

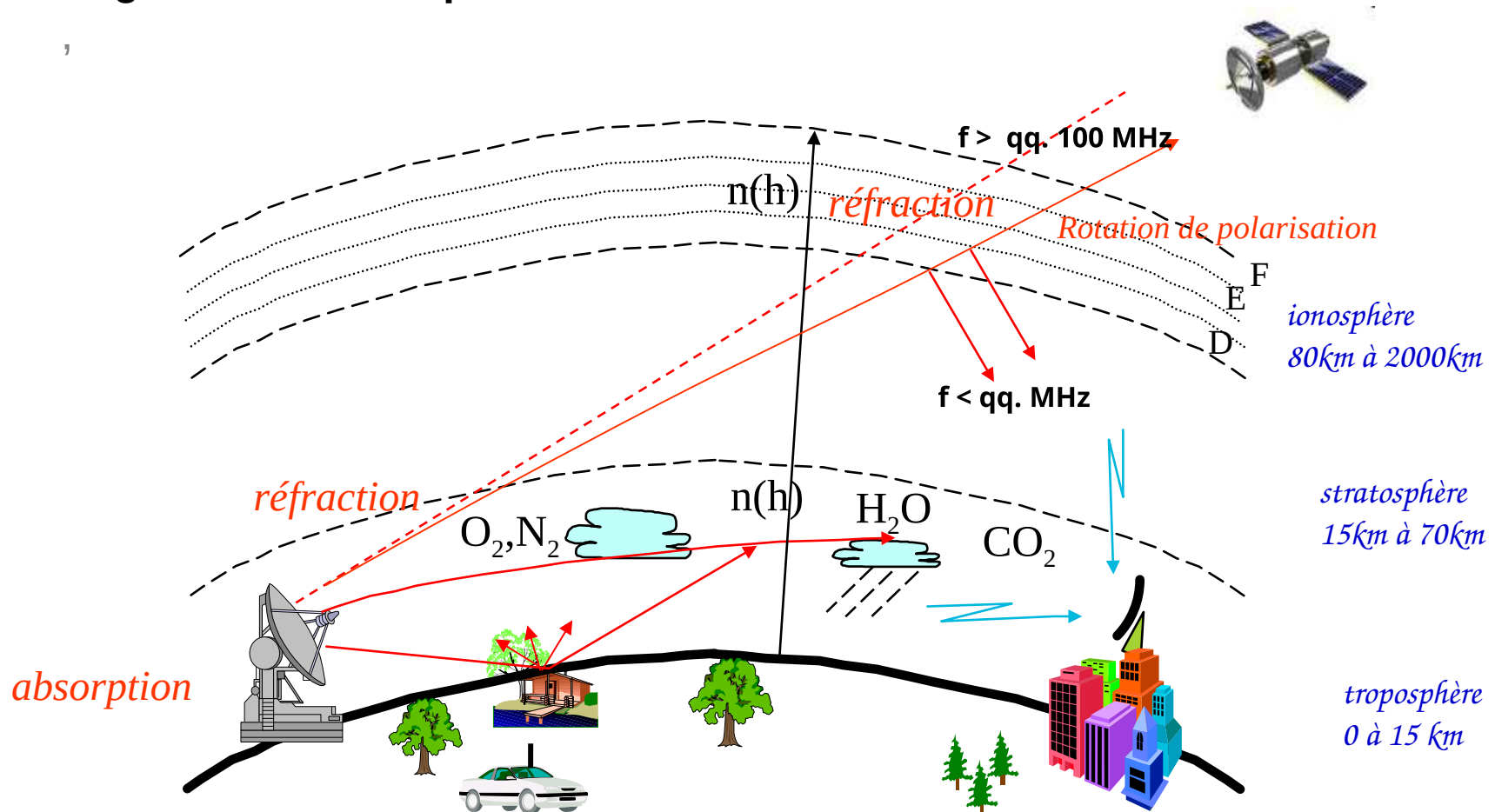
TROPOSPHÈRE & GPS

ROLLAND.FLEURY@IMT-ATLANTIQUE.FR

SOMMAIRE

1. MORPHOLOGIE
2. INFLUENCE SUR LA PROPAGATION GNSS
3. IWD/PWD AVEC MESURES SOL
4. ZTD AVEC GNSS
5. FICHIERS DE RÉSULTATS

Régions de l'atmosphère terrestre



Caractéristiques de l'atmosphère terrestre

Composition de la troposphère, au sol

- Air sec: molécules N_2 (78%) + O_2 (21%) + ...
- Vapeur d'eau H_2O (variable <1% - 4%)

