

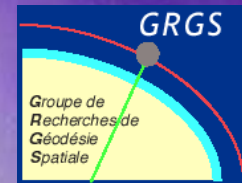
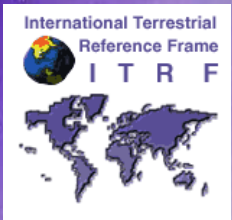


*David Coulot*



*Contributions des techniques de géodésie spatiale  
aux systèmes de référence terrestres*

*Travaux de thèse effectués en collaboration avec  
Ph. Berio, P. Exertier, O. Laurain et D. Féraudy (OCA/GEMINI)  
et Z. Altamimi (IGN/LAREG)*



*Systemes de Réference Terrestres*

*Contexte & Objectifs*

*Séries Temporelles*

*Télémétrie Laser sur Satellites*

*Analyse de Données de Télémétrie*

*Combinaison de Techniques*

*pourquoi ?*

*Conclusions & Perspectives*





# Contexte & Objectifs

A photograph of an astronaut in a white spacesuit floating in space. The astronaut is positioned in the center-right of the frame, with their body angled towards the left. The background is a vast expanse of Earth, showing a blue horizon and a dense layer of white clouds. In the lower-left corner, a portion of a solar panel array is visible, consisting of a grid of blue photovoltaic cells. The overall scene is brightly lit, suggesting the presence of the sun.

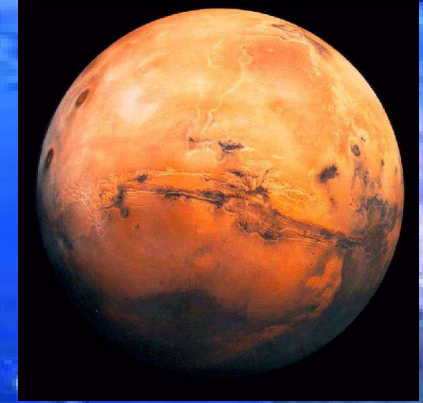
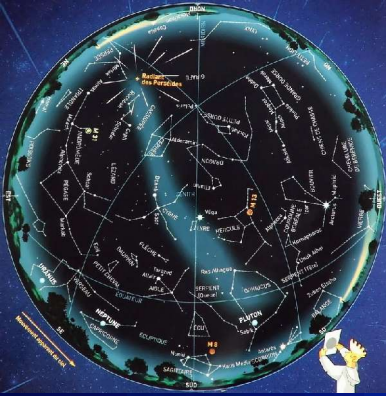
# Systemes de Référence & Séries Temporelles

# *Systèmes de Référence Terrestres*

## *Pourquoi ?*



*Se positionner sur Terre ou positionner un objet céleste par rapport à la Terre*



*Estimer des paramètres à partir de mesures spatiales*

*Géodésie spatiale : deux systèmes privilégiés*

*Paramètres de rotation*

*Repère céleste*

*Repère terrestre*

# *Systèmes de Référence Terrestres*

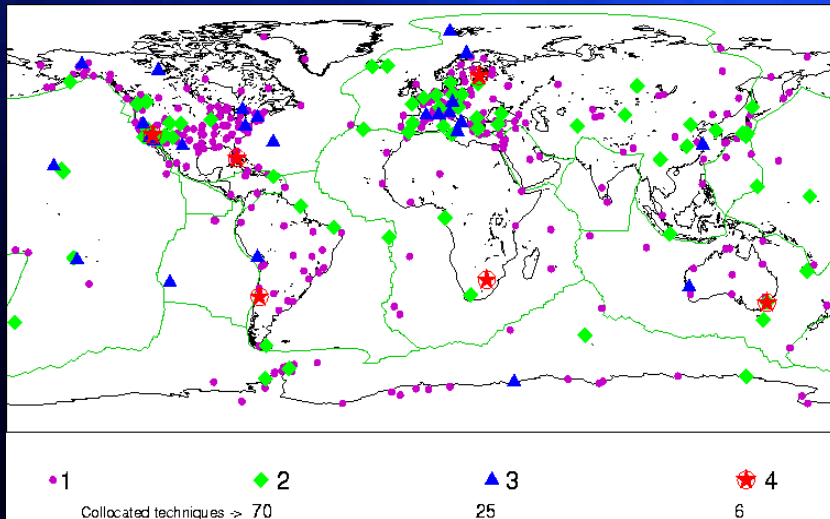
## *Repère de Référence Terrestre International*



*Réalise un Système de Référence géocentrique sans mouvement d'ensemble par rapport à la croûte terrestre*

