

Vers un repère de référence céleste ICRF multi-longueur d'onde

Patrick Charlot

Laboratoire d'Astrophysique de Bordeaux





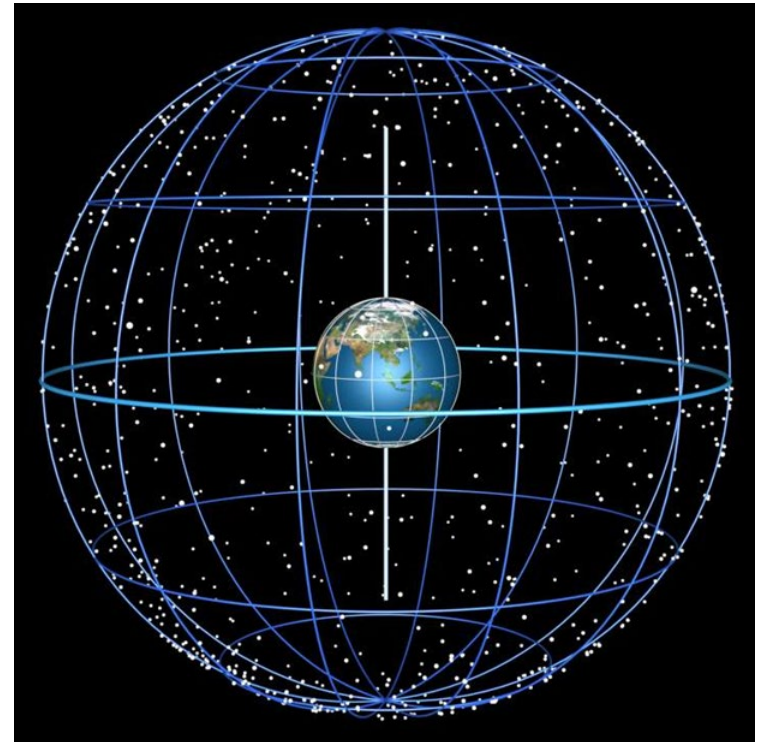
Déroulé de la présentation

- **Introduction**
 - Qu'est-ce que l'ICRF (repère, objets)?
 - De l'ICRF1 à l'ICRF3
- **Propriétés de l'ICRF3**
 - Couverture du ciel, précision du repère
 - Sources de définition
- **Le repère céleste Gaia**
 - Couverture du ciel
 - Précision
- **Problématique de la construction d'un repère multi-longueur d'onde**
- **Perspectives**

Qu'est ce que l'ICRF?

- Un repère de type « cinématique » (non-tournant par rapport à un repère inertiel local)
- Matérialisé par les directions d'objets extragalactiques (quasars)
 - Situés à des distances cosmologiques
 - Pas de mouvements propres transverses
- Observés depuis la fin des années 1970 par VLBI (produit géodésique) et plus récemment par Gaia
- Référence fondamentale en matière de repère d'espace depuis 1998 (adoptée par l'UAI)

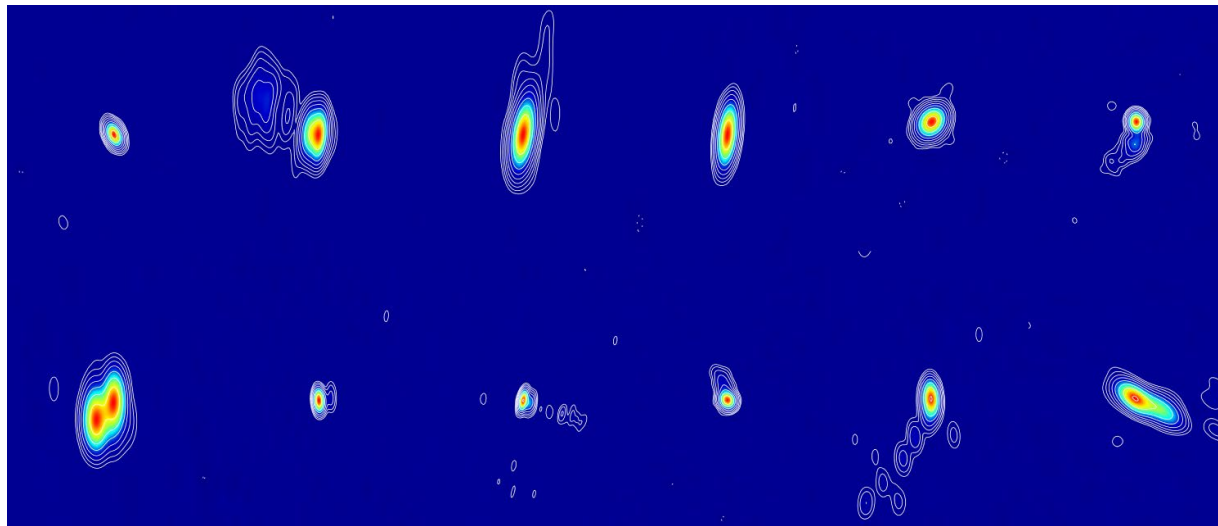
La « sphère » des quasars et la Terre



Crédit: E. Siegel (ScienceBlogs)

