

# Les gradients troposphériques

- Définition
- Gradients et résidus
- Gradients et positionnement
- Validation des gradients
  - modélisation météo
  - mesures indépendantes
  - GPS interne:  
gradients individuels  $\longleftrightarrow$  gradients entre ZTDs
- Applications:
  - résolution verticale de la mesure d'humidité
  - tomographie troposphérique
  - assimilation de délais obliques dans modèles météo

# L'estimation des paramètres troposphériques GPS: délais zénithaux et gradients horizontaux

Estimation des paramètres troposphériques supplémentaires dans l'analyse des données (moindre carrés ou filtre de Kalman): les paramètres zénithaux.

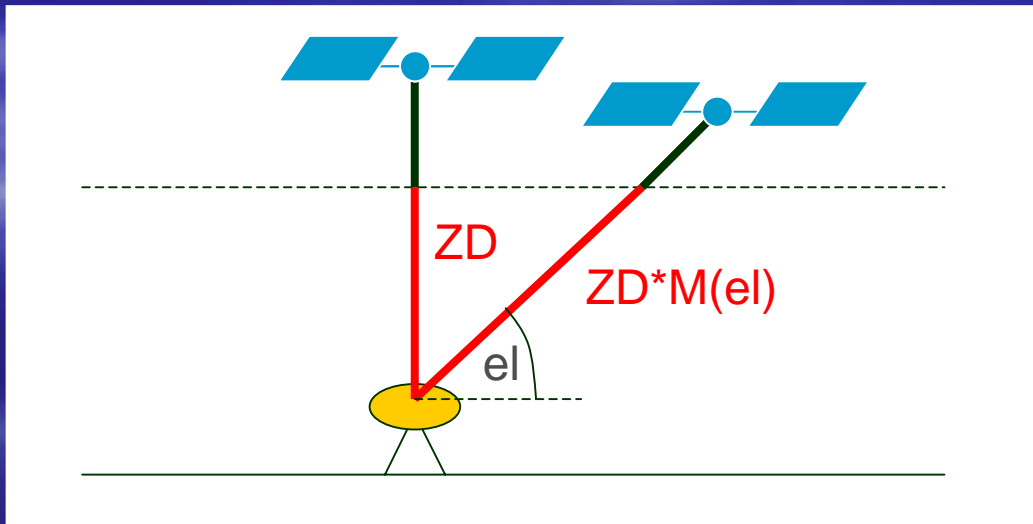
➡ d'abord pour améliorer la précision du positionnement  
➡ ensuite, à partir de stations bien localisées, utilisés comme signal

- estimation du délai troposphérique zénithal dans l'analyse GPS:

$$\text{ATMDEL}(el) = \text{ZTD} * M(el)$$

$$M(el) \sim 1/\sin(el) \sim 1 \text{ pour } el = 90^\circ$$

$$\sim \infty \text{ pour } el = 0^\circ$$



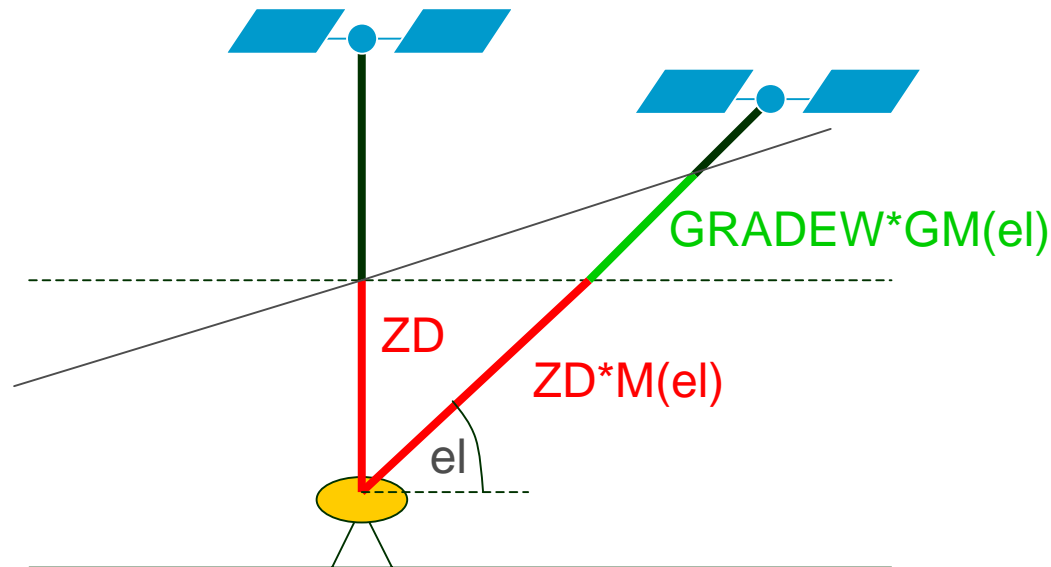
# L'estimation des paramètres troposphériques GPS: délais zénithaux et gradients horizontaux

- estimation des gradients horizontaux du délai troposphérique dans l'analyse GPS:

$$\text{ATMGRAD}(\text{az}, \text{el}) = \text{GRADNS} * \text{GM}(\text{el}) * \cos(\text{az}) + \text{GRADEW} * \text{GM}(\text{el}) * \sin(\text{az})$$

$$\text{GM}(\text{el}) \sim 1/(\sin(\text{el}) * \tan(\text{el}) + C) \sim 0 \text{ pour } \text{el} = 90^\circ$$

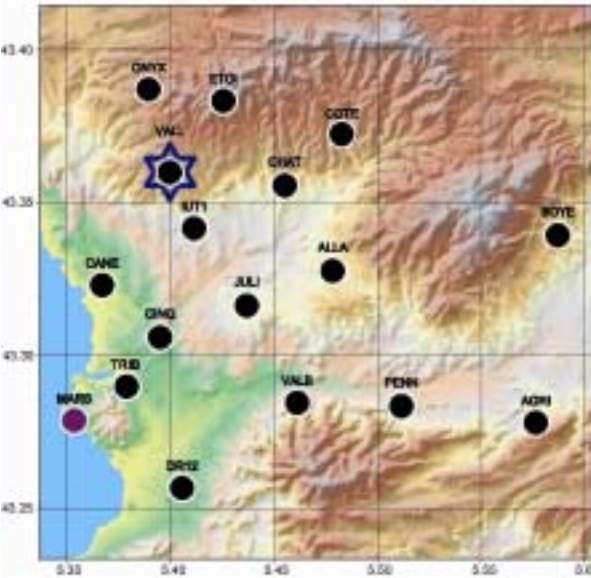
$$\sim \infty \text{ pour } \text{el} = 0^\circ$$



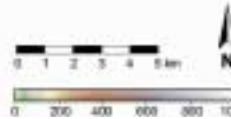


## GPS water vapor tomography - Marseille 6 to 27 June 2001

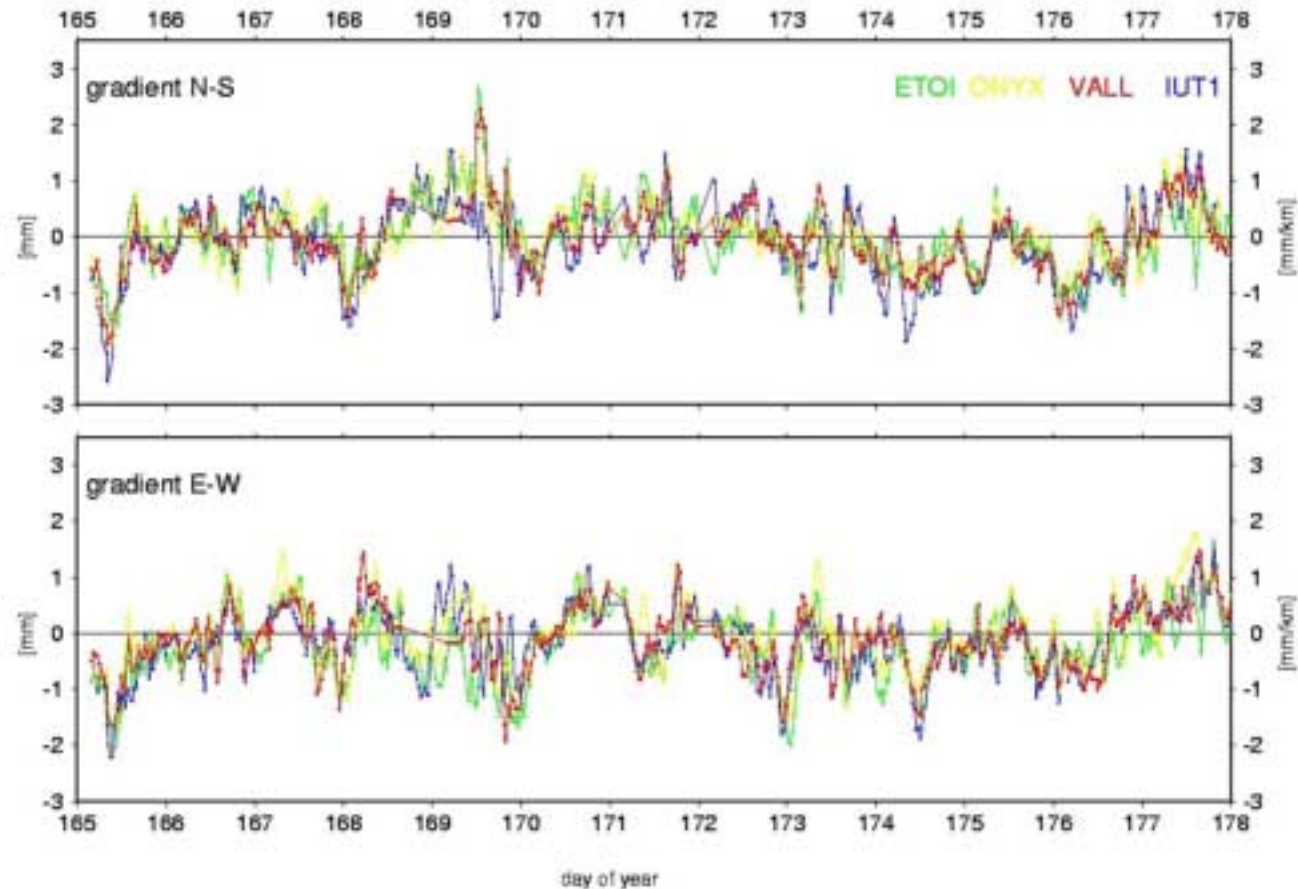
ESCOMPTE associated project



Location of GPS sites and other instruments of water vapor measurement around Marseille area in June 2001



# Observations: exemple GPS/H<sub>2</sub>O ESCOMPTE

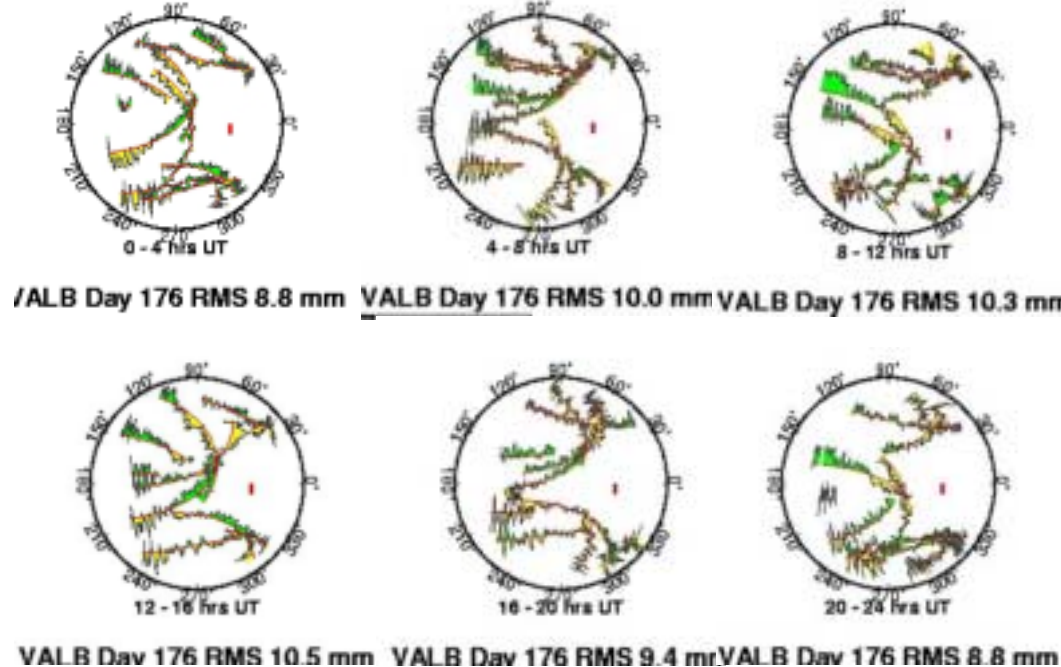
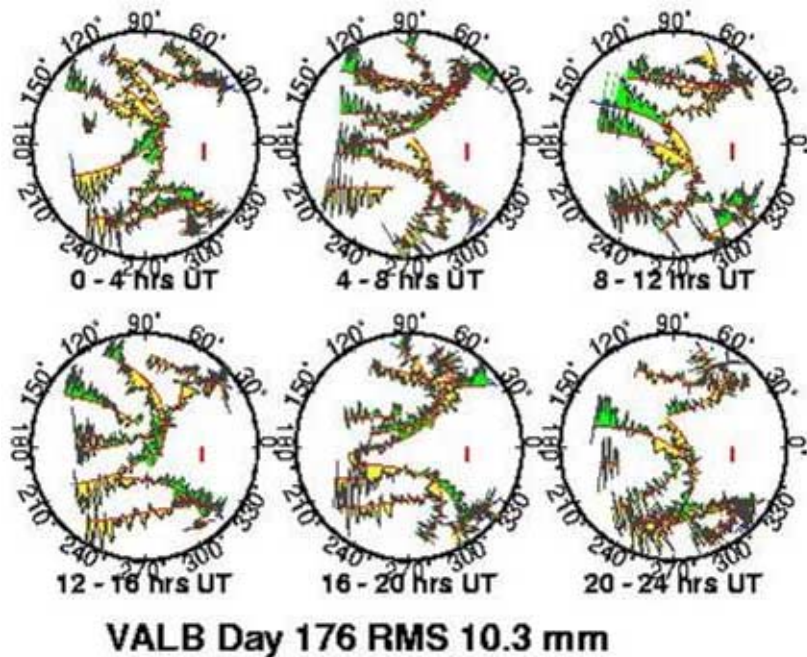




