

## *Fondement des Conventions IERS*

### **Technique d'observation DORIS**

*Jean-Michel Lemoine / CNES*



# Equations de base

## 1- Relation temps propre – temps coordonnée

$$d\tau \approx \left[ 1 - \frac{U}{c^2} - \frac{V^2}{2c^2} \right] dt$$

$d\tau$  : temps propre

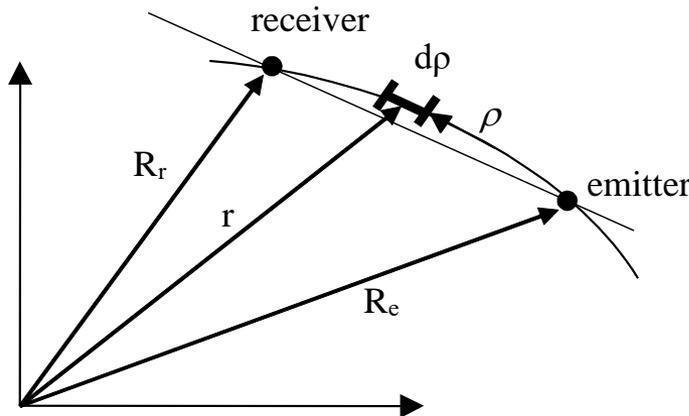
$dt$  : temps-coordonnée (TCG en l'occurrence)

$U$  : potentiel newtonien

$V$  : vitesse coordonnée

La relation entre le TCG et le TT ( $\Leftrightarrow$  TAI) est donnée par :  $dTT = (1 - L_G) * dTCG$   
avec  $L_G = 6.969290134 \times 10^{-10}$  (IERS conventions 2010, Petit and Luzum, sections 1 et 10.2)

## 2- Temps de propagation émetteur – récepteur



$$\Delta t_{travel} \approx \frac{\rho}{c} + 2 \frac{\mu}{c^3} \ln \left( \frac{R_e + R_r + \rho}{R_e + R_r - \rho} \right)$$

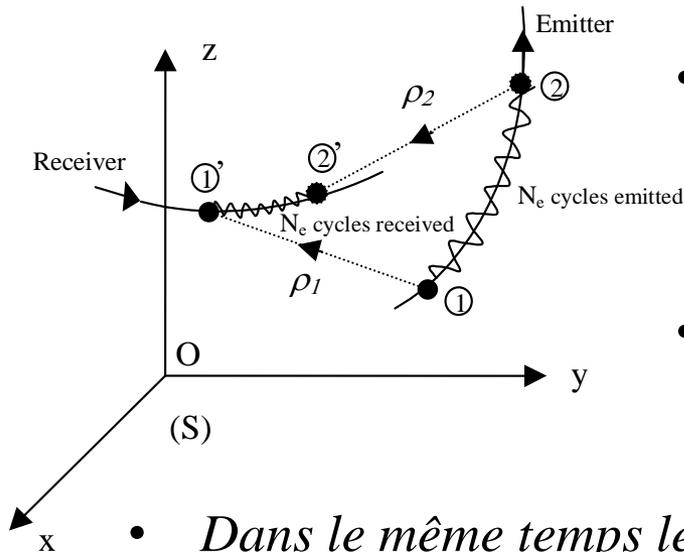
$\rho$  : distance géométrique

$\mu = GM$

$R$  : distance au centre du référentiel  
(géocentre)

# Mesure Doppler

## 3- Principe de la mesure Doppler



- Sur l'intervalle de temps propre  $\Delta\tau_e = \tau_{e2} - \tau_{e1}$  : l'émetteur émet  $N_e$  cycles ( $N_e = f_e * \Delta\tau_e$ ),  $f_e$  étant la fréquence propre émetteur
- Sur l'intervalle de temps propre  $\Delta\tau_r = \tau_{r2'} - \tau_{r1'}$  : le récepteur reçoit les  $N_e$  cycles
- Dans le même temps le récepteur a généré un nombre  $N_r$  de cycles ( $N_r = f_r * \Delta\tau_r$ ),  $f_r$  étant la fréquence propre récepteur
- La mesure Doppler est le comptage, sur l'intervalle  $\Delta\tau_r$ , du nombre de cycles de battement entre  $N_e$  et  $N_r$  :  $N_{DOP} = N_e - N_r$

