

Les gradients troposphériques

- Définition
- Gradients et résidus
- Gradients et positionnement
- Validation des gradients
 - modélisation météo
 - mesures indépendantes
 - GPS interne:
gradients individuels \leftrightarrow 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.

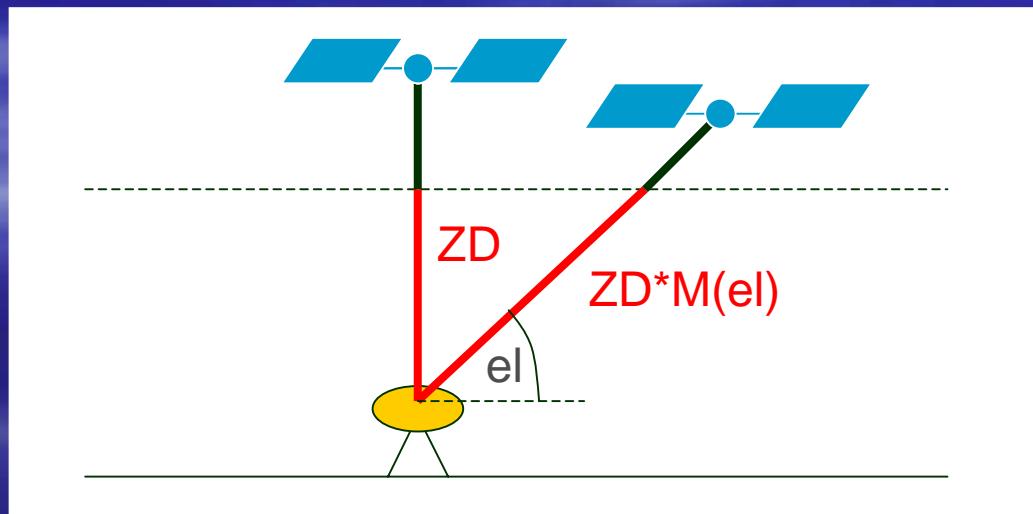
- ➡ d'abord pour améliorer la précision du positionnement
- ➡ ensuite, à partir de stations bien localisées, utilisés comme signal

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

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

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

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



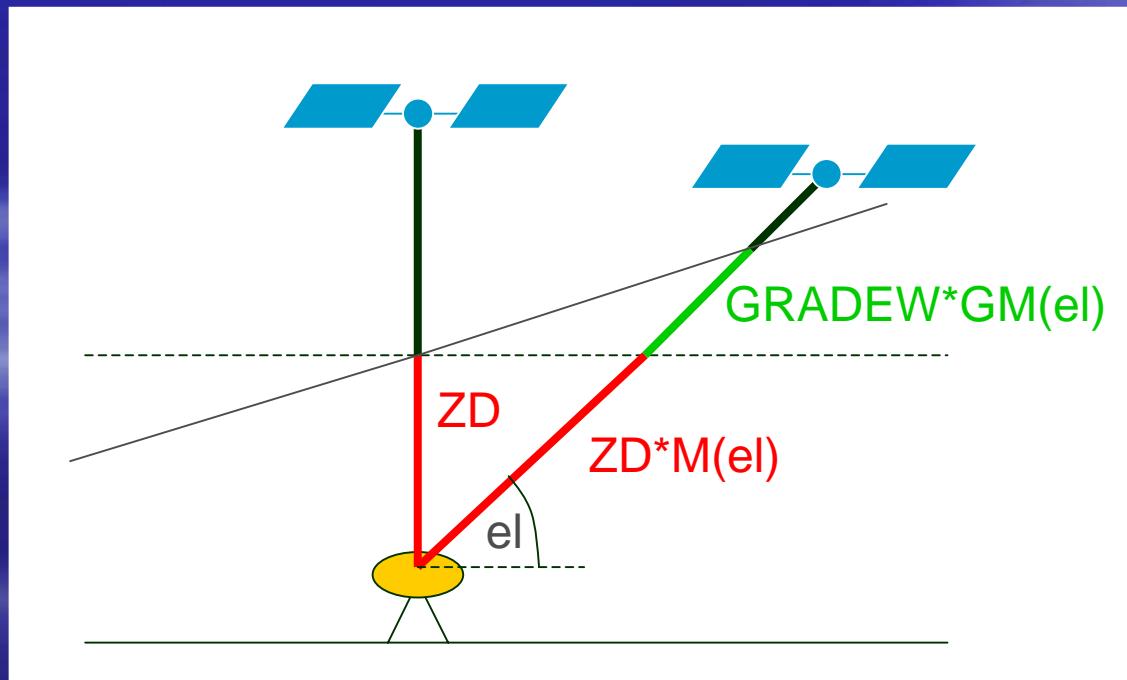
L'estimation des paramètres troposphériques GPS: délais zénithaux et gradients horizontaux

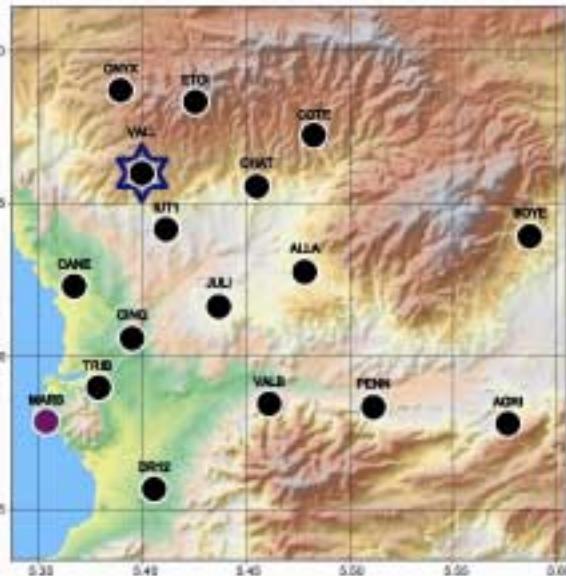
- estimation des gradients horizontaux du délai troposphérique dans l'analyse GPS:

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

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

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



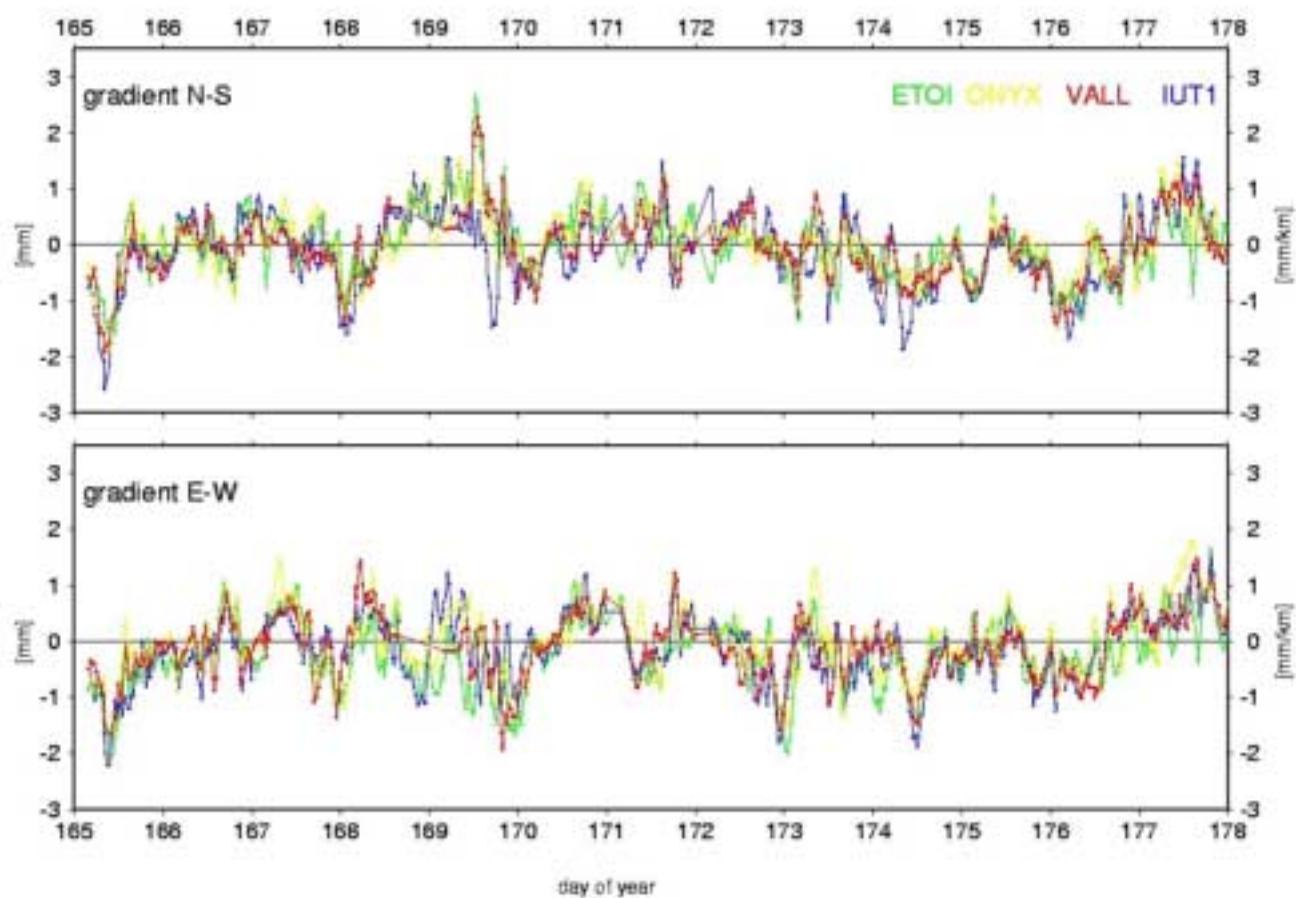


Location of GPS sites and other instruments of water vapor measurement around Marseille area in june 2001