# Résidus observation – modèle

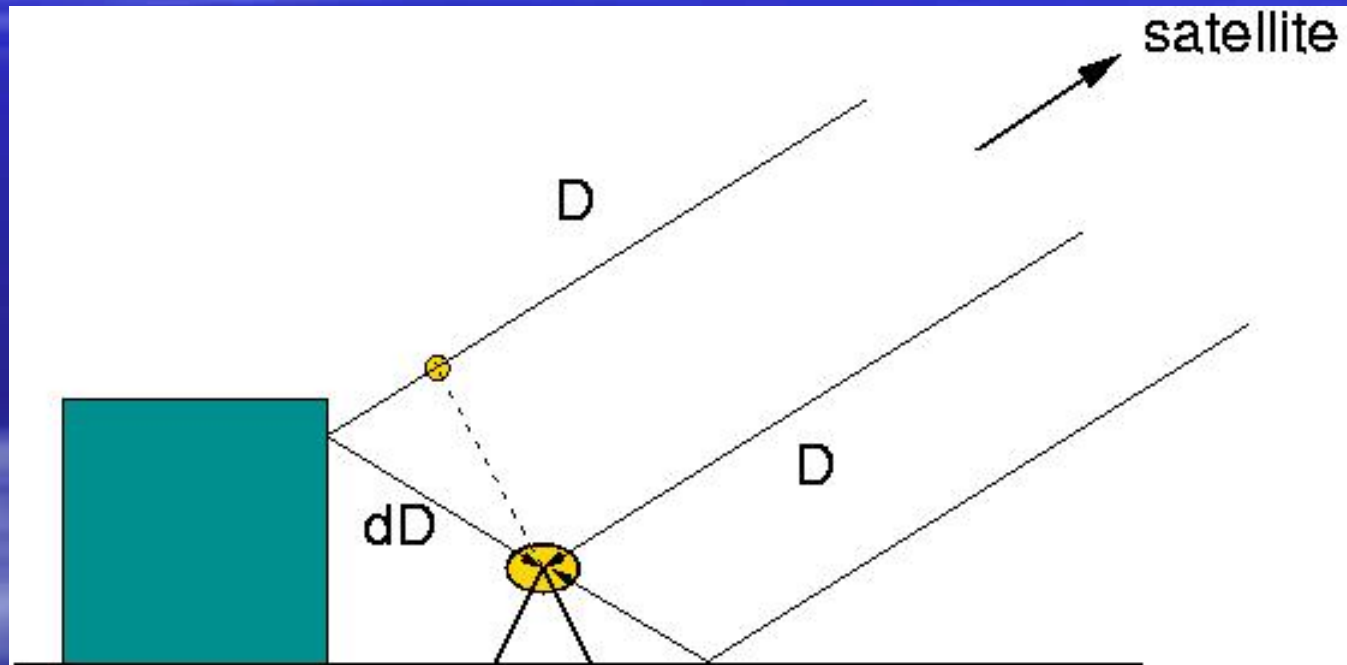
## sans gradients

## avec gradients

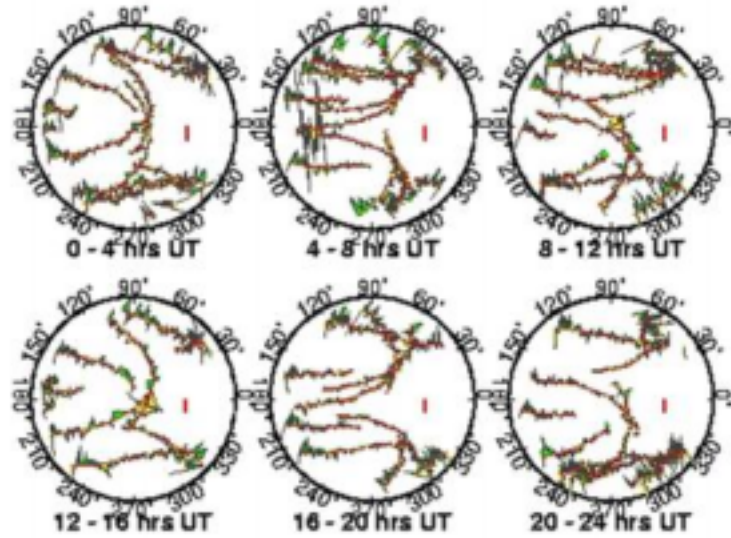


# Gradients $\longleftrightarrow$ multi-trajets !

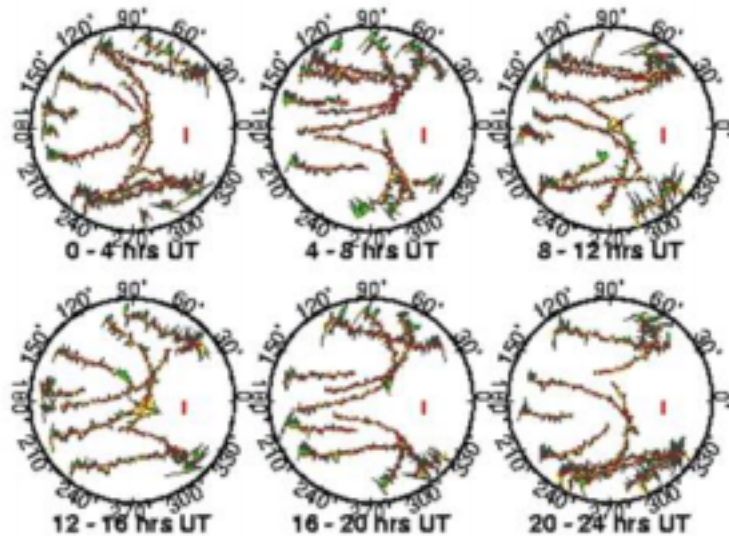
Attention: corrélation !