Les objets matérialisant le repère

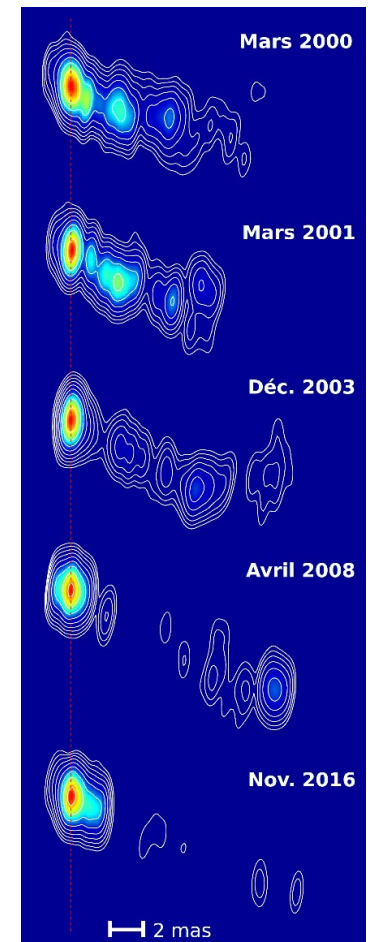
- Possèdent un noyau très compact mais morphologie radio pas toujours ponctuelle à l'échelle du VLBI
- Existence d'un jet uni-directionnel pouvant évoluer avec le temps dans beaucoup d'objets



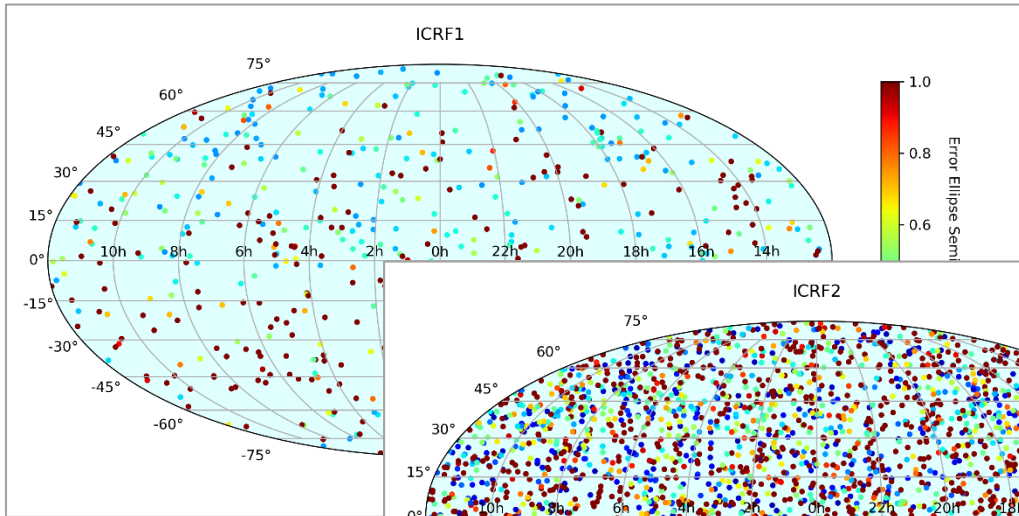
Images VLBI à 8.4 GHz (résolution de l'ordre de 1 mas) tirées de la base BVID (Bordeaux VLBI Image Database)



