_{Hi} \mu\delta_{Hi} \\ \cos\delta_{Hi} \mu\delta_{Hi} \end{vmatrix} + \quad (50)$$

$$\begin{vmatrix} 0 & \dot{A}_3 & -\dot{A}_2 \\ -\dot{A}_3 & 0 & \dot{A}_1 \\ \dot{A}_2 & -\dot{A}_1 & 0 \end{vmatrix} \cdot \begin{vmatrix} \cos\alpha_{Hi} \cos\delta_{Hi} + (-\sin\alpha_{Hi} \cos\delta_{Hi} \mu\alpha_{Hi} - \cos\alpha_{Hi} \sin\delta_{Hi} \mu\delta_{Hi}) \Delta t_{Hi} \\ \sin\alpha_{Hi} \cos\delta_{Hi} + (\cos\alpha_{Hi} \cos\delta_{Hi} \mu\alpha_{Hi} - \sin\alpha_{Hi} \sin\delta_{Hi} \mu\delta_{Hi}) \Delta t_{Hi} \\ \sin\delta_{Hi} + \cos\delta_{Hi} \mu\delta_{Hi} \Delta t_{Hi} \end{vmatrix}$$

$\Delta t_{vi} = t_0 - t_{vi}$ ,  $\Delta t_{Hi} = t_0 - t_{Hi}$ ,  $(\alpha_{vi}, \delta_{vi})$ ,  $(\alpha_{Hi}, \delta_{Hi})$  sont les coordonnées équatorielles de la radio étoile  $i$  observée en VLBI et par HIPPARCOS respectivement, et  $(\mu\alpha_{vi}, \mu\delta_{vi})$ ,  $(\mu\alpha_{Hi}, \mu\delta_{Hi})$  les composantes des mouvements propres respectifs.

Pour  $N$  radio étoiles observées avec les deux techniques, les expressions matricielles (49) et (50) fournissent  $4N$  équations indépendantes et contiennent les six inconnues  $A_1(t_0)$ ,  $A_2(t_0)$ ,  $A_3(t_0)$ ,  $\dot{A}_1$ ,  $\dot{A}_2$ ,  $\dot{A}_3$  qui font le raccordement des repères HIPPARCOS et VLBI.

En faisant des transformations algébriques aux équations présentées ci-dessus, on obtient un système de quatre équations indépendantes pour chaque étoile radio  $i$  observée avec les deux techniques

$$\begin{aligned} (\alpha_{vi} - \alpha_{Hi}) \cos\delta_{vi} &= A_1 \cos\alpha_{Hi} \sin\delta_{Hi} + A_2 \sin\alpha_{Hi} \sin\delta_{Hi} - A_3 \cos\delta_{Hi} \\ \delta_{vi} - \delta_{Hi} &= -A_1 \sin\alpha_{Hi} + A_2 \cos\alpha_{Hi} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} (\mu\alpha_{vi} - \mu\alpha_{Hi}) \cos\delta_{vi} &= A_1 \mu\delta_{Hi} \cos\alpha_{Hi} + A_2 \mu\delta_{Hi} \sin\alpha_{Hi} + \dot{A}_1 \cos\alpha_{Hi} \sin\delta_{Hi} \cos\delta_{Hi} + \\ &\quad \dot{A}_2 \sin\alpha_{Hi} \sin\delta_{Hi} \cos\delta_{Hi} - \dot{A}_3 \cos\delta_{Hi} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} (\mu\delta_{vi} - \mu\delta_{Hi}) \cos\delta_{vi} &= -A_1 \mu\alpha_{Hi} \cos\alpha_{Hi} - A_2 \mu\alpha_{Hi} \sin\alpha_{Hi} - \dot{A}_1 \sin\alpha_{Hi} \cos\delta_{Hi} + \\ &\quad \dot{A}_2 \cos\alpha_{Hi} \cos\delta_{Hi} \end{aligned}$$

## La simulation des données HIPPARCOS

Le raccordement des repères extragalactique et stellaire HIPPARCOS via des étoiles radio se fait sur la base des observations de ces objets avec les deux techniques. Le catalogue d'entrée du satellite (INPUT Catalogue) contient 186 radio étoiles dont une centaine font partie des programmes observationnels VLBI et VLA (Argue, 1989). Il est probable que tous ces objets ne soient pas tous bien adaptés au raccordement. Pour l'instant, on dispose des positions et des mouvements propres de 11 étoiles pour le raccordement obtenu avec la technique VLBI (Lestrade et al. 1988). Nous avons étudié la qualité du raccordement réalisable avec ces étoiles en le simulant de façon aussi réaliste que possible.

La simulation consiste à évaluer les vecteurs cosinus-directeur  $\vec{\sigma}_{Hi}$ ,  $\dot{\vec{\sigma}}_{Hi}$  à l'époque  $t_{Hi}$  pour chaque étoile radio à partir des vecteurs VLBI connus  $\vec{\sigma}_{vi}$ ,  $\dot{\vec{\sigma}}_{vi}$  mesurés aux époques  $t_{vi}$  par Lestrade et al (1988). Pour cela on a fixé l'orientation relative des deux repères à une époque arbitraire  $t_0$  par trois rotations  $A_1(t_0)$ ,  $A_2(t_0)$ ,  $A_3(t_0)$  et leurs évolutions dans le temps avec les dérivées temporelles respectives  $\dot{A}_1$ ,  $\dot{A}_2$ ,  $\dot{A}_3$ . On a aussi fait l'hypothèse que les effets de parallaxe ont été éliminés aussi bien dans les données HIPPARCOS que VLBI puisqu'elles seront fournies par la mission nominale d'HIPPARCOS.

Les équations (44) et (45) peuvent être utilisées pour faire cette simulation. On les a modifiées pour les exprimer à l'époque  $t_{Hi}$  des positions HIPPARCOS. A cet instant, la position VLBI est donnée par le vecteur :

$$\vec{\sigma}_{vi}(t_{Hi}) = \vec{\sigma}_{vi}(t_{vi}) + (t_{Hi} - t_{vi}) \dot{\vec{\sigma}}_{vi}$$

A l'instant  $t_{Hi}$ , la matrice de rotation pour passer du repère HIPPARCOS au repère VLBI est :

$$[R(t_{Hi})] = [R(t_0)] + (t_{Hi} - t_0) [\dot{R}]$$

Compte tenu des expressions précédentes, les équations vectorielles (44) et (45) s'écrivent :

$$\vec{\sigma}_{vi}(t_{vi}) + (t_{Hi} - t_{vi}) \dot{\vec{\sigma}}_{vi} = \{ [R(t_0)] + (t_{Hi} - t_0) [\dot{R}] \} \vec{\sigma}_{Hi}(t_{Hi}) \quad (51)$$

$$\dot{\vec{\sigma}}_{vi} = \{ [R(t_0)] + (t_{Hi} - t_0) [\dot{R}] \} \dot{\vec{\sigma}}_{Hi} + [\dot{R}] \vec{\sigma}_{Hi}(t_{Hi}) \quad (52)$$