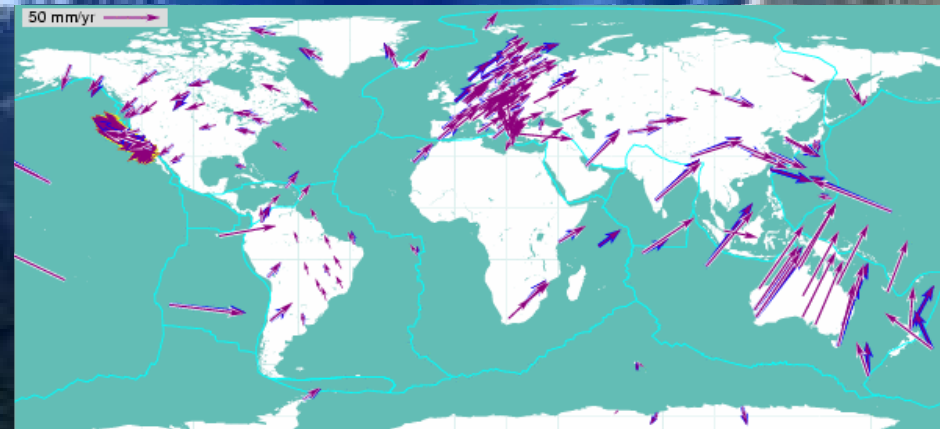
*Repose sur la combinaison de solutions individuelles calculées par technique (DORIS, GPS, LLR, SLR et VLBI)*

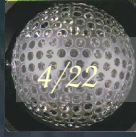
*Matérialisé par la donnée de*



*positions*

*et vitesses moyennes déterminées à une époque de référence*





# Systèmes de Référence Terrestres

## Paramètres de Rotation de la Terre

Axe de rotation terrestre n'est fixe ni dans l'espace, ni par rapport à la croûte

Attractions luni-solaires et planétaires



Offsets du pôle céleste

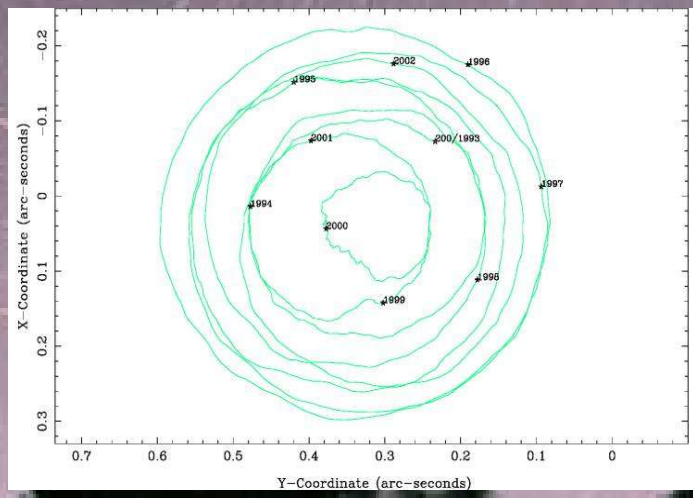
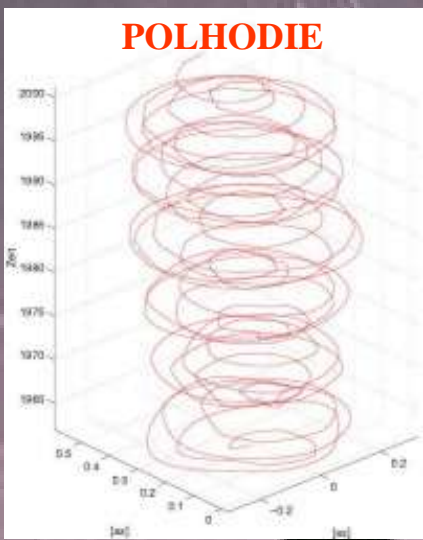
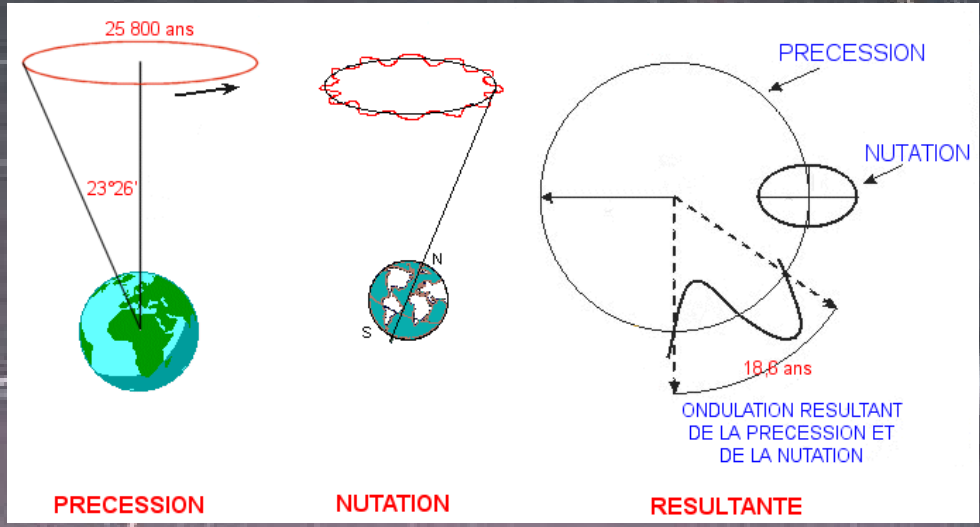


$(dy, de)$

Par rapport à la croûte ...