3C120

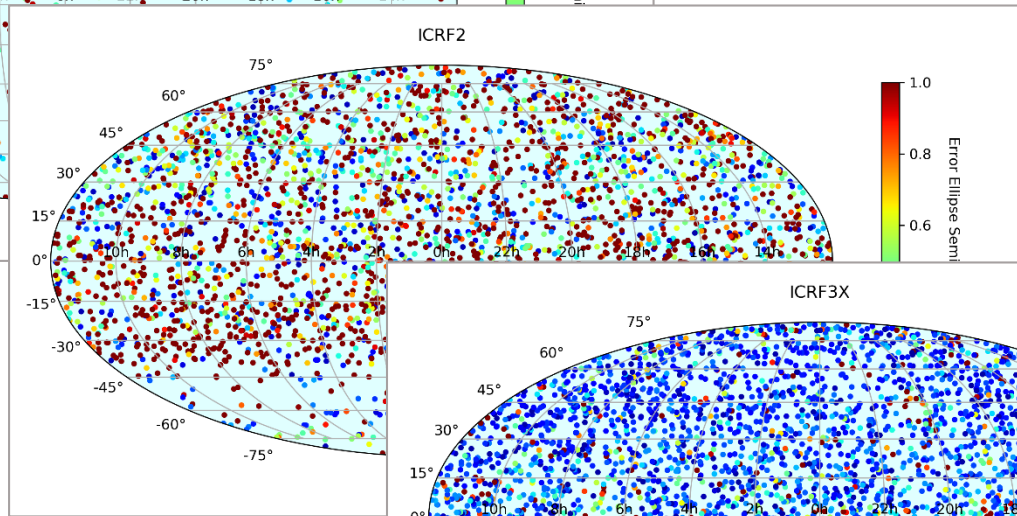


Trois réalisations radio en 20 ans



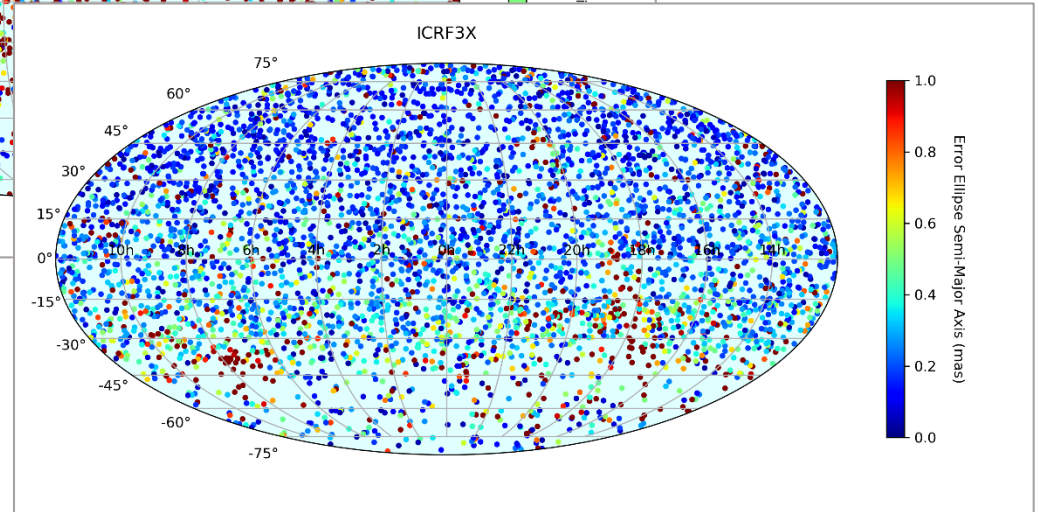
ICRF1 (1997)
608 sources

Ma et al. (1998)



ICRF2 (2009)
3414 sources

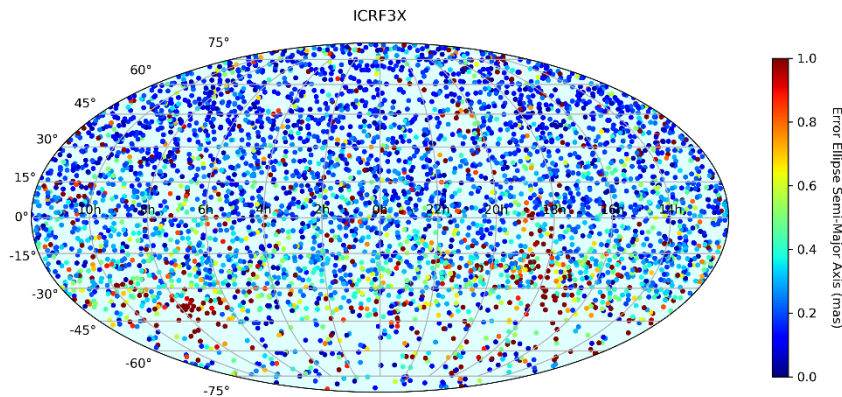
Fey et al. (2015)



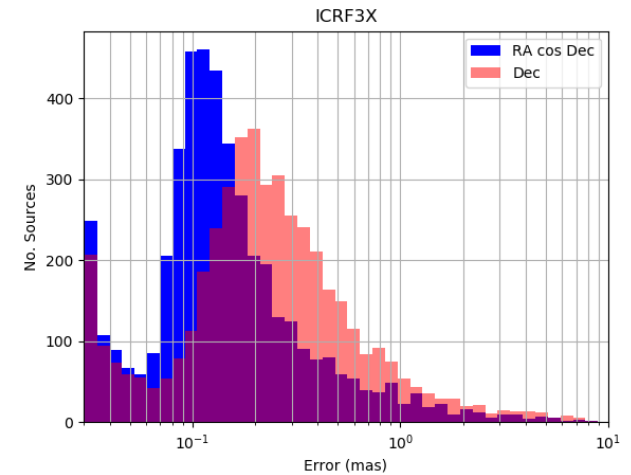
ICRF3 (2018)
4588 sources

Charlot et al. (2020)

Positions
à 8 GHz



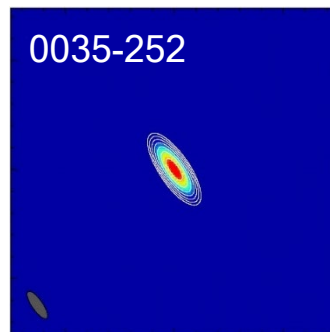
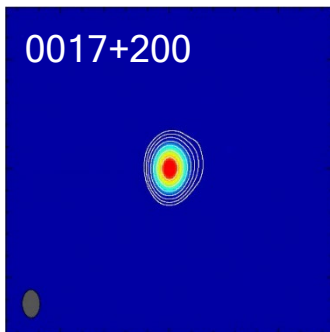
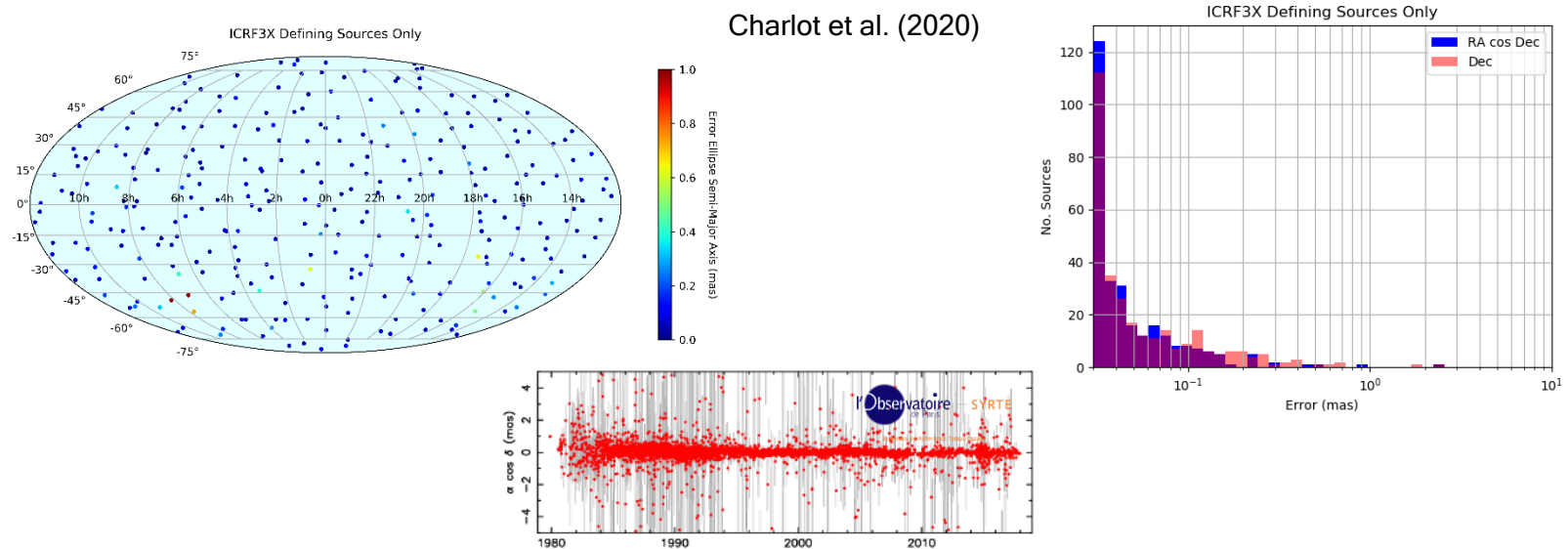
Charlot et al. (2020)