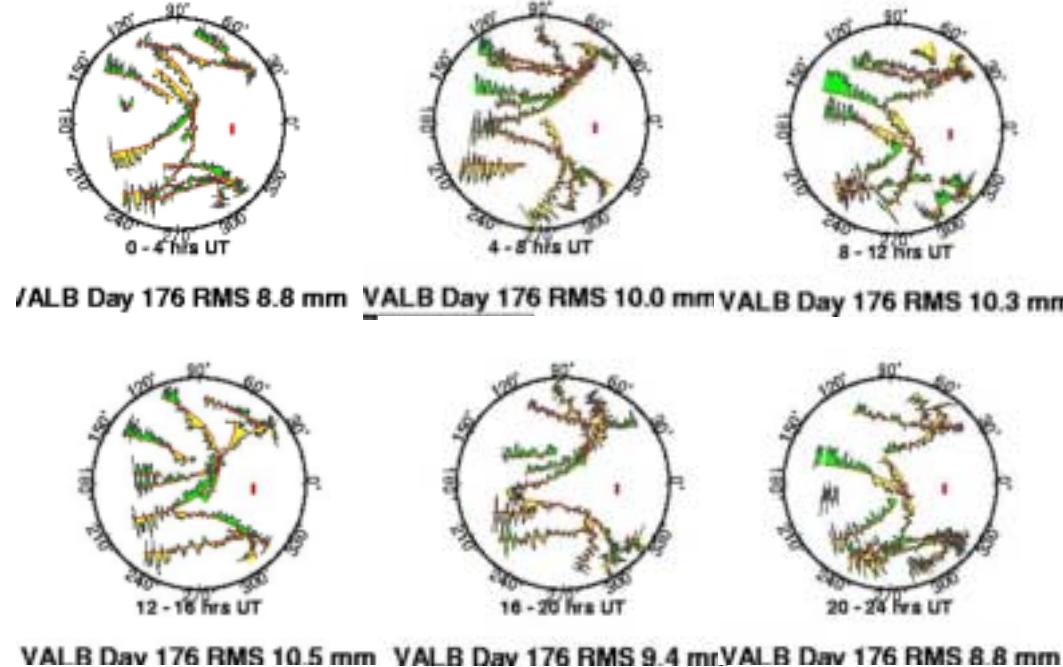
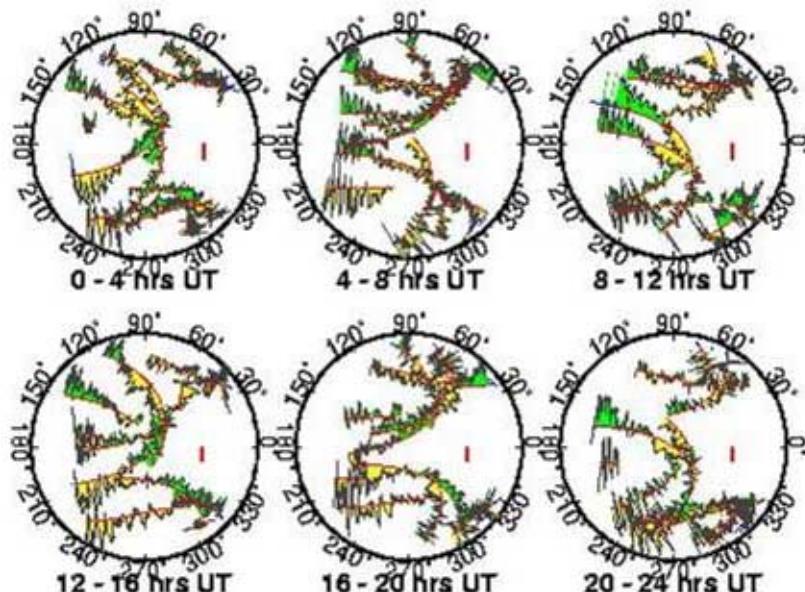
- Permanent GPS sites (Tribble)
- Temporary GPS sites (Kahleeh)
- Temporary GPS sites (Leica)
- WMT and Spectrometre site
- Human Interferometer site

0 1 2 3 4 5 km
N
0 300 400 500 600 700 800 900 1000

Observations: exemple GPS/H₂O ESCOMpte

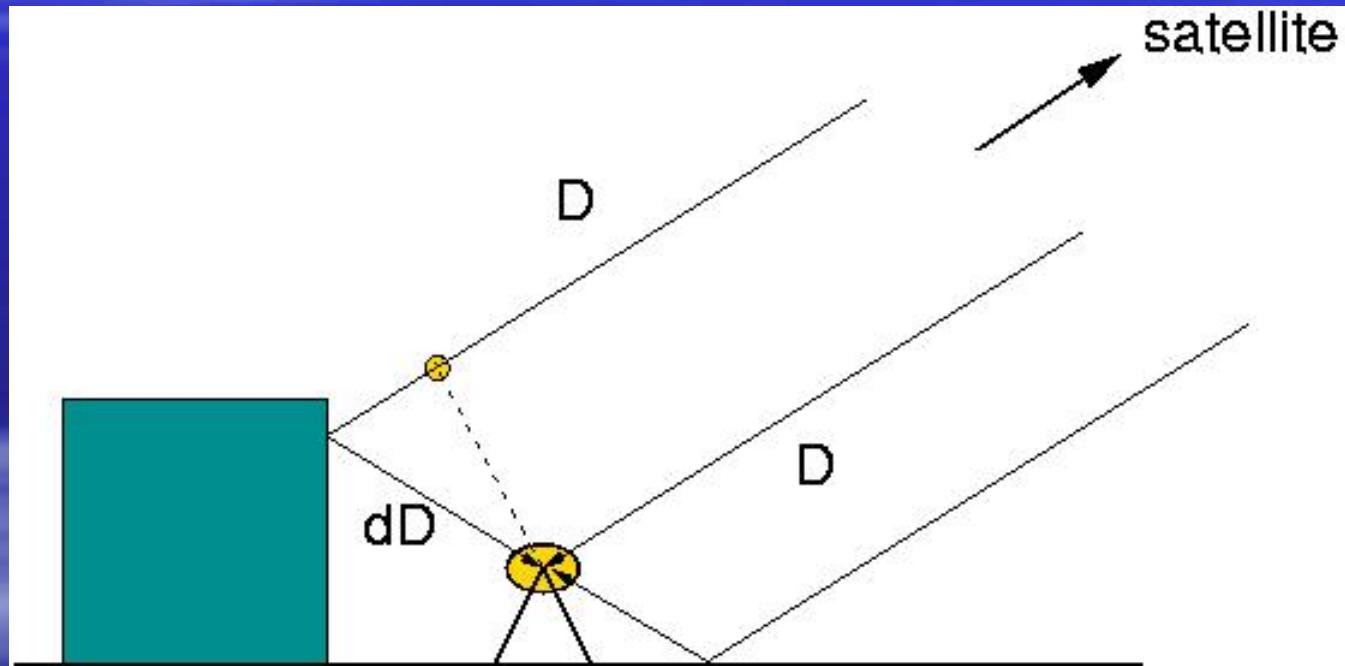


Résidus observation – modèle sans gradients avec gradients

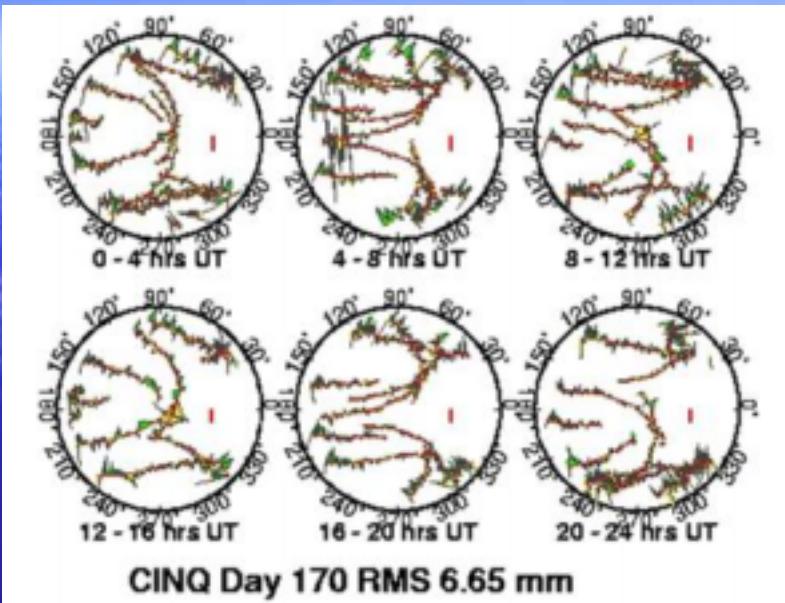


Gradients \leftrightarrow multi-trajets !

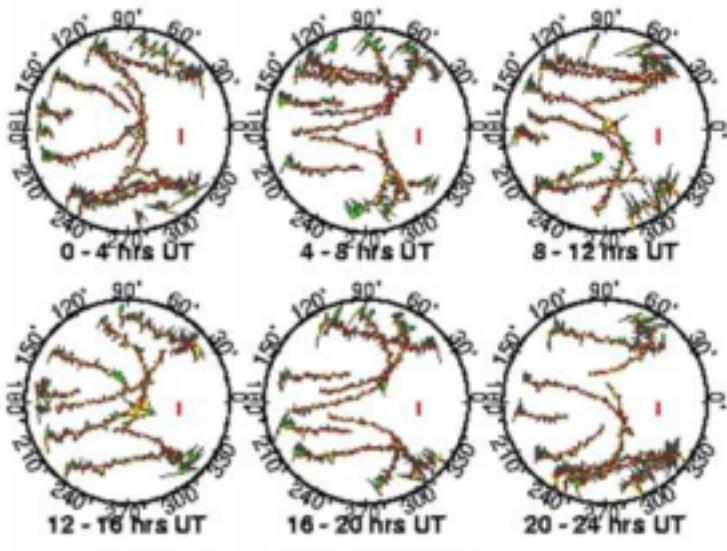
Attention: corrélation !