Atmosphère standard (plusieurs modèles selon l'application)

Équilibre hydrostatique

p =pression

m =masse des particules

g =accélération de la pesanteur

h =altitude

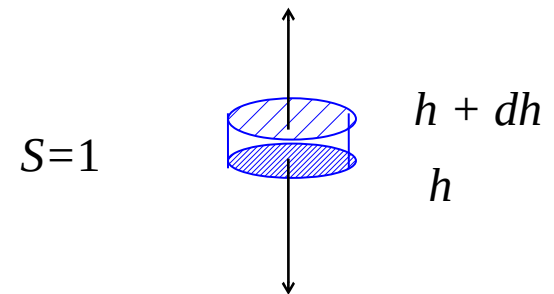
k =constante de Boltzman

T =température

n_p =concentration des particules

$\rho = n_p \cdot m$ =masse volumique

$$dp = - n_p m g \cdot dh$$



Champ de pesanteur: $n_p m g \cdot dh$

Hypothèse des gaz parfaits : $p = n_p kT$, k = cste de Boltzman

$$\left. \begin{array}{l} p = n_p kT \\ dp = - n_p mg \cdot dh \end{array} \right\} \quad \frac{dp}{p} = - \frac{1}{H} dh \quad H = \frac{kT}{mg} = \text{Hauteur d'échelle}$$

$$p(h) = p_0 \exp\left(- \int_{h_0}^h \frac{1}{H} dh'\right)$$

Hypothèse : H indépendant de h $p = p_0 \exp(- z)$ $z = \frac{h - h_0}{H} = \text{hauteur réduite}$

- décroissance exponentielle de la pression avec l'altitude
- Hypothèse approchée: conduit à $p=0$ au-delà de 20 km

Indice du milieu (indice de réfraction)

n très voisin de 1

Co indice de réfraction : $N = (n - 1) \times 10^6$

La vapeur d'eau n'est pas un gaz parfait : séparation en 2 termes

$$N(h) = N_{sec} + N_{hum}$$

Hydrostatic (gaz)
Sigle H, dry (terme sec)

Vapeur d'eau
Sigle W, wet (terme humide)

$$N = K_1 \frac{P - e}{T} + K_2 \frac{e}{T} + K_3 \frac{e}{T^2}$$

P=pression totale (en hPa)

T=Température absolue (en K)

e=pression partielle de vapeur d'eau (en hPa)

K_1, K_2, K_3 constantes empiriques

Ruger (2002)

$K_1=77.689$

$K_2=71.295$

$K_3=3.75463 \times 10^{-5}$

Variation avec l'altitude : *Le modèle exponentiel*

$$N(h) = N_0 \exp\left(-\frac{h}{H_0}\right)$$

atmosphère de référence de IUT/CCIR

h = altitude au-dessus du niveau de la mer

$H_0 = 7,6$ km = Hauteur d'échelle

Au niveau de la mer : $N_0 = 315$ ($n_0 = 1,000315$)

$$N(h) = 315 \exp(-0.136h)$$

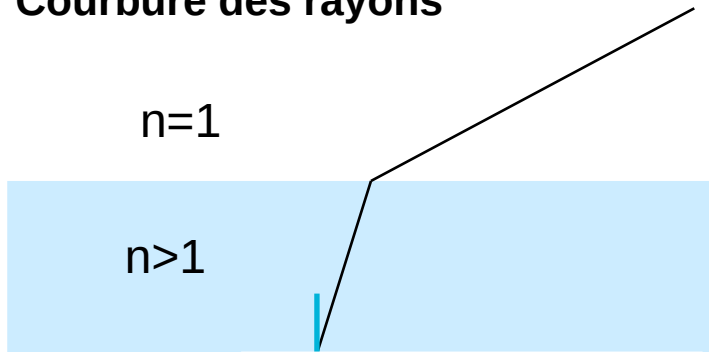
Gradient vertical

$$\frac{dN}{dh} = -\frac{1}{H_0} N(h) \quad \left(\frac{dN}{dh}\right)_{h \approx 0} = -\frac{N_0}{H_0} \approx -40 \text{ km}^{-1}$$