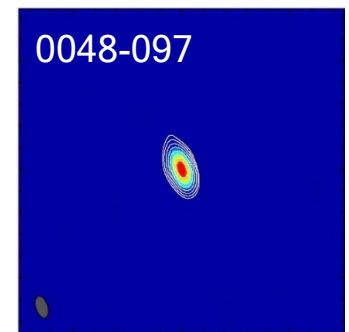
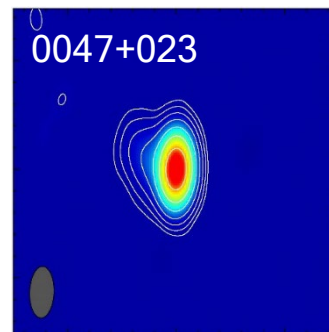
- Incertitudes médianes: 0.13 mas en ascension droite et 0.22 mas en déclinaison → déclinaison en moyenne deux fois moins précise
- Bruit plancher sur les coordonnées: 0.03 mas
- Existence d'un sous-ensemble d'environ 500 sources qui ont des incertitudes au niveau du bruit plancher
- Accélération galactocentrique estimée dans l'analyse (5.8 $\mu\text{as}/\text{an}$) et prise en compte dans les positions (époque de référence: 2015.0)

303 sources de définition

Distribuées uniformément sur le ciel, très stables et très compactes

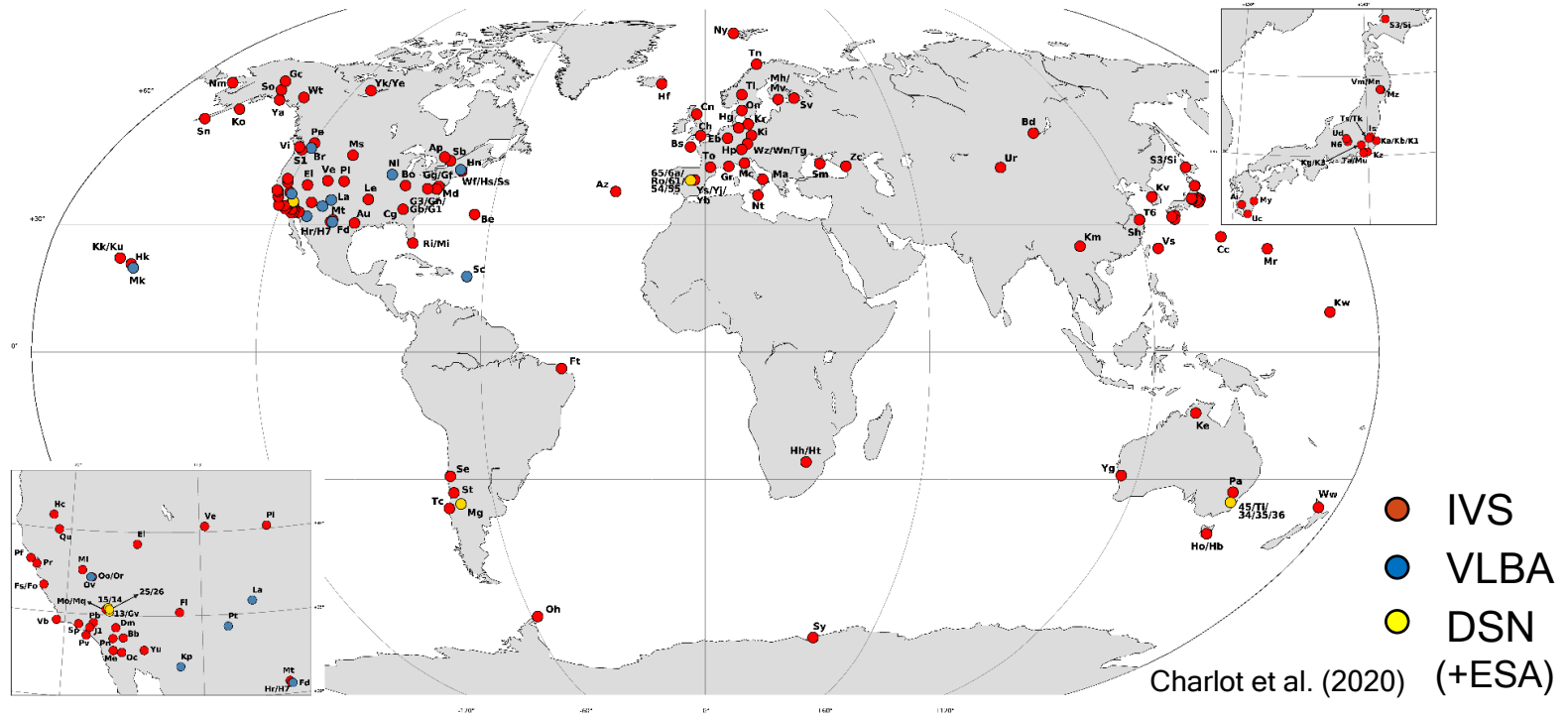


Taille images:
15 x 15 mas



ICRF3: le réseau de stations VLBI

Les données utilisées pour l'ICRF3 émanent de 167 antennes VLBI (situées sur 126 sites différents)

