



LES REPÈRES ET LE TEMPS

Objectifs du cursus

- › Apprendre **les bases** de la mécanique orbitale.
 - › **Introduction**
 - Un peu d'histoire
 - L'ellipse
 - › **Le problème à deux corps**
 - › **Représenter une orbite**
 - Les paramètres orbitaux
 - › **Les repères et le temps**
 - Représenter le temps et l'espace
 - › **Le problème à trois corps**
- › **Les orbites**
 - Les différents types d'orbite
 - Les manœuvres orbitales
- › **Les perturbations orbitales**
 - Retour à la réalité
- › **Les trajectoires interplanétaires**
- › **Systèmes spatiaux**
 - Le spatial en plusieurs questions
 - L'abécédaire du satellite

- › Pour représenter une orbite, les éléments orbitaux seuls n'apportent pas une information exploitable. Il est nécessaire de connaître également
 - Le repère associé aux éléments orbitaux
 - Le temps associé aux éléments orbitaux

- › Ainsi, **la représentation du temps et des repères sont deux notions importantes en mécanique orbitale.**

Une brève histoire de temps ...

LA MESURE DU TEMPS

Clepsydre (~1500 av. JC)



Le sablier (XIII^e)



Horloge électronique à quartz (début XX^e)



Le cadran solaire
(~IV siècle av. JC)



Horloge mécanique (XIV^e)



Horloge atomique (mi XX^e)

LA MESURE DU TEMPS

Clepsydre (~1500 av. JC)



Le sablier (XIII^e)



Horloge électronique à quartz (début XX^e)



Le cadran solaire
(~IV siècle av. JC)



Horloge mécanique (XIV^e)



Horloge atomique (mi XX^e)

- › L'appareil de mesure du temps doit : Faire une **mesure précise** du temps et être **stable**

› Le Temps Atomique International (TAI)

Le Temps Atomique International a été officiellement introduit en janvier 1972. Sa réalisation est maintenue par le *Bureau International des Poids et Mesures* (BIPM) qui combine les données d'environ 400 horloges atomiques autour du monde.

Cette échelle de temps est d'une très grande stabilité. Elle est indépendante des phénomènes célestes.

› Le Temps Universel 1 (UT1)

C'est une échelle de temps astronomique.

Elle est définie comme le temps solaire moyen observé à Greenwich.

L'UT1 est donc fondée sur la rotation de Terre.

Par conséquent, cette échelle de temps varie continuellement, et non linéairement, à cause des effets pouvant influencer la rotation de la Terre (ex: ralentissement lié aux forces de marée lunaire).

› Le Temps Universel Coordonné (UTC)

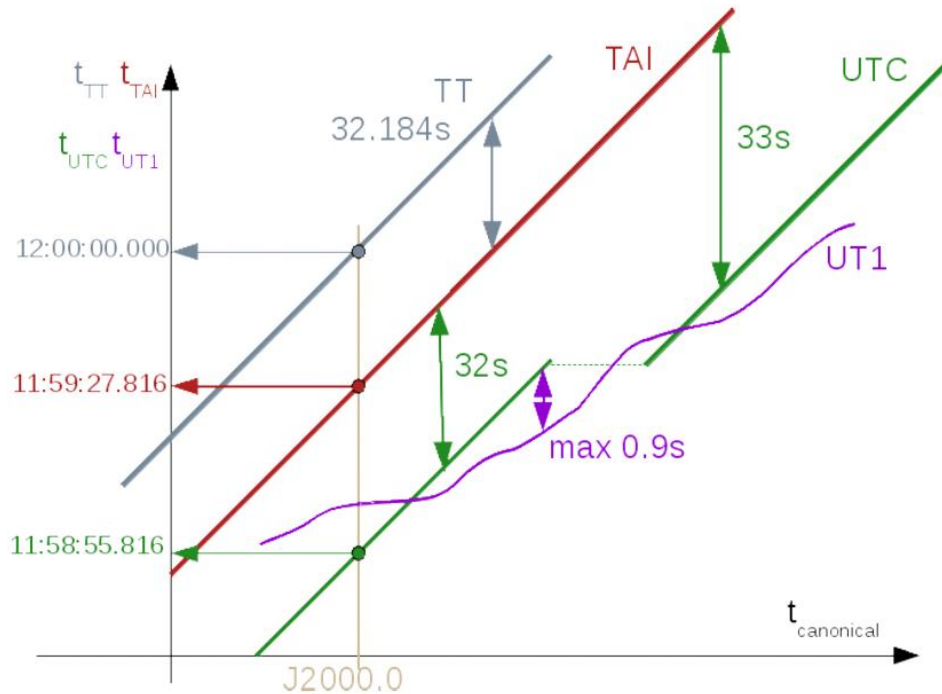
Le temps universel coordonné est un standard international sur lequel le temps civil est fondé.

L'UTC est une approximation de l'UT1 variant comme le TAI.

L'UTC est maintenu à moins de 0.9 secondes de l'UT1 en introduisant une seconde intercalaire aussi souvent que nécessaire.