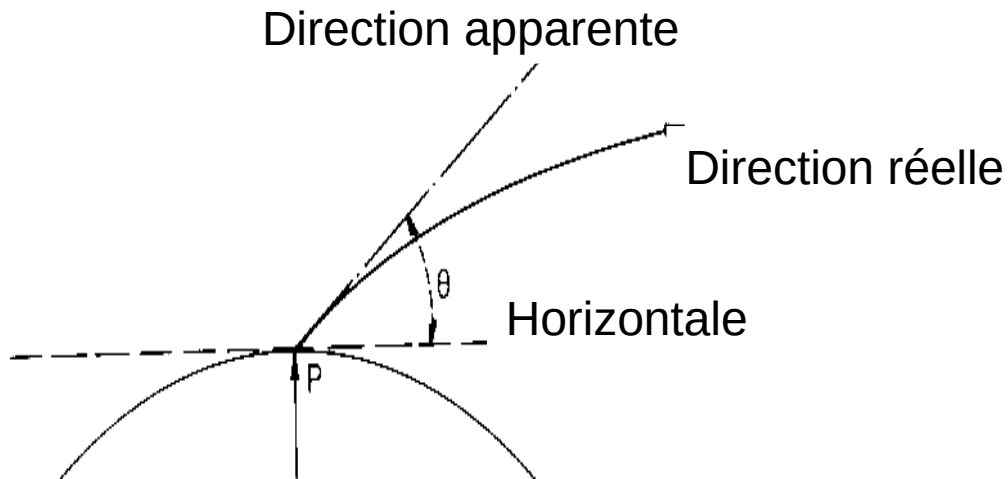
Le co-indice décroît de 40 unités tous les km

Au-delà de 8km, N devient négatif !!! limite du modèle

Courbure des rayons



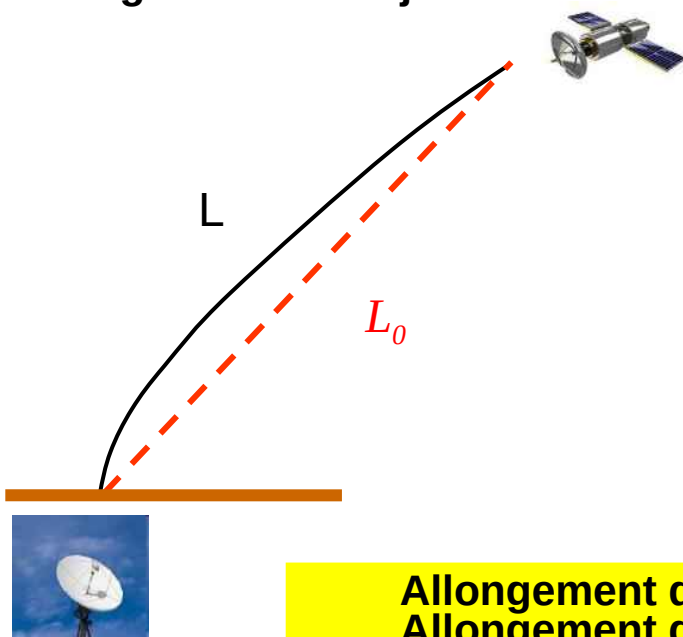
$$\left(\frac{dn}{dh} \right)_{h=0} = -40 \times 10^{-6} \text{ km}^{-1} < 0$$



Les rayons s'éloignent de la normale vers les altitudes croissantes

Erreur de pointage faibles
Ex.: err < 0,1° pour el = 10°

Allongement du trajet



Courbure du rayon
(négligeable)
Vitesse de propagation $v < c$

Retard de propagation

$$\Delta t = \frac{1}{c}(L - L_0) = \frac{1}{c} \int_L (n - 1) dl$$

Allongement dû à l'air sec pour un trajet zénithal : $L \approx 2,25 \text{ m}$
Allongement dû à la vapeur d'eau pour un trajet zénithal :
variable, **de l'ordre de 10 cm**
Oblique : **3-4 m à 50°, 12-15 m à 10°, ≈100 m à 0°**

Valeurs l'allongement

Vertical : 2,30-2,60 m selon l'altitude/niveau de la mer

--> 50m à élévation $\approx 3^\circ$

➤ Composante sèche (90%) 2,25-2,35m

Modélisable avec les paramètres mesuré au sol

➤ Composante humide 0 à 40 cm

- Distribution en altitude h
- $h < 1,5$ km : 50%
- $h > 1,5$ km & $h < 5$ km : 40%
- $h > 5$ km : 5%