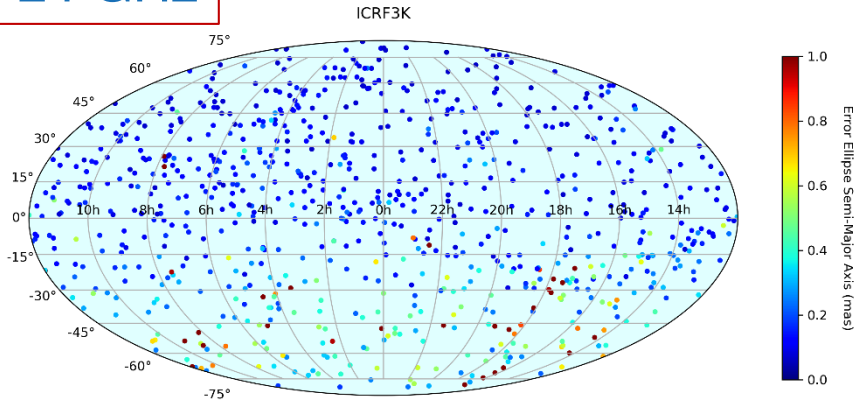


3 réseaux: IVS (International VLBI Service for Geodesy and Astrometry), VLBA (Very Long Baseline Array), DSN (Deep Space Network)

ICRF3-K et ICRF3-XKa

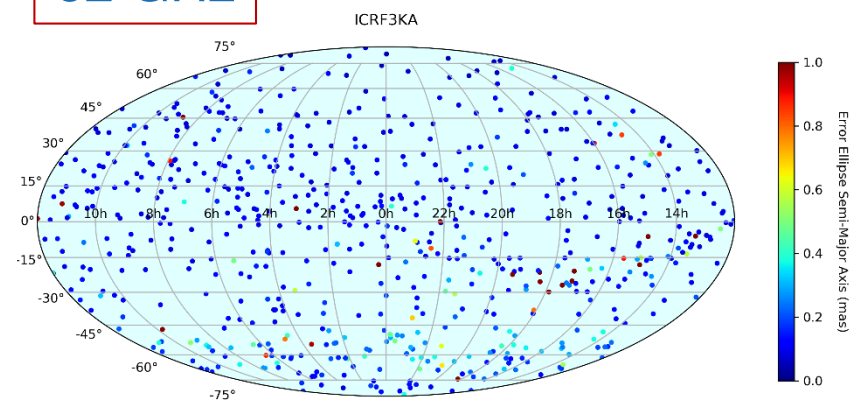
24 GHz

824 sources

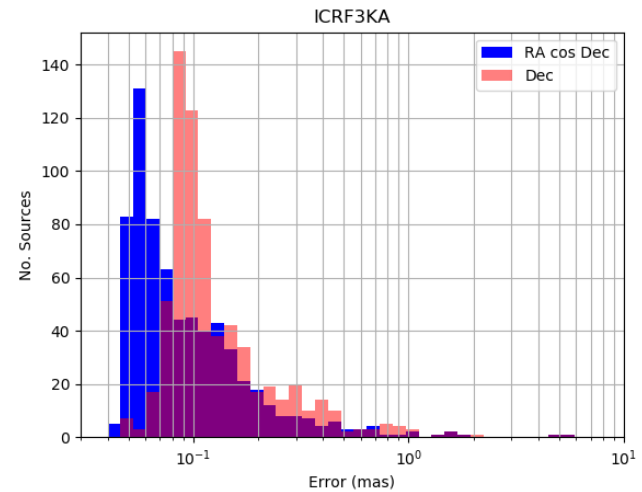
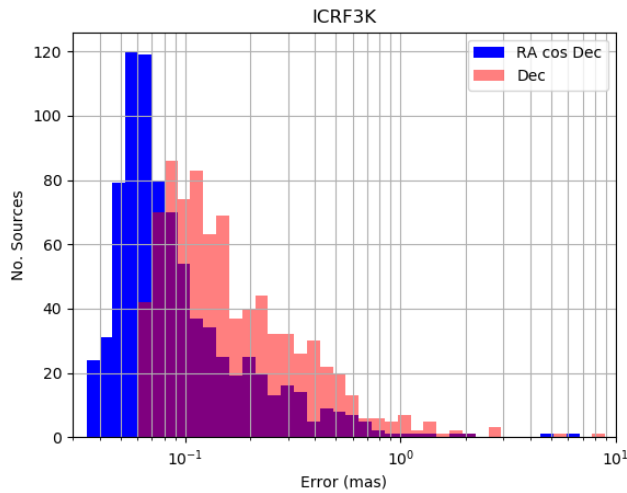