# Mesure Doppler

## 4- Expression de la mesure Doppler en fonction de la vitesse relative émetteur – récepteur

$$N_{DOP} = N_e - N_r \Rightarrow N_{DOP} = f_e \Delta\tau_e - f_r \Delta\tau_r$$

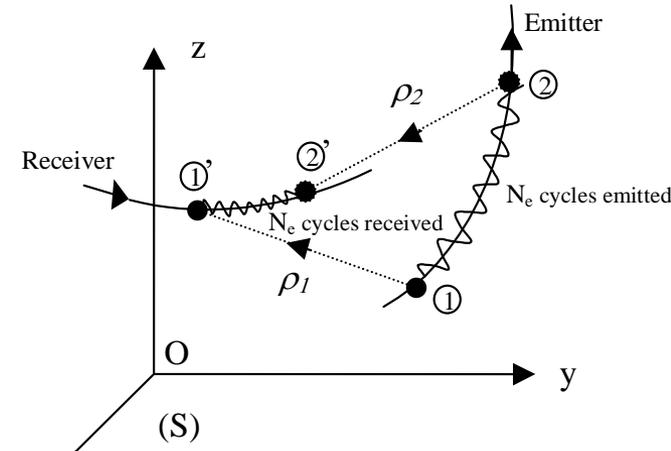
$$\Delta\tau_e = \tau_{e_2} - \tau_{e_1} \approx \left( 1 - \frac{U_e}{c} - \frac{V_e^2}{2c^2} \right) (t_2 - t_1)$$

$$t_2 - t_1 = (t_2 - t_2') + (t_2' - t_1') + (t_1' - t_1) = -(t_2' - t_2) + (t_2' - t_1') + (t_1' - t_1)$$

$$t_2' - t_2 \approx \frac{\rho_2}{c} + \frac{2\mu}{c^3} \ln \left( \frac{R_2 + R_2' + \rho_2}{R_2 + R_2' - \rho_2} \right)$$

$$t_1' - t_1 \approx \frac{\rho_1}{c} + \frac{2\mu}{c^3} \ln \left( \frac{R_1 + R_1' + \rho_1}{R_1 + R_1' - \rho_1} \right)$$

$$t_2' - t_1' = \Delta t_r \approx \left( 1 + \frac{U_r}{c} + \frac{V_r^2}{2c^2} \right) \Delta\tau_r$$



# Mesure Doppler

- *En assemblant toutes les équations précédentes on obtient :*

$$N_{DOP} \approx f_e \left( 1 - \frac{U_e}{c^2} - \frac{V_e^2}{2c^2} \right) \left[ \left( 1 + \frac{U_r}{c^2} + \frac{V_r^2}{2c^2} \right) \Delta\tau_r - \frac{\rho_2 - \rho_1}{c} + 2 \frac{\mu}{c^3} \left[ \ln \left( \frac{R_1 + R_1' + \rho_1}{R_1 + R_1' - \rho_1} \right) - \ln \left( \frac{R_2 + R_2' + \rho_2}{R_2 + R_2' - \rho_2} \right) \right] \right] - f_r \Delta\tau_r$$

- *Simplifications dans le contexte terrestre ( $U/c^2 \ll 1$  et  $V^2/c^2 \ll 1$ ), on élimine tout ce qui est inférieur à  $1/c^3$  :*

$$\begin{cases} v_{measured} = \frac{c}{f_e} \left( f_e - f_r - \frac{N_{DOP}}{\Delta\tau_r} \right) + \Delta v_{REL} \\ v_{theo} = \left( 1 - \frac{U_e}{c^2} - \frac{V_e^2}{2c^2} \right) \frac{\rho_2 - \rho_1}{\Delta\tau_r} \end{cases}$$

$$\text{with: } \Delta v_{REL} = \frac{1}{c} \left( U_r - U_e + \frac{V_r^2 - V_e^2}{2} \right) + \frac{2\mu}{c^2 \Delta\tau_r} \left[ \ln \left( \frac{R_1 + R_1' + \rho_1}{R_1 + R_1' - \rho_1} \right) - \ln \left( \frac{R_2 + R_2' + \rho_2}{R_2 + R_2' - \rho_2} \right) \right]$$