En inversant ces deux équations, on trouve finalement,

$$\vec{\sigma}_{Hi}(t_{Hi}) = \{ [R(t_0)] + (t_{Hi} - t_0) [\dot{R}] \}^{-1} \{ \vec{\sigma}_{vi}(t_{vi}) + (t_{Hi} - t_{vi}) \dot{\vec{\sigma}}_{vi} \} \quad (53)$$

$$\dot{\vec{\sigma}}_{Hi} = \{ [R(t_0)] + (t_{Hi} - t_0) [\dot{R}] \}^{-1} \{ \dot{\vec{\sigma}}_{vi} - [\dot{R}] \vec{\sigma}_{Hi}(t_{Hi}) \} \quad (54)$$

Avec l'équation (53) et à partir des coordonnées et mouvement propre VLBI d'une étoile, on évalue les composantes du vecteur position  $\vec{\sigma}_{Hi}(t_{Hi})$  dans le repère HIPPARCOS, ensuite, on les introduit dans l'équation (54) et on calcule les composantes du mouvement propre  $\dot{\vec{\sigma}}_{Hi}$ .

### *Les étoiles radio sélectionnées pour le raccordement*

14 étoiles radio ayant des positions et des mouvements propres VLBI ont été utilisées pour le raccordement. Pour qu'elles soient observables par le satellite HIPPARCOS dans les meilleures conditions, leurs magnitudes visuelles sont toutes plus brillantes que  $m = 11$ . La Table 3 présente les étoiles radio sélectionnées, leurs coordonnées équatorielles dans le système J2000.0, leurs mouvements propres et les époques d'observation en VLBI. Les données de cette table proviennent de sources différentes : les données de huit objets ont été obtenues à l'aide du système d'acquisition de données VLBI MarkIII et analysées avec le logiciel MASTERFIT du JPL par Lestrade et al. (1988), ils sont indiqués avec l'indice (1) dans la table. On a inclut quatre étoiles à des déclinaisons négatives, dont deux observées en VLBI par White et al. (1990) et indiquées avec l'indice (2) dans la table. Les positions des deux étoiles avec l'indice (3) ont été fournies aussi par Lestrade, et déterminées à partir des observations du VLA. Toutes ces positions radio sont rapportées au système J2000.0 avec le système des constantes astronomiques de l'UAI, les modèles UAI 1976 de la precession et UAI 1980 et de nutation. La Figure 8 montre dans une projection de Aitoff la distribution des 14 étoiles radio de raccordement dans le ciel.

Toutes ces étoiles sont à émission radio non-thermique et appartiennent pour la plupart à la classe des systèmes binaires serrés spectroscopiques RSCVn. Quelques objets de la liste sont cependant particuliers. ALGOL n'appartient pas strictement à la classe des RSCVn mais elle a des propriétés proches. Cyg X-1 et LSI 61°303 sont des étoiles binaires émettant fortement en rayon X. Sur le plan astrométrique, ALGOL est un système triple formé d'une binaire serrée qui tourne autour d'une troisième composante avec une période de 1.86 ans le long d'une orbite de demi grand-axe 0.040".  $\sigma$  CrB est une binaire visuelle avec une séparation angulaire de 5" entre composantes. Leurs magnitudes visuelles sont proches avec 5.8 et 6.8 respectivement. HR 1099 présente les mêmes caractéristiques. Il s'agit d'une binaire visuelle (6.5" de séparation angulaire) avec des magnitudes visuelles de 6.7 et 8.2. HR 1099 et SZ Psc sont des étoiles très proches de l'équateur. La précision

Etoile	Asc. Droite J 2000.0 h m s	Déclinaison J 2000.0 ° ' "	$\sigma_\alpha$ s	$\sigma_\delta$ "	Mouv. Propre		$\sigma_{\mu\alpha}$ ( $^{\circ}$ /an)	$\sigma_{\mu\delta}$ ( $^{\circ}$ /an)	Epoque
					$\alpha$ ( $^{\circ}$ /an)	$\delta$ ( $^{\circ}$ /an)			
(1) LSI 61°303	02 40 31.686	61 13 45.56	0.00013	0.002	0.0000	0.000	0.000067	0.001	1990.5
(1) ALGOL	03 08 10.1308	40 57 20.359	0.00013	0.002	+0.0003	+0.002	0.000067	0.001	1988.5
(1) UX ARI	03 26 35.3375	28 42 56.026	0.00013	0.002	+0.0016	- 0.106	0.000067	0.001	1988.5
(1) HR 1099	03 36 47.3251	00 35 18.60	0.00013	0.020	- 0.002	- 0.161	0.000067	0.001	1990.5
(2) HD 26337	04 09 40.864	-07 53 35.64	0.00067	0.010	+0.001	+0.130	0.000470	0.007	1992.5
			0.00033	0.005			0.000270	0.004	
(2) HD 32918	04 55 11.044	-74 56 16.02	0.00067	0.010	+0.0072	+0.058	0.000470	0.007	1992.5
			0.00033	0.005			0.000270	0.004	
(2) AB Dor	05 28 44.53515	-65 27 02.1914	0.00067	0.010	+0.0084	+0.133	0.000470	0.007	1992.5
			0.00033	0.005			0.000270	0.004	
(2) HD 77137	08 59 42.765	-27 48 58.11	0.00067	0.010	- 0.0036	- 0.049	0.000470	0.007	1992.5
			0.00033	0.005			0.000270	0.004	
(1) HR 5110	13 34 47.6893	37 10 56.859	0.00013	0.002	+0.0069	- 0.013	0.000067	0.001	1989.5
(1) SIG CrB	16 14 41.2011	33 51 32.47	0.00013	0.002	- 0.0221	- 0.080	0.000067	0.001	1987.5
(1) Cyg X-1	19 58 21.6804	35 12 05.887	0.00013	0.002	- 0.0016	- 0.018	0.000067	0.001	1991.5
(3) AR Lac	22 08 40.871	45 44 31.51	0.00013	0.002	- 0.0028	+0.035	0.000067	0.001	1989.5
(1) SZ Psc	23 13 23.7645	02 40 31.31	0.00013	0.020	- 0.0002	+0.041	0.000067	0.001	1992.5
(3) II Peg	23 52 29.0891	28 21 17.74	0.00013	0.002	+0.0437	+0.038	0.000067	0.001	1992.5

Table 3. Positions et mouvements propres VLBI des radio étoiles utilisées pour le raccordement.

des déterminations de leurs déclinaisons avec la technique VLBI est réduite avec les réseaux VLBI actuelles qui ont des lignes de base dont les composantes perpendiculaires à l'équateur sont relativement courtes.