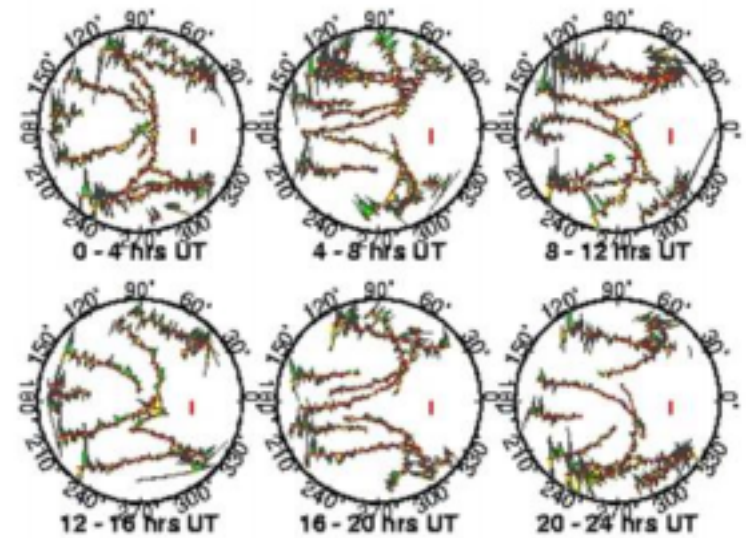
# Multi-trajets : SNR



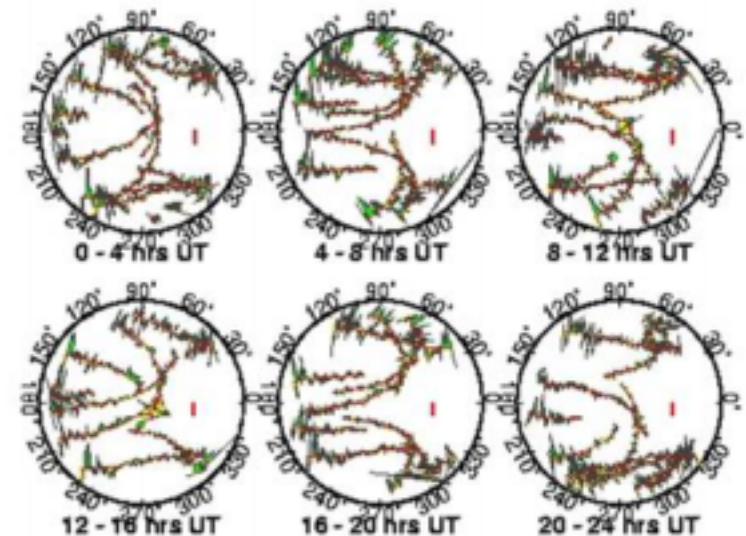
**CINQ Day 170 RMS 6.65 mm**



**CINQ Day 171 RMS 6.08 mm**



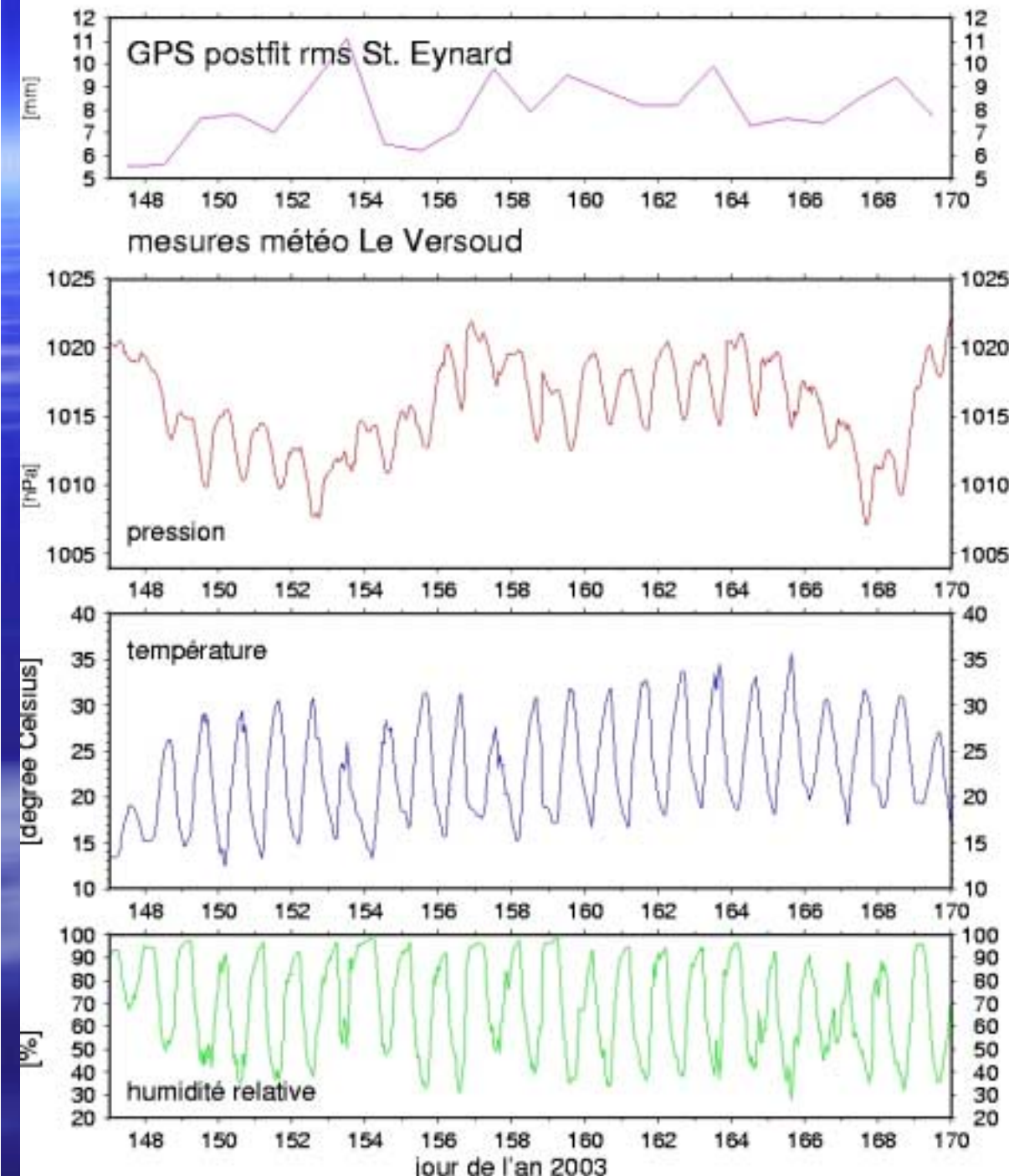
**CANE Day 170 RMS 7.79 mm**



**CANE Day 171 RMS 7.79 mm**

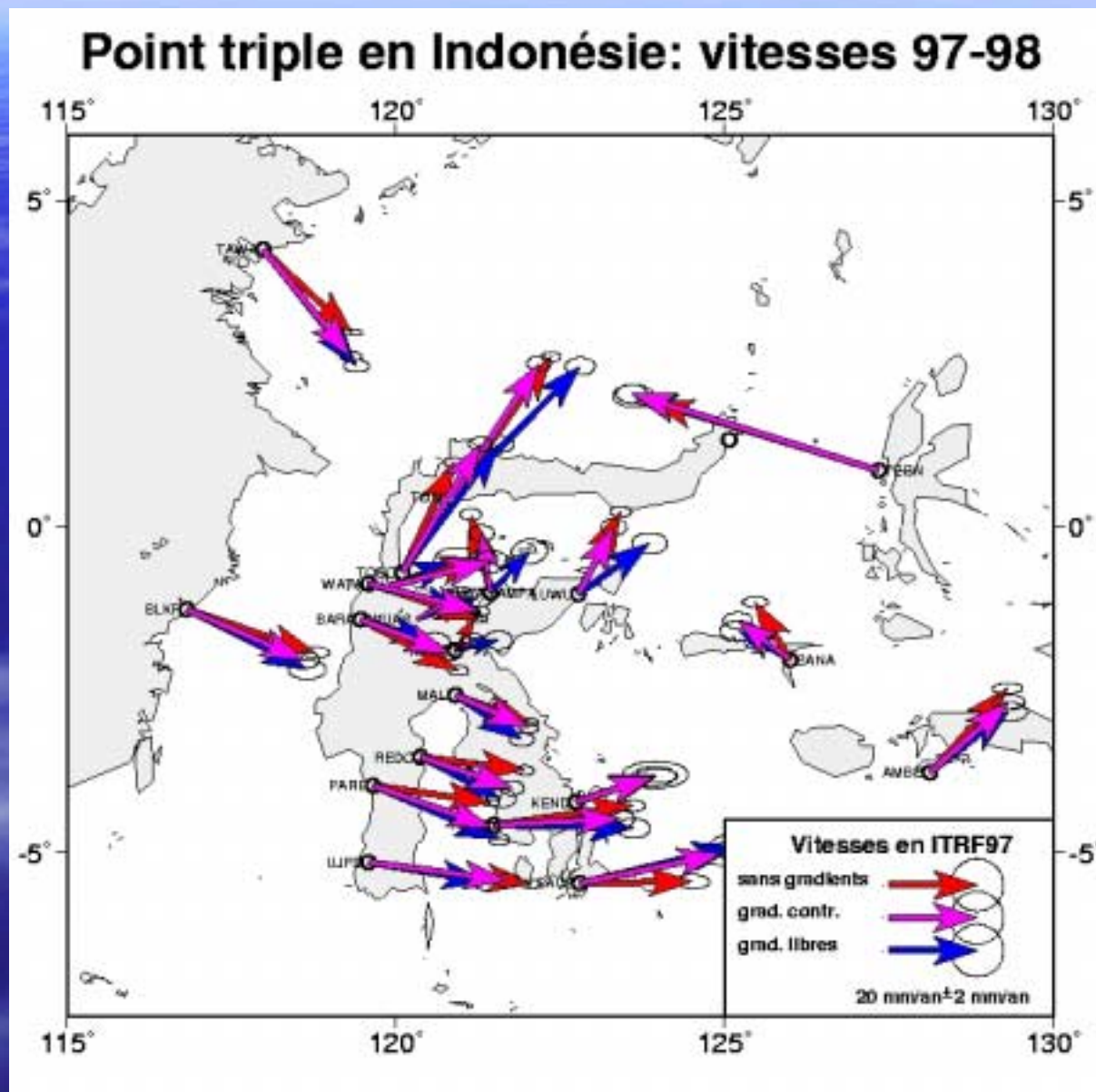


Interprétation:  
résidus =  
atmosphère ?





# Gradients et positionnement



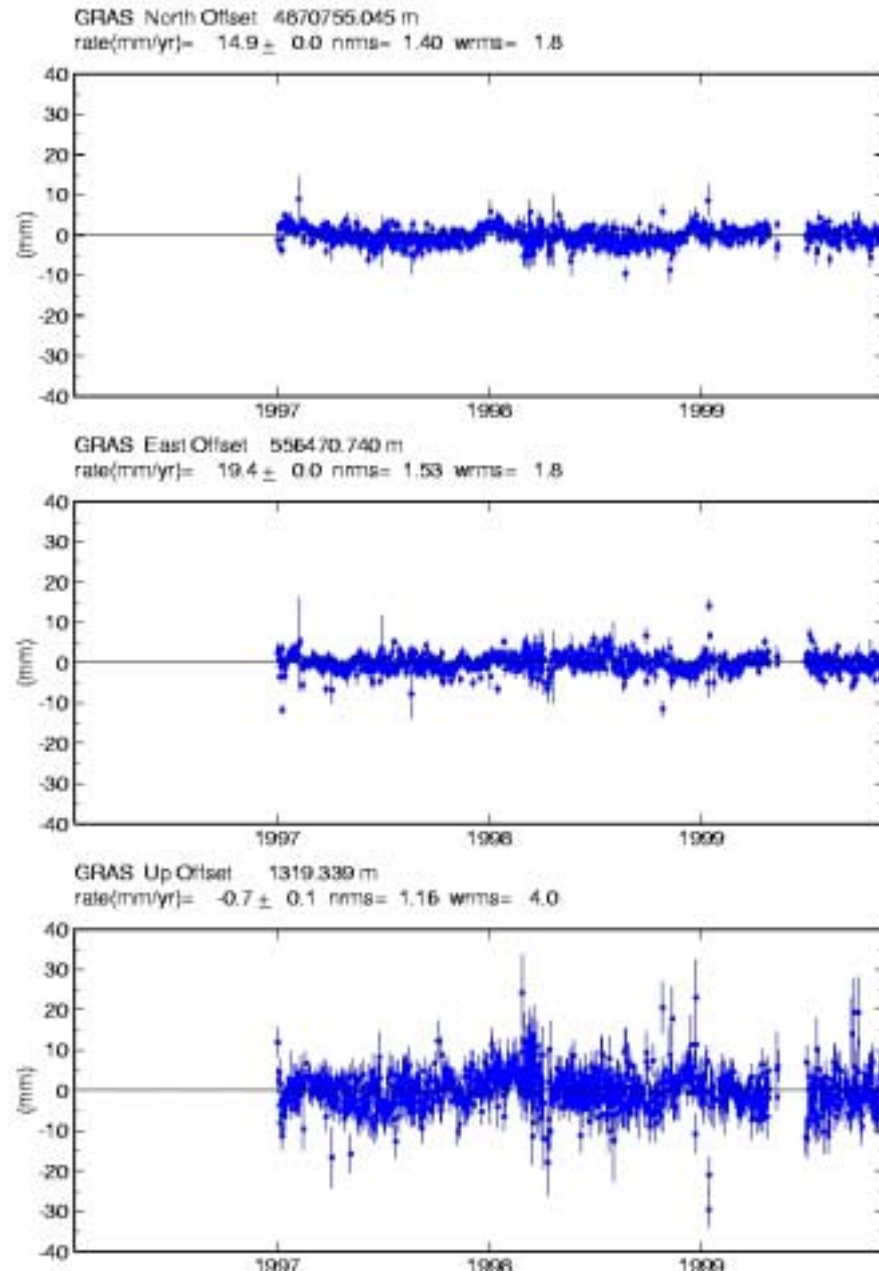
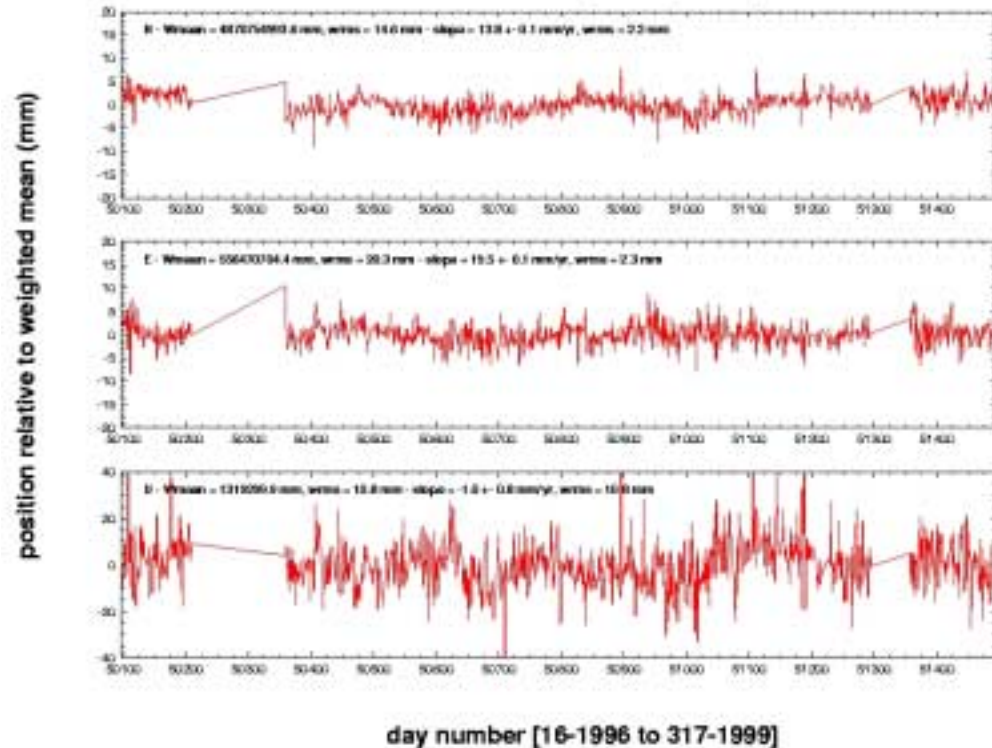
# Gradients et positionnement

Avec 1 gradient / 24 h

Sans gradients

## GRAS\_GPS

cleaned and detrended time series, maxsig=10 mm, maxdev=10 mm



# Validation des gradients horizontaux troposphériques

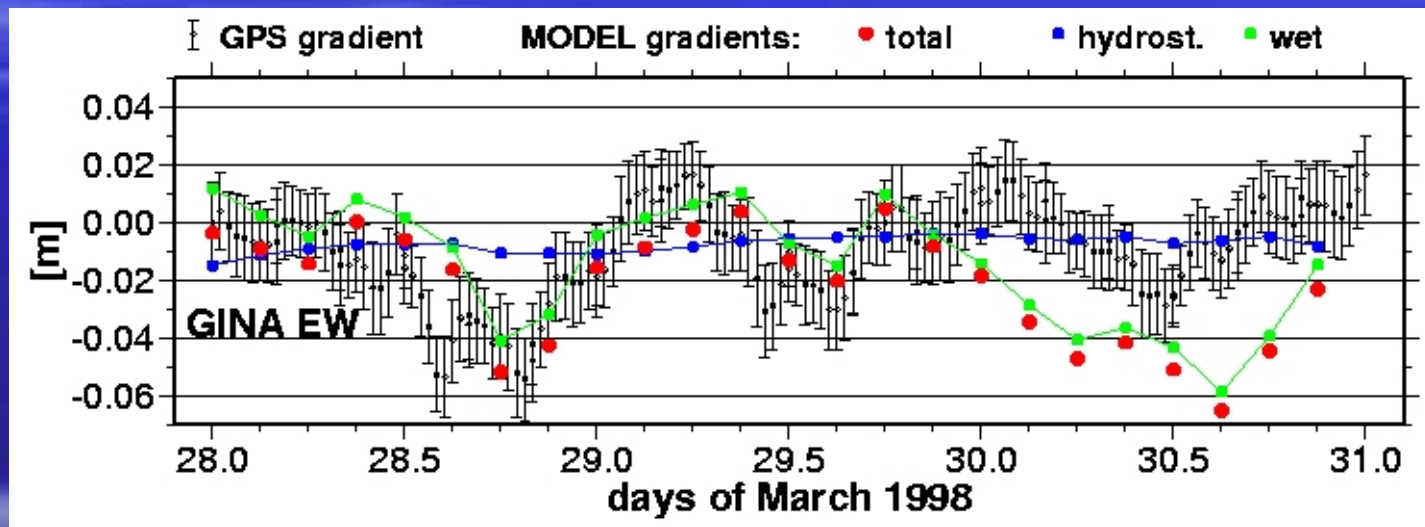
- Rappel: validation ZTD terminée
  - Comparaison avec mesures indépendantes (pression, température, radiosondes, radiomètres à vapeur d'eau, lidar, ...)
  - Comparaison avec modèles atmosphériques (HIRLAM, ALADIN, ...)
- Gradients: validation plus compliquée
  - 2 composantes (hydrostatique et humide) du même ordre de grandeur
  - Pas de mesure météo simple
  - Radiomètres pointés (Ware et al., 1997, Bar-Sever et al., 1998, Aonashi et al., 2000, Alber et al., 2000, Gradinarski et al., 2000, ...)
  - Modèles météo (Walpersdorf et al., 2000, de Haan et al., 2002, ...)



# Validation par simulation NWP: ALADIN

- Appliquée aux stations GPS près de la Méditerranée lors de FETCH 1998
- Résolution  $0.1^\circ \times 0.1^\circ$ , 15 niveaux verticaux (P\_sol – 100 mbar), intervalle 3 h
- Extrapolation pour sites en dessous du modèle
- ZTD par intégration verticale ➔ 70 km (solution analytique au-dessus du modèle)
- GRAD par intégration sur lignes de vue sous 8 azimuths / 10 élévations

# Gradient GPS - ALADIN



# Perspectives validation gradients par modèle météo:

- Modèle de haute résolution (250 x 250 m):  
Meso-NH (Météo France)
- Évaluation des délais sur lignes de vue  
réelles (6 – 10 satellites visibles  
simultanément)

➡ re-projection sur ZTD / GRADNS/EW

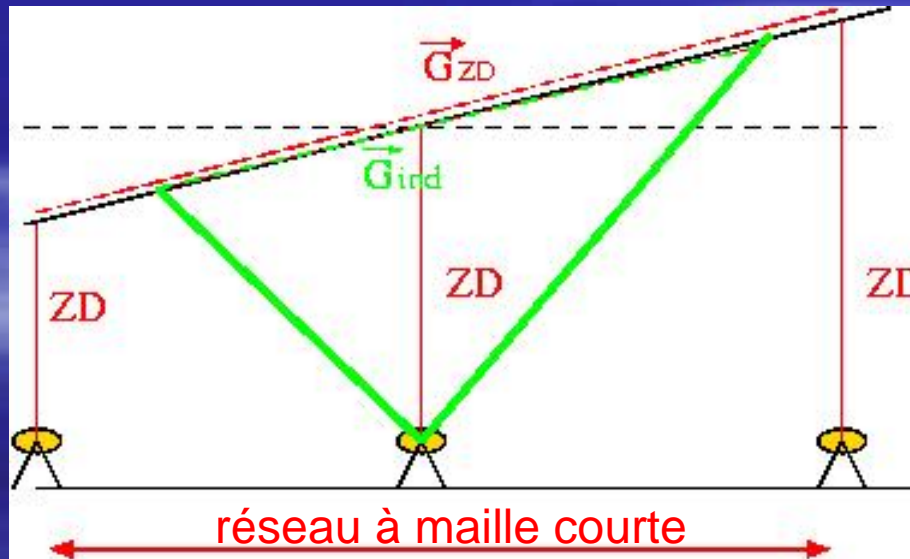


# Validation GPS interne :

## Comparaison:

gradients individuels ( $G_{ind}$ )  $\longleftrightarrow$  gradient entre ZTDs ( $G_{ZD}$ )

GRADNS/EW évalués à une station GPS  $\longleftrightarrow$  gradient entre les ZTDs de plusieurs stations / d'un réseau de stations GPS