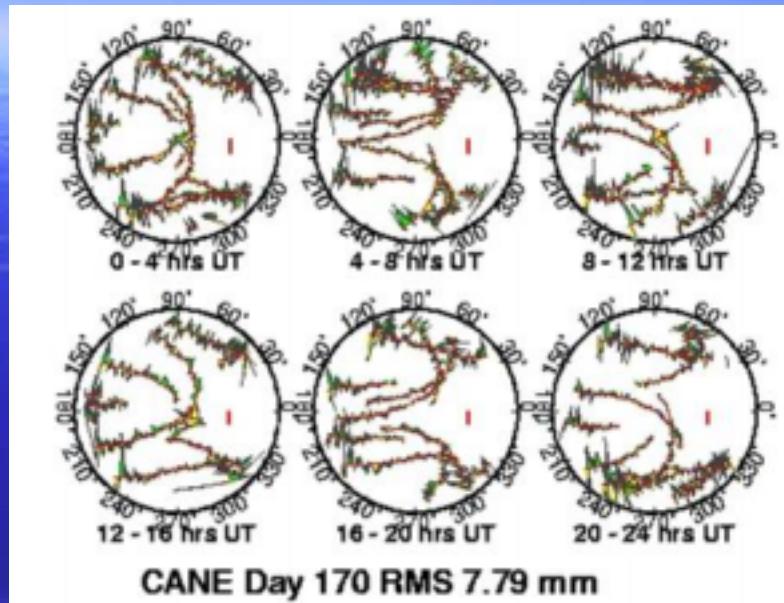
Multi-trajets : SNR



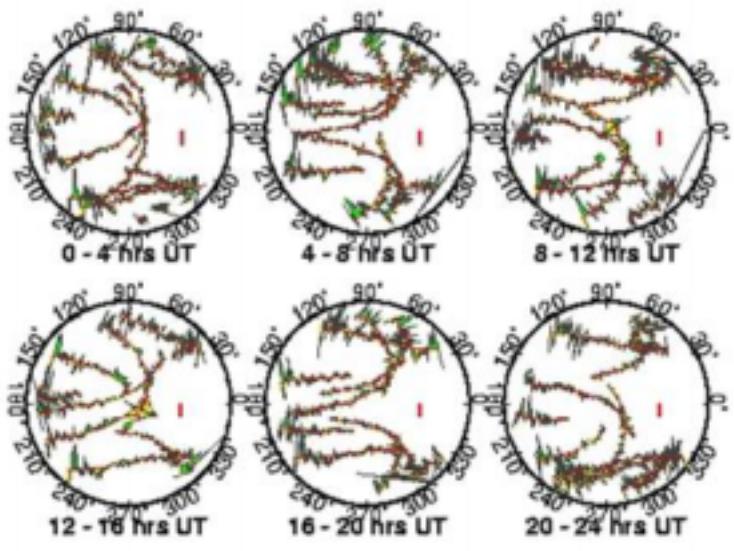
CINQ Day 170 RMS 6.65 mm



CINQ Day 171 RMS 6.08 mm

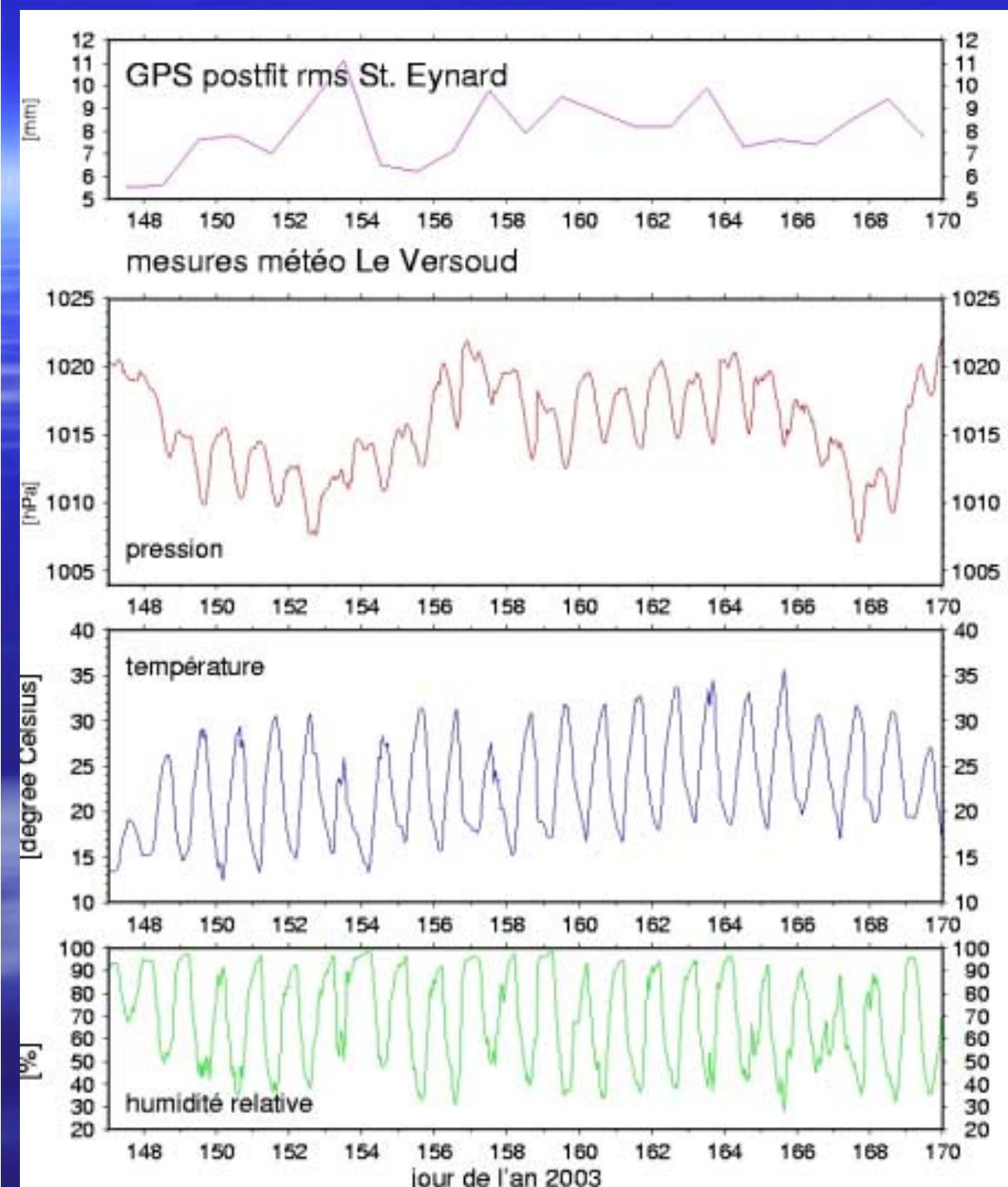


CANE Day 170 RMS 7.79 mm

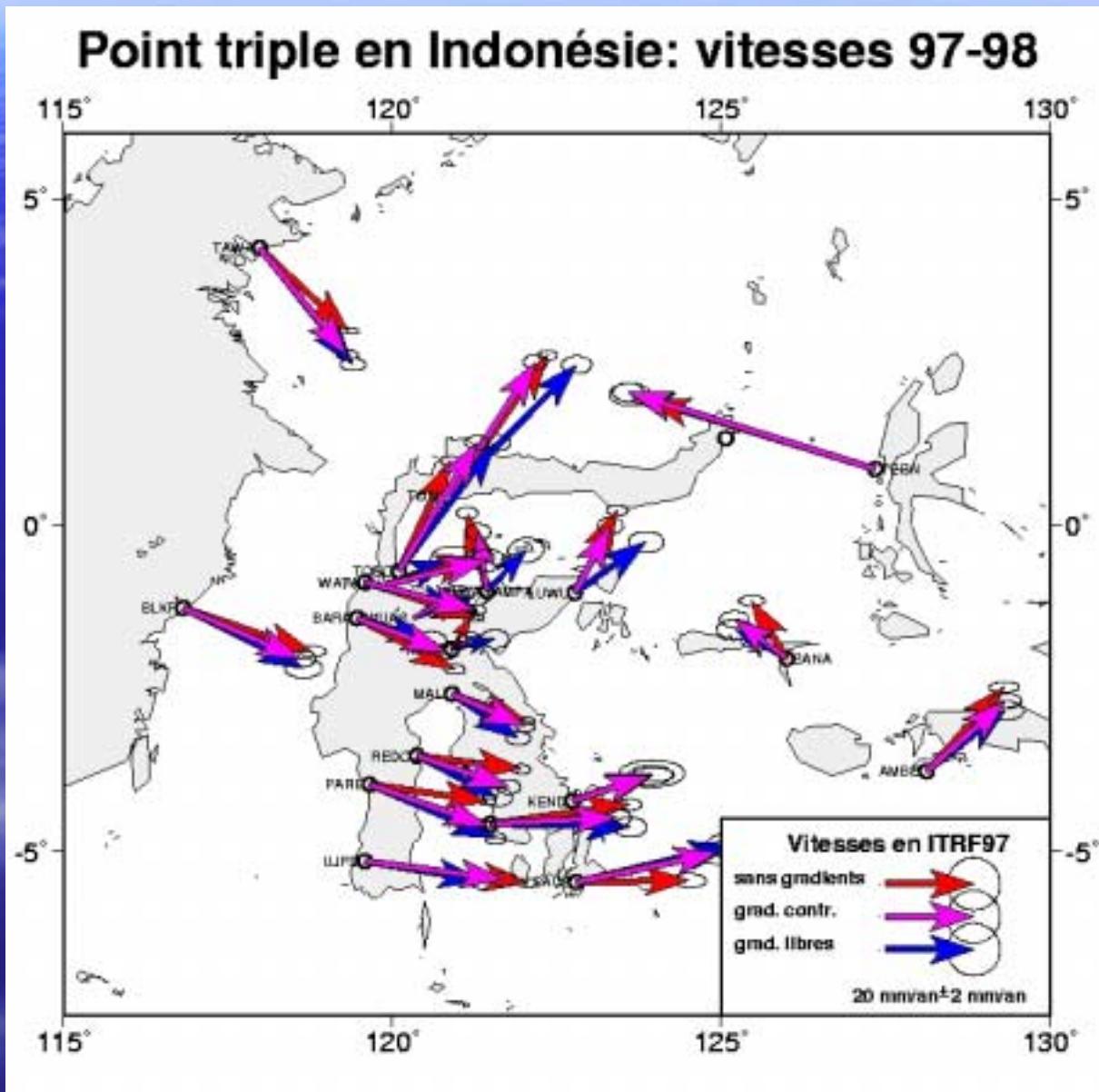


CANE Day 171 RMS 7.79 mm

Interprétation: résidus = atmosphère ?