La différence entre l'UT1 et l'UTC est appelée le DUT1

DIFFÉRENTES ÉCHELLES



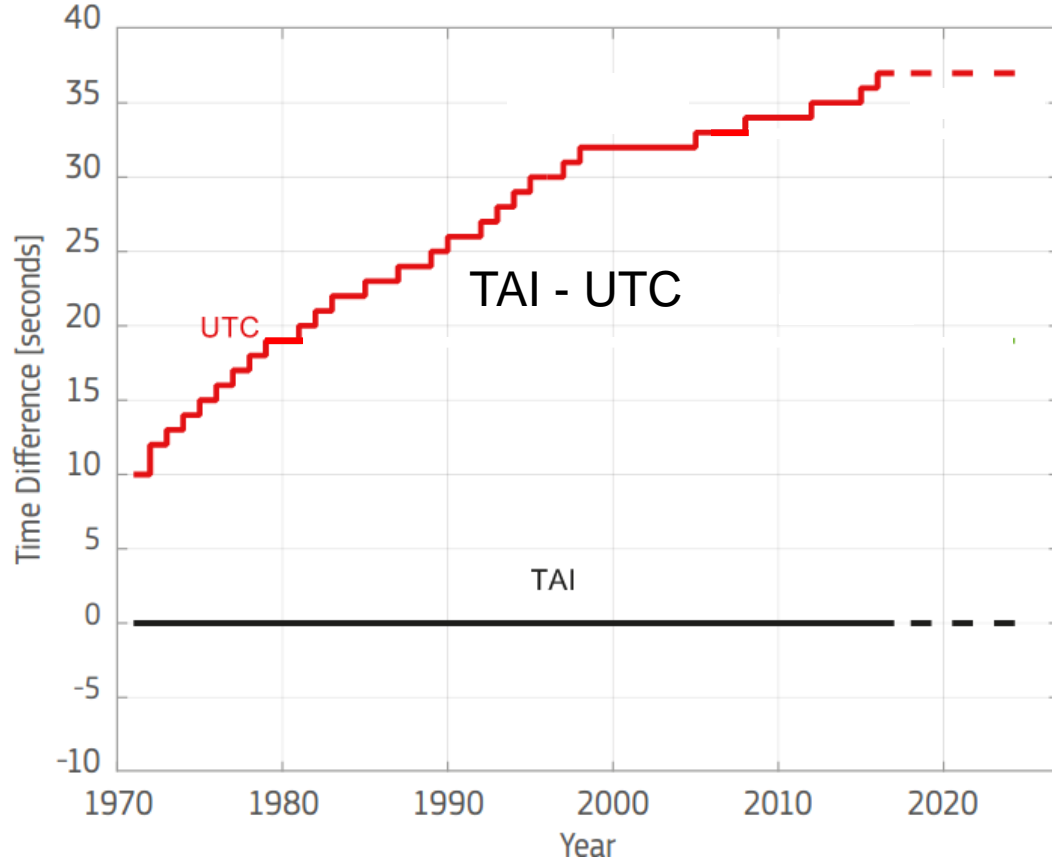
- › TT = Terrestrial Time
 - Autre échelle de temps plus ancienne utilisée par l'IAU (International Astronomical Union)
 - Alignée sur TAI depuis 1977

- › J2000 = 2000-01-01T12:00:00 TT
 - Référence de temps très utilisée
 - Notamment pour les repères inertiels J2000 et GCRF

Principales échelles de temps terrestre

Orekit Training

DIFFÉRENTES ÉCHELLES – UTC VS TAI



› Initialement, la différence entre le TAI et l'UTC était de 10 secondes.

› Depuis, 27 secondes intercalaires ont été introduites.

Aujourd'hui la différence entre le TAI et l'UTC est de 37 secondes

› Nombreuses autres échelles de temps: GMST, GPS, GST, GLONASS etc.



La Terre et la Lune (distances et tailles non représentatives)

Futura Science - Comment la rotation de la Terre a influencé la diversité de la vie

› Ralentissement de la rotation de la Terre

- Effet de marée Lune / Soleil
- Au Dévonien (-380Ma)
 - Un jour = 22h
 - Une année = 400 jours
- Evolution vers une rotation synchrone de la Terre et de la Lune
47 jours dans plusieurs milliards d'années

› Mais, la Terre accélère depuis 2016...

› **Format ISO 8601:** YYYY-MM-DDThh:mm:ss.sss(...) (Z)

Ex: 2023-02-01T10:45:32.123+01:00

- Ordre lexicographique = ordre chronologique
- Fraction de secondes: ss.sss(...) → pas de limite de décimales
- (Z): Zulu Time zone (nom militaire). Fuseau horaire, facultatif (Zulu=UTC+0, Alpha=UTC+1, Bravo=UTC+2, etc.)

› **Date Julienne:** nombre de jours Juliens (86400s) écoulés depuis une date de référence:

JD.XXX avec XXX = fraction de jour pour représenter l'heure

- Date julienne (modifiée) : -4712-01-01 (1858-11-17) à midi
- Agences : 1950-01-01 (CNES), 1980-01-06 (GPS), 2000-01-01 (IAU)

→ Pourquoi s'infliger ça ? Format plus compact et calculs plus simples (addition, soustraction...)

... et de repères

L'ART DE CHOISIR LA RÉFÉRENCE: LE BESOIN

- › Dans les chapitres précédents nous avons établi la forme et l'évolution d'une orbite dans un référentiel inertiel (galiléen)
- › En effet, le PFD $\sum \vec{F} = m\vec{a}$ n'est valide que dans ces référentiels
- › Cependant, l'exploitation des charges utiles des satellites nécessite de connaître leur position par rapport au sol (images, stations pour les communications)
- › On veut **connaître le mouvement du satellite p/r à la Terre**
Sachant que le repère Terrestre n'est pas galiléen
- › Repères en mécanique spatiale = problème très complexe !