Coordonnées du pôle

$(x_p, y_p)$



Temps Universel

**UT**



# Séries temporelles

## Enjeux



- ♣ *Exactitude et échantillonnage des séries temporelles pour les Systèmes de Référence et la géodynamique*
  - *Méthode de calcul (orbites, approche multi-techniques)*
  - *Représentation des phénomènes*
  - *Méthode d'estimation*
- ♣ *Analyse des séries temporelles*
  - *Discrimination des signaux locaux et globaux*
  - *Analyse stochastique indispensable*
- ♣ *Télémétrie laser sur satellites*
  - *Développement d'une méthode d'estimation de séries temporelles*
  - *Mise en place d'outils pérennes pour fourniture de solutions vers l'ILRS et l'ITRS*
- ♣ *Combinaison de techniques*
  - *Développement d'une méthode fiable pour les PRT*
  - *Réponse au projet pilote de l'ITRS*



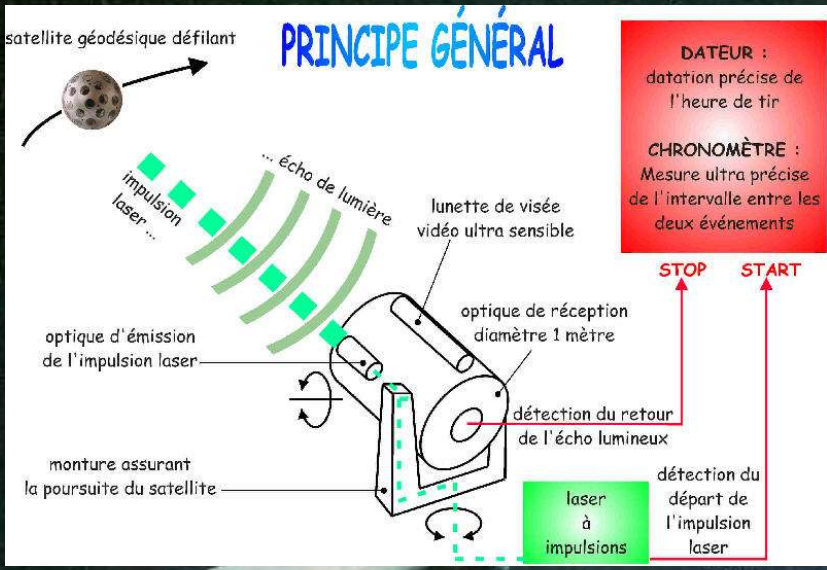
# Télémétrie Laser sur Satellites



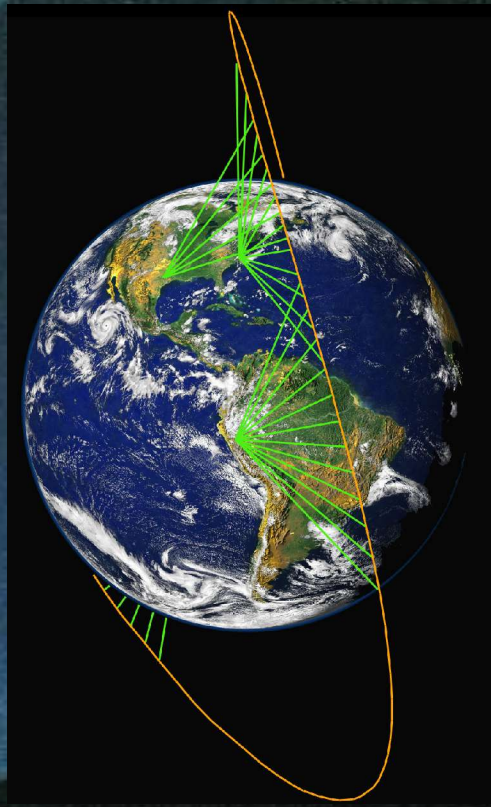
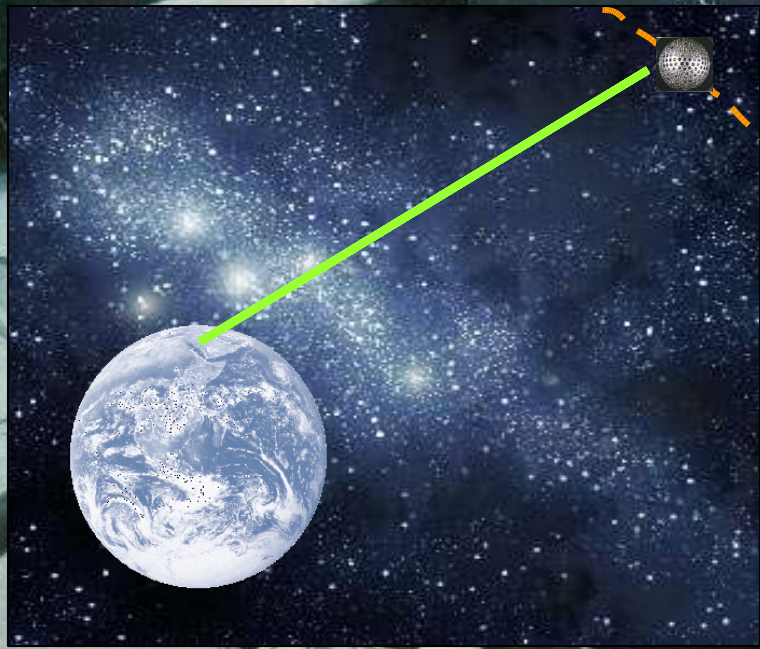