Gradients et positionnement



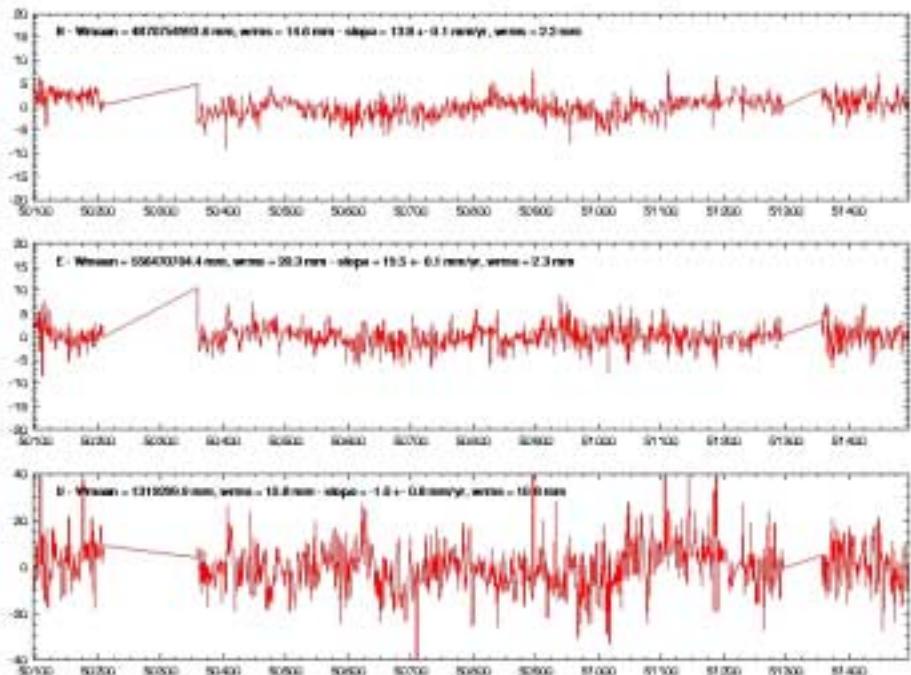
Gradients et positionnement

Avec 1 gradient / 24 h

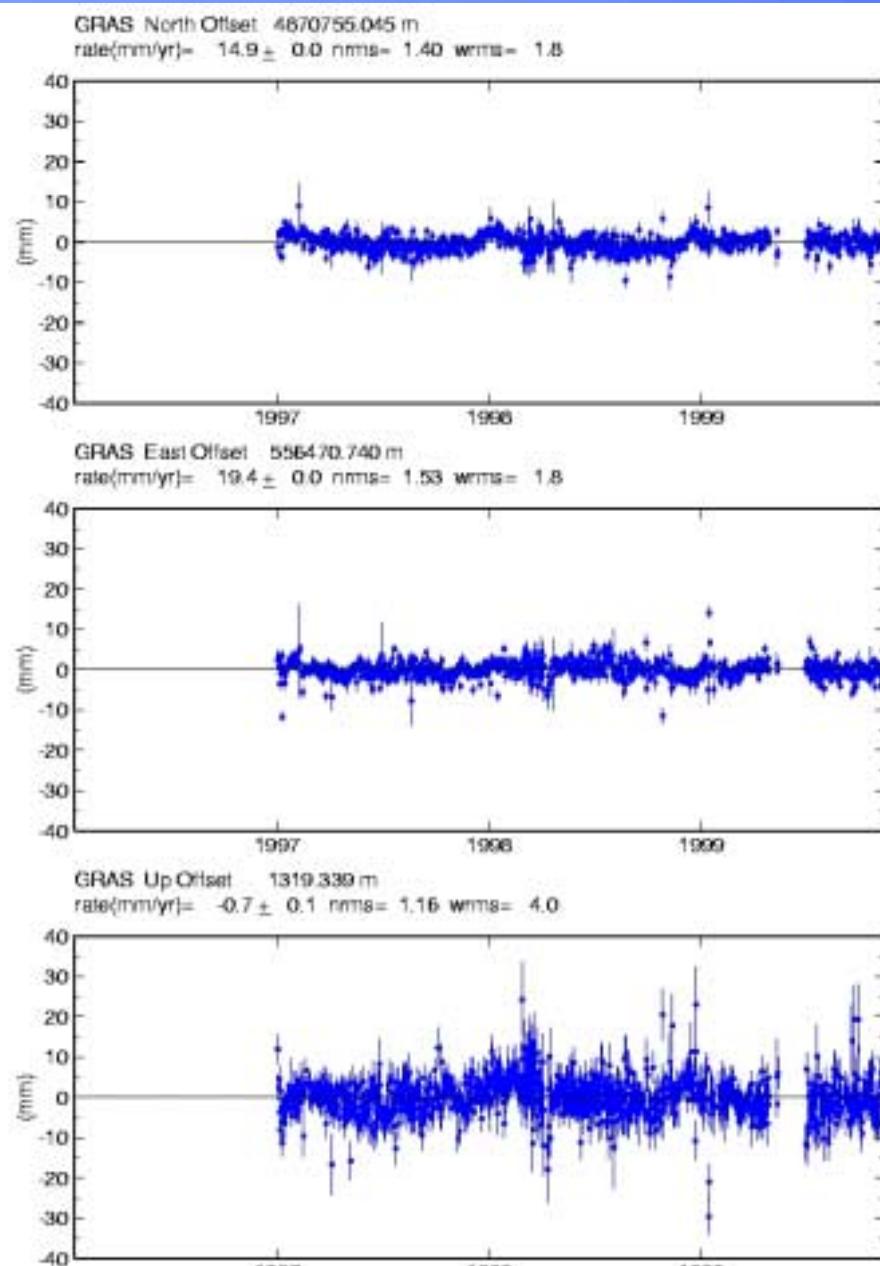
Sans gradients

GRAS_GPS

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



day number [16-1996 to 317-1999]



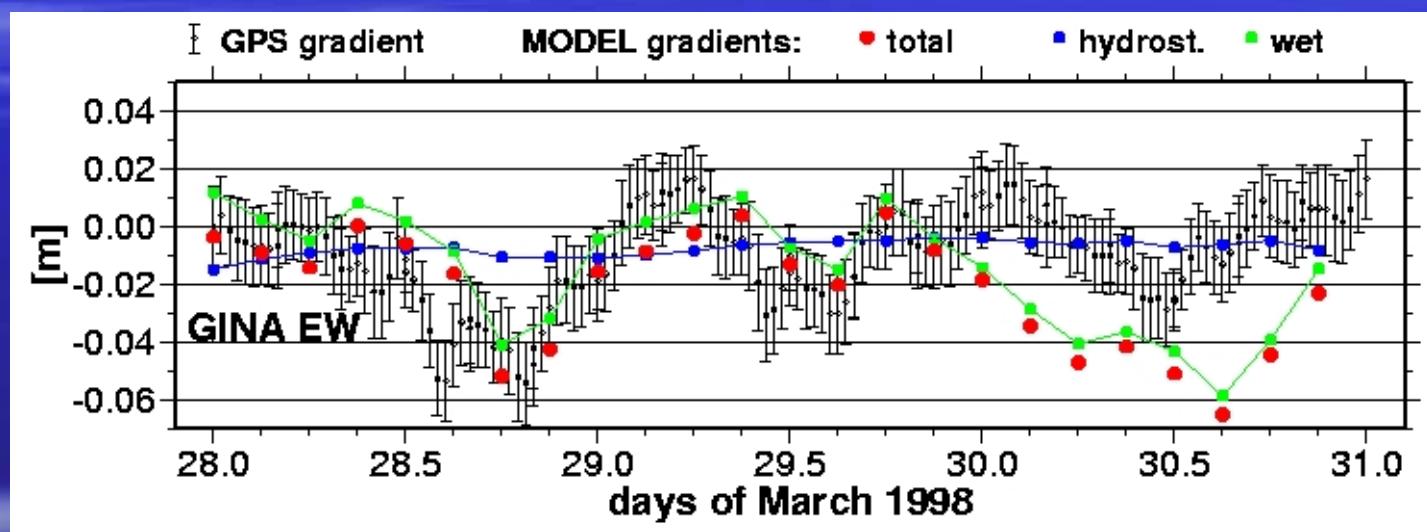
Validation des gradients horizontaux troposphériques

- 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 ($P_{\text{sol}} - 100 \text{ mbar}$), 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



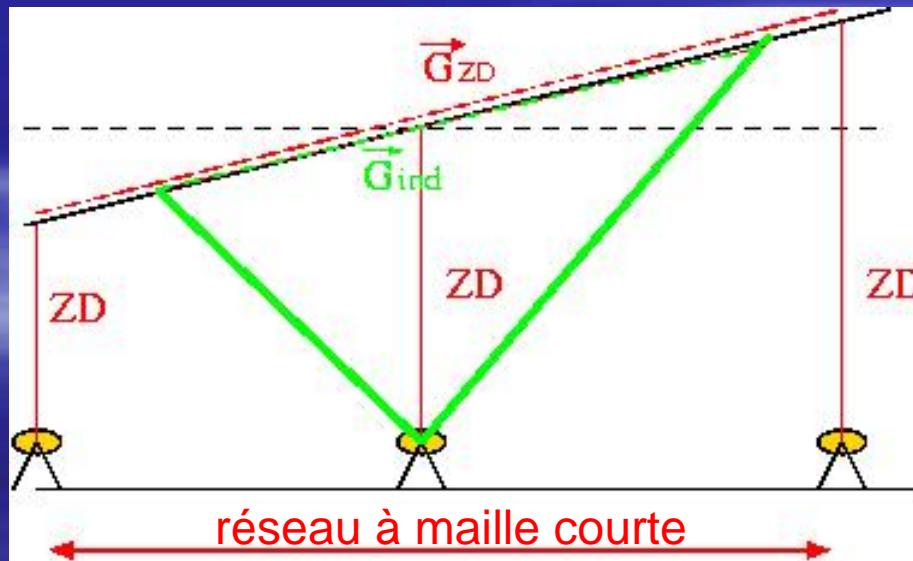
Perspectives validation gradients par modèle météo:

- 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}) \leftrightarrow gradient entre ZTDs (G_{ZD})
GRADNS/EW évalués à une station GPS \leftrightarrow 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})

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

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

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

\vec{p} : vecteur de déplacement horizontal

Gradient ZTD:

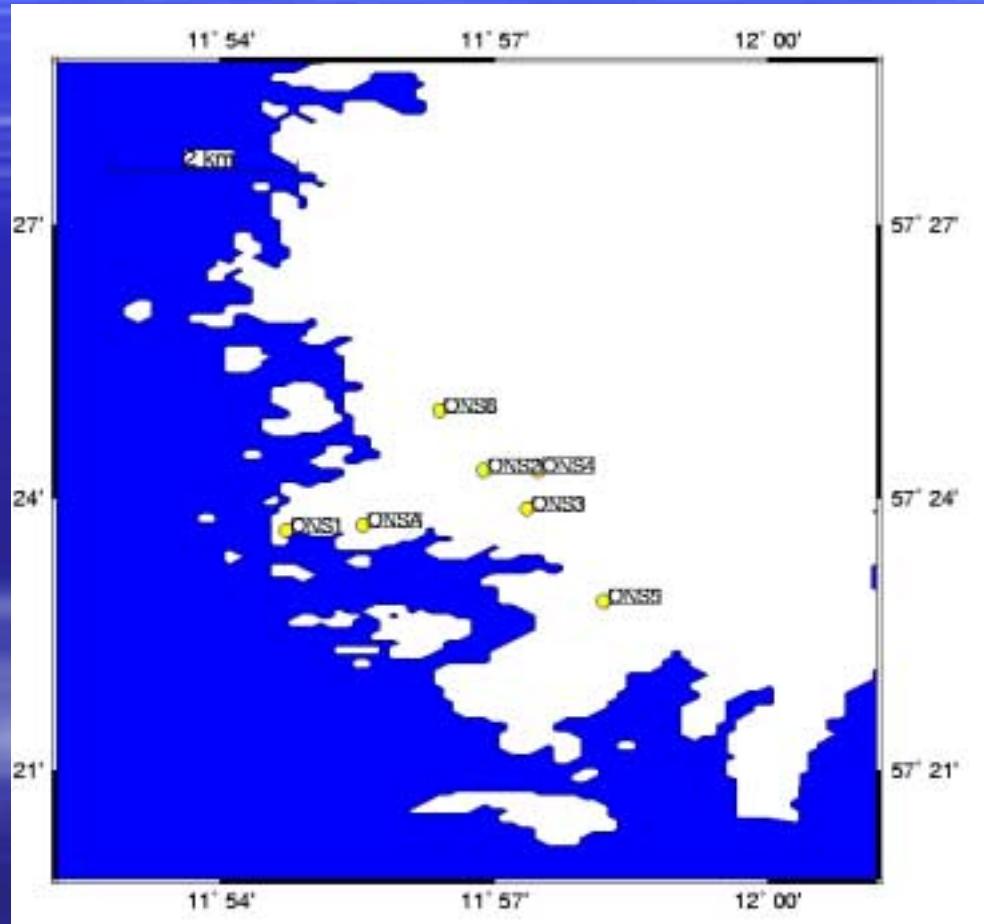
$$\vec{G}_{ZD} = 10^{-6} \int_0^{\infty} \vec{\eta}(z) dz$$