› Exemples de problématiques:

▪ Satellite d'observation de la Terre

- A un instant t on sait le placer dans un repère inertiel (lois de Kepler)
- Au-dessus de quel point de la Terre est-il ? (notion de trace au sol)
- Comment l'orienter pour qu'il prenne une photo de Toulouse lors de sa prochaine orbite ?

▪ Sonde interplanétaire

- Lancement depuis la Terre (repère liée à la rotation de la Terre, non-inertiel)
- Quelle sera son orbite en repère inertiel une fois lancée ?
- Comment la faire arriver sur une autre planète (repères planétocentriques, héliocentriques) ?

› Les repères inertiels (Galiléens)

Repères fixes par rapport aux étoiles. Utiles pour décrire le mouvement des corps célestes et des satellites.

› Les repères terrestres

Prise en compte des effets de précession et de nutation du pôle, de la rotation de la Terre et du mouvement du pôle par rapport à la croûte terrestre.

› Les repères topocentriques

Repères liés aux stations sol (Nord – Est – Zénith)

› Les repères orbitaux

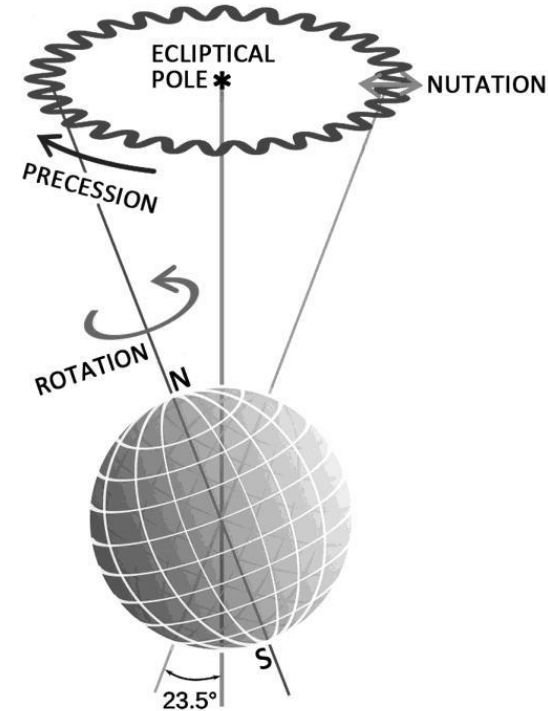
Repères associés au satellite

› Les autres repères possibles

Planétocentriques, héliocentriques (interplanétaires), télescopes ou caméras embarqués etc.

› Repère terrestre (International Terrestrial Reference Frame)

- **Obliquité - 41000 ans:**
Axe des pôles varie entre $22,1^\circ$ et $24,5^\circ$. Actuellement $23,44^\circ$
- **Précession - 26000 ans:**
Cône, toupie - Mouvement régulier: $1^\circ 23'$ / siècle
- **Nutation - 18,6 ans**
Mouvement harmonique: $< 20''$
- **Rotation propre - 24h**
(Temps sidéral) Non constante
- **Mouvement de la croûte Terrestre p/r aux pôles - Quotidien**
Mesuré tous les jours par l'[IERS](#) (EOP: Earth Orientation Parameters)