Quantité variable erreur majeure en géodésie

Allongement troposphérique

ZTD ('Zenith Tropospheric Delay') ou ZPD ('Zenith Path Delay')

$$\mathbf{ZTD = ZHD + ZWD}$$

Terme sec

$$ZHD = 10^{-6} \int_{h_0}^{\infty} K_1 \frac{P}{T} dh$$

ZHD(m) peut-être calculé par la formule précise de Saastamoinen

$$ZHD = \frac{0.0022767 * P}{1 - 0.0026 * \cos 2\varphi - 0.00000028 * h}$$

φ = latitude au dessus de l'ellipsoïde

H = altitude en m

P=pression au sol (hPa)

ex: P=1010 hPa, h=0 m, $\varphi=45^\circ$ ZHD=2.30 m

Baldysz et al., Assessment of the impact of gnss processing..., remote sensing, doi:10.3390, 2018

Terme humide

$$ZWD = 10^{-6} \int_{h_0}^{\infty} \left(K'_2 \frac{e}{T} + K_3 \frac{e}{T^2} \right) dh$$

$$K'_2 = K_2 - K_1 \frac{M_{wet}}{M_{dry}} \approx 22.1 \text{ (K/hPa)}$$

$M_d = 28.9644$ et $M_w = 18.0151$, masses moléculaires air sec et humide en g/mol

IWV = 'Integrated Water Vapor' : quantité de vapeur d'eau par unité de surface

R_v = cste de vapeur d'eau = 461.5 (J/kg K)

$$IWV = \int_{h_0}^{\infty} \left(\frac{e}{R_v T} \right) dh = \pi(T_m) * ZWD$$

$\pi(T_m)$ = sans dimension

$$\pi^{-1} = 10^{-8} (R_v * (K_3 * T_m + K'_2))$$

T_m = température moyenne de l'atmosphère

T_s = température au sol

Formule empirique à 2% près $T_m \approx 0.72 * T_s + 70.2$

PWV = 'Precipitable Water Vapor'

$PWV = IWV / \rho$, ρ = densité de l'eau liquide

$ZWD \approx 6.4 * PWV$

sinex_tro_v2.00.pdf

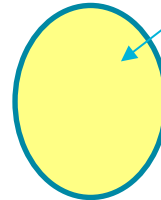
Mesures : équations de de la **phase**

$$= + c() + - + +$$

cste d'ambiguïté

r=récepteur, s=satellite, e=élévation, α =latitude géo.

Indépendant de la fréquence



Algo calcul ZTD ('Zenith Tropospheric Delay')

$$(e) + ZWD * (e) + [\cos + \sin (e)]$$

sec (Dry)

humide (Wet)

gradients horizontaux

$$ZTD = ZHD + ZWD$$

Conversion paramètre météo

$$\text{ZWD} = \text{ZTD} - \text{ZHD}$$

Équation de Saastamoinen pour la composante sèche
) * ()

obtenu par les données météo

IWV = 'Integrated Water Vapor'

/) avec T_s donné et T_m estimé

IWV = variable climatique essentielle reconnue par WMO/GCOS

Les fichiers troposphère sur le Web

<https://igs.org/wg/troposphere/>

Type	Accuracy	Latency	Updates	Sample Interval
Final tropospheric zenith path delay with N, E gradients	4 mm (ZPD)	< 4 weeks	daily	5 minutes

Le retard est estimé en même temps que le PPP en calculant tous les termes de l'équation d'observation

Logiciels : Bernese (Berne) – Gamit (MIT) – Gypsy (JPL)

Mesures :

- réseaux géodésiques (IGS, EUREF, ..)
- réseaux denses régionaux

pas de logiciel existant en mono-station

<ftp.aiub.unibe.ch/code>

Fichiers extension *.tro

COD20830.tro, stations IGS uniquement (2083=semaine, 0=jour 1)

Mais Il n'y a ni DAKR, YKRO, RABT dans l'exemple

ZTD total (mm)