# Télémétrie Laser sur Satellites

## Principe



*Mesure du temps de vol aller-retour d'une impulsion lumineuse entre un télescope terrestre et un satellite artificiel*





# Télémétrie Laser sur Satellites

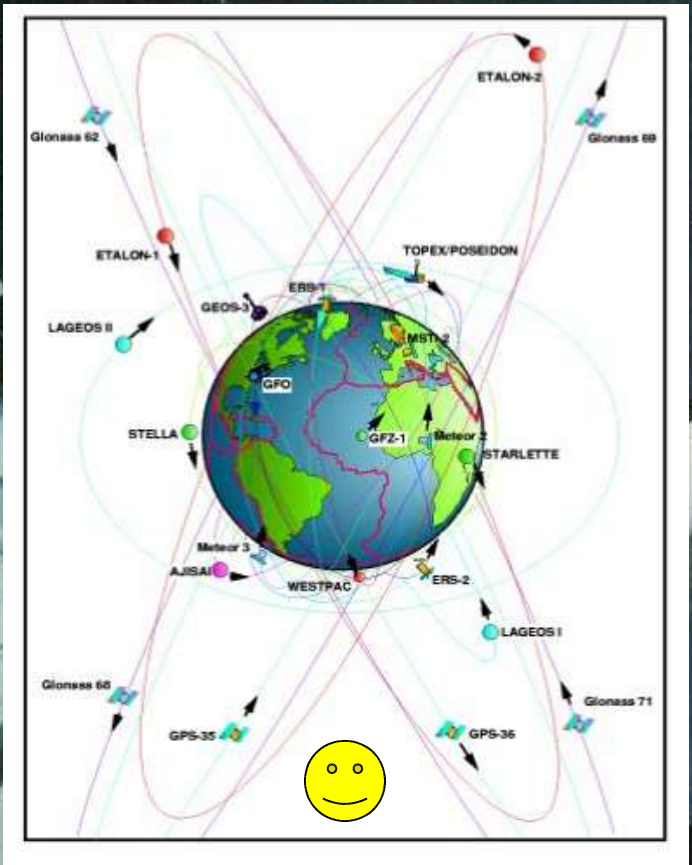
## Caractéristiques



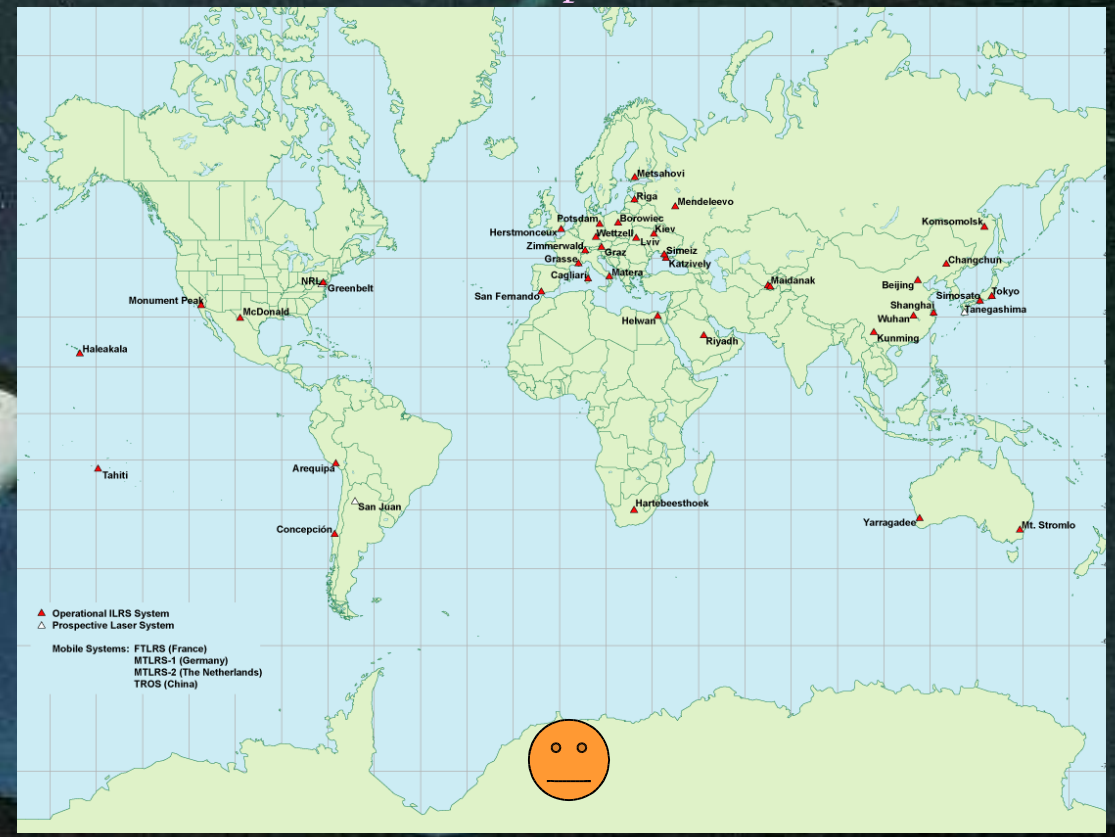
- ♠ *Mesure « pure » donc très exacte*
- ♠ *Dépendance vis-à-vis des conditions météorologiques*
- ♠ *Lien optique faible impact de la traversée de l'atmosphère*
- ♠ *Systématismes résiduels = « biais en distance »*