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 intérieure: REGINA (Elosegui et al., 1999)

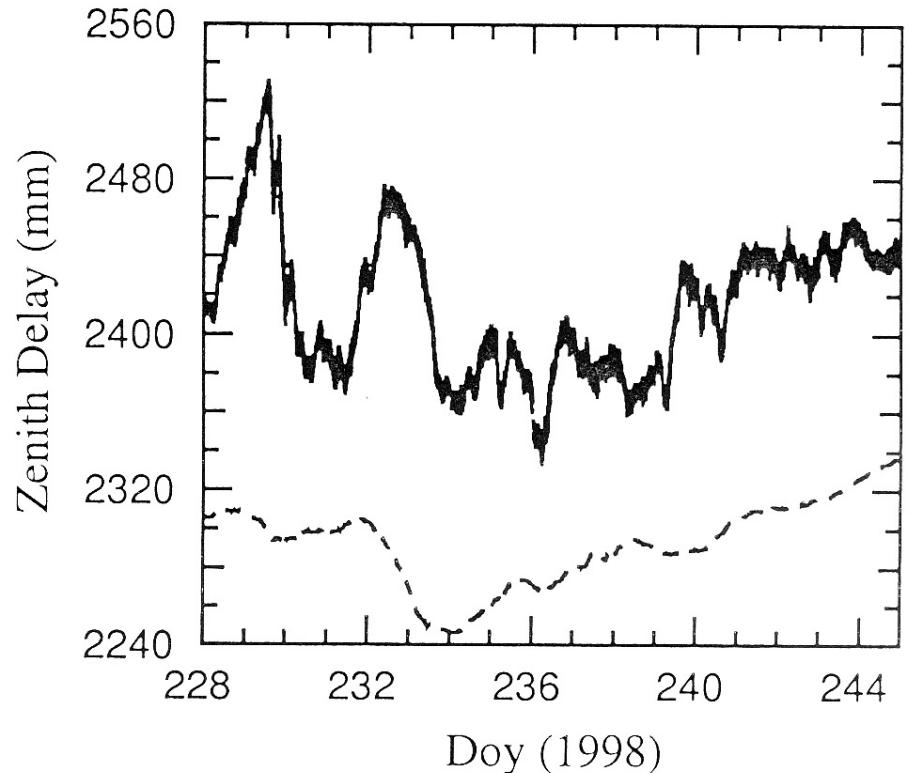


Comparaison des performances GIPSY (Elosegui et al.) – GAMIT (cette étude)

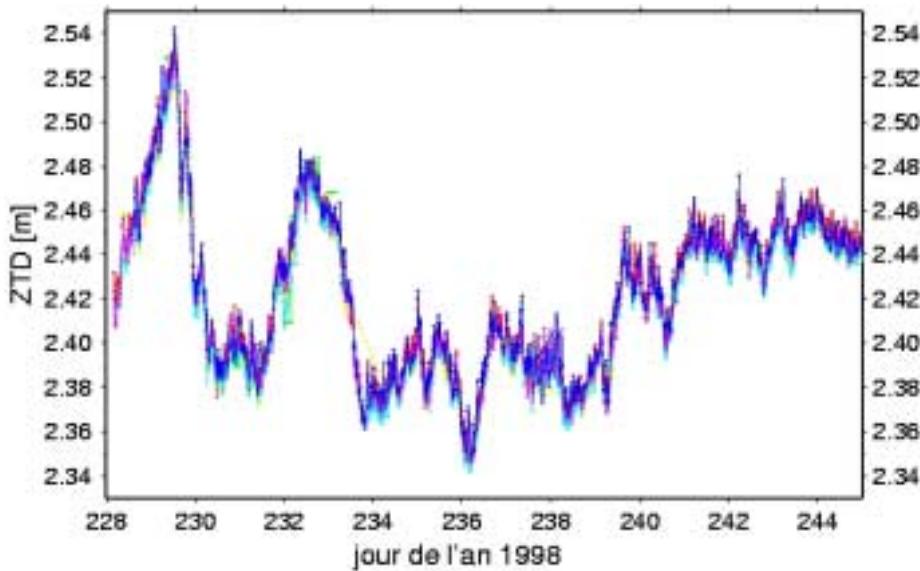
ZTDs

GIPSY

GAMIT



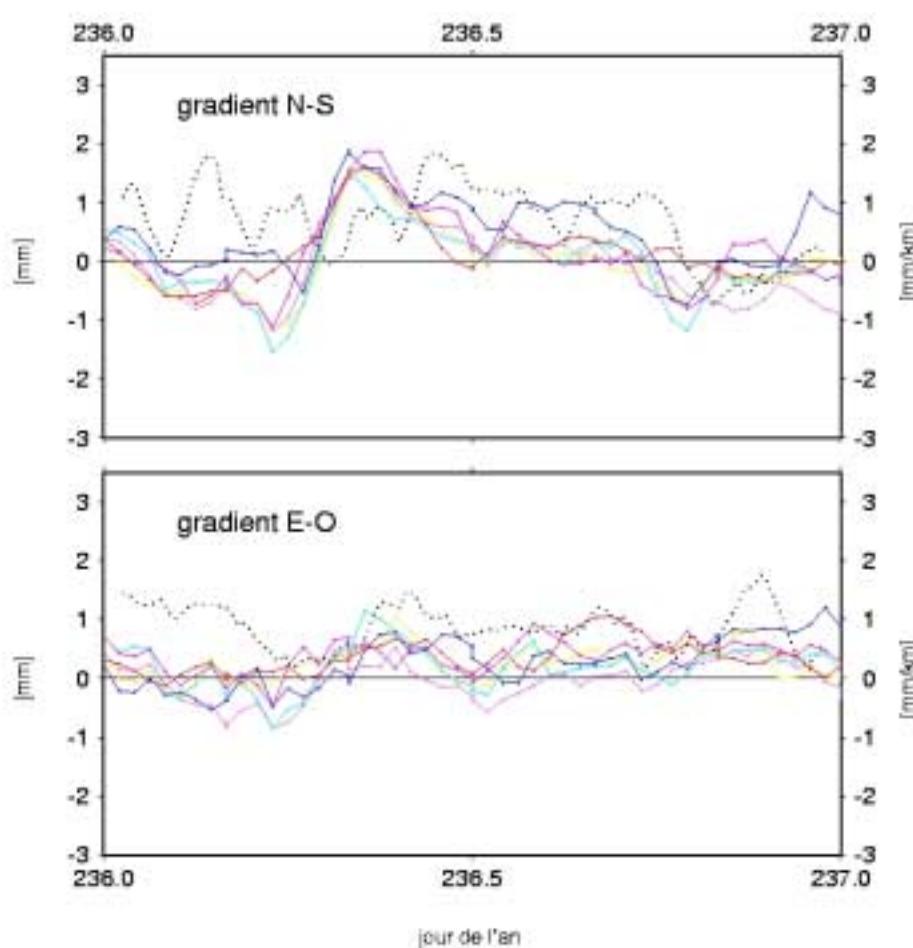
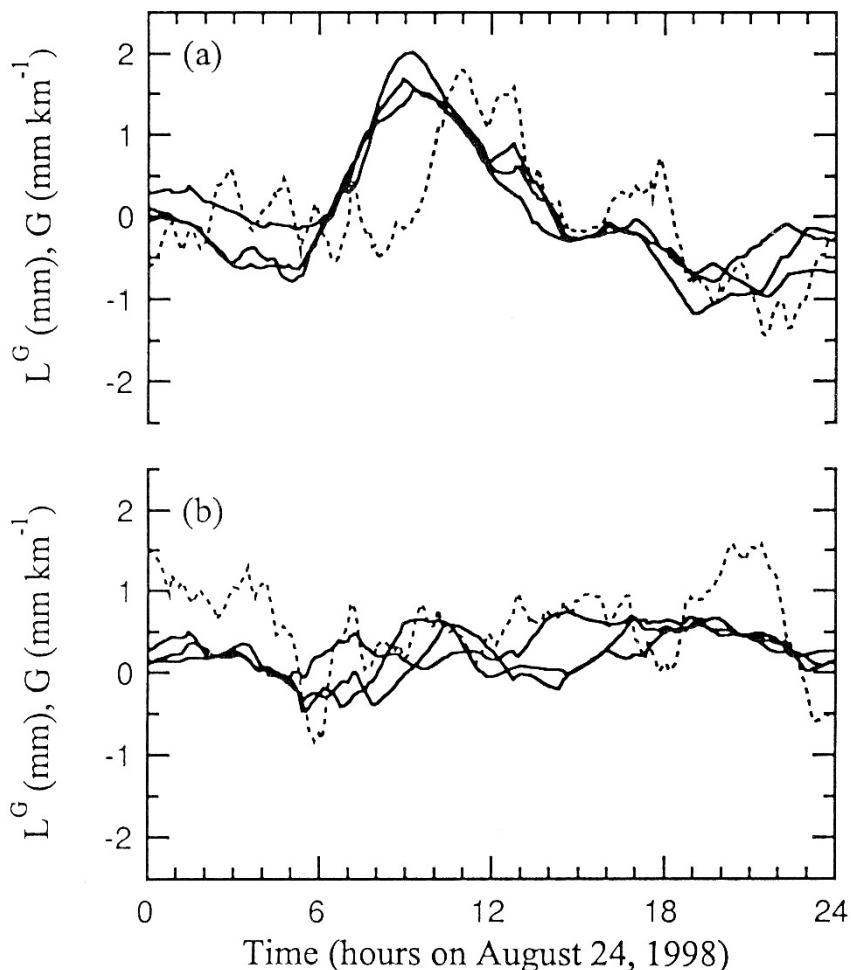
Elosegui et al., 1999