# La mesure réelle

## 5- Prise en compte des corrections de propagation et de fréquence

- *Il faut tenir compte des corrections de propagation  $\Delta v_{iono}$  et  $\Delta v_{tropo}$*
- *Les oscillateurs de l'émetteur et du récepteur ne sont pas parfaits, il faut tenir compte de l'écart par rapport à leur fréquence nominale en remplaçant  $f_e$  par  $(f_{eN} + \Delta f_e)$  et  $f_r$  par  $(f_{rN} + \Delta f_r)$  dans les équations précédentes.*
- *En assumant que  $\frac{\Delta f_e}{f_{eN}} \ll 1$  on peut négliger tous les termes en  $\frac{\Delta f_e}{f_{eN}^2}$  et  $\frac{\Delta f_e^2}{f_{eN}^2}$  et l'équation Doppler devient :*

$$\left\{ \begin{array}{l} v_{measured} = \frac{c}{f_{eN}} \left( f_{eN} - f_{rT} - \frac{N_{DOP}}{\Delta \tau_r} \right) + \Delta v_{IONO} + \Delta v_{REL} \\ v_{theo} = \left( 1 - \frac{U_e}{c^2} - \frac{V_e^2}{2c^2} \right) \frac{\rho_2 - \rho_1}{\Delta \tau_r} + \Delta v_{TROPO} - \frac{c \left( \frac{N_{DOP}}{\Delta \tau_r} + f_{rT} \right)}{f_{eN}} \frac{\Delta f_e}{f_{eN}} \end{array} \right.$$

# La mesure réelle

## 6- Corrections supplémentaires et lien avec les conventions IERS

- Loi de phase DORIS :

*Les antennes ne sont pas parfaites : la phase du signal varie de quelques degrés en fonction de l'azimut et l'élévation de la mesure.*

➔ *Fichiers ANTEX :*

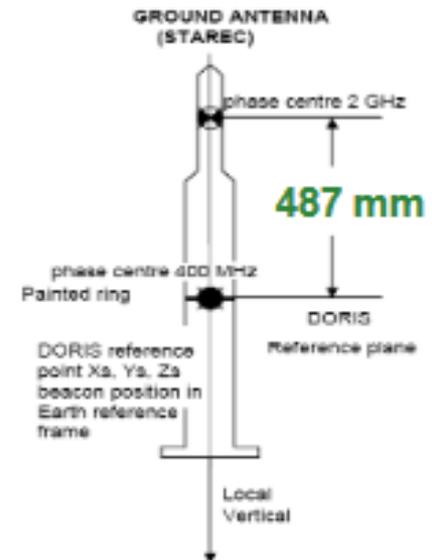
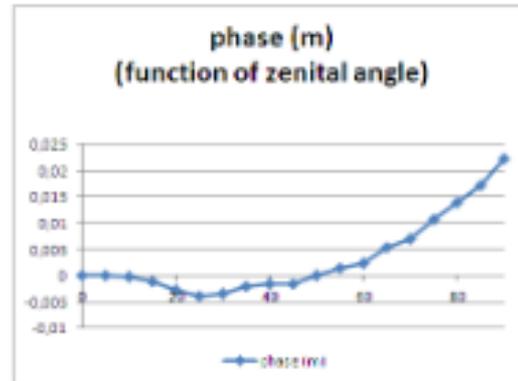
*phase = f(azimut, élévation)*