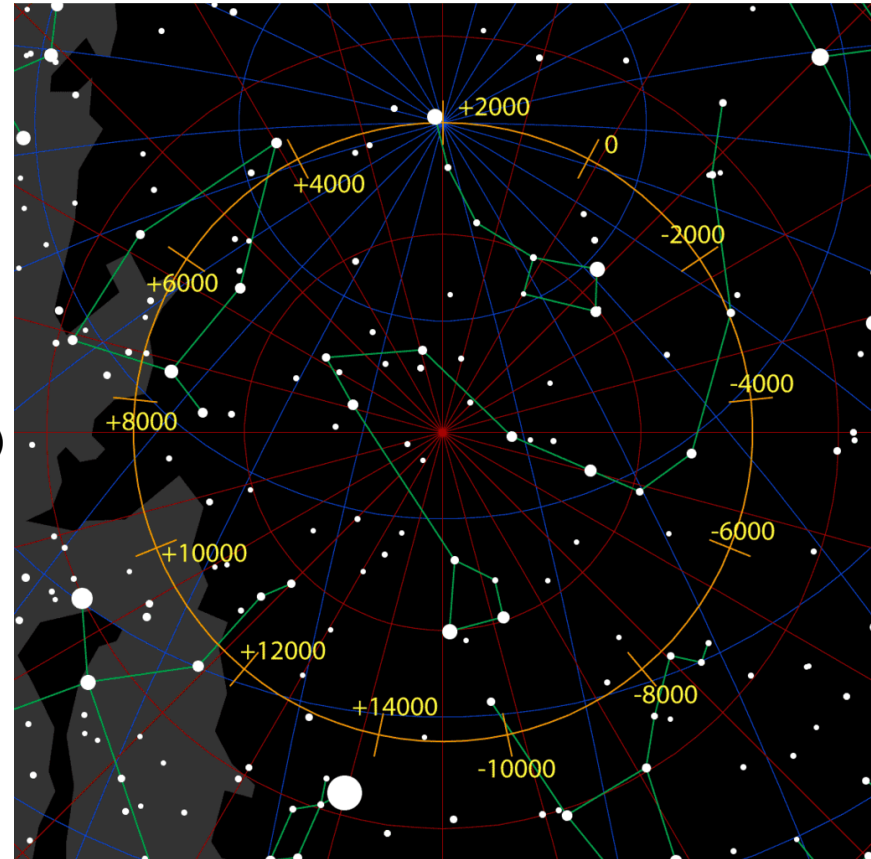
LE REPÈRE TERRESTRE: MOUVEMENT DU PÔLE

› Précession

▪ Précession des équinoxes

- Mesurée depuis l'antiquité
(Babyloniens, Egyptiens, Grecs, Aztèques...)
- Etoile polaire
 - Actuellement: α Ursae Minoris (Petite Ourse)
 - -2 800 BC: α Draconis (Thuban)
 - Dans 12 000 ans: α Lyrae (Véga)

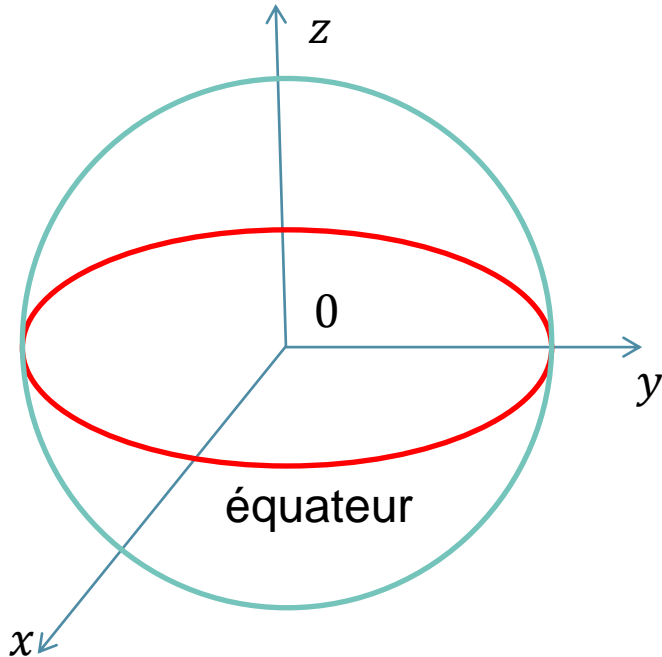
- › Modification excentricité Terre + évolution axe de rotation → [Paramètres de Milankovic](#)
→ [Variations cycliques du climat](#) (ères glaciaires)



Parcours du Pôle Nord Céleste parmi les Etoiles

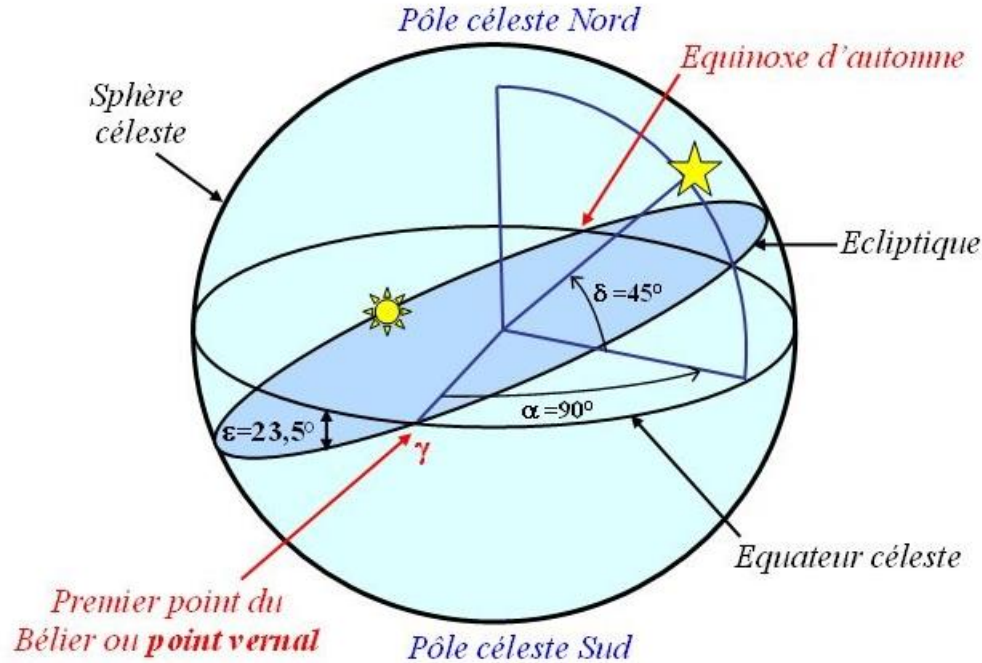
Wikipédia - Tau'olunga

› Le repère EME2000 (J2000) (l'ancienne référence)



- 0 centre de la Terre
- x orienté vers le point vernal le 1^{er} Janvier 2000 à 12H TT
- **On fixe la date pour le rendre inertiel !**
- z perpendiculaire équateur moyen
- y complète le trièdre
- J2000 se déplace avec la Terre autour du Soleil