Gradient Nord

Gradient Est

```

- TROP/STA_COORDINATES
*-----
...
+TROP/SOLUTION
*SITE   EPOCH   TROTOT STDDEV  TGTOT STDDEV  TGETOT STDDEV
ABMF 19:342:03600 2533.9  0.4 -1.351 0.041 -0.828 0.042
ABMF 19:342:10800 2524.9  0.4 -1.297 0.037 -0.839 0.039
ABMF 19:342:18000 2519.0  0.4 -1.243 0.034 -0.850 0.035
ABMF 19:342:25200 2560.7  0.4 -1.188 0.031 -0.861 0.032
...
CPVG 19:342:03600 2404.2  0.4 -0.052 0.030 -0.289 0.037
CPVG 19:342:10800 2394.2  0.3 -0.109 0.027 -0.237 0.033
CPVG 19:342:18000 2383.3  0.3 -0.166 0.024 -0.186 0.030
CPVG 19:342:25200 2384.5  0.3 -0.222 0.022 -0.134 0.028
CPVG 19:342:32400 2395.6  0.3 -0.279 0.021 -0.082 0.026
CPVG 19:342:39600 2400.9  0.3 -0.336 0.020 -0.030 0.025
CPVG 19:342:46800 2393.7  0.3 -0.393 0.020  0.021 0.024
CPVG 19:342:54000 2389.2  0.4 -0.450 0.021  0.073 0.025
CPVG 19:342:61200 2392.2  0.4 -0.507 0.023  0.125 0.027
CPVG 19:342:68400 2391.1  0.3 -0.564 0.025  0.177 0.029
CPVG 19:342:75600 2388.5  0.3 -0.621 0.028  0.229 0.032
CPVG 19:342:82800 2392.8  0.3 -0.678 0.031  0.280 0.036
    
```


Fichiers extension *.trp (post-traitements)

ex. COD22003.trp, modélisé (?), total, grad_nord, grad_est

```

CODE'S 3-DAY FINAL SOLUTION FOR DAY 003, 2022      09-JAN-22 13:42
-----
TROPOSPHERE FILE FORMAT      : 2
SOURCE OF METEOROLOGICAL DATA : MODELLED
A PRIORI TROPOSPHERE MODEL   : DRY_VMF3
MAPPING FUNCTION FOR PARAMETERS: WET_VMF3
TROPOSPHERE GRADIENT MODEL    : CHEN-HERRING
TABULAR INTERVAL (TRP/GRD)    : 7200 / 86400
MINIMUM ELEVATION             : 3

STATION NAME  FLG  YYYY MM DD HH MM SS  YYYY MM DD HH MM SS  MOD_U  CORR_U  SIGMA_U TOTAL_U  CORR_N  SIGMA_N  CORR_E  SIGMA_E

ABMF 97103M001 A  2022 01 03 00 00 00      2.3216 0.16927 0.00077 2.49083 -0.00022 0.00005 -0.00039 0.00005
ABMF 97103M001 A  2022 01 03 02 00 00      2.3212 0.16852 0.00081 2.48973 -0.00018 0.00005 -0.00041 0.00005
ABMF 97103M001 A  2022 01 03 04 00 00      2.3206 0.17315 0.00072 2.49377 -0.00014 0.00004 -0.00042 0.00004
...
CPVG 39601M001 A  2022 01 03 00 00 00      2.3045 0.04772 0.00095 2.35221 0.00003 0.00005 0.00018 0.00006
CPVG 39601M001 A  2022 01 03 02 00 00      2.3048 0.04394 0.00075 2.34876 0.00005 0.00004 0.00017 0.00006
CPVG 39601M001 A  2022 01 03 04 00 00      2.3034 0.04457 0.00077 2.34798 0.00007 0.00004 0.00016 0.00005
CPVG 39601M001 A  2022 01 03 06 00 00      2.3020 0.04776 0.00085 2.34976 0.00009 0.00004 0.00014 0.00005
...
YKRO 32601M001 A  2022 01 03 00 00 00      2.2456 0.24729 0.00050 2.49292 -0.00145 0.00003 -0.00059 0.00004
YKRO 32601M001 A  2022 01 03 02 00 00      2.2461 0.22230 0.00050 2.46836 -0.00135 0.00003 -0.00055 0.00004
YKRO 32601M001 A  2022 01 03 04 00 00      2.2455 0.22300 0.00047 2.46853 -0.00124 0.00002 -0.00051 0.00004
YKRO 32601M001 A  2022 01 03 06 00 00      2.2450 0.23040 0.00048 2.47541 -0.00114 0.00002 -0.00048 0.00003
YKRO 32601M001 A  2022 01 03 08 00 00      2.2459 0.24536 0.00043 2.49124 -0.00103 0.00002 -0.00044 0.00003
YKRO 32601M001 A  2022 01 03 10 00 00      2.2468 0.24235 0.00051 2.48910 -0.00093 0.00002 -0.00041 0.00003
YKRO 32601M001 A  2022 01 03 12 00 00      2.2476 0.23688 0.00051 2.48451 -0.00082 0.00002 -0.00037 0.00003
    
```

ftp.aiub.unibe.ch/REPRO_2020/CODE/année

Retraitement n° 3 (Repro3 avec les 3 systèmes GNSS)