### Constellation de satellites



### Réseau de poursuite





# Télémétrie Laser sur Satellites

## Contributions

- ♣ Positionnement par SLR repose sur la dynamique des satellites LAGEOS
- ♣ Télémétrie donne le repère terrestre à très grandes mailles
- ♣ Télémétrie donne le champ de gravité à grandes longueurs d'onde
- ♣ Télémétrie donne l'origine du repère terrestre
- ♣ Télémétrie contribue à la réalisation de l'échelle du repère (GM)
- ♣ SLR participe au calcul de la série EOPC04
- ♣ 20 à 30 ans de données sur certains satellites

technique	nombre de solutions	+ petit RMS 3D positions	+ grand RMS 3D positions	+ petit RMS 3D vitesses	+ grand RMS 3D vitesses
DORIS	2	25 mm	30 mm	4 mm/an	5 mm/an
GPS	6	2 mm	5 mm	1 mm/an	2 mm/an
LLR	1	50 mm	50 mm	5 mm/an	5 mm/an
SLR	7	2 mm	14 mm	1 mm/an	5 mm/an
VLBI	3	2 mm	3 mm	1 mm/an	1 mm/an

Source : Altamimi et al., JGR, 2002

# Contributions Méthodologiques

## Considérations Générales



*Orbitographie*

*Erreurs d'orbite résiduelles*

*Orbites corrigées des erreurs résiduelles*      *Termes empiriques donnés par l'intégration des équations de Hill Correction selon les trois composantes ( $\mathcal{R}$ ,  $\mathcal{T}$  et  $\mathcal{N}$ )*

*Modèle sur la position des stations*

*Modèles alternatifs pour les positions de stations*  
*Séries périodiques et bases d'ondelettes*

*Effet des biais résiduels*

*Décorrélation avec la composante verticale*  
*Méthode de décorrélation temporelle*