32 GHz

678 sources



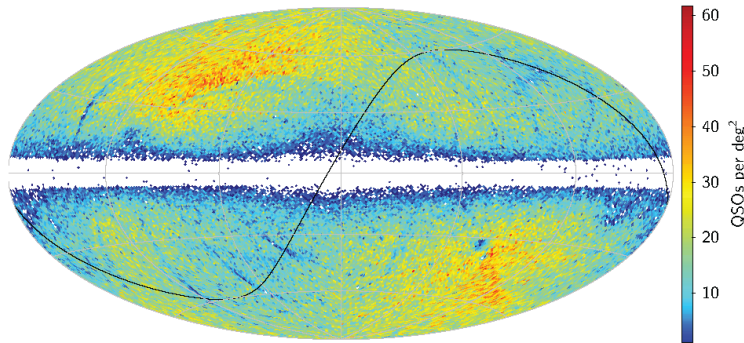
Charlot et al. (2020)





Première réalisation optique du repère extragalactique

25 avril 2018



Gaia-CRF2 (2018)

556 869 objets

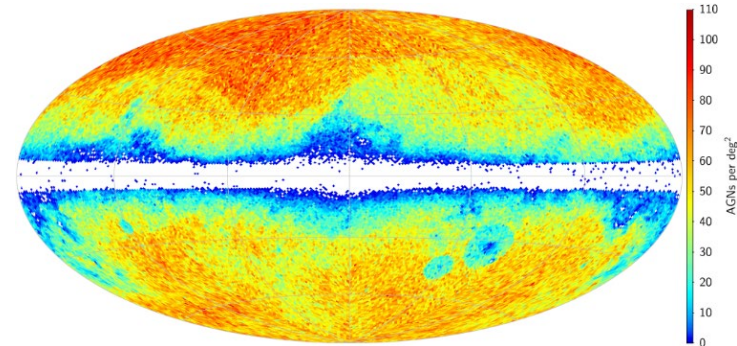
Gaia Collaboration (2018)

3 décembre 2020

Gaia-CRF3 (2020)

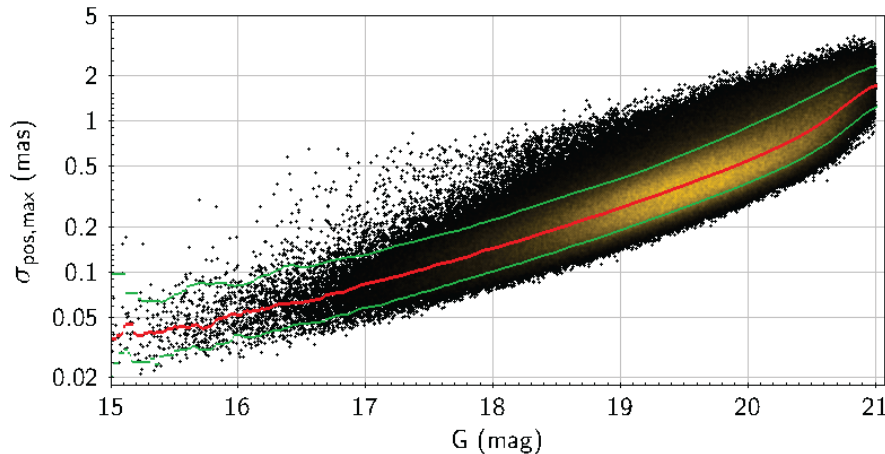
1 614 173 objets

Gaia Collaboration (2022)



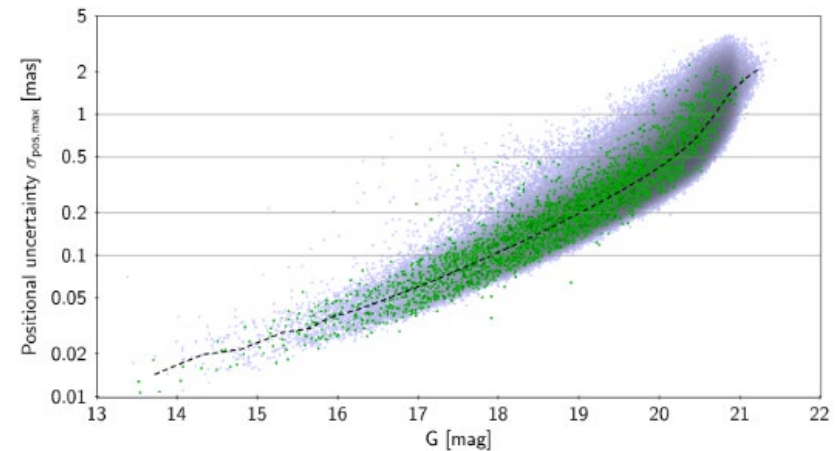


Gaia-CRF2



Gaia Collaboration (2018)

Gaia-CRF3



Gaia Collaboration (2022)

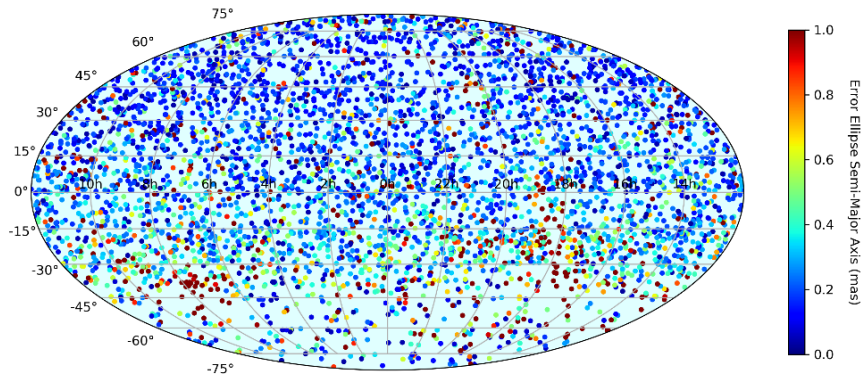
- Dépend de la magnitude des objets
 - Quelques 0.01 mas pour les objets les plus brillants
 - Atteint 1 mas à la magnitude 20.7 (Gaia-CRF3)
- Amélioration d'un facteur 0.8 entre Gaia-CRF3 et Gaia-CRF2
- Accélération galactocentrique détectée dans les données Gaia-CRF3 (amplitude de 5.05 $\mu\text{s}/\text{an}$, époque de référence 2016.0)