# Validation GPS interne :

## Comparaison

gradients individuels ( $G_{ind}$ ) – gradients entre ZTDs ( $G_{ZD}$ )

$$ZTD = 10^{-6} \int_0^{\infty} N(z) dz$$

$$N = N(\vec{\rho}, z) = N_0(z) + \vec{\eta}(z) \cdot \vec{\rho} + \dots$$

$\vec{\eta}(z)$  : gradient horizontal de réfractivité

$\vec{\rho}$  : vecteur de déplacement horizontal

Gradient ZTD:

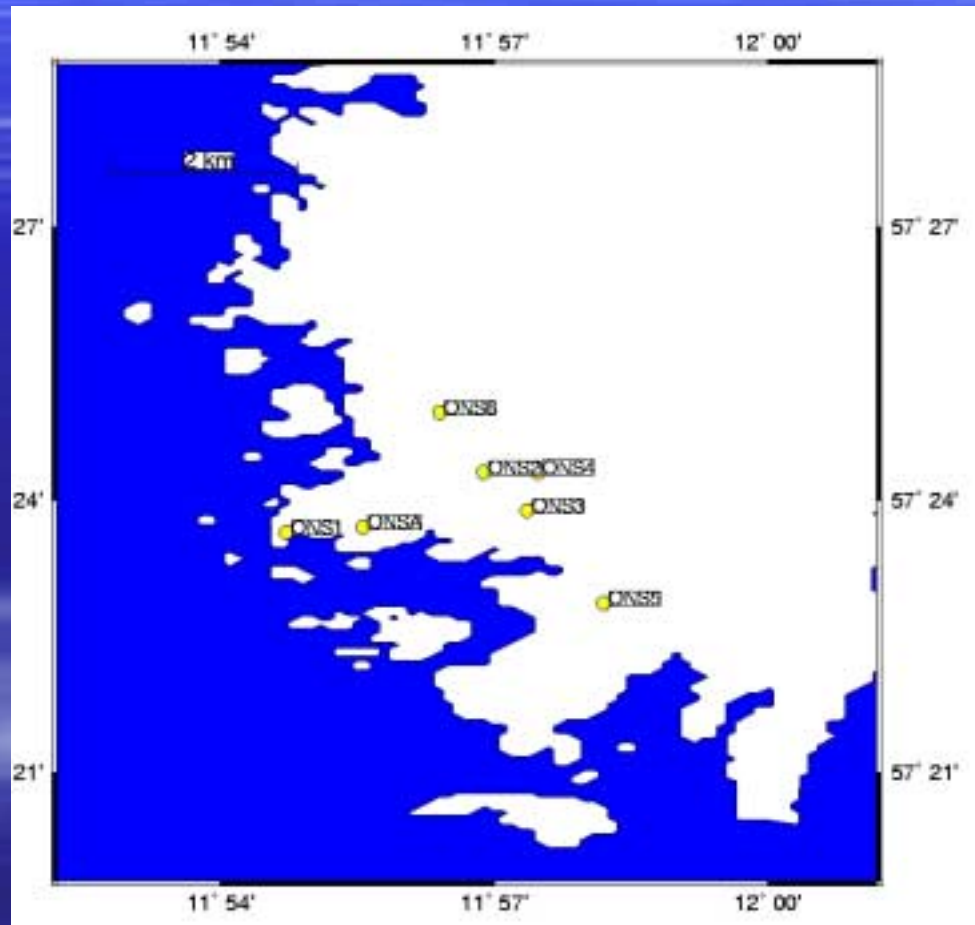
$$\vec{G}_{ZD} = 10^{-6} \int_0^{\infty} \vec{\eta}(z) dz$$

Gradient individuel:

$$\vec{G}_{ind} = 10^{-6} \int_0^{\infty} \vec{\eta}(z) \cdot z dz$$

➡  $\vec{G}_{ind}$  est sensible à l'altitude du gradient,  $\vec{G}_{ZD}$  ne l'est pas !

# Première expérience de validation GPS intèrne: REGINA (Elosegui et al., 1999)

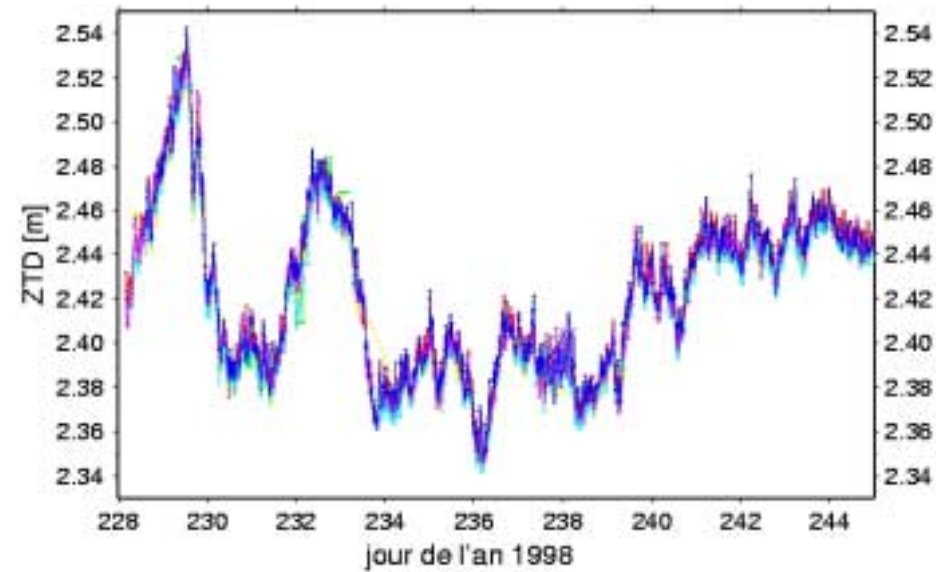
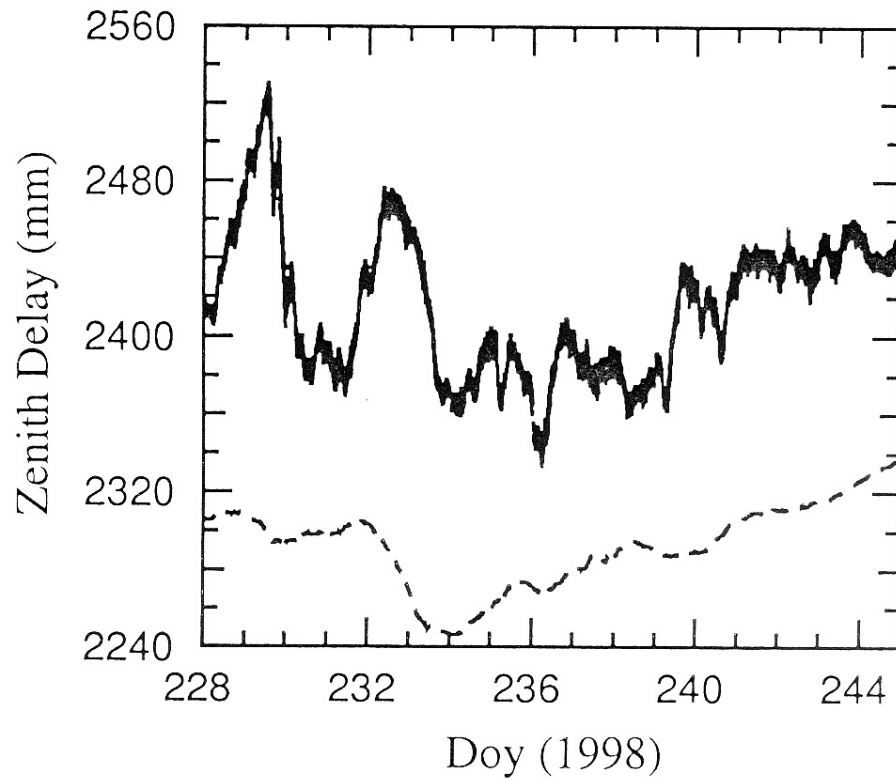


Comparaison des performances GIPSY (Elosegui et al.) – GAMIT (cette étude)



# ZTDs

## GIPSY – GAMIT

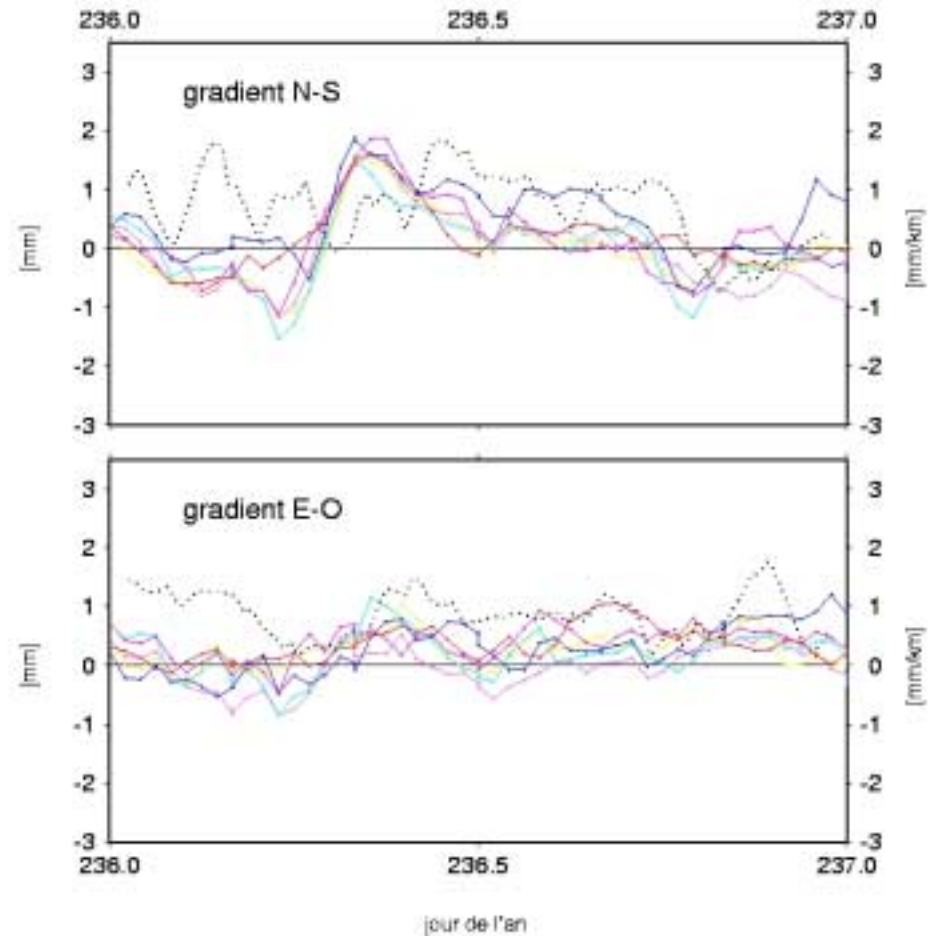
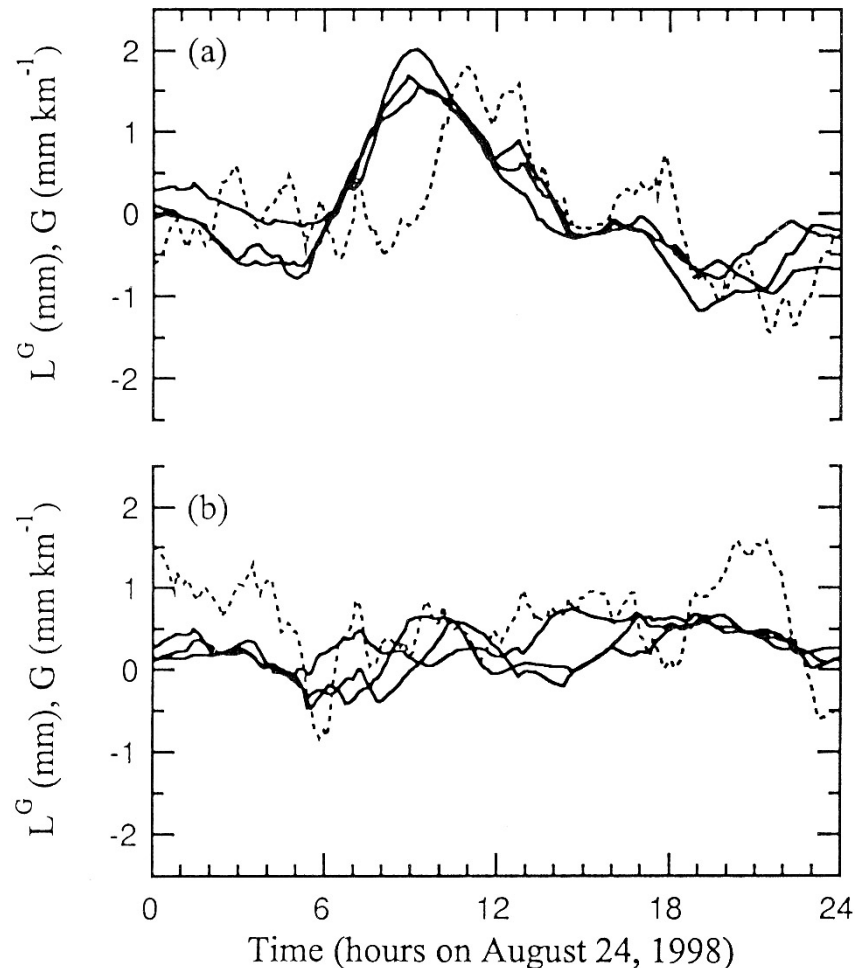