Fichier COD0R03FIN_20120290000_01D_01H_CNT.TRO (total, nord, est)

```

%CODE TROP 2021:011:62453 IGS 2012:029:00000 2012:030:00000 P MIX
-----
+FILE/REFERENCE
*INFO TYPE INFO
DESCRIPTION CODE, Center for Orbit Determination in Europe
OUTPUT Troposphere zenith path delay estimates
CONTACT code@aiub.unibe.ch
SOFTWARE Bernese GNSS Software Version 5.3
HARDWARE UBELIX: Linux, x86_64
INPUT CODE IGS-Repro3 solution for GPS/GLO/GAL
*DOI 10.7892/boris.135946
-FILE/REFERENCE
-----
+FILE/COMMENT
*PRODUCT_REFERENCE
CODE IGS-Repro3 series.
Published by Astronomisches Institut, University of Bern.
URL: http://www.aiub.unibe.ch/download/REPRO_2020/CODE
-FILE/COMMENT
-----
+TROP/DESCRIPTION
* KEYWORD VALUE(S)
TROP SAMPLING INTERVAL 3600
DATA SAMPLING INTERVAL 300
GNSS SYSTEMS GR
TIME SYSTEM G
TROP MODELING METHOD Piece Wise Linear Interpolation
GEOID MODEL NA
OCEAN TIDE LOADING MODEL FES2014b
ATMOSP TIDE LOADING MODEL NOT APPLIED
ELEVATION CUTOFF ANGLE 3
OBSERVATION WEIGHTING COSZ
A PRIORI TROPOSPHERE MODELLED
TROP MAPPING FUNCTION WET_VMF1
GRADS MAPPING FUNCTION CHEN-HERRING
SOURCE OF MET/DATA NONE
TROP PARAMETER NAMES TROTOT STDDEV TGNTOT STDDEV TGETOT STDDEV
TROP PARAMETER UNITS 1e+03 1e+03 1e+03 1e+03 1e+03 1e+03
TROP PARAMETER WIDTH 6 6 7 6 7 6
-TROP/DESCRIPTION
-----
...
+TROP/SOLUTION
*STATION EPOCH TROTOT STDDEV TGNTOT STDDEV TGETOT STDDEV
ABMF00GLP 2012:029:00000 2463.8 2.2 -0.118 0.096 -0.204 0.104
ABMF00GLP 2012:029:03600 2461.3 1.5 -0.102 0.089 -0.213 0.097
...
RABT00MAR 2012:029:00000 2385.3 1.5 -0.443 0.091 -0.331 0.074
RABT00MAR 2012:029:03600 2388.6 1.1 -0.437 0.085 -0.340 0.070
RABT00MAR 2012:029:07200 2386.0 1.2 -0.431 0.080 -0.349 0.065
RABT00MAR 2012:029:10800 2383.8 1.0 -0.424 0.074 -0.357 0.060
RABT00MAR 2012:029:14400 2385.3 1.1 -0.418 0.069 -0.366 0.056

```

Ex. rabt20150.zdp

```
%=TRO 0.00 GFZ 19:231:37552 GFZ 18:231:00450 18:231:85950 P RABT
+FILE/REFERENCE
DESCRIPTION      GFZ German Research Centre for Geosciences, Potsdam
OUTPUT           TROP ESTIMATES
CONTACT          Galina Dick; dick@gfz-potsdam.de
...
+TROP/DESCRIPTION
*_____KEYWORD_____VALUE(S)_____
SAMPLING TROP          900
TROP MAPPING FUNCTION    GMF
ELEVATION CUTOFF ANGLE    7
SOLUTION_FIELDS_1      TROTOT STDDEV #ACTAK #ACDEL NOSAT TGRADN TGRADE
-TROP/DESCRIPTION
*-----
+TROP/SOLUTION
*SITE_____EPOCH_____TROTOT____SIG #T #D NSAT GradN GradE
RABT A 18:231:00450 2492.1 1.77 1 0 5 -0.682 0.902
RABT A 18:231:01350 2492.1 1.33 1 0 5 -0.701 0.845
RABT A 18:231:02250 2491.4 1.17 1 0 7 -0.700 0.715
RABT A 18:231:03150 2490.4 1.18 1 0 7 -0.661 0.539
RABT A 18:231:04050 2489.1 1.12 1 0 7 -0.628 0.389
RABT A 18:231:04950 2487.4 1.06 1 0 7 -0.585 0.183
RABT A 18:231:05850 2487.7 1.22 1 0 6 -0.572 0.026
RABT A 18:231:06750 2488.4 1.34 1 0 6 -0.601 -0.202
```