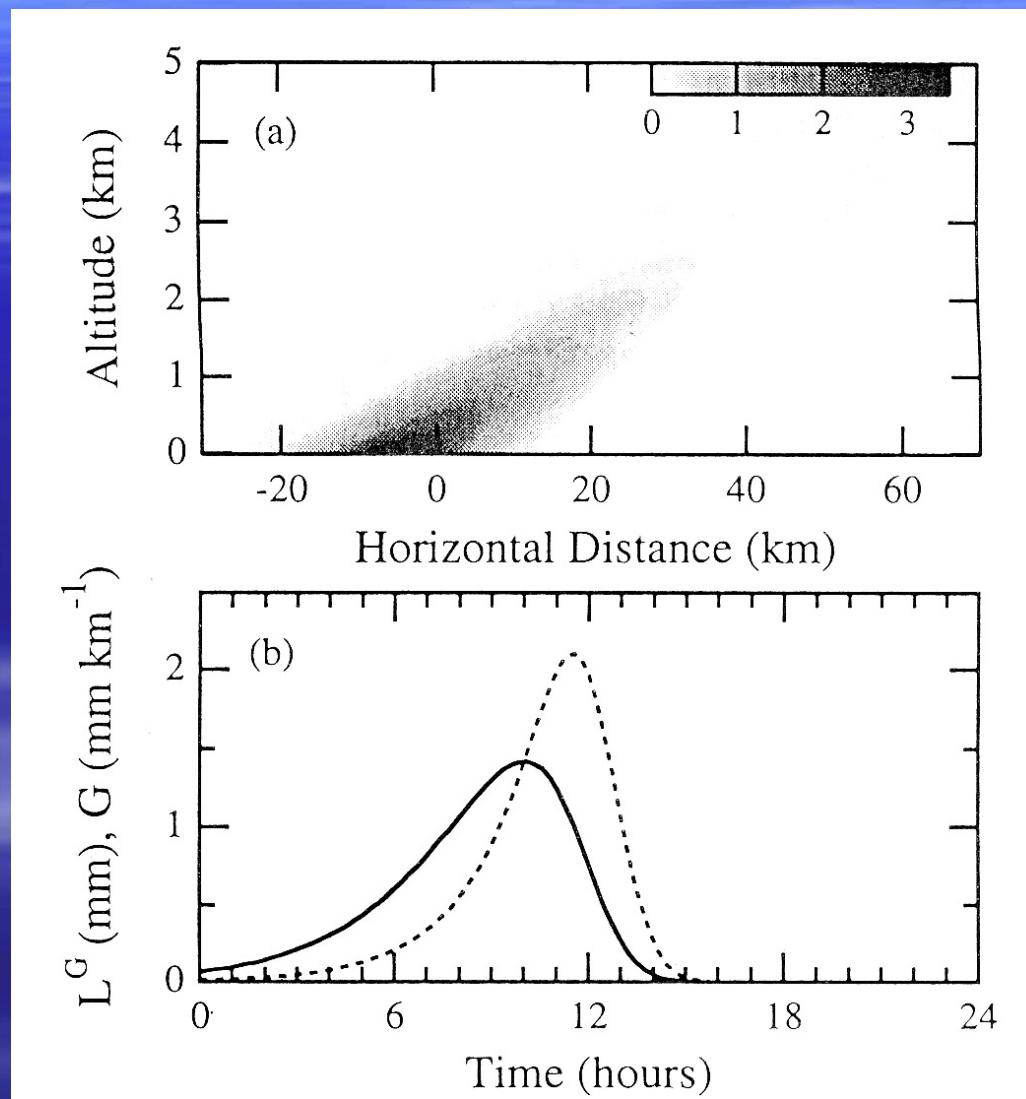
cette étude

Gradients individuels / entre ZTDs

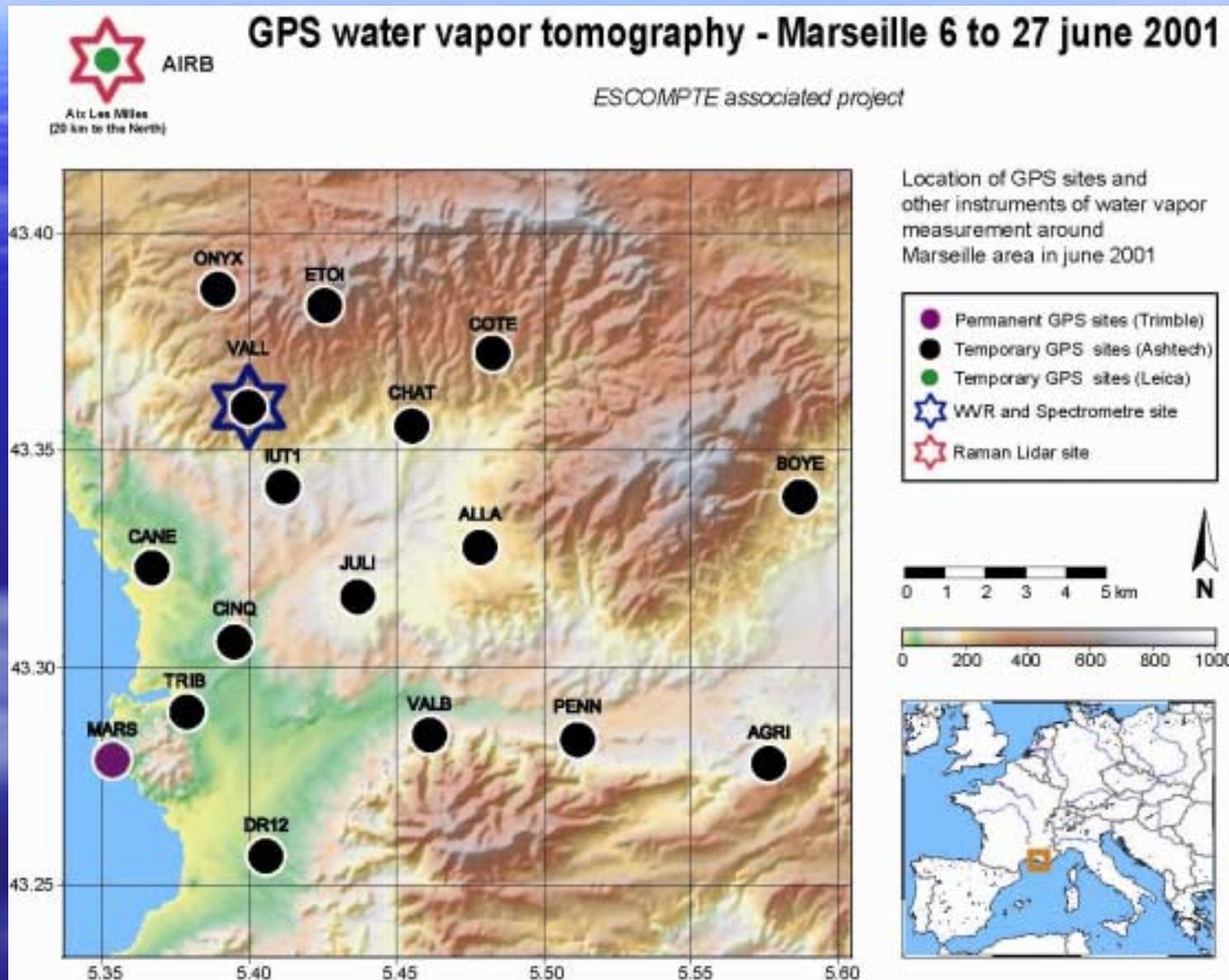
GIPSY - GAMIT



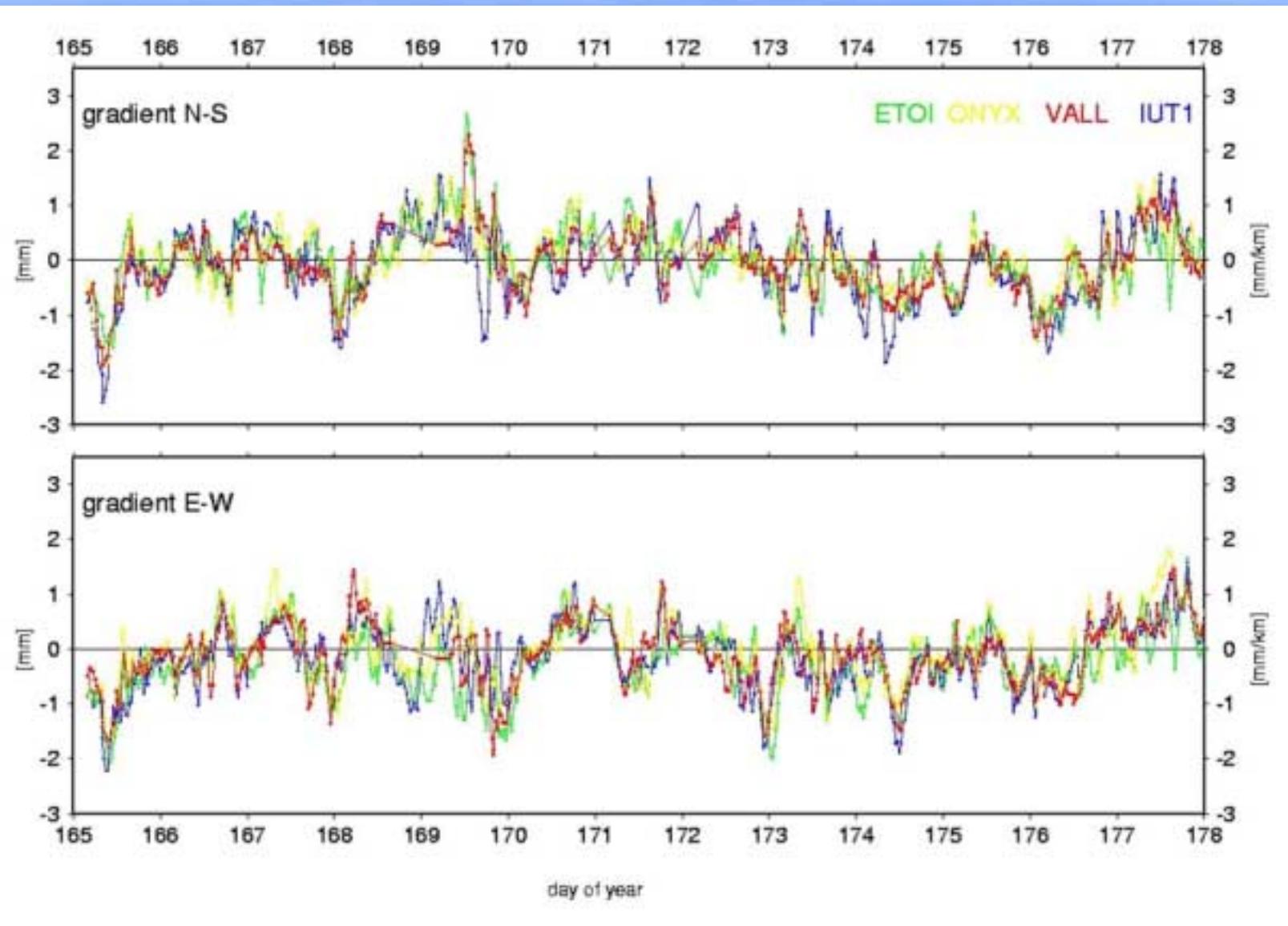
Simulation: passage N-S d'un front d'air chaud