REPÈRES INERTIELS: J2000 - POINT VERNAL



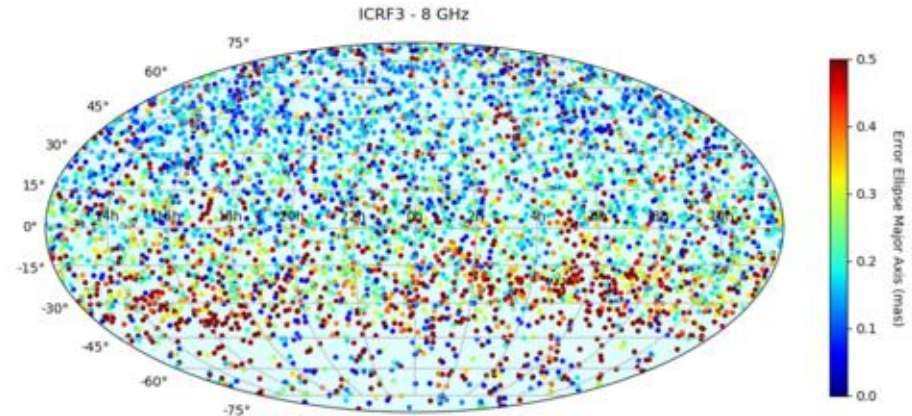
(α, δ) = Ascension-droite, déclinaison d'une étoile
 ϵ = Obliquité Terrestre

Le point vernal est l'un des deux points de la sphère céleste où l'équateur céleste et l'écliptique se croisent.

Plus précisément, ce point est défini par la position du Soleil sur la sphère céleste au moment de l'équinoxe de printemps dans l'hémisphère Nord.

› ICRF: International **C**elestial **R**eference **F**rame (la nouvelle référence)

- Origine: Barycentre Système Solaire
- Date, la même que J2000
- Axes quasi alignés avec J2000
(biais de moins de 0,025 arcsec)
- Calcul: mesure précise de centaines de sources radios lointaines (quasars)



Sources Radios ICRF3
[Observatoire de Paris](#)

› Gaia-CRF: satellite Gaia

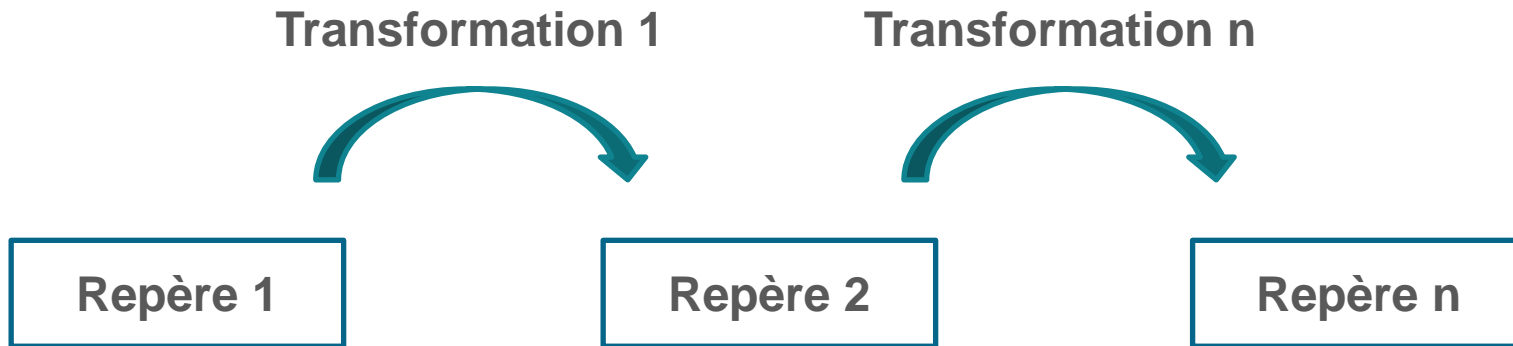
- Equivalent ICRF avec des mesures optiques

- › GCRF: G_{eocentric} C_{elestial} R_{eference} F_{rame} (la nouvelle référence)
 - Réalisation géocentrique de l'ICRF
 - Aligné avec ICRF

 - Origine: Centre gravité Terre
 - Se déplace avec la Terre !
Pas inertielle ? Si mais seulement sur des durées courtes (quelques jours)

 - Biais GCRF/J2000 < 0,025 arcsec ~ 6,43 µdeg
Erreur de 0,7m à 1 rayon terrestre

- › Il existe des relations parents / enfants entre les différents repères.
On parle alors de **transformation** entre les repères (translation + rotation)
Ainsi, par transformations successives, il est possible de passer facilement d'un repère à un autre.