Elosegui et al., 1999

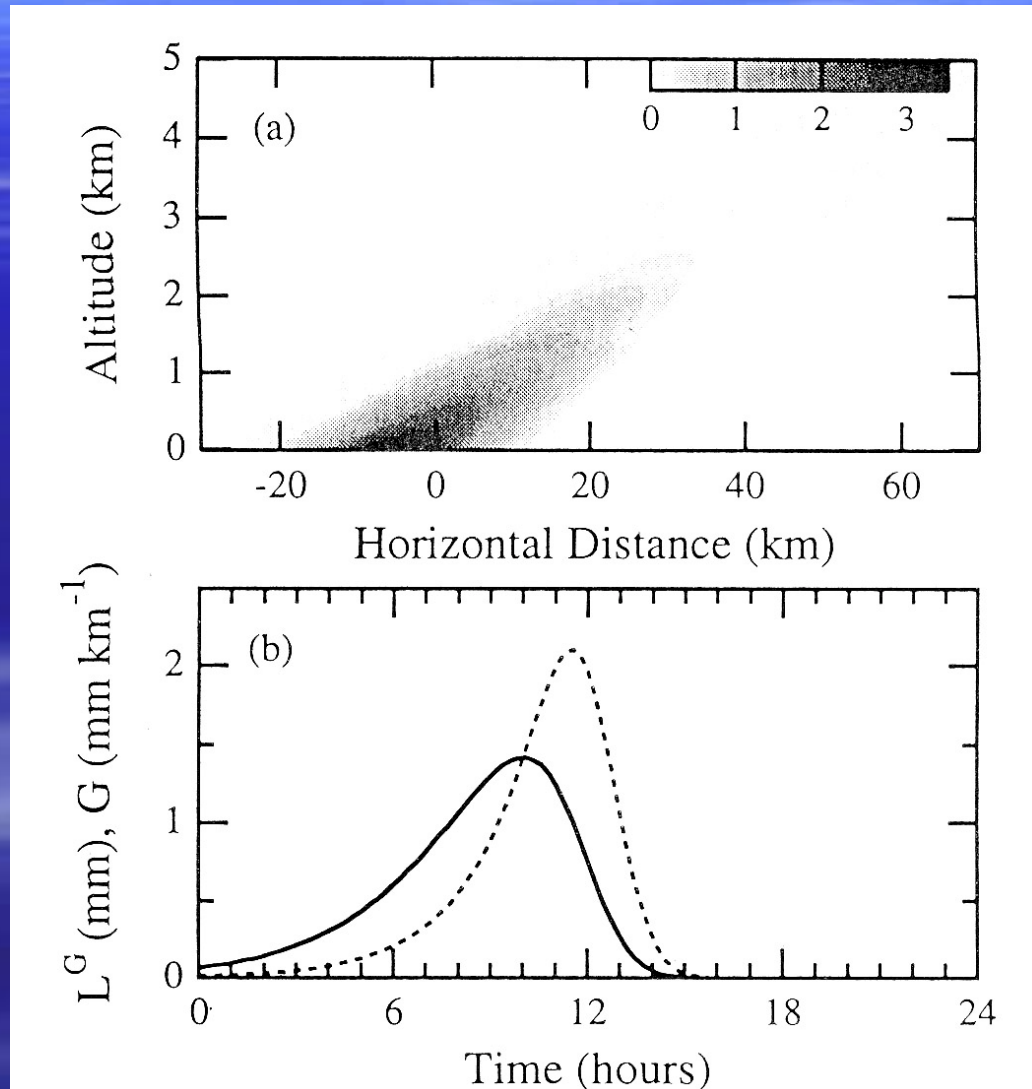
cette étude

# Gradients individuels / entre ZTDs

## GIPSY - GAMIT

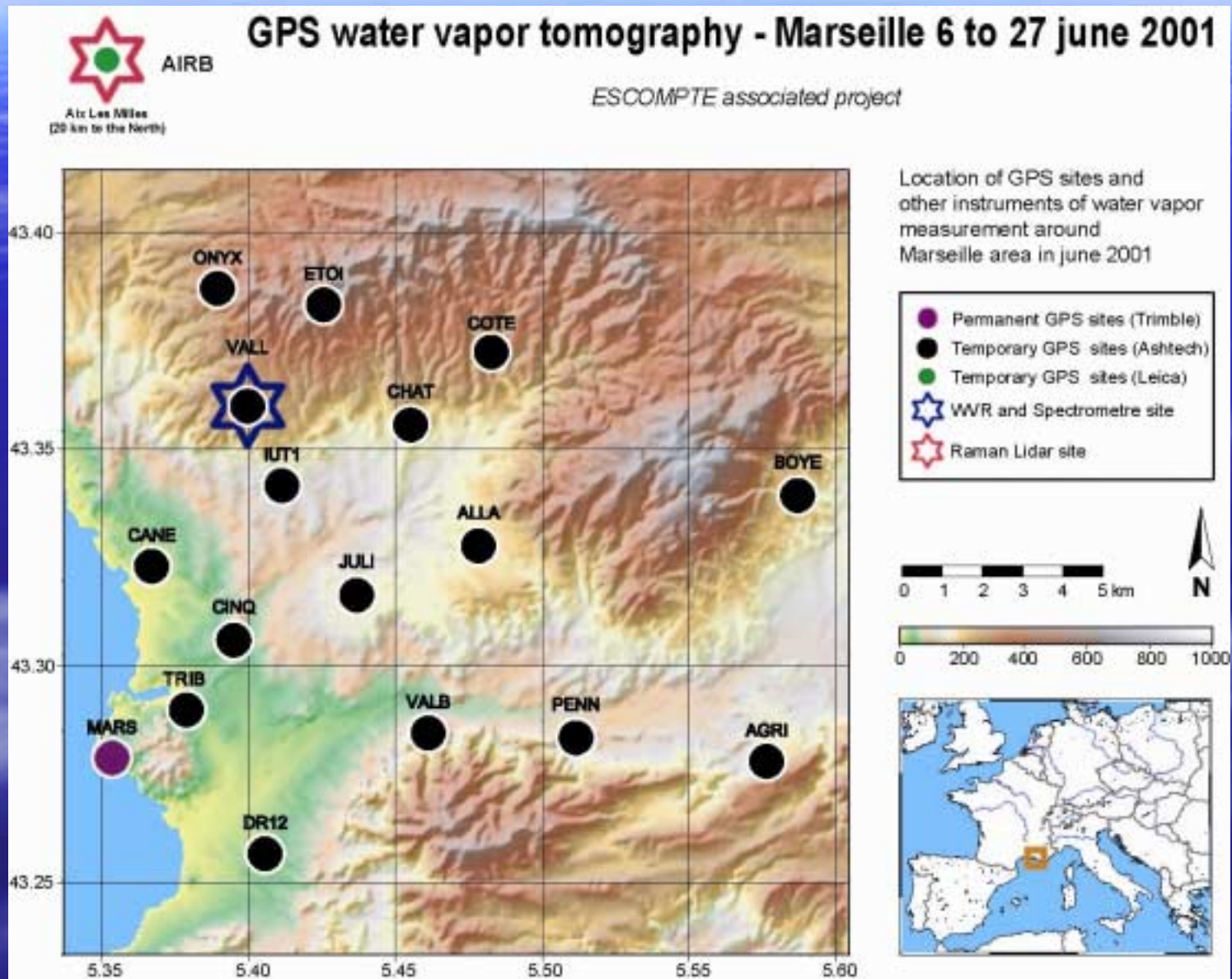


# Simulation: passage N-S d'un front d'air chaud

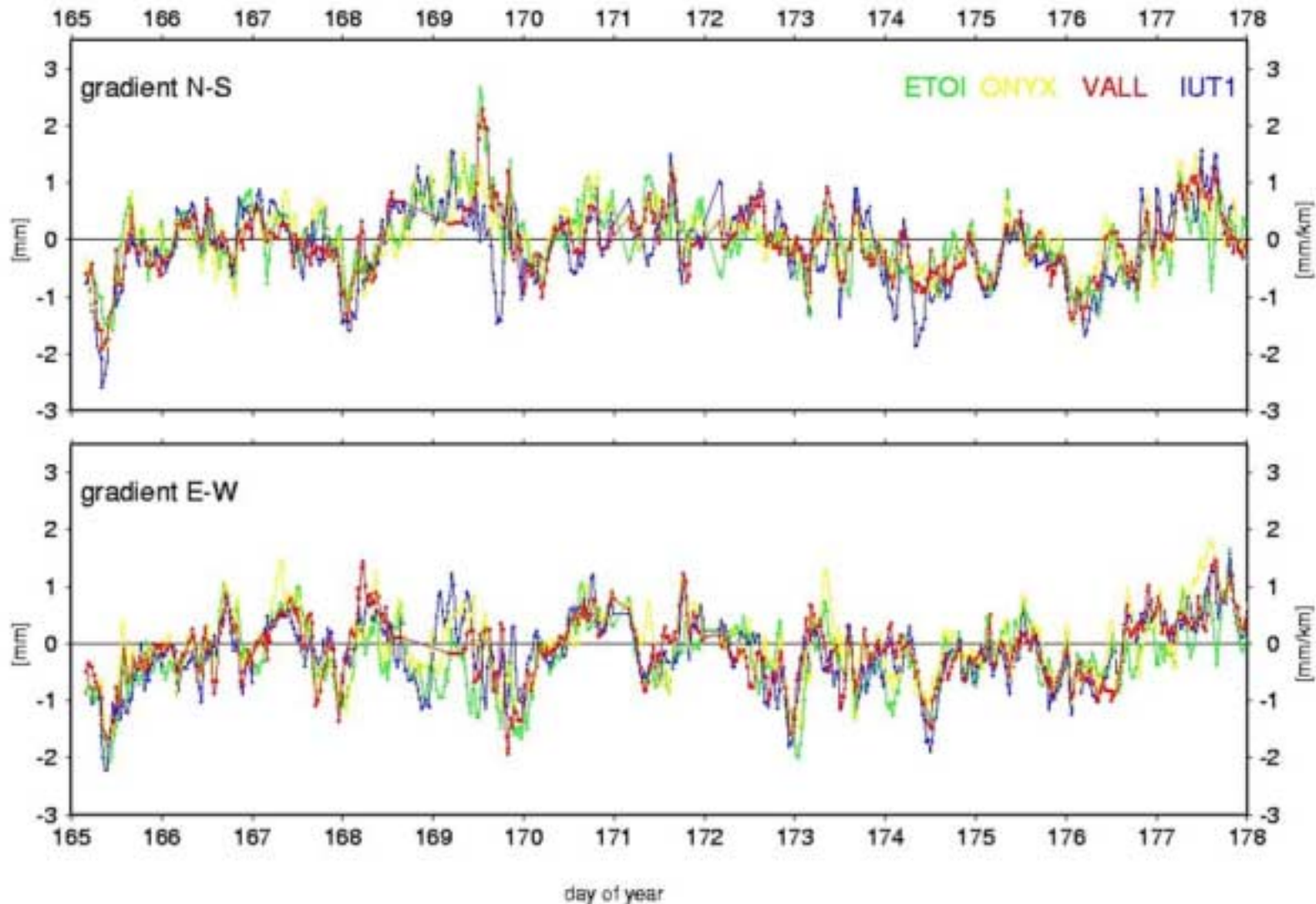




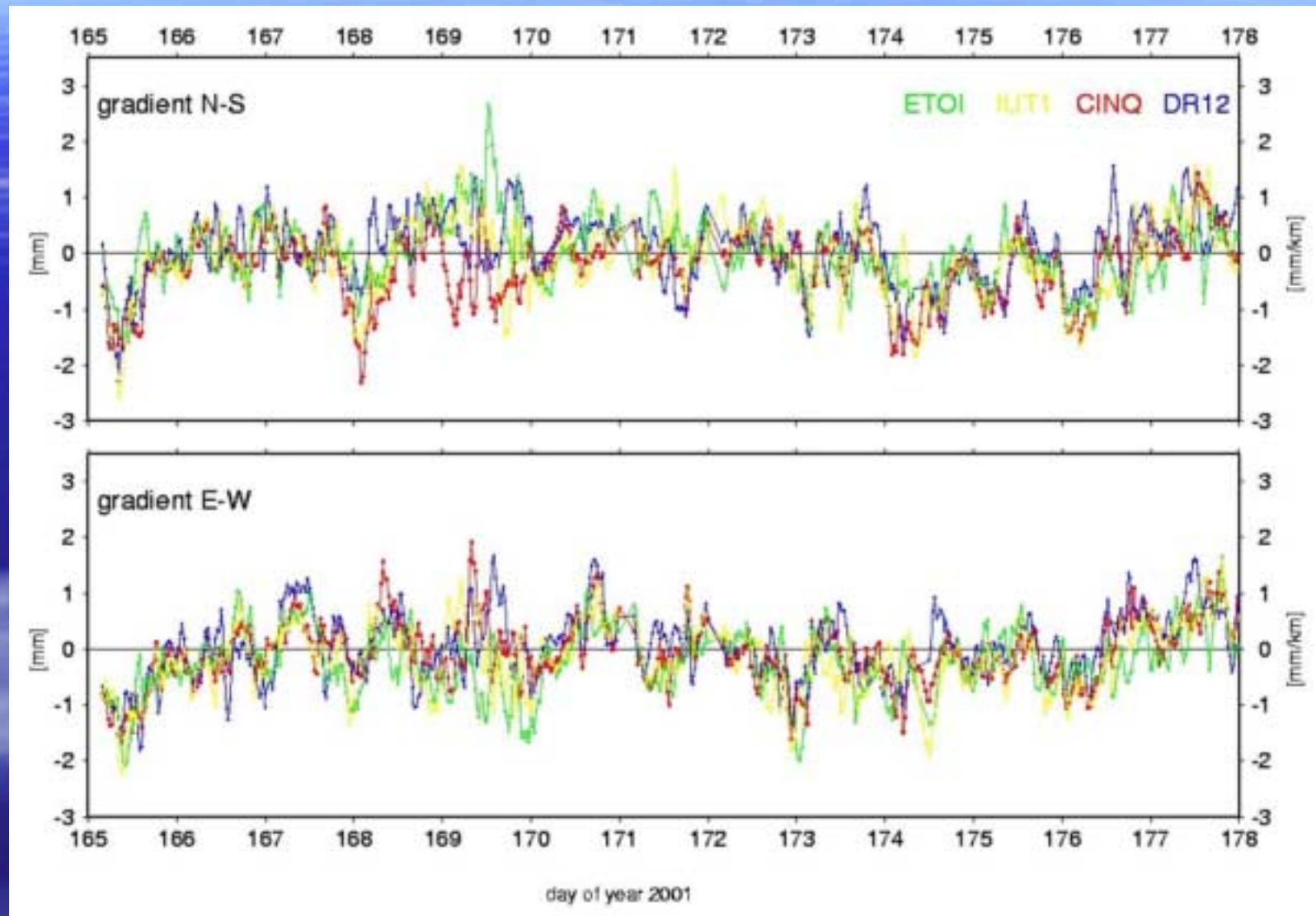
# Application: ESCOMPTE GPS/H2O



# Gradients horizontaux sites proches: bien corrélés



# Gradients horizontaux sites éloignés: moins corrélés

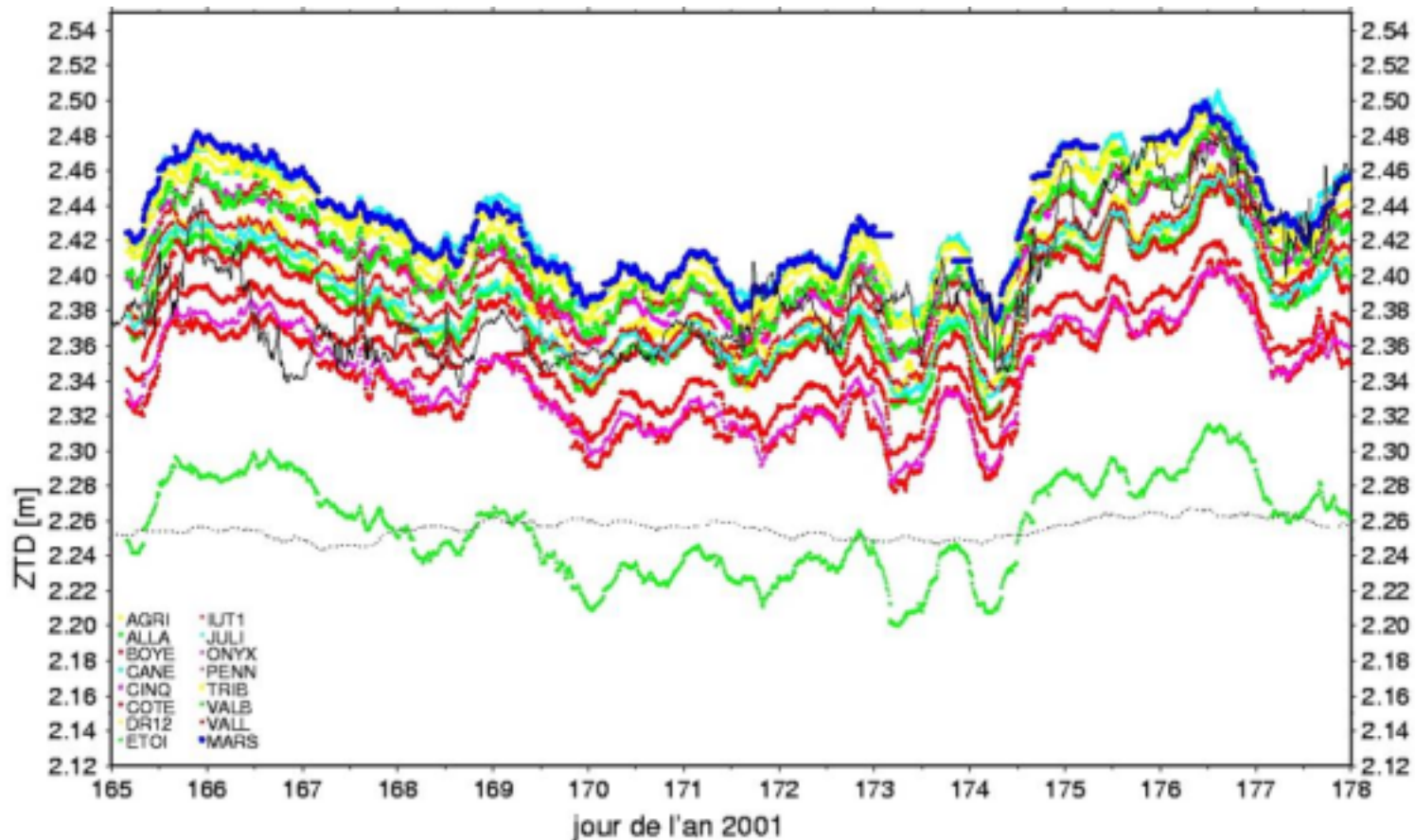




# Gradient entre ZTDs: difficulté: relief !

ZTD corrélé avec l'altitude de la station

→ enlever partie hydrostatique (ZHD) et utiliser ZWD