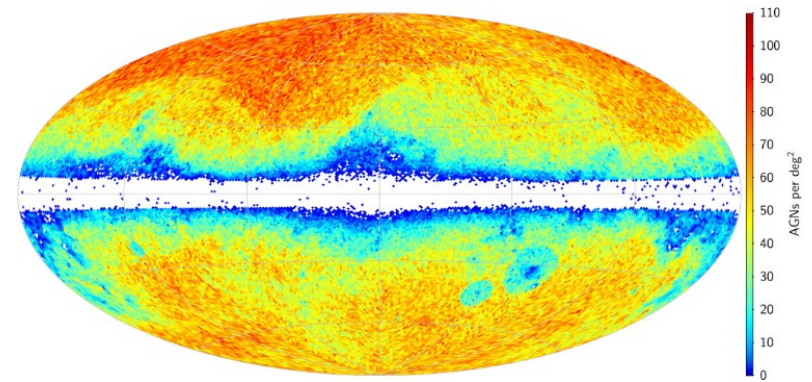
L'ICRF: état actuel

- Trois catalogues (S/X, K, X/Ka) co-existent aujourd'hui en radio plus un en optique (Gaia-CRF*) - tous avec le même niveau de précision.
- Gaia possède 300 fois plus de sources, mais le VLBI is indispensable pour la géodésie, la rotation de la Terre, la navigation spatiale,...
- Coopération et complémentarité sont de mise plutôt que la compétition.
- Prochaine étape: construire un repère céleste multi-longueur d'onde unifié intégrant toutes les bandes radio et la bande optique
- Nouveau groupe de travail de l'UAI intitulé "Multi-waveband ICRF" mis en place en 2021 à cette fin
- Questions (non-exhaustives) à étudier
 - Comment traiter la non-uniformité des repères?
 - Quelle valeur (commune) de l'amplitude de l'accélération galactocentrique utiliser ?
 - Comment traiter les sources dont la position varie avec la longueur d'onde et/ou avec le temps?
 - Terminologie à préciser

ICRF3



Gaia-CRF3



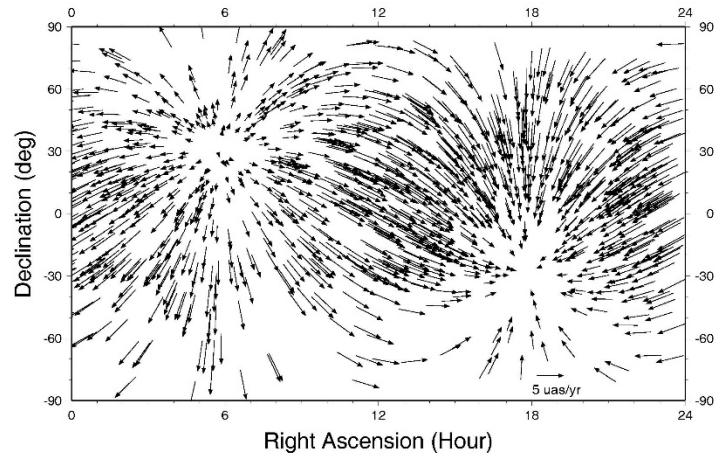
- ICRF3

- Déficit de sources et positions moins précises dans l'hémisphère sud
- Dû au faible nombre d'antennes VLBI dans l'hémisphère sud; difficile à corriger, du moins à court terme

- Gaia-CRF3

- Quasi-absence de sources dans le plan galactique du fait de la confusion stellaire
- Pourrait être corrigé en utilisant les positions ICRF3 en input dans cette zone

Accélération galactocentrique

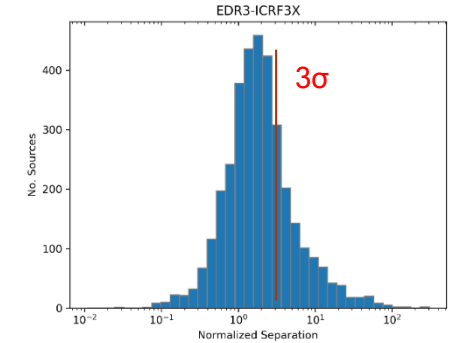
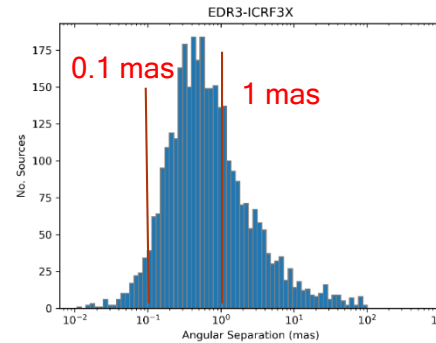


Produit des **mouvements propres fictifs** selon la position des sources dans le ciel (effet dipolaire)