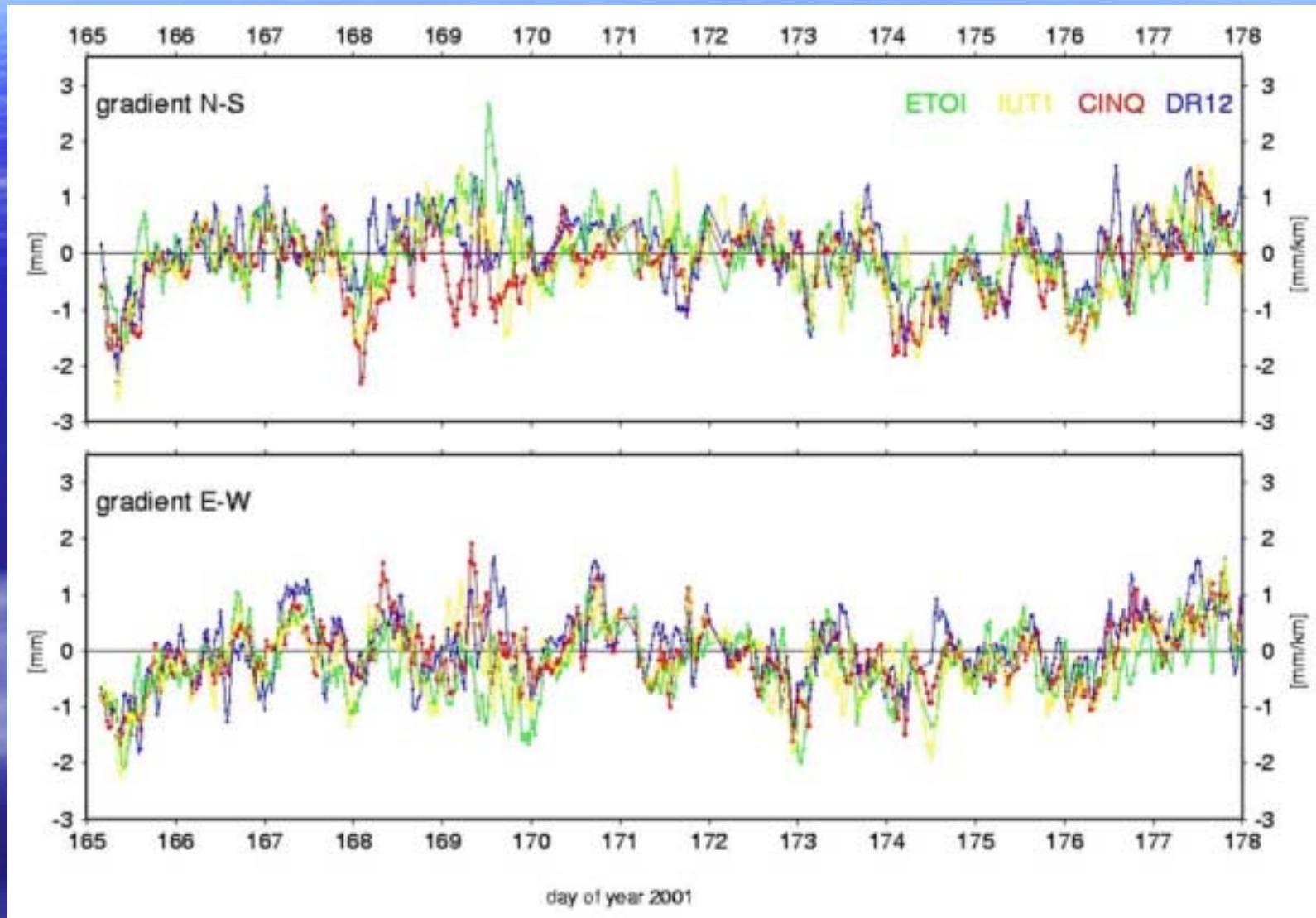
Application: ESCOMPTE GPS/H₂O



Gradients horizontaux sites proches: bien corrélés



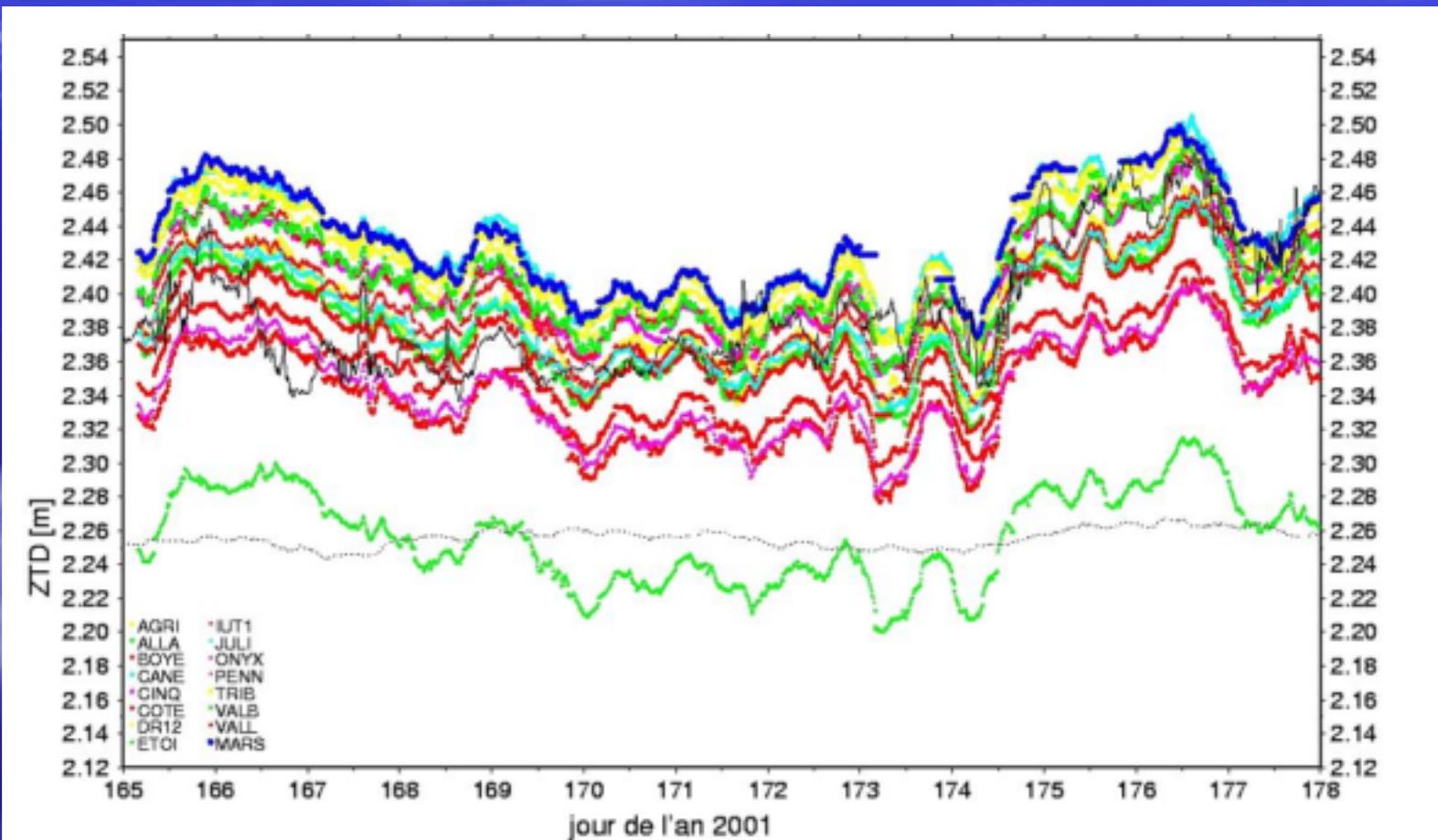
Gradients horizontaux sites éloignés: moins corrélés



Gradient entre ZTDs: difficulté: relief !

ZTD corrélé avec l'altitude de la station

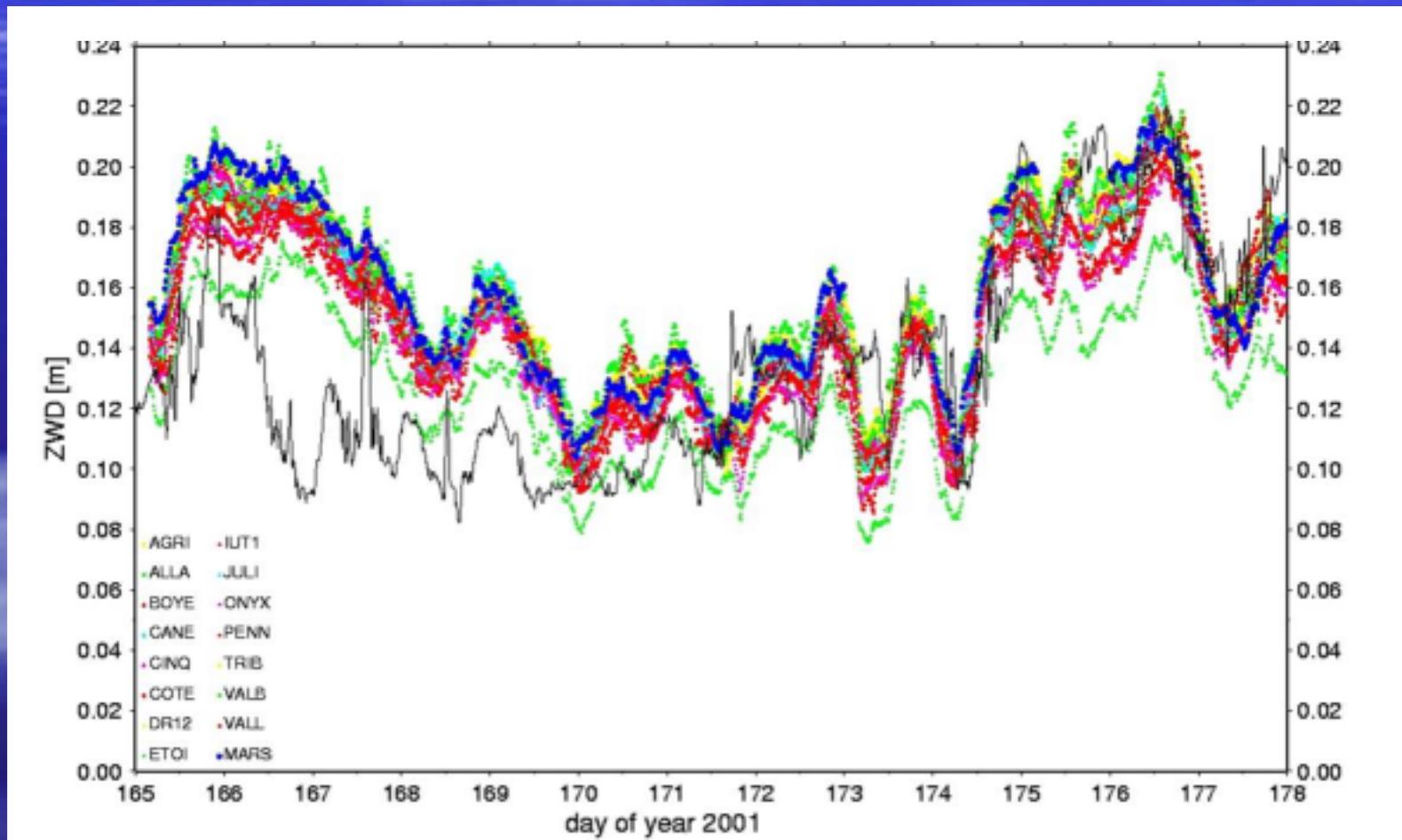
→ enlever partie hydrostatique (ZHD) et utiliser ZWD