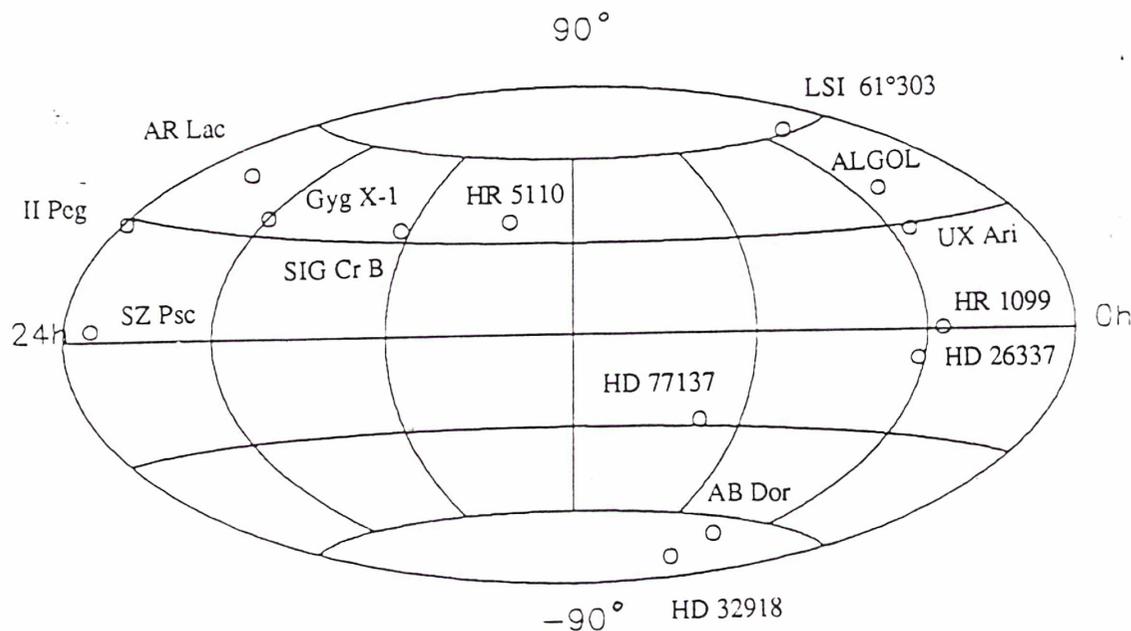


Figure 8. Radio étoiles utilisées pour le raccordement des repères VLBI et HIPPARCOS.

### *Le résultat de la simulation des observations HIPPARCOS*

Les positions et les mouvements propres HIPPARCOS utilisés pour le raccordement ont été simulés à l'aide des équations (53) et (54). L'époque moyenne d'observation du satellite est fixée à  $t_{Hi} = 1991.0$ , identique pour toutes les radio étoiles de raccordement. Les époques individuelles  $t_{vi}$  des observations interférométriques sont dans la Table 3.

On suppose qu'à l'époque arbitraire  $t_0 = 1991.0$  les repères VLBI et HIPPARCOS ne diffèrent que d'une rotation représentée par la matrice  $[R(t_0)]$ . Pour la simulation, on a adopté les valeurs suivantes des angles de rotation à l'époque 1991.0

$$A_1 = + 0.030'' \qquad A_2 = + 0.025'' \qquad A_3 = - 0.045''$$

A partir de l'instant  $t_0$ , le repère HIPPARCOS tourne par rapport au repère fixe VLBI avec une vitesse angulaire représentée par la matrice  $[R]$ . Pour les éléments de cette matrice on a adopté les valeurs :

$$\dot{A}_1 = + 0.002''/\text{an} \qquad \dot{A}_2 = - 0.003/\text{an} \qquad \dot{A}_3 = + 0.001''/\text{an}$$

La Table 4 présente les coordonnées et les mouvements propres optiques simulés pour la mission HIPPARCOS à l'aide de ces matrices. Les paramètres ainsi calculés ne sont pas affectés d'erreurs de mesure. La simulation du raccordement à partir de celles-ci ne serait donc pas un cas réaliste. Par conséquent, on a modifié les coordonnées simulées pour HIPPARCOS ainsi que les données VLBI d'origine pour leur ajouter du bruit gaussien. Pour chacune des 14 étoiles radio on a quatre paramètres : deux coordonnées et deux composantes du mouvement propre. Comme les mêmes objets sont observés à la fois par la technique VLBI et par HIPPARCOS, il en résulte deux ensembles indépendants de 56 paramètres chacun à "bruiter".  $d_{0k}$  est la valeur d'un de ces paramètres non affectée d'erreur et  $\sigma_k$  est son incertitude, on évalue la valeur bruitée  $d_k$  du paramètre avec la relation

$$d_k = d_{0k} + F_k \sigma_k \tag{55}$$

( $K = 1, \dots, 56$ )

La distribution des facteurs  $F_k$  doit suivre une loi de Gauss pour que les erreurs des mesures soient aléatoires. On les a évalué à partir de la table de distribution normale standard pour un échantillon de 56 points. La distribution des facteurs  $F_k$  est représentée dans l'histogramme de la Figure 9. Les valeurs des 56 facteurs ont été tirées au hasard et affectées aux coordonnées et aux composantes des mouvements propres VLBI et HIPPARCOS, indépendamment pour chaque technique à l'aide de l'équation (55). Les Tables 5 et 6 montrent les facteurs  $F_k$  effectivement assignés aux quatre paramètres observés respectivement en VLBI et avec HIPPARCOS pour les 14 étoiles. Les coordonnées et les mouvements propres ainsi obtenus sont dans la Table 5.