*Méthode d'estimation*

*Méthodes d'estimation alternatives*

*Modélisation*

*Estimation*

*Mesures*

*Logiciel MATLO (environ 25 000 lignes de code)*



**Analyse de 12 Ans de Données Laser**



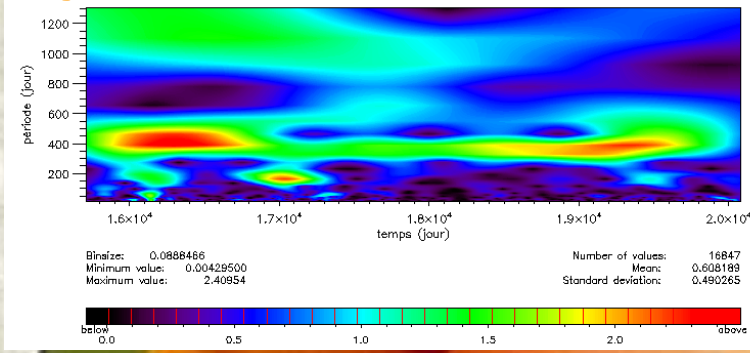
# Analyse de Douze Ans de Données Laser

## Mouvement du Géocentre

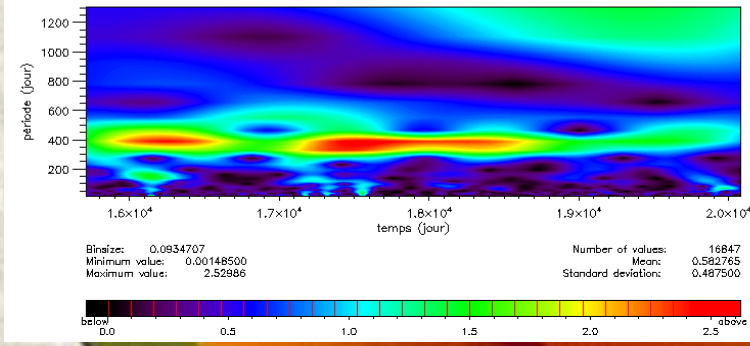


Analyses en ondelettes

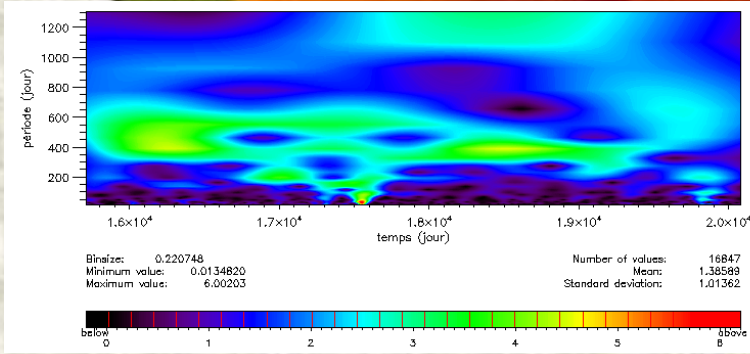
TX



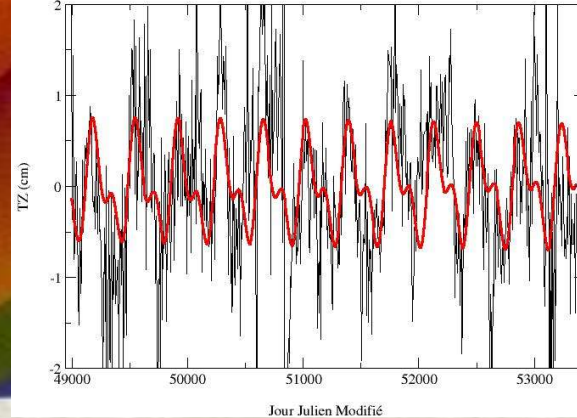
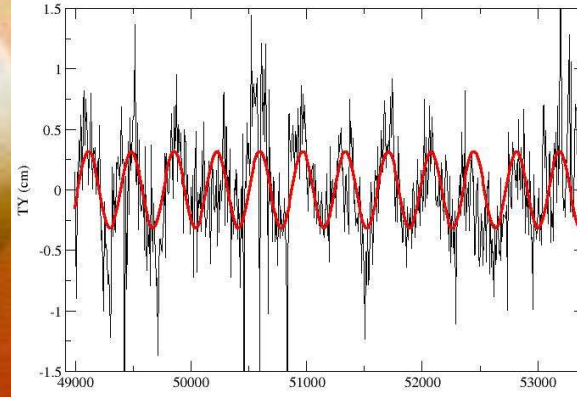
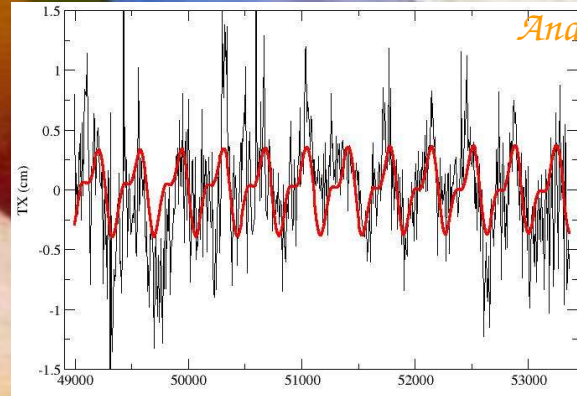
TY



TZ



Analyses spectrales





# Analyse de Douze Ans de Données Laser

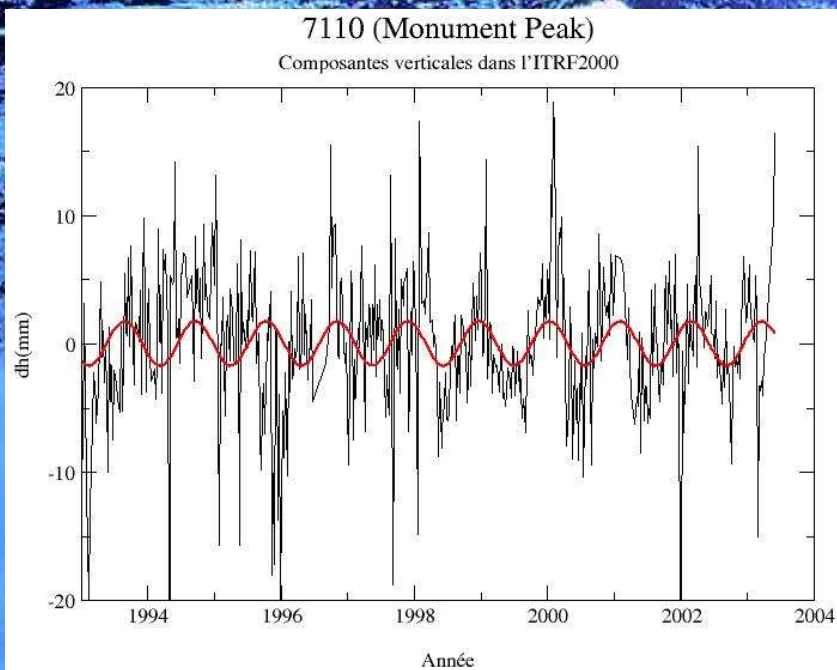
## Séries Temporelles de Positions de Stations