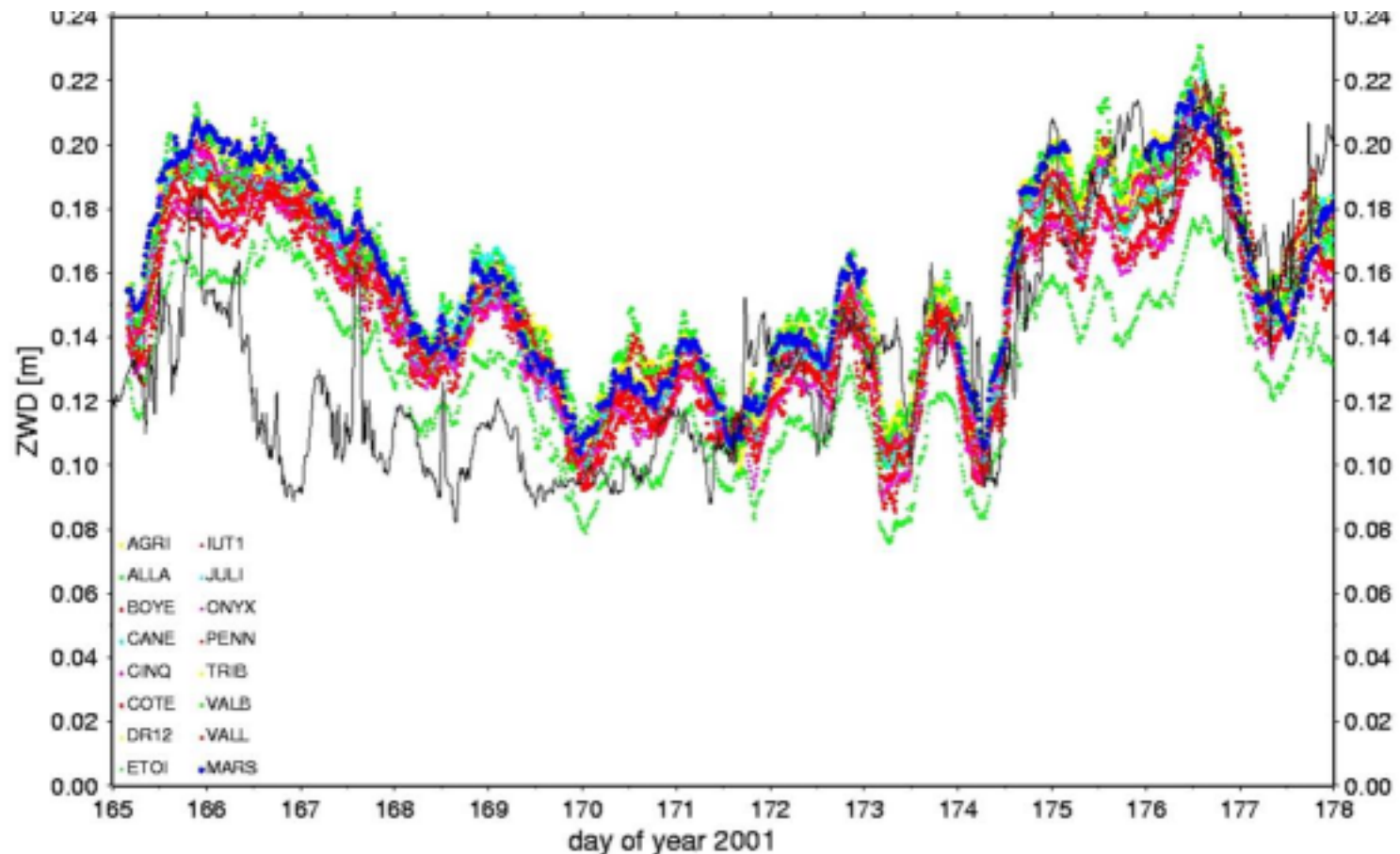




# Gradient entre ZTDs:

ZWD toujours corrélé avec l'altitude de la station !

➡ normaliser ZWD avec hauteur d'échelle de la vapeur d'eau



# Normalisation du ZWD avec hauteur d'échelle de la vapeur d'eau troposphérique:

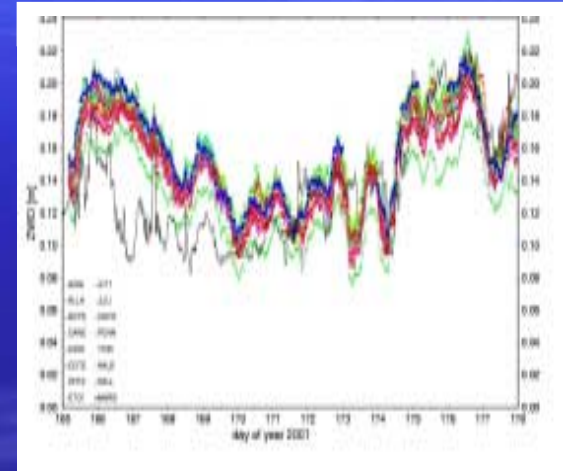
$$N(z) = N_s e^{-z/H}$$

$N$  : réfractivité de la vapeur d'eau

$z$  : altitude

$N_s$  : réfractivité humide à la surface

$H$  : hauteur d'échelle de la vapeur d'eau



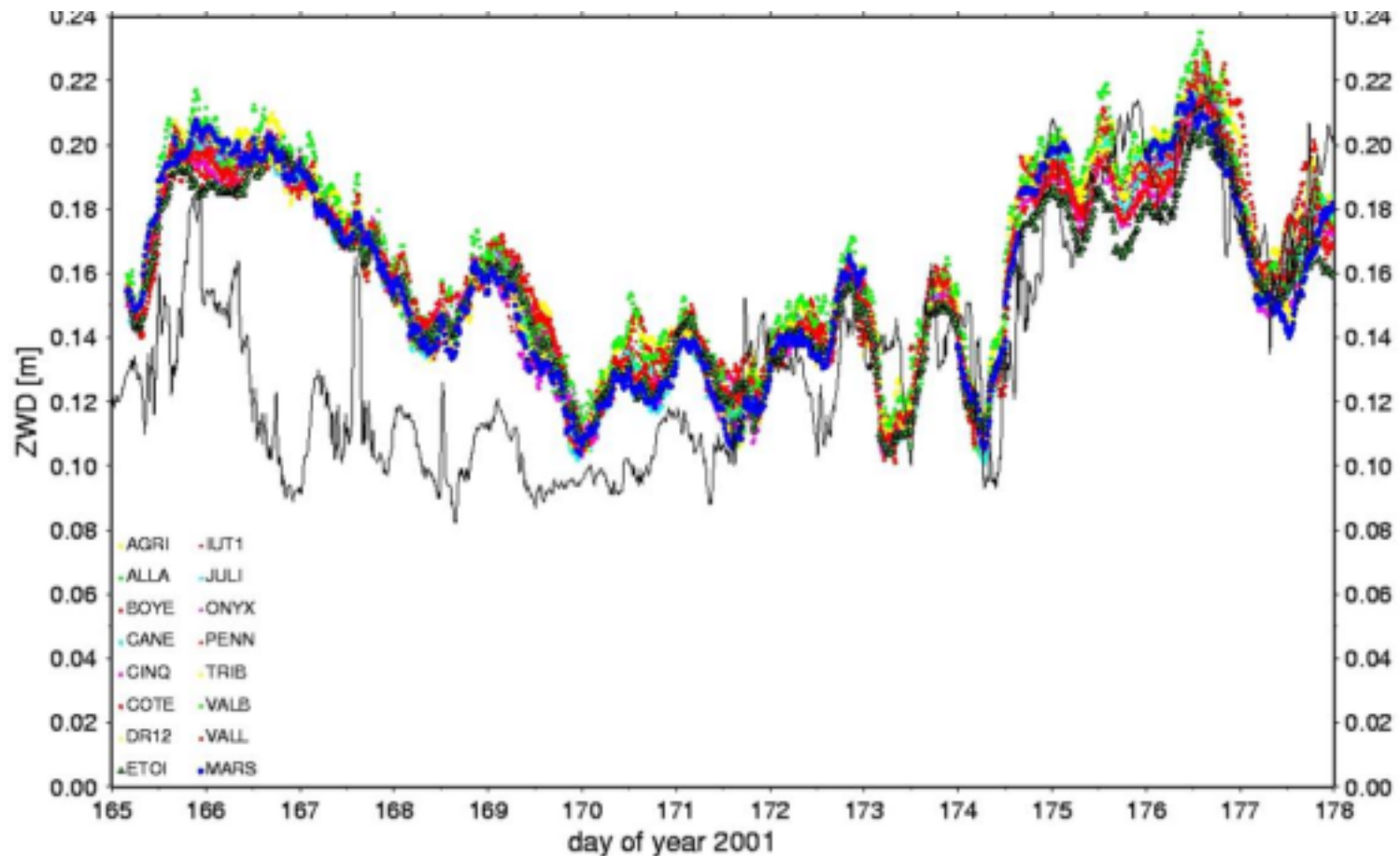
$$ZWD(z_i) - ZWD(z_{ref}) = ZWD(z_{ref}) \left[ e^{-(z_i - z_{ref})/H} - 1 \right]$$