Etoile	Asc. Droite	Déclinaison	$\sigma_\alpha$	$\sigma_\delta$	Mouv. Propre		$\sigma_{\mu_\alpha}$	$\sigma_{\mu_\delta}$	Epoque
	J 2000.0	J 2000.0			$\alpha$	$\delta$			
	h m s	° ' "	s	"	( $^{\circ}$ /an)	( $''$ /an)	( $^{\circ}$ /an)	( $''$ /an)	
LSI 61°303	02 40 31.685	61 13 45.561	0.00033	0.0050	+0.0001	+0.004	0.00033	0.0050	1991.0
ALGOL	03 08 10.131	40 57 20.365	0.00013	0.0020	+0.0004	+0.006	0.00013	0.0020	1991.0
UX ARI	03 26 35.341	28 42 55.762	0.00013	0.0020	+0.0017	- 0.103	0.00013	0.0010	1991.0
HR 1099	03 36 47.323	00 35 18.521	0.00013	0.0020	- 0.0019	- 0.158	0.00013	0.0020	1991.0
HD 26337	04 09 40.862	-07 53 35.833	0.00013	0.0020	+0.0010	+0.133	0.00013	0.0020	1991.0
HD 32918	04 55 11.033	-74 56 16.105	0.00013	0.0020	+0.0067	+0.061	0.00013	0.0020	1991.0
AB Dor	05 28 44.522	-65 27 02.388	0.00013	0.0020	+0.0081	+0.135	0.00013	0.0020	1991.0
HD 77137	08 59 42.770	-27 48 58.033	0.00013	0.0020	- 0.0037	- 0.050	0.00013	0.0020	1991.0
HR 5110	13 34 47.699	37 10 56.840	0.00013	0.0020	+0.0070	- 0.017	0.00013	0.0020	1991.0
SIG CrB	16 14 41.123	33 51 32.188	0.00013	0.0020	- 0.0221	- 0.083	0.00013	0.0020	1991.0
Cyg X-1	19 58 21.681	35 12 05.892	0.00013	0.0020	- 0.0017	- 0.018	0.00013	0.0020	1991.0
AR Lac	22 08 40.866	45 44 31.559	0.00013	0.0020	- 0.0030	+0.037	0.00013	0.0020	1991.0
SZ Psc	23 13 23.764	02 40 31.246	0.00013	0.0020	- 0.0001	+0.044	0.00013	0.0020	1991.0
II Peg	23 52 29.023	28 21 17.681	0.00013	0.0020	+0.0436	+0.041	0.00013	0.0020	1991.0

Table 4. Positions et mouvements propres HIPPARCOS des radio étoiles utilisées pour le raccordement. Ces valeurs sont celles obtenues avec la simulation des observations du satellite.

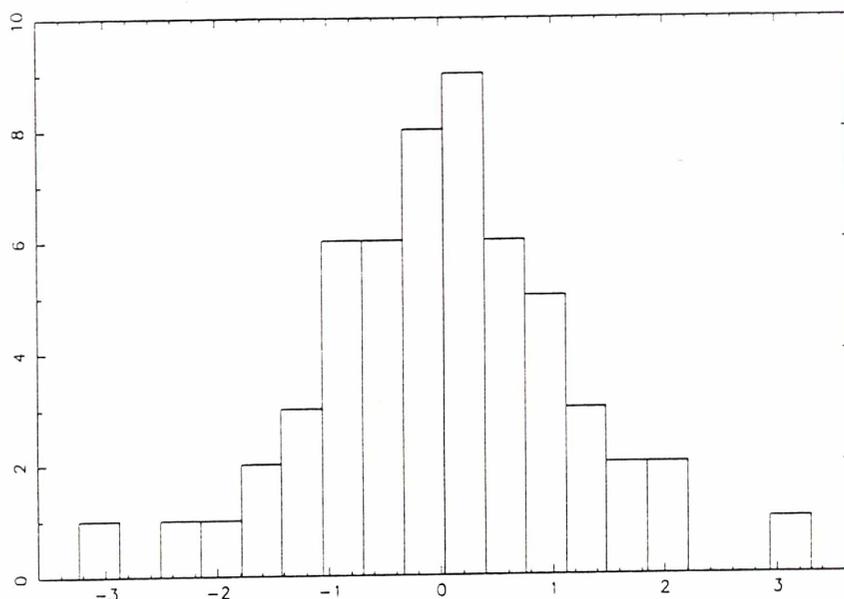


Figure 9. Distribution des facteurs appliqués aux incertitudes pour bruiteer les observations VLBI et HIPPARCOS.

### Les résultats du raccordement. Analyse des cas différents

Pour simuler le raccordement de la sphère stellaire HIPPARCOS au repère extragalactique on a utilisé les coordonnées et les mouvements propres VLBI et HIPPARCOS des Tables 3 et 4.

Le raccordement consiste à retrouver l'orientation relative des deux repères à l'époque arbitraire  $t_0$  et leur évolution dans le temps. Pour cela, on a les vecteurs-direction  $\vec{\sigma}_{vi}$  à l'époque  $t_{vi}$  des observations VLBI, les vecteurs des mouvements propres  $\dot{\vec{\sigma}}_{vi}$ , les vecteurs-direction  $\vec{\sigma}_{Hi}$  à l'époque  $t_{Hi}$  des observations du satellite HIPPARCOS et les vecteurs des mouvements propres  $\dot{\vec{\sigma}}_{Hi}$ . Avec ces données et les équations (44) et (45) on a évalué les angles  $A_1(t_0)$ ,  $A_2(t_0)$ ,  $A_3(t_0)$  entre les axes des deux repères, et les composantes  $\dot{A}_1$ ,  $\dot{A}_2$ ,  $\dot{A}_3$  de la vitesse angulaire de rotation. Avec  $N$  radio étoiles de raccordement, il y a  $4N$  équations indépendantes qu'on a résolu avec un ajustement de moindres carrés pondérés. On a pondéré les équations avec les incertitudes des Tables 3 et 4. Pour les coordonnées et les mouvements propres VLBI des quatre étoiles au Sud de l'équateur on a

Etoile	$F_{\alpha}$	$F_{\delta}$	$F_{\mu\alpha}$	$F_{\mu\delta}$
LSI 61°303	-2.20	+0.70	+2.20	+0.80
ALGOL	-1.14	-0.03	-0.70	-1.26
UX ARI	-0.65	-0.60	-0.85	-0.24
UR 1099	+1.05	+1.50	+0.24	+0.85
HD 26337	+1.26	+1.60	+1.40	+0.26
HD 32918	+0.07	-0.53	-1.00	+1.60
AB Dor	-0.35	-0.26	-0.07	-3.00
HD 77137	-0.40	+0.60	-1.05	-1.50
HR 5110	+0.31	-2.00	+0.48	+2.00
SIG CrB	+1.17	+3.00	+0.65	+0.10
Cyg X-1	-1.17	+0.40	+0.35	+0.17
AR Lac	-0.90	+0.90	+0.03	+0.31
SZ Psc	-0.48	+0.35	+0.10	+1.00
II Peg	-1.40	+0.80	+0.17	+0.14

Table 5 Facteurs appliqués aux incertitudes pour bruite les observations VLBI. Ils ont été choisis pour qu'ils suivent la distribution normale pour un échantillon de 56 points.