*Séries Temporelles de Positions de Stations dans l'ITRF2000*

*Mise en évidence de signaux résiduels*

*Comparaison avec d'autres techniques pour instruments co-localisés*



*Signal annuel résiduel détecté dans les appoints*

*Effets de charge résiduels ?*



A photograph of a Space Shuttle launching from a launch pad. The shuttle is ascending vertically, leaving a massive, bright orange and white plume of fire and smoke behind it. The launch pad structure is visible on the left, and the sky is a clear blue with some light clouds. Overlaid on the image is the text "Combinaison de Techniques Spatiales" in a 3D, purple, sans-serif font, slanted upwards from left to right.

Combinaison de Techniques Spatiales



# Combinaison de Techniques

## Pourquoi Combiner les Techniques ?



♣ Produits majeurs de la géodésie résultent de combinaisons

♣ Tirer avantage de chaque technique en palliant défauts de chacune

♣ Approche actuelle = combiner les solutions individuelles *inexactitudes*

♣ Approche novatrice = combiner les systèmes normaux

Temps Universel obtenu directement

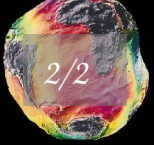
Paramètres atmosphériques = paramètres de liaison

Satellite multi-techniques = mission dédiée pour lien spatial

Rattachements locaux