➔ *Ou simplement loi de phase (DORIS) :*

*phase = f(élévation)*

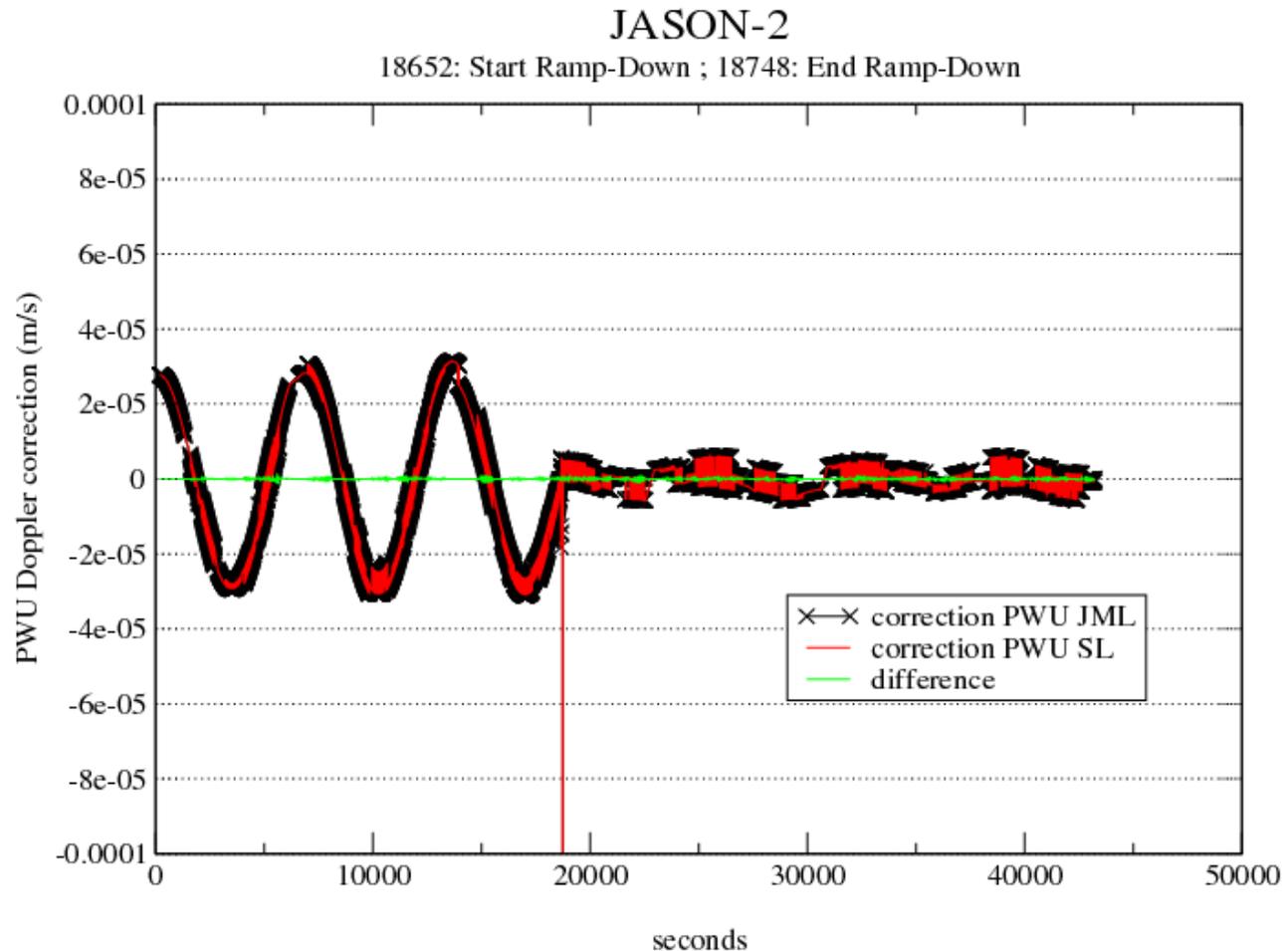
✦ **Phase law given :**

- » In mm,
- » For zenithal angle from 0 to 90,
- » Every 5°
- » For specified phase center position 487mm up



# La mesure réelle

- « Phase Wind Up » : la phase du signal émis ou reçu tourne de  $2\pi$  quand on fait le tour de l'antenne → en tenir compte pour les antennes d'émission et de réception.