Etoile	$F_{\alpha}$	$F_{\delta}$	$F_{\mu\alpha}$	$F_{\mu\delta}$
LSI 61°303	-0.80	+1.50	+0.53	+0.17
ALGOL	-2.00	+1.60	-1.17	-0.60
UX ARI	+1.40	+0.90	+0.48	-1.26
UR 1099	-0.35	+1.05	+0.26	-2.20
HD 26337	-0.70	-0.03	-1.40	-0.10
HD 32918	-1.00	-0.14	-3.00	-0.65
AB Dor	+2.20	+0.14	+0.10	-0.40
HD 77137	+0.85	+0.70	+0.17	-0.85
HR 5110	+1.17	+0.65	+0.24	+1.00
SIG CrB	-1.05	+0.31	+0.35	+0.03
Cyg X-1	-0.48	+0.40	+0.53	-0.07
AR Lac	-1.50	-1.60	-0.26	+1.26
SZ Psc	+0.60	+0.07	+2.00	-0.90
II Peg	-0.24	+3.00	-0.31	+0.80

Table 6 Facteurs appliqués aux incertitudes pour bruite les observations HIPPARCOS simulées. Ils ont été choisis pour qu'ils suivent la distribution normale pour un échantillon de 56 points.

Etoile	$\alpha_{VLBI}$ h m s	$\delta_{VLBI}$ ° ' "	$\mu\alpha_{VLBI}$ (s/an)	$\mu\delta_{VLBI}$ ("/an)	$\alpha_{HIPPP}$ h m s	$\delta_{HIPPP}$ ° ' "	$\mu\alpha_{HIPPP}$ (s/an)	$\mu\delta_{HIPPP}$ ("/an)
LSI 61°303	02 40 31.6857	61 13 45.562	0.0002	0.001	02 40 31.6847	61 13 45 568	0.0003	0.003
ALGOL	03 08 10.1308	40 57 20.359	0.0003	0.001	03 08 10.1305	40 57 20.368	0.0003	0.004
UX ARI	03 26 35.3374	28 42 56.025	0.0015	-0.106	03 26 35.3410	28 42 55.764	0.0018	-0.105
HR 1099	03 36 47.3252	00 35 18.630	-0.0020	-0.160	03 36 47.3235	00 35 18.523	-0.0020	-0.162
HD 26337	04 09 40.8648	-07 53 35.656	0.0017	0.132	04 09 40.8618	-07 53 35.833	0.0009	0.133
HD 32918	04 55 11.0441	-74 56 16.025	0.0067	0.069	04 55 11.0331	-74 56 16.105	0.0063	0.060
AB Dor	05 28 44.5349	-65 27 02.194	0.0084	0.112	05 28 44.5226	-65 27 02.388	0.0081	0.134
HD 77137	08 59 42.7647	-27 48 58.104	-0.0041	-0.060	08 59 42.7699	-27 48 58.032	-0.0036	-0.051
HR 5110	13 34 47.6893	37 10 56.855	0.0069	-0.011	13 34 47.6994	37 10 56.8401	0.0070	-0.014
SIG CrB	16 14 41.2012	33 51 32.476	-0.0221	-0.080	16 14 41.1231	33 51 32.189	-0.0221	-0.083
Cyg X-1	19 58 21.6803	35 12 05.888	-0.0016	-0.018	19 58 21.6805	35 12 05.893	-0.0018	-0.019
AR Lac	22 08 40.8709	45 44 31.512	-0.0028	0.035	22 08 40.866	45 44 31.556	-0.0030	0.039
SZ Psc	23 13 23.7644	02 40 31.317	-0.0002	0.042	23 13 23.7643	02 40 31.246	0.0001	0.042
II Peg	23 52 29.0889	28 21 17.738	0.0436	0.038	23 52 29.0230	28 21 17.687	0.0435	0.042

Table 7. Coordonnées et mouvements propres VLBI et HIPPARCOS bruités.

considéré deux ensembles de valeurs différents (0.0010", 0.007"/an et 0.005", 0.004"/an) et on a évalué deux solutions différentes, tel qu'on le montre dans les cas 1 et 2 des Tables 8 et 9.

On a analysé aussi la qualité du raccordement en fonction de la distribution d'étoiles radio qui servent à faire le lien entre les repères VLBI et HIPPARCOS. On a étudié l'influence de certaines étoiles sur le raccordement, notamment celles qu'on a présenté comme des objets particuliers dans la section ci-dessus "*Les radio étoiles sélectionnées pour le raccordement*" et on a aussi analysé la qualité du raccordement quand on le fait sur la base des étoiles Nord seulement.

On a d'abord simulé les données HIPPARCOS en choisissant des valeurs arbitraires mais réalistes pour les angles  $A_1, A_2, A_3$  entre les axes des repères à l'époque  $t_0$  et pour les composantes  $\dot{A}_1, \dot{A}_2, \dot{A}_3$  de la vitesse angulaire de rotation du repère HIPPARCOS par rapport au repère VLBI. On a ensuite cherché à retrouver les valeurs des  $A_i(t_0)$  et des  $A_i$  ( $i=1, 2, 3$ ) à partir des vecteurs-direction  $\vec{\sigma}_{vi}, \dot{\vec{\sigma}}_{vi}$ , de la table 5 et  $\vec{\sigma}_{Hi}$  et  $\dot{\vec{\sigma}}_{Hi}$  simulés. Le degré d'accord entre les valeurs des angles et des vitesses calculés et initiales est un indice de la qualité du raccordement.

Les résultats des différents cas de raccordement analysés sont présentés dans la Table 8. La table 9 montre, pour chaque cas, la différence entre les valeurs des 6 paramètres de raccordement et ceux qu'on a utilisé pour la simulation ( $A_1(t_0) = 0.030''$ ,  $A_2(t_0) = 0.025''$ ,  $A_3(t_0) = -0.045''$ ,  $\dot{A}_1 = 0.002''/\text{an}$ ,  $\dot{A}_2 = -0.003''/\text{an}$ ,  $\dot{A}_3 = 0.001''/\text{an}$ ). Les différences sont indiquées en nombre de fois l'incertitude respective. Dans la même table on montre les coefficients de corrélation entre les angles et entre les composantes de la vitesse angulaire évalués dans la solution de moindres carrés. Les corrélations croisées entre les angles  $A_i$  et les vitesses  $\dot{A}_i$  sont nulles.

Nous avons adopté deux ensembles d'incertitudes différentes pour les données VLBI des étoiles de l'hémisphère Sud. Les cas 1 et 2 des Tableaux 8 et 9 correspondent à ces deux solutions. Dans le cas 1, on a adopté les valeurs 0.010" et 0.007"/an pour les incertitudes des coordonnées et des mouvements propres VLBI. Quand on les réduit à la moitié (cas 2), la précision du raccordement est améliorée de ~ 10%, et la cohérence avec les valeurs initiales reste inchangée, ainsi que les coefficients de corrélation. Le paramètre R qui caractérise la qualité de l'ajustement (voir Chapitre II, page 48) indique que dans deux cas, la probabilité d'avoir une distribution gaussienne des résidus est 0.25.