https://cddis.nasa.gov/archive/GPS_Explorer/archive/trop/V2/2021/

YKRO 12 janvier 2021

JPS2_SES_FIN_20210130000_30H_05M_YKRO_TRO.TRO

```
+FILE/REFERENCE
DESCRIPTION      Jet Propulsion Laboratory ESESES MEaSURES
OUTPUT          Daily 5min PPP trop estimates
CONTACT         Angelyn.W.Moore@jpl.nasa.gov, Sharon.Kedar@jpl.nasa.gov
SOFTWARE        GipsyX 1.x
VERSION NUMBER   002
-FILE/REFERENCE
+TROP/DESCRIPTION
*      KEYWORD      VALUE(S)
TROPO PARAMETER NAMES  TROTOT STDEV TGNWET STDEV TGEWET STDEV  IWV  PRESS TEMDRY
TROPO PARAMETER UNITS  1e3  1e3  1e3  1e3  1e3  1e3  1  1  1
...
+TROP/SOLUTION
*STATION  EPOCH      TROTOT STDEV TGNWET STDEV TGEWET STDEV  IWV  PRESS TEMDRY
YKRO      21:012:75600 2503.6  2.4 -1.78 0.37 1.18 0.31 -99.99 -99.99 -999.9
YKRO      21:012:75900 2503.5  2.3 -1.78 0.36 1.19 0.30 -99.99 -99.99 -999.9
YKRO      21:012:76200 2503.4  2.2 -1.79 0.35 1.20 0.29 -99.99 -99.99 -999.9
YKRO      21:012:76500 2503.2  2.1 -1.81 0.35 1.22 0.28 -99.99 -99.99 -999.9
YKRO      21:012:76800 2503.0  2.0 -1.83 0.34 1.24 0.28 -99.99 -99.99 -999.9
```

Paramètres
météo (si
mesures)

5 mn

RABT0100.19.zpd
Q=010/2019

CDDIS : <https://cddis.nasa.gov/archive/gnss/products/troposphere/zpd/2022/064/>

Liste pour Q=064/2022

abmf0640.22zpd.gz 2022:03:28 16:46:22 5.21KB

abpo0640.22zpd.gz 2022:03:28 16:46:22 5.19KB

ac230640.22zpd.gz 2022:03:28 16:46:22 4.86KB

...

ykro0640.22zpd.gz 2022:03:28 16:46:26 5.23KB

Uniquement les stations avec des mesures le jour demandé

%=TRO 0.01 XYZ 19:031:17612 IGS 19:009:75600 19:011:03600 P RABT

+SITE/ID

*CODE PT DOMES T STATION DESCRIPTION APPROX_LON APPROX_LAT APP_H
RABT A 35001M002 P Rabat, Morocco 353 8 44.6 33 59 53.2 90.1

-SITE/ID

...

+TROP/DESCRIPTION

* KEYWORD VALUE(S)