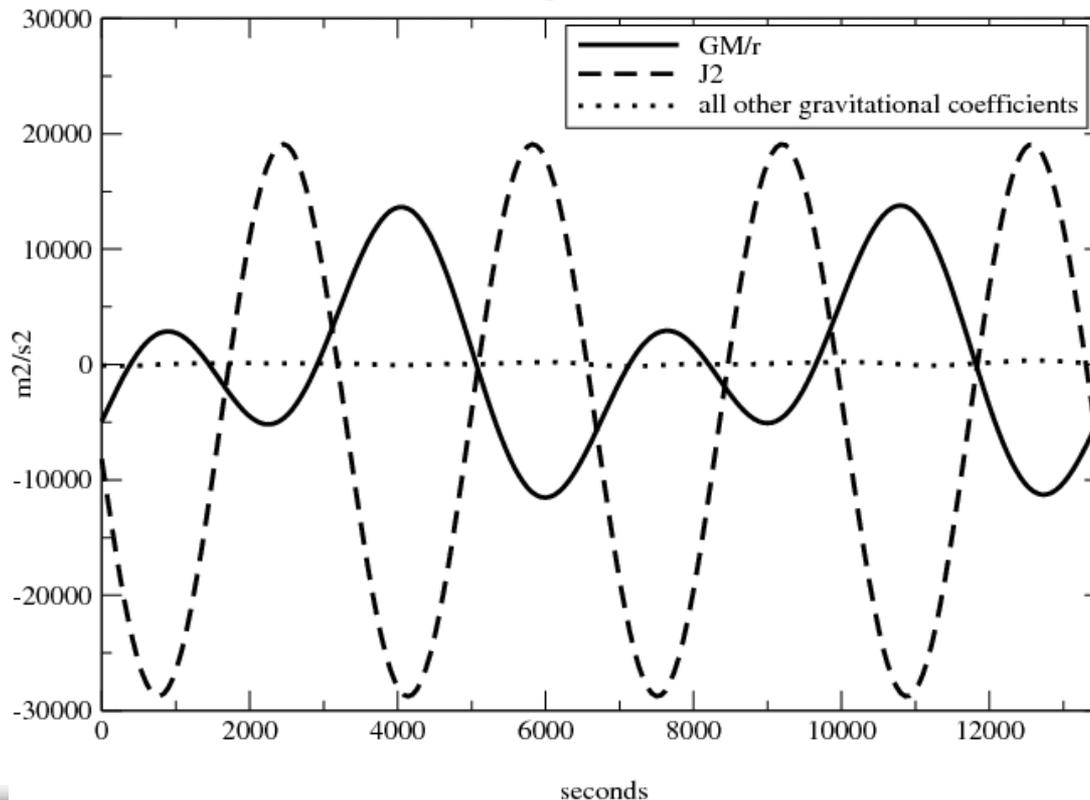


# La mesure réelle

- Corrections relativistes sur les horloges : Pour les satellites bas, le potentiel  $U$  qui apparait dans les corrections relativistes des horloges ne peut pas se limiter au terme central du potentiel  $GM/r$ . Le  $J_2$  en particulier produit une variation du potentiel qui est supérieure à celle du terme central :

Variations of the gravity potential

along Jason-2 orbit



*Ce point est mentionné dans la section 10.2 des conventions IERS2010 et il avait été mis en évidence en particulier par Larson et al. pour GRACE et TOPEX en 2007.*

# La mesure réelle

- Corrections relativistes sur les horloges : Il est donc recommandé de prendre en compte au moins le  $J_2$  en plus du terme central dans le calcul du potentiel. La formule de calcul du potentiel est dans ce cas :

$$U = \frac{\mu}{r} \left( 1 - \left( \frac{a_e}{r} \right)^2 J_2 \frac{3 \sin^2(\varphi) - 1}{2} \right)$$

Avec  $a_e$ : rayon équatorial de la Terre,  $r$ : distance radiale du satellite au centre de la Terre,  $\varphi$ : latitude du satellite et  $J_2 = 1.0826359 \cdot 10^{-3}$  dans la convention “zero-tide” (Table 1.1, IERS conventions 2010, Petit and Luzum, 2010).