Le cas 3 présente le résultat du raccordement avec les 10 étoiles radio de l'hémisphère Nord. Comparée à la solution avec les 14 étoiles, la cohérence des angles  $A_i$  et des vitesses  $\dot{A}_i$  avec leurs valeurs dans la simulation ne change pas de façon significative, et les coefficients de corrélation

Cas	N	A <sub>1</sub>	A <sub>2</sub>	A <sub>3</sub>	Ā <sub>1</sub>	Ā <sub>2</sub>	Ā <sub>3</sub>	σ	R	Commentaires
1	14	+31.33±1.7.	+22.78±1.54	-44.34±1.15	+2.11±1.13	-3.31±1.01	+1.52±0.76	2.10	1.34	Incertitudes VLBI des étoiles Sud 0.010" et 0.007"/an
2	14	+31.20±1.65	+22.96±1.40	-44.33±1.13	+2.00±1.09	-3.24±0.90	+1.38±0.74	2.03	1.34	Incertitudes VLBI des étoiles Sud 0.005" et 0.004"/an
3	10	+31.44±1.50	+22.96±1.40	-44.34±1.01	+2.14±1.01	-3.70±0.95	+1.65±0.67	1.56	1.01	Raccordement avec étoiles Nord seules
4	9	+31.79±1.34	+23.16±1.19	-44.27±1.07	+1.35±0.83	-3.12±0.75	+1.47±0.70	1.79	1.17	LSI 61°303 et étoiles Sud éliminées
5	9	+32.49±1.17	+22.79±1.03	-43.10±1.10	+1.79±0.77	-3.31±0.67	+1.64±0.70	1.66	0.96	HR 1099 et étoiles Sud éliminées
6	9	+31.41±1.32	+23.13±1.18	-44.13±1.07	+1.03±0.85	-3.27±0.76	+1.70±0.71	1.77	1.10	ALGOL et étoiles Sud éliminées
7	9	+32.18±1.34	+23.32±1.13	-43.83±1.08	+1.20±0.89	-3.02±0.74	+1.43±0.74	1.78	1.11	σCrB et étoiles Sud éliminées
8	9	+32.02±1.17	+22.96±1.04	-44.43±1.03	+1.02±0.75	-3.43±0.70	+0.66±0.70	1.91	0.97	SZ Psc et étoiles Sud éliminées
9	9	+31.18±1.25	+21.54±1.16	-44.32±0.98	+1.57±0.79	-2.48±0.74	+1.58±0.65	1.67	0.96	AR Lac et étoiles Sud éliminées
10	9	32.33±1.17	+24.65±1.18	-44.57±1.00	+1.30±0.75	-2.77±0.74	+1.54±0.66	1.69	0.97	IIPeg et étoiles Sud éliminées
11	8	+32.21±1.29	+22.94±1.14	-43.15±1.17	+1.85±0.83	-3.38±0.72	+1.67±0.74	1.68	1.07	LSI 61°303, HR 1099 et étoiles Sud éliminées
12	7	+32.03±1.39	+23.17±1.15	-42.19±1.26	+1.63±1.00	-3.56±0.77	+2.08±0.84	1.63	1.01	ALGOL, σCrB, HR1099 et étoiles Sud éliminées
13	8	+32.46±1.10	+22.77±0.97	-43.18±1.13	+1.44±0.73	-3.68±0.67	+0.68±0.73	1.79	0.85	HR1099, SZ Psc et étoiles Sud éliminées
14	5	+30.76±1.29	+23.91±1.34	-42.23±1.17	+1.69±0.94	-2.29±0.86	+2.52±0.77	1.34	0.71	ALGOL, HR1099, HD32918, σCrB, AR Lac, IIPeg et étoiles Sud éliminées
15	5	+31.33±1.78	+22.94±1.65	-42.11±1.49	+1.66±1.32	-4.51±1.13	+1.13±1.01	1.68	1.00	ALGOL,σCrB, HR1099,LSI61°303 et les étoiles Sud éliminées.

Table 8. Résultat des différents cas du raccordement des repères VLBI et HIPPARCOS. N est le nombre de radio étoiles utilisées, σ est la moyenne quadratique des résidus après l'ajustement et R est le paramètre qui caractérise la qualité de l'ajustement.

Unité de A<sub>1</sub>, A<sub>2</sub>, A<sub>3</sub>, et σ : 0.001" - Unité de Ā<sub>1</sub>, Ā<sub>2</sub>, Ā<sub>3</sub>, : 0.001"/an

CAS	$\Delta A_1$	$\Delta A_2$	$\Delta A_3$	$\Delta \dot{A}_1$	$\Delta \dot{A}_2$	$\Delta \dot{A}_3$	COEFFICIENTS DE CORRELATION					
							$A_1 A_2$	$A_1 A_3$	$A_2 A_3$	$\dot{A}_1 \dot{A}_2$	$\dot{A}_1 \dot{A}_3$	$\dot{A}_2 \dot{A}_3$
1	0.8	1.4	0.6	0.1	0.3	0.7	-0.06	+0.31	-0.18	-0.05	+0.27	-0.18
2	0.7	1.5	0.6	0.0	0.3	0.5	-0.06	+0.30	-0.21	-0.06	+0.26	-0.22
3	1.0	1.5	0.7	0.1	0.7	1.0	-0.005	+0.32	-0.16	-0.04	+0.28	-0.15
4	1.3	1.5	0.7	0.8	0.2	0.7	+0.007	+0.24	-0.13	-0.10	+0.19	-0.09
5	2.1	2.1	1.7	0.3	0.5	0.9	+0.02	+0.28	-0.12	+0.06	+0.23	-0.10
6	1.1	1.6	0.8	1.1	0.4	1.0	-0.03	+0.23	-0.18	+0.06	+0.15	-0.17
7	1.6	1.5	1.1	0.9	0.0	0.7	+0.03	+0.26	-0.10	+0.14	+0.21	-0.06
8	1.7	2.0	0.6	1.3	0.6	0.9	+0.01	+0.31	-0.08	+0.09	+0.30	-0.02
9	0.9	2.9	0.7	0.5	0.7	0.9	+0.11	+0.17	-0.06	+0.19	+0.13	-0.04
10	2.0	0.3	0.4	0.9	0.3	0.8	+0.04	+0.20	-0.12	+0.13	+0.15	-0.09
11	1.7	2.1	1.6	0.2	0.5	0.9	-0.01	+0.27	-0.15	+0.05	+0.22	-0.11
12	1.5	1.6	2.2	0.4	0.7	1.3	-0.08	+0.33	-0.19	-0.07	+0.31	-0.16
13	2.2	2.3	1.6	0.8	1.0	0.9	+0.02	+0.30	-0.12	+0.08	+0.24	-0.08
14	0.6	0.8	2.4	0.3	0.8	2.0	+0.06	+0.13	-0.17	+0.06	+0.12	-0.13
15	0.7	1.2	1.9	0.3	1.3	0.1	-0.15	+0.43	-0.33	-0.11	+0.43	-0.25