REPÈRES: DE GCRF À ITRF

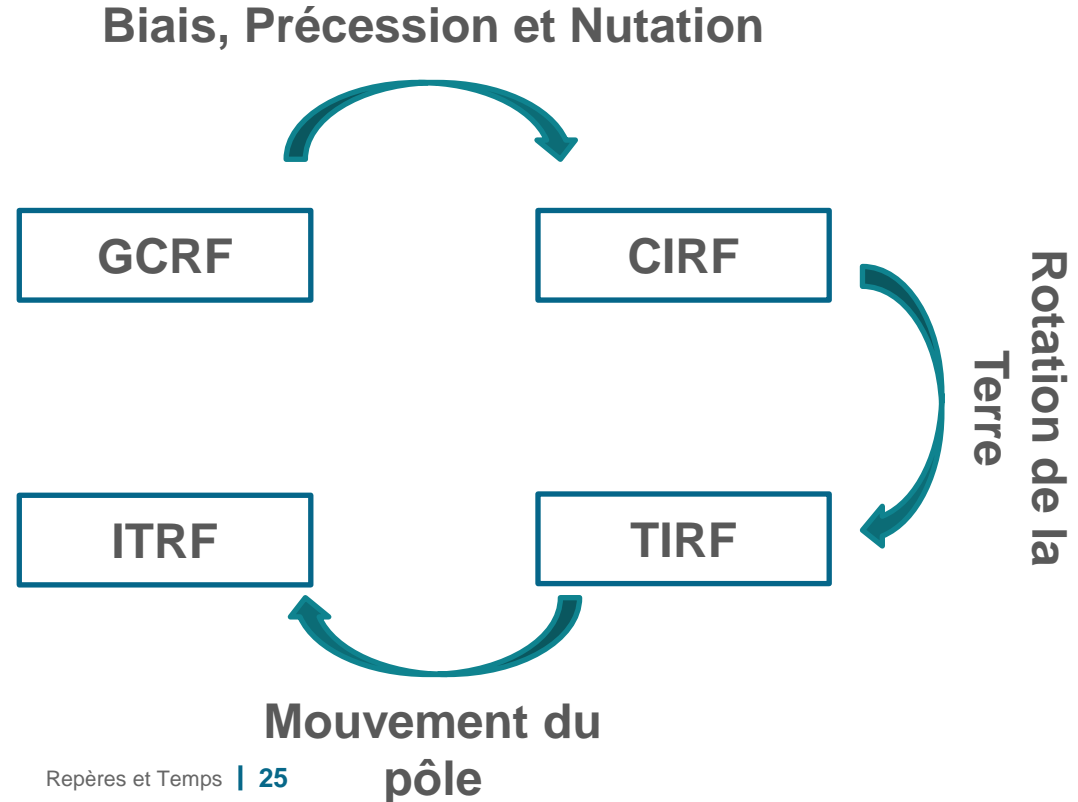
- › **GCRF** → **ITRF**: « le nouveau paradigme » - pas de lien avec l'équinoxe

Conventions IERS 2010

- › RF: Reference Frame

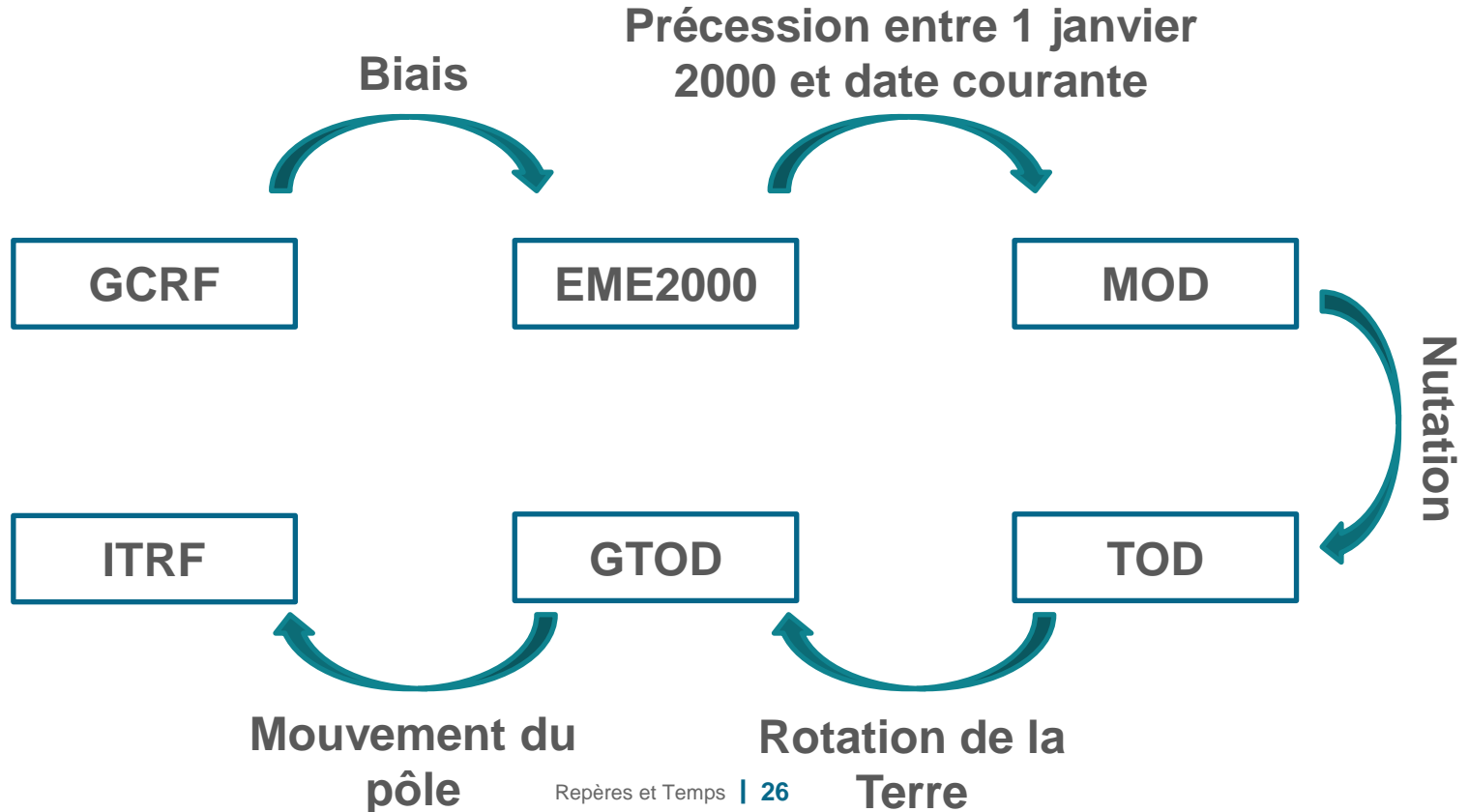
- › C'est compliqué !