ELEVATION CUTOFF ANGLE 7

SAMPLING INTERVAL 300

SAMPLING TROP 300

TROP MAPPING FUNCTION WET GMF

SOLUTION_FIELDS_1 TROTOT STDDEV TGNTOT STDDEV TGETOT STDDEV

-TROP/DESCRIPTION

+TROP/STA_COORDINATES

*SITE PT SOLN T STA_X STA_Y STA_Z SYSTEM REMRK

RABT A 1 P 5255617.569 -631745.445 3546322.760 IGS14_XYZ

-TROP/STA_COORDINATES

+TROP/SOLUTION

*SITE EPOCH TROTOT STDDEV TGNTOT STDDEV TGETOT STDDEV

RABT 19:010:00000 2381.0 2.0 -0.178 0.293 -0.271 0.295

RABT 19:010:00300 2380.9 1.9 -0.179 0.281 -0.271 0.285

RABT 19:010:00600 2380.5 1.8 -0.180 0.276 -0.272 0.282

RABT 19:010:00900 2380.1 1.8 -0.180 0.263 -0.274 0.273

RABT 19:010:01200 2380.0 1.7 -0.180 0.258 -0.276 0.271

RABT 19:010:01500 2380.0 1.7 -0.186 0.244 -0.285 0.261

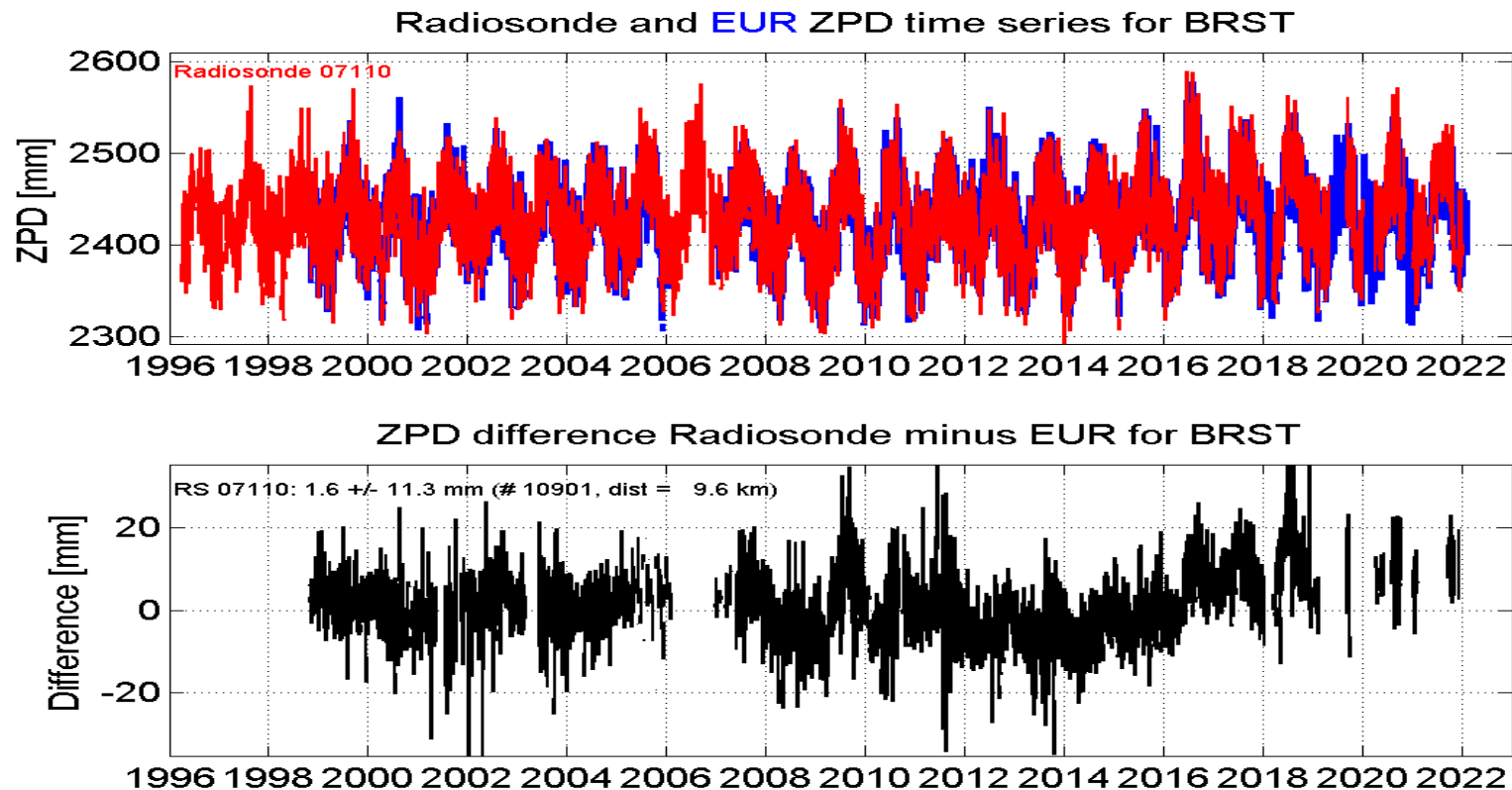
RABT 19:010:01800 2380.0 1.6 -0.192 0.239 -0.293 0.260

Total

Nord

Est

Comparaison BRST (réseau européen EUREF)



Intérêt d'être dans un réseau performant

- Nombreuses sources d'erreur : estimation des coordonnées, bruit des mesures, coupures, mesures fausses 'outliers', interpolations, influence des nuages, ...
- Différences entre les logiciels, avec les radiosondes
- Rendre les solutions homogènes : repro- 2 (1996-2014), -3 (1994-2020)
- Comparaison avec ERA5 IWV
- Validation avec des mesures satellites (Copernicus, radio-occultation)
- Intégration dans les modèles climatiques
- Voir par exemple

https://www.mdpi.com/journal/remotesensing/special_issues/Global_Climate_GNSS