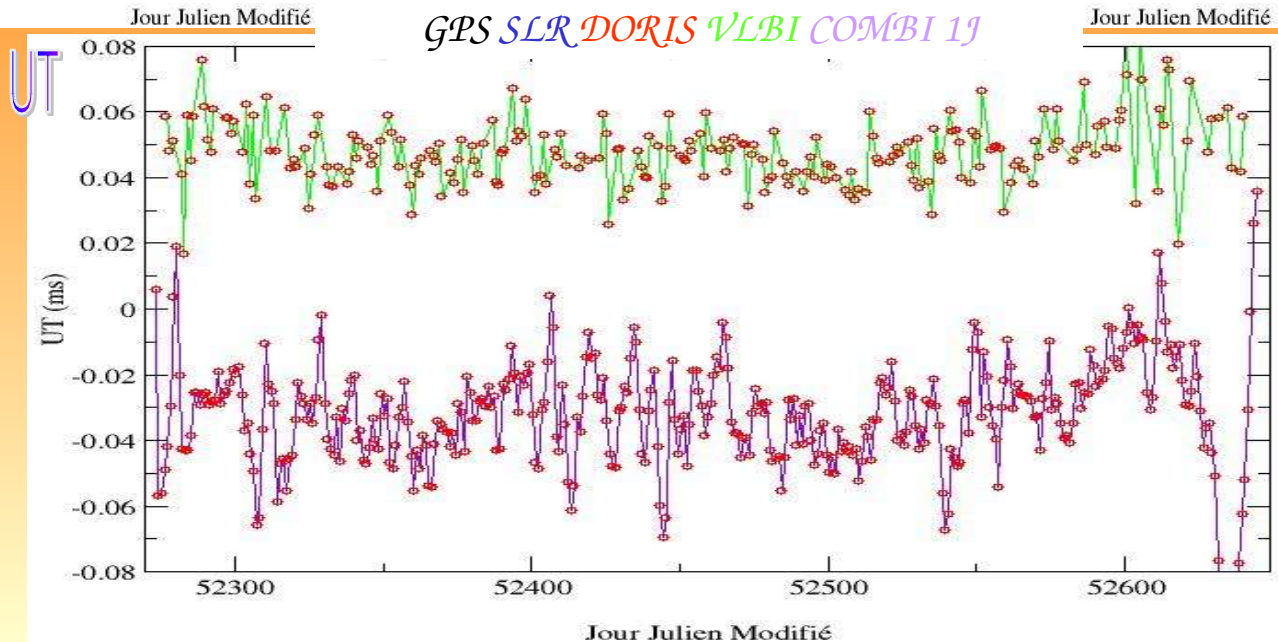
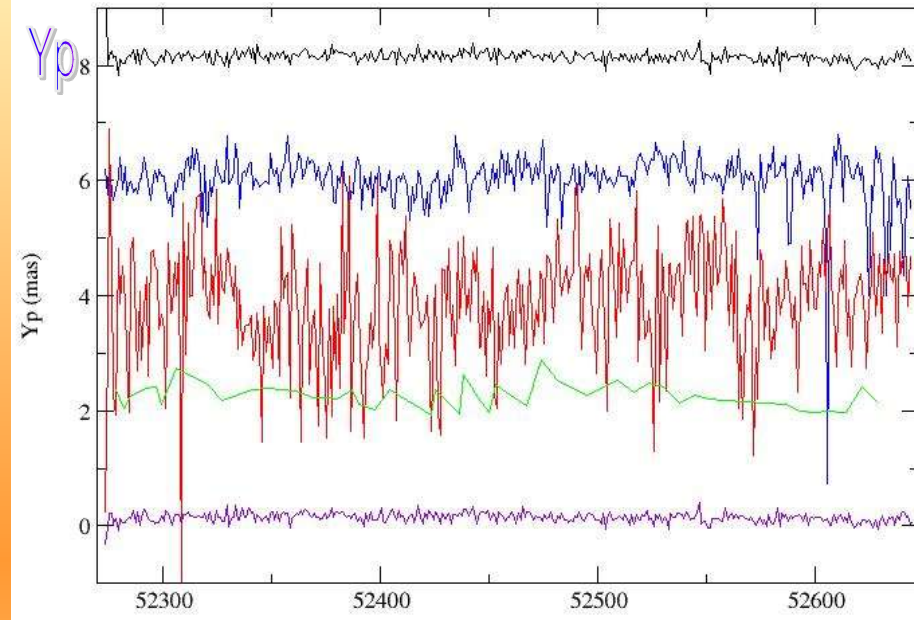
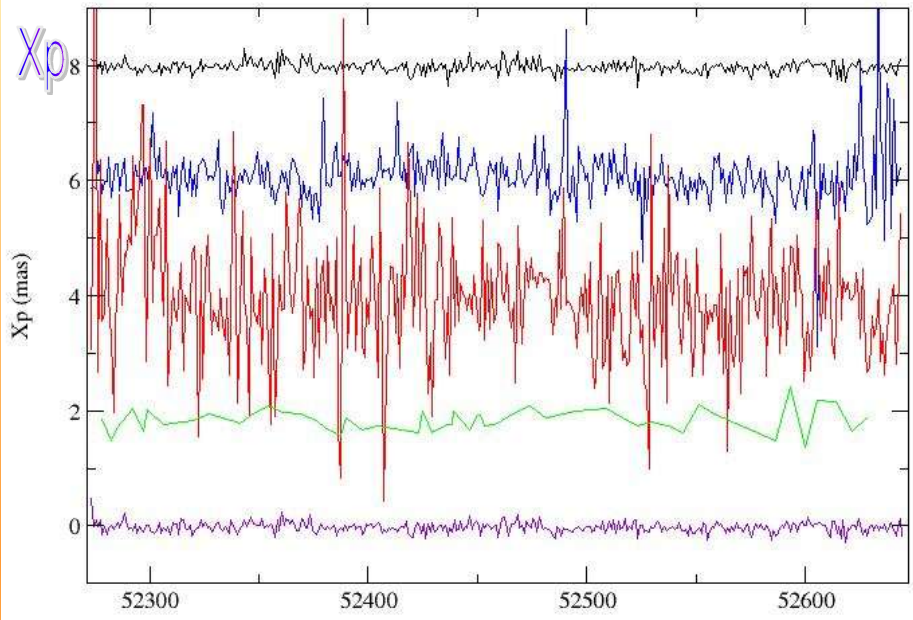
Obtention simultanée de tous les produits





# Combinaison de Techniques

## Résultats pour les Paramètres de Rotation de la Terre



$UT$

## Travaux tournés vers réalisations de Systèmes de Référence Terrestres

### Téléométrie laser sur satellites

- OCA/GEMINI = centre d'analyse ILRS avec GINS/MATLO
- Solutions comparables à celles du centre ASI  
(centre de combinaison des solutions des centres d'analyse de l'ILRS)
- Travaux toujours en cours pour
  - Réflexions sur la référence des orbites
  - Étude des biais en distance
  - Estimation directe de signaux au niveau des mesures laser
  - Obtention de « produits » dans des références homogènes

### Combinaison de techniques

- Expérience concluante pour les Paramètres de Rotation de la Terre
- RMS de 0.08 mas pour  $\chi_p$  et  $y_p$  et 0.014 ms pour  $UT$
- Travaux toujours en cours pour
  - Obtention d'un repère terrestre combiné homogène
  - Prendre en compte de « nouveaux liens » entre les techniques (rattachements locaux, délais troposphériques, satellites)
  - Réflexions sur le calcul simultané des orbites et des produits
  - Réflexions pour l'estimation simultanée de tous les produits