- › Les différents noms de repères ne sont pas à retenir



REPÈRES: DE GCRF À ITRF

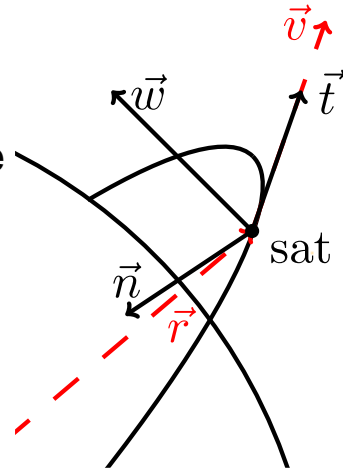
- › **GCRF → ITRF: « l'ancien paradigme »** - equinoxed-based transformations



REPÈRES: AUTRES REPÈRES

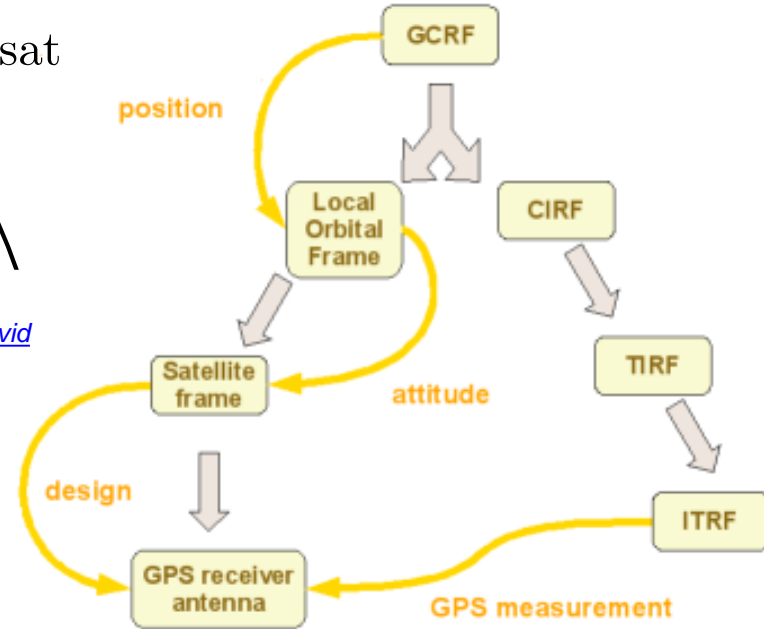
> Repère orbital local:

- Lié au centre de masse du satellite
- Axes = alignés avec position ou vitesse, et moment cinétique



> Repère satellite / instrument

- Attitude du satellite
- Position/orientation instrument



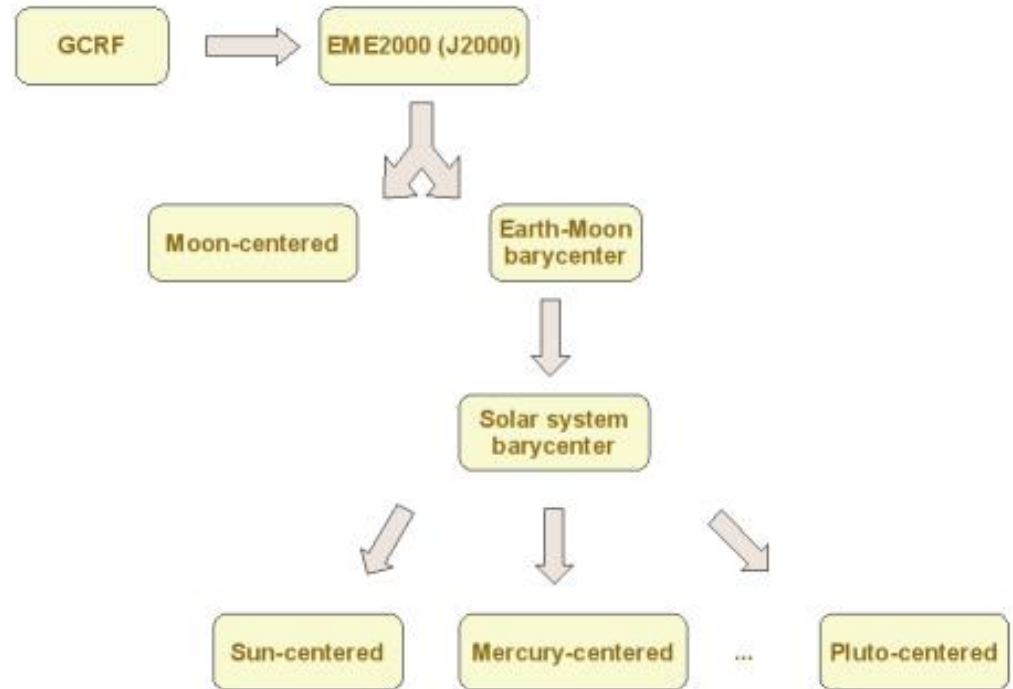
Repère instrument (antenne GPS)

[Orekit Architecture - Frames](#)

REPÈRES: ET SUR LES AUTRES PLANÈTES ?