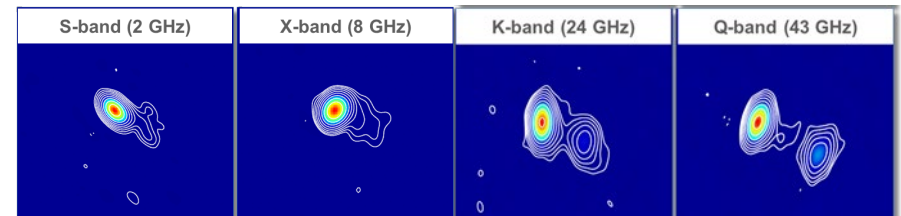
- Amplitude des mouvements propres diffère de 1.8σ ($5.8 \pm 0.3 \mu\text{as/an}$ pour l'ICRF3 et $5.05 \pm 0.35 \mu\text{as/an}$ pour le catalogue Gaia-CRF3)
- Approche différente
 - ICRF3: accélération estimée et implémentée dans la modélisation
 - Gaia-CRF3: effet non-corrigé, mouvements propres des sources estimés et considérés comme partie intégrante du catalogue
- **Nécessité d'adopter une approche commune**

Non-coïncidence des positions

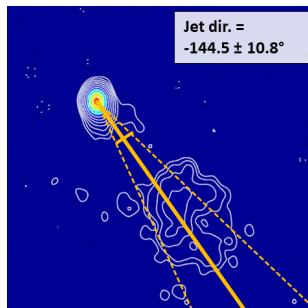
- Décalage significatif ($> 3\sigma$) entre positions ICRF3 et Gaia-CRF3 pour environ 20% des sources



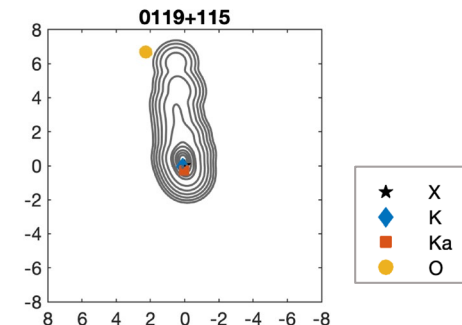
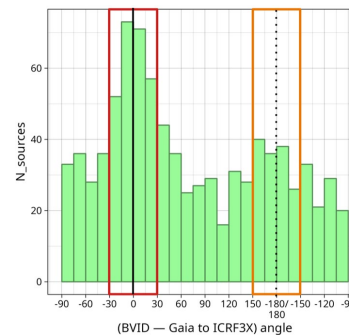
- Manifestation de la structure non-ponctuelle, et variable en fonction de la fréquence, des sources



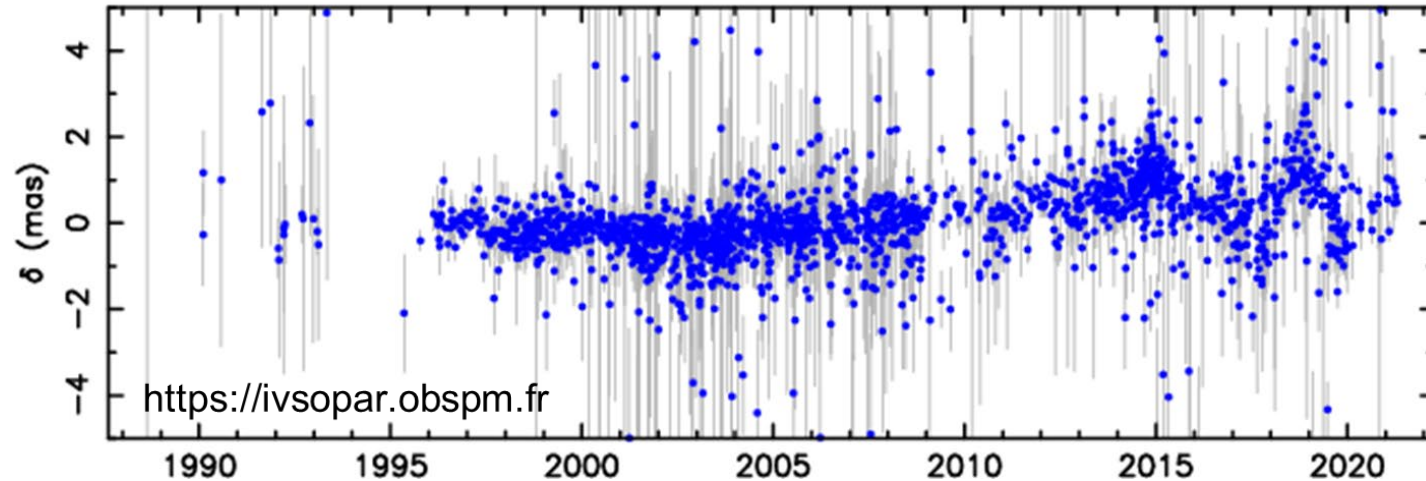
- Alignement des décalages avec la direction des jets observés en VLBI



Collioud et al. (2023)



Lambert et al. (2021)



- Les positions VLBI des sources peuvent aussi varier au cours du temps, à l'échelle de quelques semaines à quelques années
- Effet, là aussi, dû à l'évolution temporelle de leur morphologie radio
- Comment traiter cette variabilité lors de la construction d'un repère multi-longueur d'onde unifié?



Perspectives

- Etudier les différentes problématiques durant la première mandature du groupe de travail (2021-2024)
- Gaia-CRF4 planifié pour fin 2025
- Accumulation de nouvelles données VLBI qui justifie la création d'un nouvel ICRF
- Construction d'un nouveau repère VLBI et d'un repère multi-longueur d'onde unifié durant la seconde mandature du groupe de travail (2024-2027)
- Adoption par l'UAI lors de l'Assemblée Générale 2027

Merci de votre attention