- Correction d’aberration : La mesure est effectuée par le récepteur donc on connaît avec précision les instants de réception. Pour savoir où est l’émetteur aux instants d’émission, et donc pouvoir calculer  $\rho$ , il faut estimer les instants d’émission en utilisant une valeur approchée de  $\rho$ ,  $\rho^*$ , et en appliquant :  $t_e = t_r - \rho^*/c$ . Le processus peut nécessiter des itérations mais dans le cas DORIS, l’émetteur étant sur Terre, ce n’est pas nécessaire.

# La mesure réelle

- Corrections ionosphériques : La plupart des instruments Doppler émettent sur deux fréquences pour permettre la correction ionosphérique du premier ordre. Pour DORIS les fréquences sont 400 MHz et 2 GHz. On combine les mesures de pseudo-distance sur ces deux fréquences pour obtenir une mesure de pseudo-distance iono-free à 2 GHz :

$$C_{\text{iono-free-2GHz}} = \frac{\gamma C_{2\text{GHz}} - C_{400\text{MHz}}}{\gamma - 1} \quad \gamma \text{ est le carré du rapport des fréquences : } \gamma = (f_{2\text{GHz}} / f_{400\text{MHz}})^2$$

- Pour ce qui est de la mesure de phase ( $L = C * f / c$ ), la mesure de phase iono-free à 2 GHz est donnée par la formule :

$$L_{\text{iono-free-2GHz}} = \frac{\gamma L_{2\text{GHz}} - \sqrt{\gamma} L_{400\text{MHz}}}{\gamma - 1} = L_{2\text{GHz}} + \frac{L_{2\text{GHz}} - \sqrt{\gamma} L_{400\text{MHz}}}{\gamma - 1}$$

- Ces mesures sont relatives au centre de phase iono-free dont la localisation le long de l'axe antenne est donnée par la formule :

$$\vec{r}_{2\text{GHz,iono-free}} = \frac{\vec{r}_{400\text{MHz},2\text{GHz}}}{\gamma - 1}$$

# La mesure réelle

- *Dans le cas de DORIS, les fréquences nominales sont 2.036250 GHz et 401.250 MHz, donc  $\gamma = 25.75325356$ . Les centres de phase iono-free sont à quelques millimètres des centres de phase 2 GHz.*
- *Les Conventions IERS 2010 fournissent au §9.4.2 les formules pour calculer les corrections ionosphériques d'ordre supérieur.*

# Le réseau DORIS



# Les antennes DORIS

*Antenne Alcatel*



*Antenne Starec*



*Antenne satellite (Sentinel-3A)*



# SWOT / FORCES (Strengths) IDS



# FAIBLESSES (weaknesses) IDS



# OPPORTUNITIES

externalcollaboration  
synergies  
subdiurnaltimescales  
cubesats  
commercial  
globalrefsystem  
geocentre  
students  
newsatellites  
funds  
pod  
gnsscoupling  
hy  
climateproducts  
chinese  
nrt  
ggos  
constellations  
newproducts  
multitechnics  
miniaturization

# MENACES (Threats)



A word cloud of various threats. The most prominent word is 'budget' in a large, dark purple font. Other significant words include 'gnss' in a large, dark blue font, 'oldpeople' in a large, red font, and 'small' in a large, dark red font. Smaller words include 'french', 'communication', 'stationbreaks', 'across', 'beaconhosting', 'price', 'cnets', 'technology', and 'unknown'. The words are arranged in a somewhat circular pattern, with 'budget' at the bottom center and 'gnss' and 'small' on the right side.

budget  
gnss  
small  
oldpeople  
french  
communication  
stationbreaks  
across  
beaconhosting  
price  
cnets  
technology  
unknown

# Forces du système DORIS

- *Système radio-électrique (donc tout temps)*
- *Réseau assez dense (40-50 stations), très bien réparti, et colocalisé avec autres techniques*
- *Soin apporté à la monumentation des stations*
- *Pérennité et longue série temporelle (28 ans)*

## Faiblesses actuelles du système DORIS

- *Stabilité des oscillateurs ultra-stables (USO) DORIS (bord et sol)*
- *Sensibilité des USOs satellites aux radiations des ceintures de Van Allen*

## Perspectives d'amélioration

- *Balises 4G en cours de déploiement*
- *Interconnexion USO DORIS – récepteur GNSS*