$ZWD(z_i)$  : zenith wet delay à une altitude  $z_i$

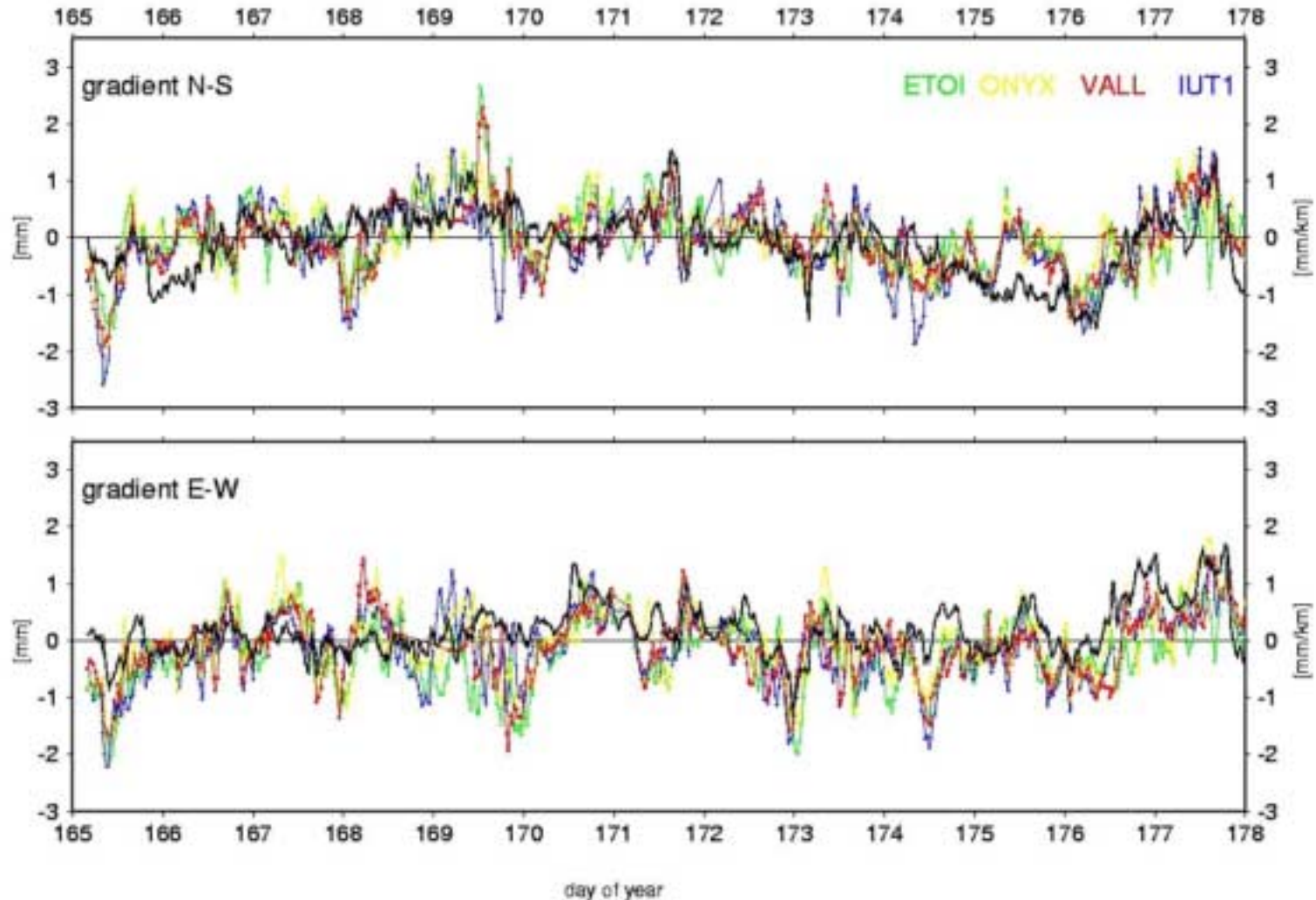
$ZWD(z_{ref})$  : zenith wet delay à l'altitude de référence

(Elosegui et al., Phys. Chem. Earth 1998)

# ZWD normalisé avec hauteur d'échelle de la vapeur d'eau de $H=3$ km

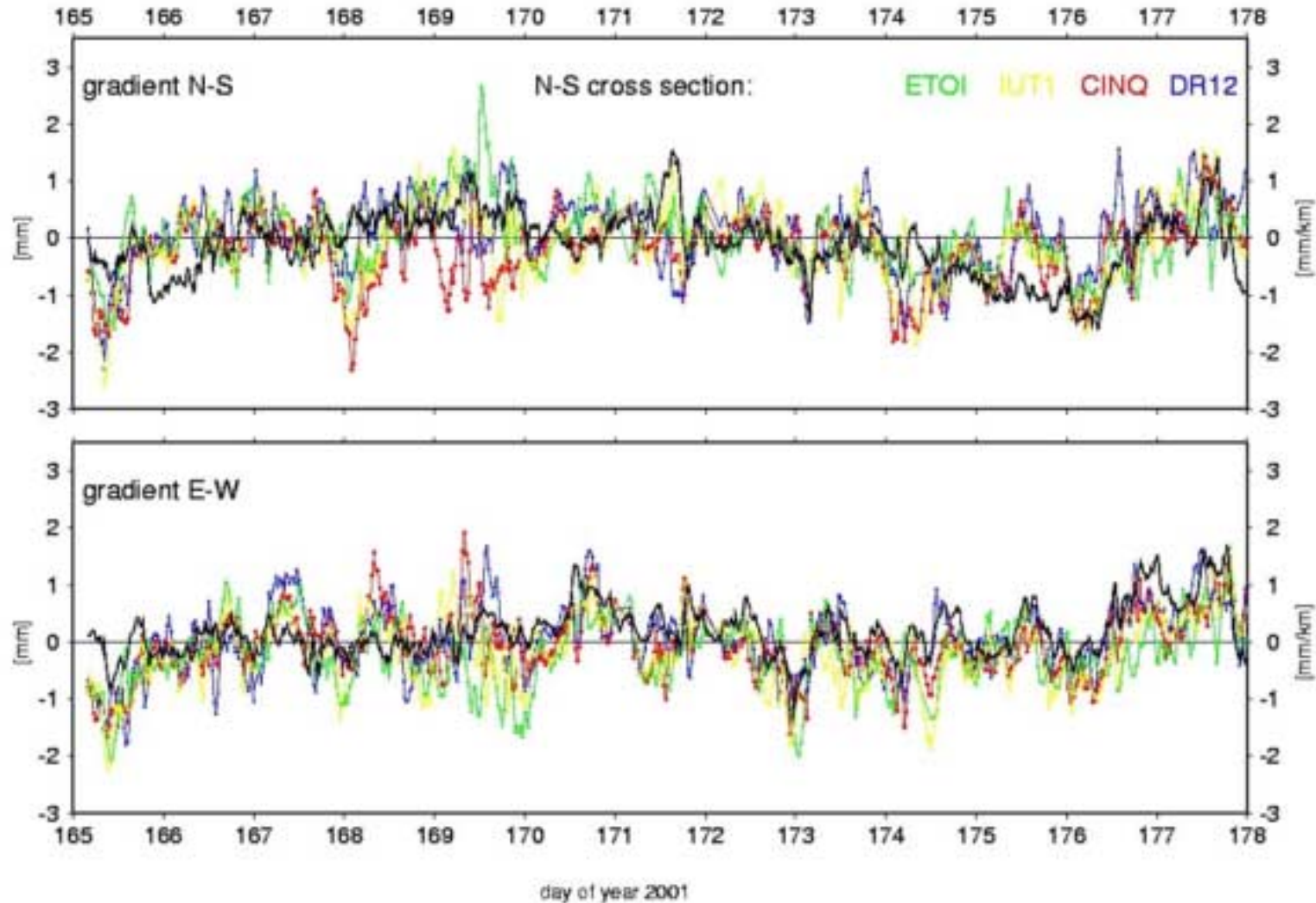


# Gradients ZWD et gradients individuels à 4 sites proches

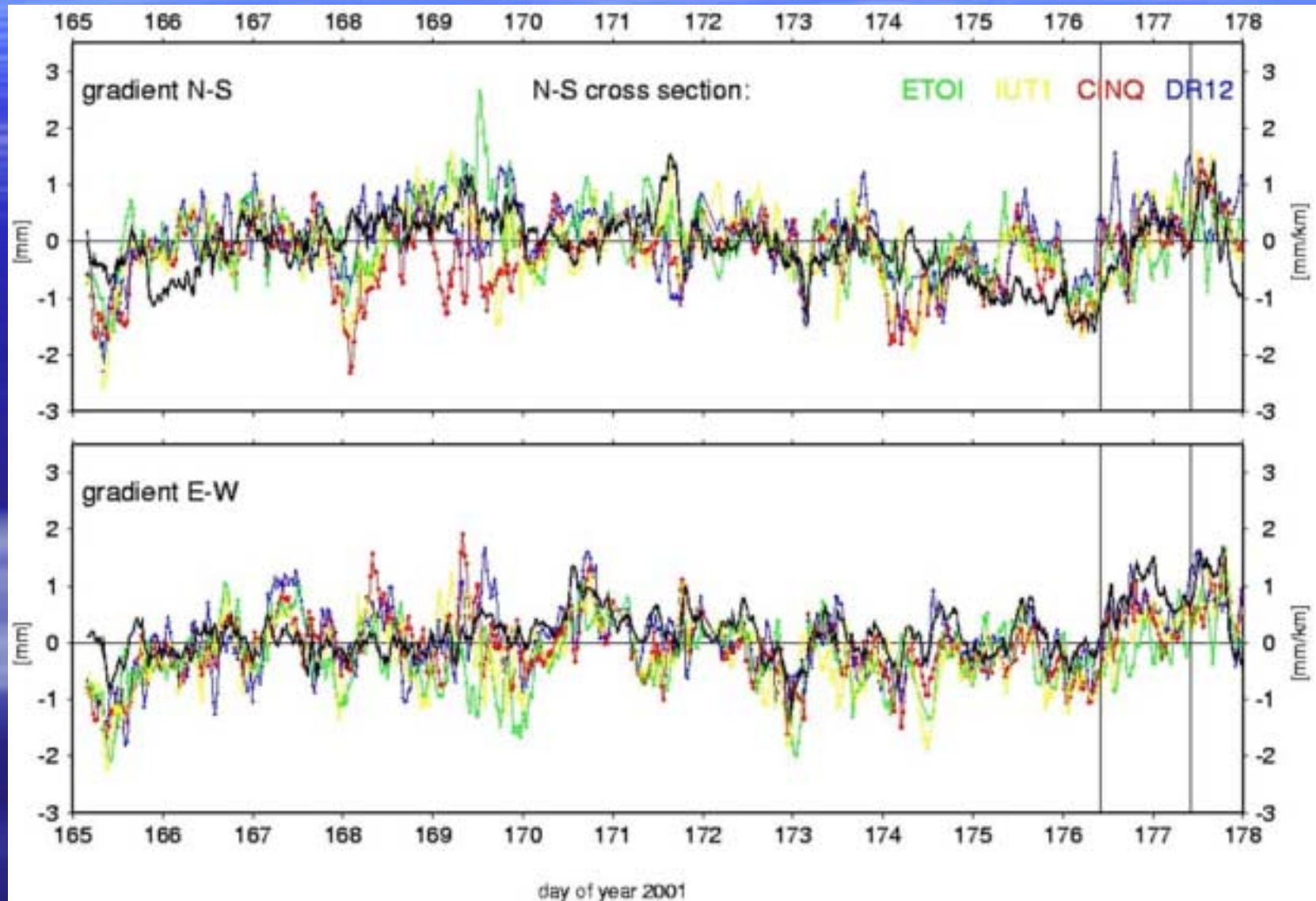




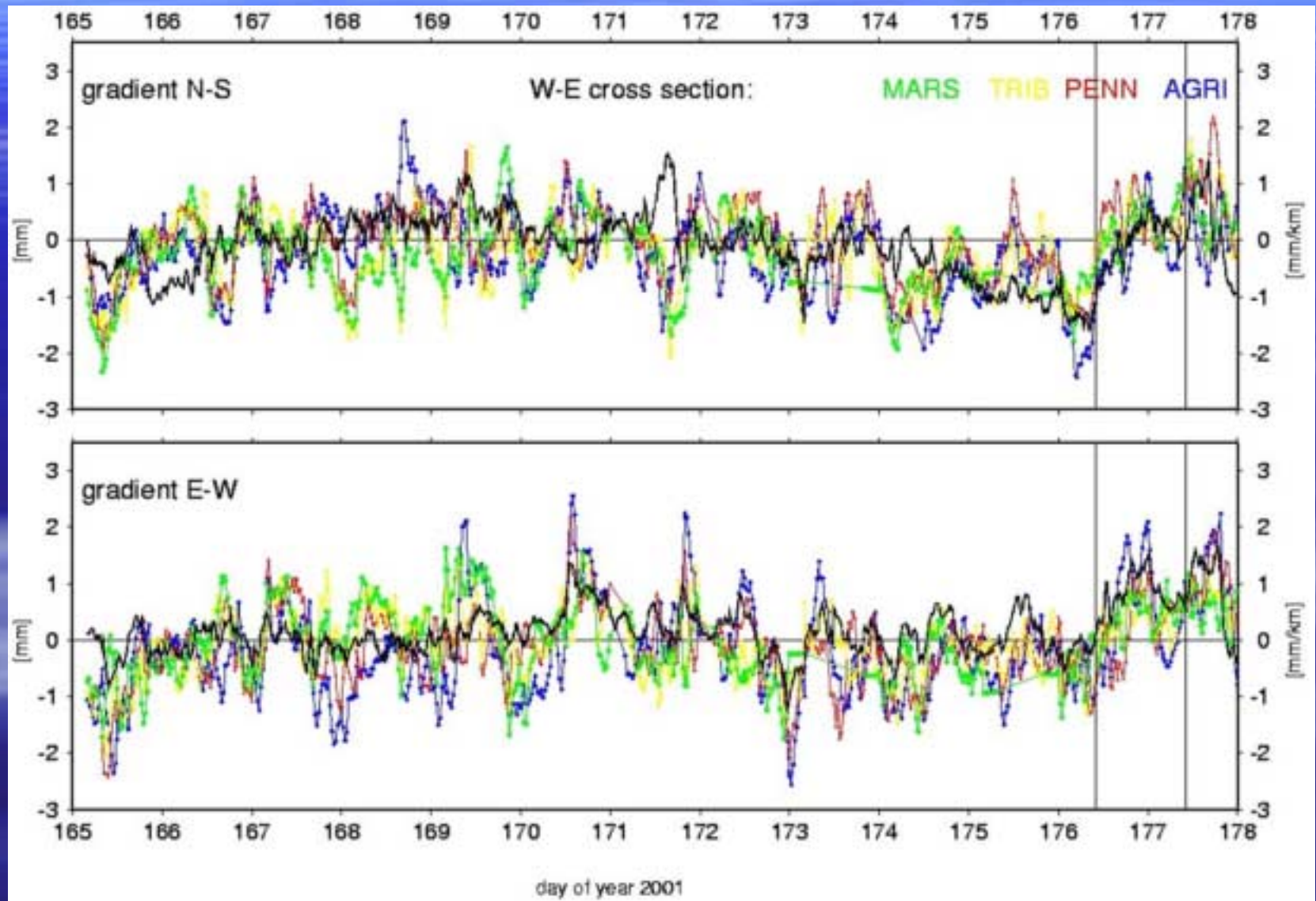
# Gradients ZWD et gradients individuels à 4 sites éloignés