Table 9. Différences et  $(i=1,2,3)$  entre les valeurs des 6 paramètres de raccordement calculées et utilisées dans la simulation des observations HIPPARCOS en nombre de fois les incertitudes respectives. Les six dernières colonnes donnent les coefficients de corrélation entre les angles et les composantes de la vitesse angulaire respectivement.

ne varient pas. La précision de l'ajustement donnée par la moyenne quadratique des résidus ( $\sigma$  dans le Tableau 8) s'améliore de 25% quand on raccorde les repères avec les 10 radio étoiles Nord seules. Dans ce cas, la valeur R indique qu'il y a une probabilité de 45% d'avoir une distribution gaussienne de résidus après l'ajustement.

Sept autres cas de raccordement ont été réalisés avec 9 radio étoiles de l'hémisphère Nord (cas 4 à 10) pour tester l'effet des étoiles individuelles sur le raccordement. Dans chaque solution on a éliminé un objet, parce que ses caractéristiques physiques et/ou astrométriques font de lui un cas particulier (voir paragraphe ci-dessus). La précision de l'ajustement donnée par la moyenne quadratique des résidus et les valeurs du paramètre R indiquent que la qualité du raccordement dans ces cas est comparable à celui du cas 3 (toutes les étoiles Nord).

### *Conclusion*

Nous avons analysé la qualité du raccordement entre les repères VLBI et HIPPARCOS via les étoiles radio en simulant le plus réalistement possible les observations du satellite HIPPARCOS. Le nombre de radio étoiles utilisées pour le raccordement varie entre 5 et 14, la liste complète étant dressée à partir des observations de Lestrade et al (1988) et de White et al (1990), Nous avons assigné aux observations simulées d'HIPPARCOS les incertitudes attendues pour les coordonnées et les mouvements propres qui déterminera le satellite (0.002" et 0.002"/an), à l'exception de LSI 61°303 (0.005" et 0.005"/an). Les observations VLBI ont été affectées des incertitudes réalistes, en fonction de la géométrie des réseaux : 0.002" et 0.002"/an pour les étoiles de l'hémisphère Nord, deux ensembles de valeurs différents pour les objets de l'hémisphère Sud (0.010", 0.007"/an et 0.005", 0.004"/an) et, tenant compte de la faiblesse des réseaux actuels pour déterminer les déclinaisons des objets proches de l'équateur, deux étoiles radio ont des incertitudes en déclinaison de 0.020".

Dans les différents cas de raccordement analysés, la rotation à l'époque initiale représentée par la matrice [R] avec les angles  $A_1$ ,  $A_2$ ,  $A_3$  est déterminées avec une précision au niveau d'un millième de seconde de degré. La précision de la rotation relative  $\dot{R}$  représentée par les composantes de la vitesse angulaire  $\dot{A}_1$ ,  $\dot{A}_2$ ,  $\dot{A}_3$  varie entre 0.0008"/an et 0.0015"/an. Ces deux résultats sont en accord avec les prédictions de Froeschlé et Kovalevsky (1982).

Dans la plupart des cas étudiés, c'est l'angle  $A_2$  qui est le plus mal déterminé avec une erreur systématique de deux fois son incertitude formelle dans notre simulation.

Les corrélations entre les éléments  $A_i$  de la matrice  $[R]$  et entre les éléments  $\dot{A}_i$  de la matrice  $[\dot{R}]$  sont faibles, au-dessous de 0.4.

On a étudié la qualité du raccordement quand certains objets sont éliminés. On a constaté que l'inclusion des étoiles radio à des déclinaisons négatives avec des incertitudes réalistes qui sont environ 5 fois moins bonnes que dans l'hémisphère Nord, n'améliore pas le raccordement et introduit un biais dans  $A_1$ ,  $A_2$  et  $A_3$ .

## Références bibliographiques du Chapitre IV

- ARGUE, A.N., 1989 : Coordinating Optical and Radio Reference Frames, Impact of HIPARCOS.
- BARTEL, N., HERRING, T.A., RATNER, M.I., SHAPIRO, I.I., COREY, B.E., 1986 : *Nature*, **319**, 733.
- BAUDRY, A., MAZURIER, J.M., REQUIEME, Y., 1983 : *VLBI and Compact Radio Sources*, Proceedings, IAU Symposium No 110, Bologna, June 1983, edited by Fanti and Kellermann, Reidel Publisher.
- FROESCHLÉ, M., KOVALEVSKY, J., 1982 : *Astron. Astrophys.*, **116**, 89.
- HEMENWAY, DUNCOMBE, R.L., 1985 : *Proceedings of the IAU Symposium* 109, 613.
- LESTRADE, J.-F., PRESTON, R.A., SLADE, M.A., 1982 : *Very Long Baseline Interferometry Techniques*, Conf. CNES, Toulouse, France, F. Biraud (ed.), Ed. Cepadues, 199.
- LESTRADE, J.-F., PRESTON, R.A., REQUIEME, Y., RAPAPORT, M., MUTEL, R.L., 1985 : *Proceedings of a Colloquium on the European Astrometric Satellite HIPPARCOS - Scientific Aspects of the Inert Catalogue Preparation*, Aussois, France.
- LESTRADE, J.-F., REQUIEME, Y., RAPAPORT, PRESTON, R.A., 1988 : *The Earth's Rotation and Reference Frames for Geodesy and Geodynamics*, G.W. Williams and A. Babcock (eds.), Reidel, 67.
- LESTRADE, J.-F., NIELL, A.E., PRESTON, R.A., MUTEL, R.L., 1988 : *Astron. J.*, **96**, 1746.
- WALTER, H.G., 1977 : *Astron. Astroph. Supp.*, **30**, 381.
- WHITE, L.W., LESTRADE, J.-F., JAUNCEY, D.L., PHILLIPS, R.B., PRESTON, R.A., REYNOLDS, J.E., 1990 : *Astron.J.*, **99**, 405.

## CONCLUSION GENERALE

Les positions des sources radio extragalactiques déterminées avec la technique d'interférométrie à très longue base (VLBI) sont à présent la meilleure réalisation d'un repère céleste non-tournant. A la suite des discussions entre les membres du Working Group on Reference Systems de l' Union Astronomique Internationale il s'avère que dans l'avenir le repère céleste extragalactique sera la matérialisation du système de référence céleste primaire.