› Pour les autres planètes ?

- Repères planéto-centrés
- Inertiels:
Alignés J2000
- Tournants:
Entraînés par la rotation du corps
(Soleil, planète, satellite etc.)

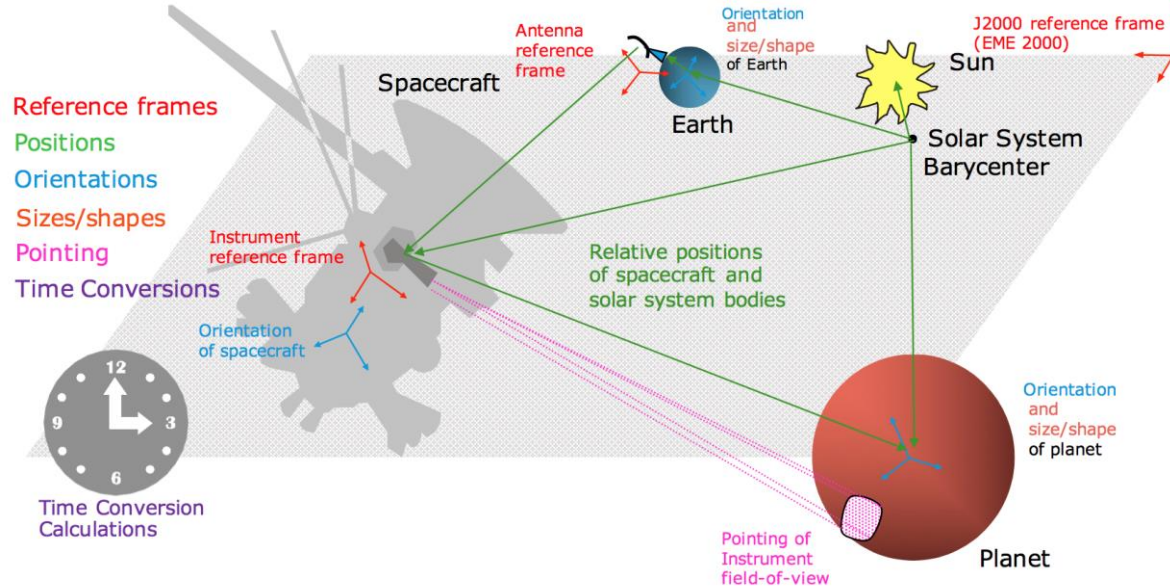


Solar System Frames
[Orekit Architecture - Frames](#)

REPÈRES: ET SUR LES AUTRES PLANÈTES ?

› Pour les autres planètes ? En pratique: Ephémérides JPL ou IMCCE

- JPL: Jet Propulsion Laboratory (NASA)
- IMCCE: Observatoire de Paris



[SPICE at ESA](#)

- › **Tout ça c'est compliqué...**
- › Comment fait-on **en pratique** pour calculer temps et repères ?
- › **On se base sur l'existant**: logiciels, bibliothèques de mécanique spatiale
Exemple: [Orekit](#), GMAT
- › Qui utilise des fichiers:
 - UTC-TAI (leap seconds): IERS et US Naval Observatory
 - Ephémérides des planètes: JPL ou IMCCE
 - Précession, nutation: IERS
 - EOP: Earth Orientation Parameters (IERS, calculés tous les jours)

- › Exemple: Orekit, gestion des dates et échelles de temps

```
// Time
TimeScale utc      = TimeScalesFactory.getUTC();
AbsoluteDate date = new AbsoluteDate("2023-02-01T10:45:12.123", utc);

2023-02-01T10:45:12.123 UTC
2023-02-01T10:45:49.123 TAI
2023-02-01T10:46:21.307 TT
```

- › Exemple: Orekit, gestion des repères et transformations

```
// Frames
Frame gcrf = FramesFactory.getGCRF();
Frame itrfr = FramesFactory.getITRF(IERSConventions.IERS_2010, false);

// Transform
Transform gcrfToItrfr = gcrf.getTransformTo(itrfr, date);

// Transform a position from GCRF to ITRF
Vector3D positionItrfr = gcrfToItrfr.transformPosition(positionGcrf);
```

- › [Cours de mécanique céleste](#) : Luc Duriez, observatoire de Lille
- › **[Orekit](#): Bibliothèque libre de mécanique spatiale (Java / Python)**
 - Architecture - [Time](#)
 - Architecture - [Frames](#)
- › Sites de l'[IERS](#) et de l'[IMCCE](#)
- › Wikipédia: [rotation de la Terre](#), [Julian day](#), ISO [8601](#), [ICRS](#) etc.
- › [Les cycles de Milankovitch et les changements climatiques](#)
(David Louapre, Science étonnante)



Maxime Journot

Ingénieur Mécanique Spatiale

maxime.journot@csgroup.eu

CS GROUP

22, AVENUE GALILÉE
92350 – LE PLESSIS-ROBINSON

TÉL : 01.41.28.40.00

csgroup.eu

BU ESPACE

PARC DE LA GRANDE PLAINE
RUE BRINDEJONC DES MOULINAIIS
BP 15872
31506 – TOULOUSE CEDEX 5

TÉL : 05.61.17.66.66

csgroup.eu