# Gradients ZWD et gradients individuels: coupe N-S

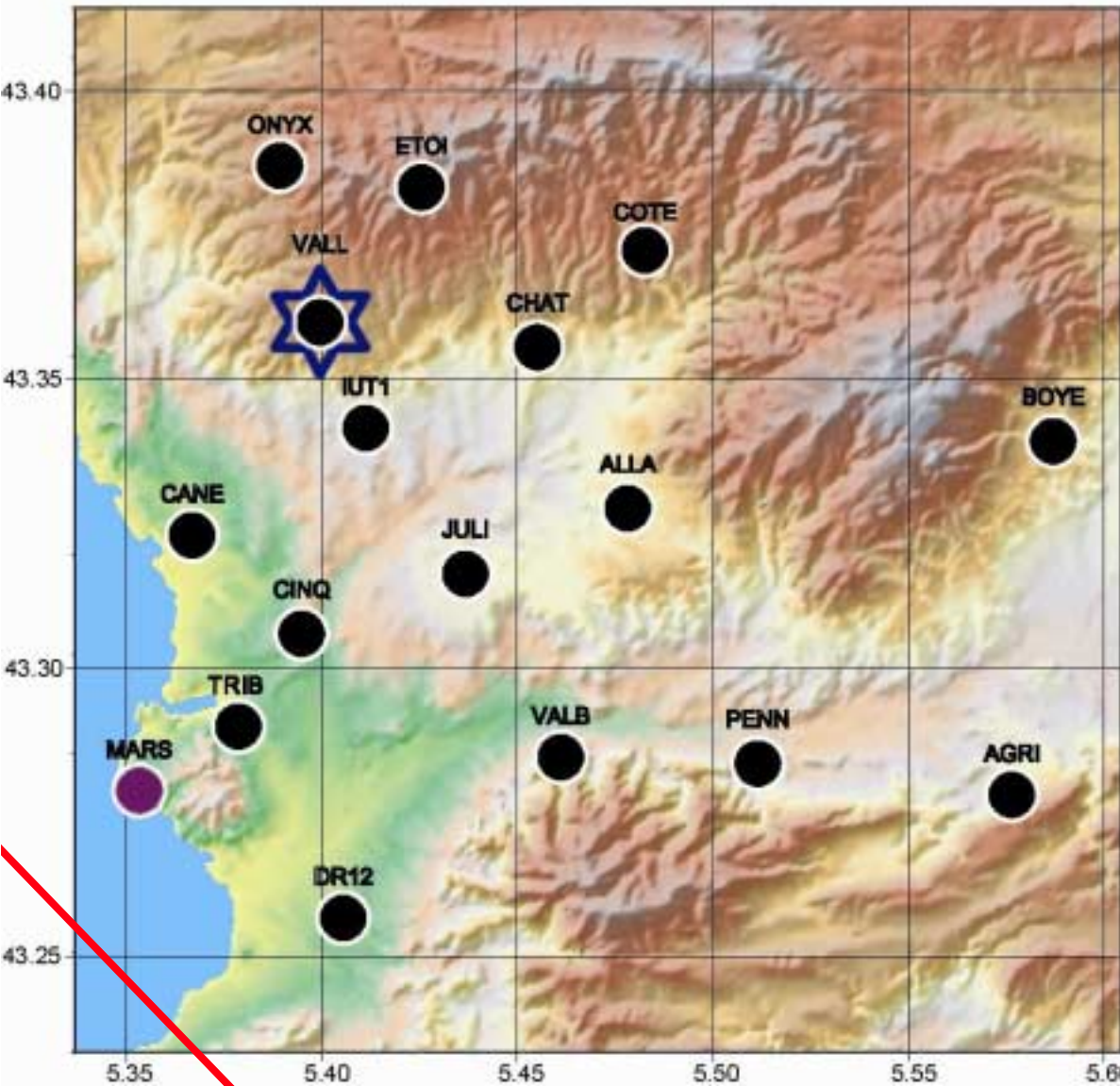


# Gradients ZWD et gradients individuels: coupe O-E

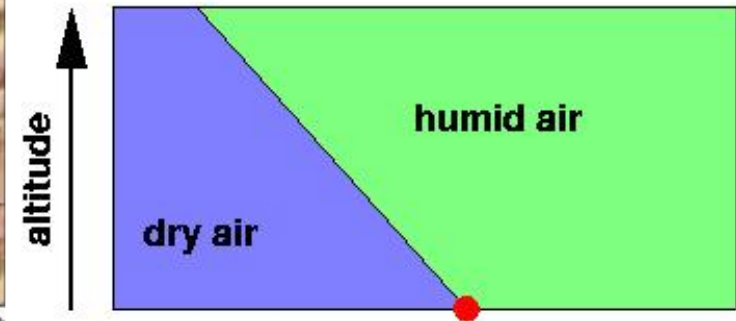




# Explication possible:



Zone frontale inclinée qui sépare l'air humide devant de l'air sec derrière, en traversant le réseau de SW en NE





Gradient GPS = gradient total  
= gradient hydrostatique + humide

- Extraction des gradients humides pour
  - Comparaison cohérente avec gradients ZWD
  - Établir des délais humides obliques comme observable pour
    - la tomographie troposphérique
    - l'assimilation dans des modèles de prévision météorologique

# Extraction des gradients humides par :

- Evaluation du gradient hydrostatique par la moyenne du gradient total GPS sur plusieurs heures de mesure (Bar-Sever et al., 1998)
- Mesure indépendante du gradient hydrostatique (baromètres)
- Calcul du gradient hydrostatique à partir des modèles atmosphériques opérationnels
- Nouvelle fonction de projection de Niell et al., 2002, ➡ gradient GPS total = gradient humide

# Exemple GPS/H2O ESCOMPTE:

1ère approximation:

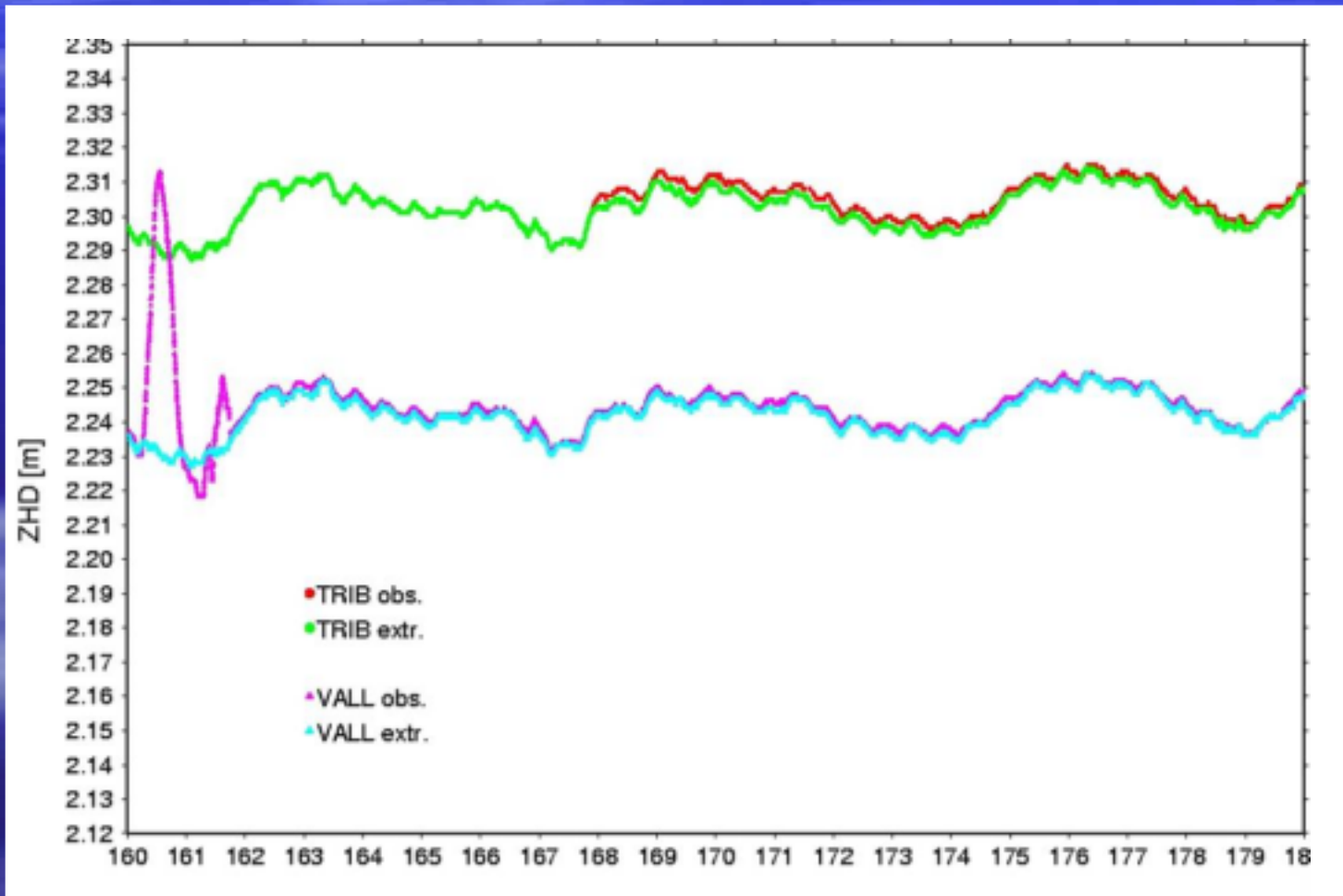
- Gradient hydrostatique dans réseau de petite taille (20 x 20 km) négligeable, unique mesure de pression à CINQ

2ème approximation:

- Estimation du gradient hydrostatique avec mesures de pression sur 3 sites (CINQ, TRIB et VALL)

# ZHD à partir de pression

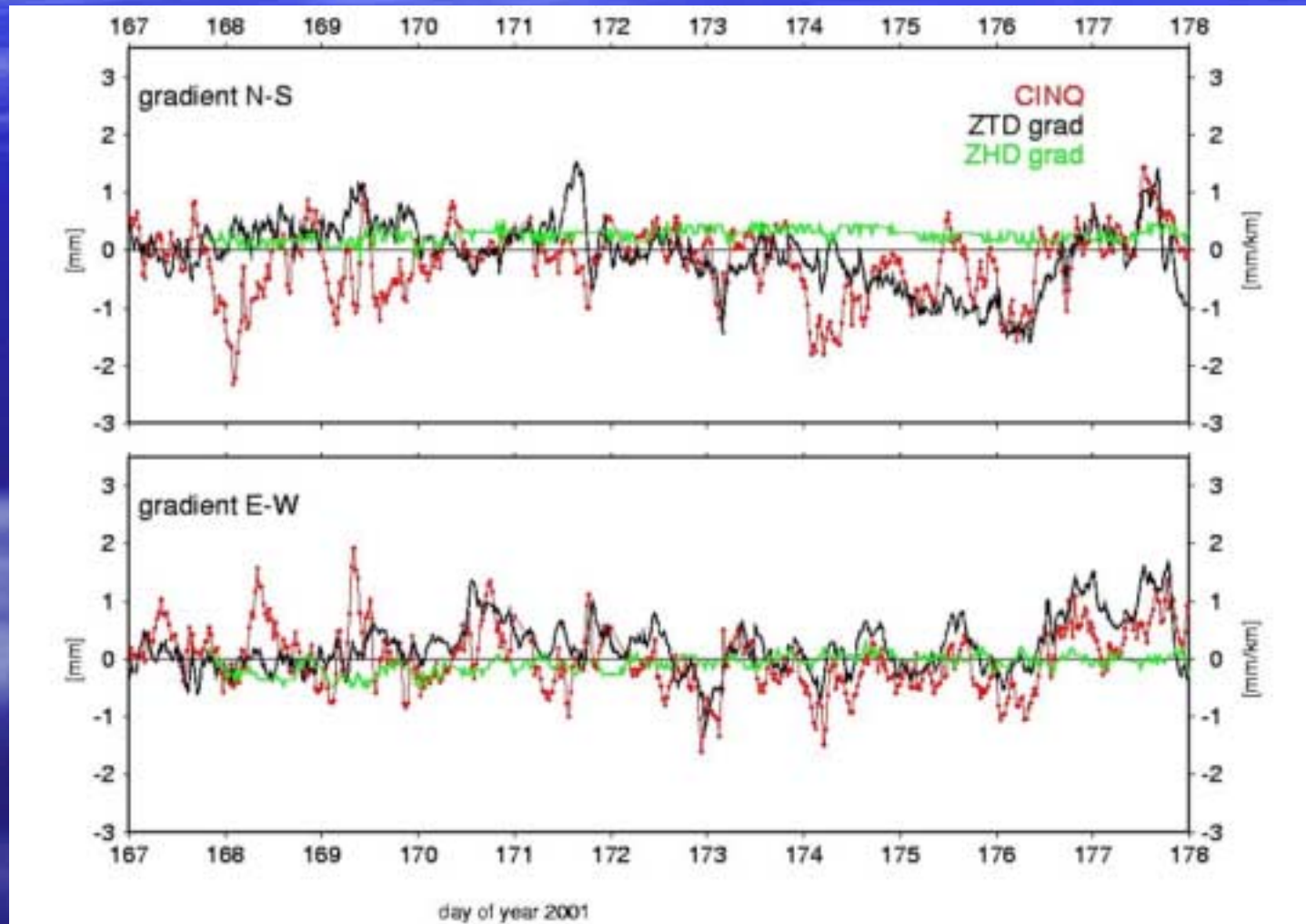
- 1) mesurée à TRIB et VALL
- 2) extrapolée hydrostatiquement à partir des mesures à CINQ





# Gradients

- 1) individuels (GPS CINO)
- 2) entre ZTD (tout le réseau GPS)
- 3) hydrostatique (mesures pression à CINO, TRIB et VALL)



# Délais obliques:

- Projection des ZWD et GRADNS/EW humides sur les lignes de vue des satellites GPS
- Ajout ou non des résidus (signal tropo ou bruit ?)



Observable pour l'inversion tomographique  
champs 3D de la vapeur d'eau

Observation pour l'assimilation dans modèles  
de prévision météo