Les études présentées dans ce mémoire sont une contribution à la réalisation, l'optimisation et l'accessibilité du repère extragalactique VLBI.

Nous avons développé des méthodes pour analyser la cohérence entre les réalisations individuelles du repère extragalactique VLBI. Nos analyses montrent qu'il existe encore des rotations globales entre les axes des repères qui peuvent atteindre  $0,002''$ . Une large partie de ces rotations est due au fait que dans les solutions des différents laboratoires on prend une date origine pour fixer les paramètres d'orientation de la Terre (notamment  $d\psi$  et  $d\epsilon$ ). Quand on élimine cette rotation arbitraire, l'orientation relative résiduelle est de l'ordre de  $0,0005''$ . Outre les rotations globales, on a mis en évidence des déformations régionales dans certaines zones du ciel au niveau de  $0,002''$ . Une meilleure stratégie pour fixer arbitrairement l'origine des ascensions droites, une distribution plus homogène des stations sur la Terre (et en particulier dans l'hémisphère Sud), et de meilleures modélisations sont des facteurs qui pourraient améliorer la cohérence des repères individuels. Le choix du quasar 3C273B pour fixer arbitrairement l'origine sur l'équateur n'a pas été heureux. Il s'agit de la source radio la plus brillante en optique, mais elle présente une structure complexe variable qui peut provoquer des orientations différentes des axes des repères individuels (elle contribue notamment à une rotation autour de l'axe polaire). L'adoption d'une stratégie différente pour déterminer le point zéro sur l'équateur, sur la base des coordonnées d'un ensemble de sources radio - tel qu'on commence à le faire à présent - devrait corriger une partie des incohérences entre repères indépendants. La plupart des réseaux VLBI a des antennes dans l'hémisphère Nord, imposant donc des limites aux déclinaisons des sources radio observées. Le repère de référence ainsi déterminé n'est pas homogène, car la densité d'objets au Sud de l'équateur n'est pas comparable à celle dans l'hémisphère Nord, de même que la précision de leurs coordonnées. D'autre part, la qualité des déclinaisons des objets proches de l'équateur exige des lignes de base avec des longues composantes dans la direction Nord- Sud, configuration qu'on ne trouve pas dans les réseaux, à l'exception de la ligne de base Australie-Californie du DSN. Cette

mauvaise géométrie des réseaux pourrait être à l'origine des déformations régionales mises en évidence dans nos analyses.

Sur la base des meilleures réalisations individuelles du repère céleste extragalactique, nous avons élaboré un repère céleste combiné dans le cadre des activités de l'IERS, en suivant les recommandations de l'UAI et de l'UGGI. Le repère céleste de l'IERS est défini sur la base des coordonnées d'un ensemble de sources radio sélectionnées sur des critères géométriques et physiques, et il est densifié avec l'inclusion d'autres sources radio qui appartiennent aux catalogues individuels. Les directions des axes du repère céleste de l'IERS ont été fixées dans sa première réalisation, et elles sont conservées dans les réalisations suivantes pour assurer la continuité. Le repère céleste de l'IERS est la réalisation d'un repère quasi-inertiel au niveau de  $0,002''$  dans les positions individuelles des sources radio. Son alignement avec les axes du repère stellaire FK5 est assurée au niveau de la précision de ce dernier ( $0,04''$ ).

Dans l'algorithme classique d'analyse et de réduction des observations VLBI, les coordonnées équatoriales des sources radio sont ajustées simultanément aux paramètres d'orientation de la Terre et aux coordonnées des stations, entre autres. Un repère de référence céleste plus précis pourrait être obtenu si dans l'ajustement des paramètres on éliminait l'orientation de la Terre et de la ligne de base. Nous avons montré que ceci est possible si on construit une nouvelle "quantité observée" à partir des retards et des vitesses de frange déterminés avec la technique VLBI. Cette nouvelle quantité est la longueur de l'arc entre deux sources radio; elle permet de déterminer des coordonnées sphériques des radio sources dans un système arbitraire. Le système lié au plan de l'équateur n'étant pas adapté à cette méthode, nous avons exprimé les équations d'observation dans un système lié à la ligne de base. On a montré que la précision théorique de cette méthode est meilleure que  $0,001''$ , mais une comparaison avec le logiciel classique de réduction et d'analyse VLBI s'avère nécessaire. On envisage de réaliser cela à partir de la simulation d'observations simultanées de paires de sources radio. D'autre part, il est nécessaire de pousser la précision de la modélisation au delà de  $0,001''$ ; cela est possible en utilisant un interféromètre à trois éléments pour les observations, ce qui permettrait de construire un système de référence lié à deux lignes de base. Pour mettre en oeuvre la nouvelle méthode il faudra élaborer des programmes d'observation ad hoc. Si la comparaison des résultats avec ceux de l'algorithme classique VLBI prouve que la méthode est performante, elle sera introduite dans un nouvel algorithme de réduction VLBI développé en France.

Les réalisations les plus denses du repère extragalactique comportent un peu plus de 200 objets. Le Système Céleste de l'IERS est matérialisé par environ 250 sources radio ayant une distribution homogène dans le ciel. Le nombre de points de repère n'est pas suffisant pour réaliser un repère de densité comparable aux repères stellaires. Par ailleurs, les sources radio extragalactiques sont des objets très faibles en fréquences optiques et par conséquent elles sont difficilement observables par les télescopes optiques, ce qui limite l'accessibilité du repère. Le raccordement des repères célestes VLBI et HIPPARCOS bénéficiera aux deux techniques. D'une part, le repère stellaire du satellite astrométrique HIPPARCOS sera raccordé à un repère non-tournant, et d'autre part, le raccordement rendra le repère VLBI accessible et dense en fréquences optiques. Sur la base des observations de 14 radio étoiles bien adaptées à l'observation par les deux techniques, nous avons analysé le raccordement entre les deux repères. Nous avons montré que la précision de ce raccordement est au niveau du millième de seconde de degré pour la rotation à l'époque initiale, et qu'elle varie entre  $0,0008''/\text{an}$  et  $0,0015''/\text{an}$  pour la vitesse de rotation relative. Dans les différents cas de raccordement analysés, nous avons constaté que l'ajout des étoiles radio à des déclinaisons négatives, mais ayant des incertitudes plusieurs fois supérieures de celles de l'hémisphère Nord n'améliore pas le raccordement. Il est souhaitable que dans un futur proche des observations VLBI soient développées dans l'hémisphère Sud, contribuant à améliorer la qualité du repère VLBI quant aux observations des sources radio extragalactiques, et à renforcer le raccordement VLBI-HIPPARCOS quant aux observations des étoiles radio au Sud de l'équateur.





IMPRIMERIE DE L'OBSERVATOIRE DE PARIS