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:

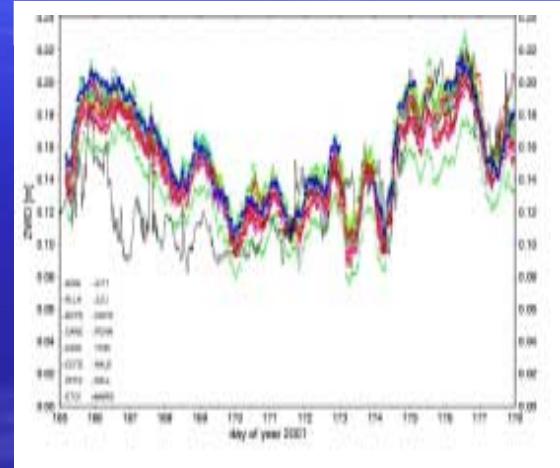
$$N(z) = N_s e^{-z/H}$$

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



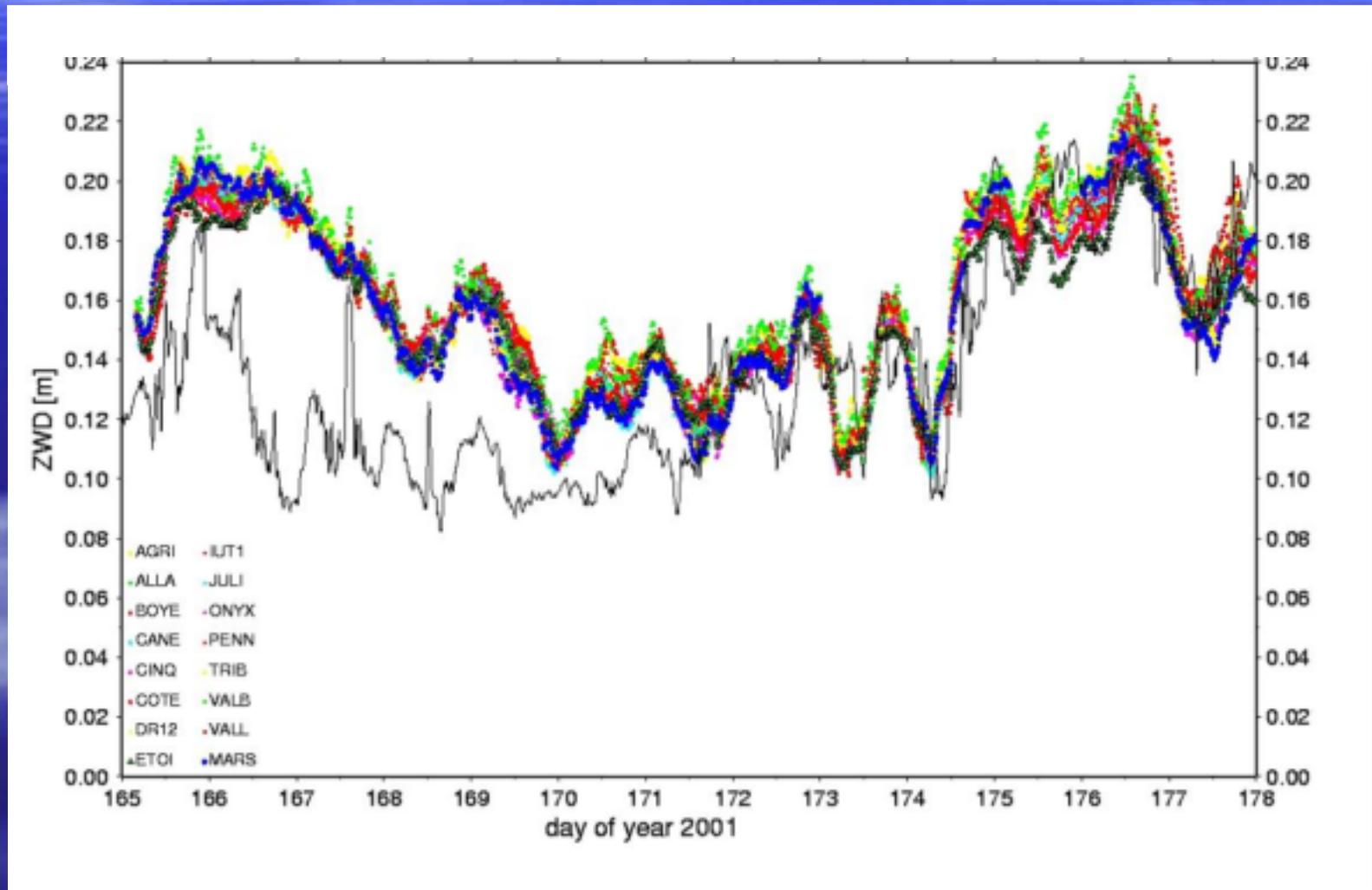
$$\text{ZWD}(z_i) - \text{ZWD}(z_{ref}) = \text{ZWD}(z_{ref}) \left[e^{-(z_i - z_{ref})/H} - 1 \right]$$

$\text{ZWD}(z_i)$: zenith wet delay à une altitude z_i

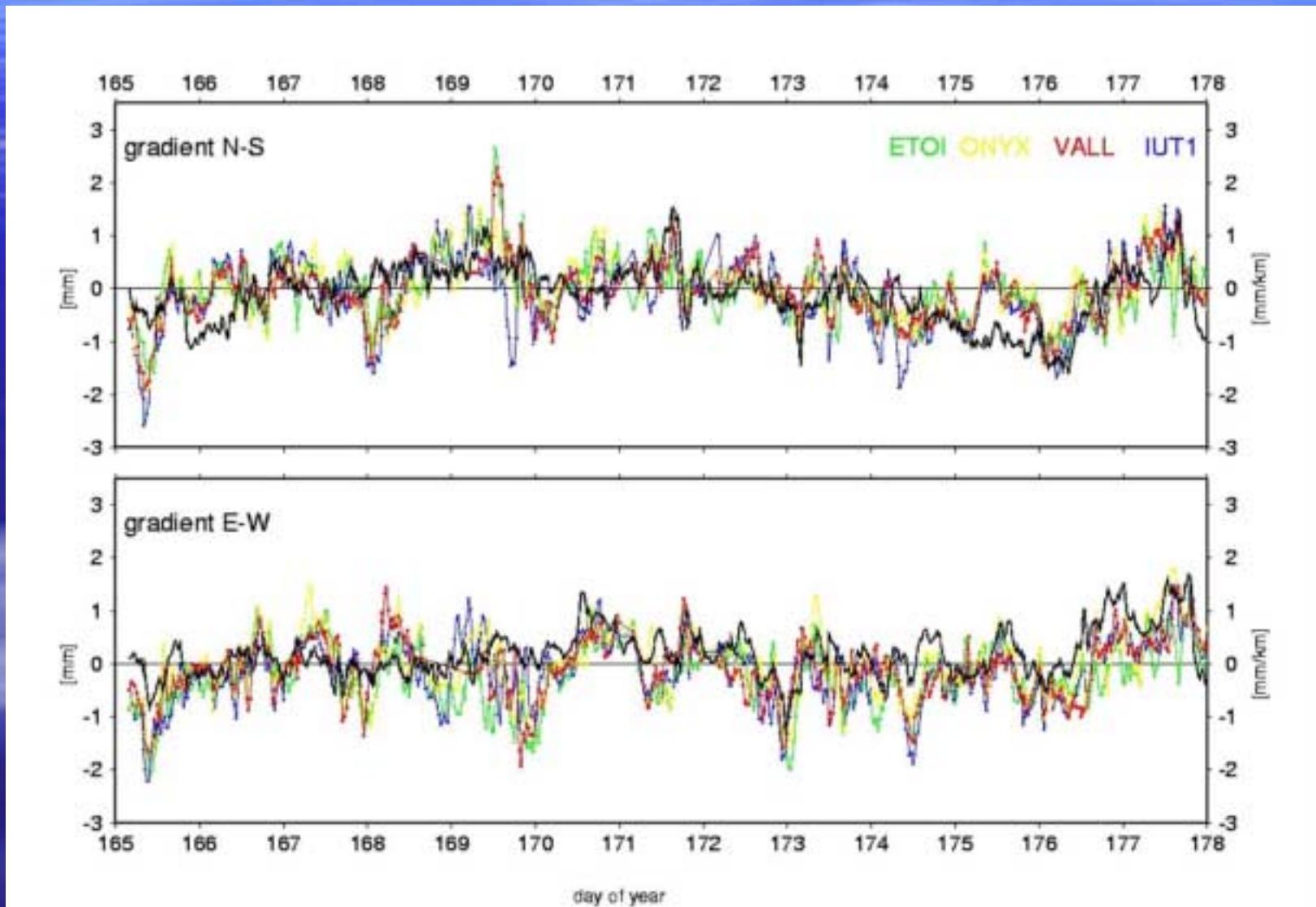
$\text{ZWD}(z_{ref})$: zenith wet delay à l'altitude de référence

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

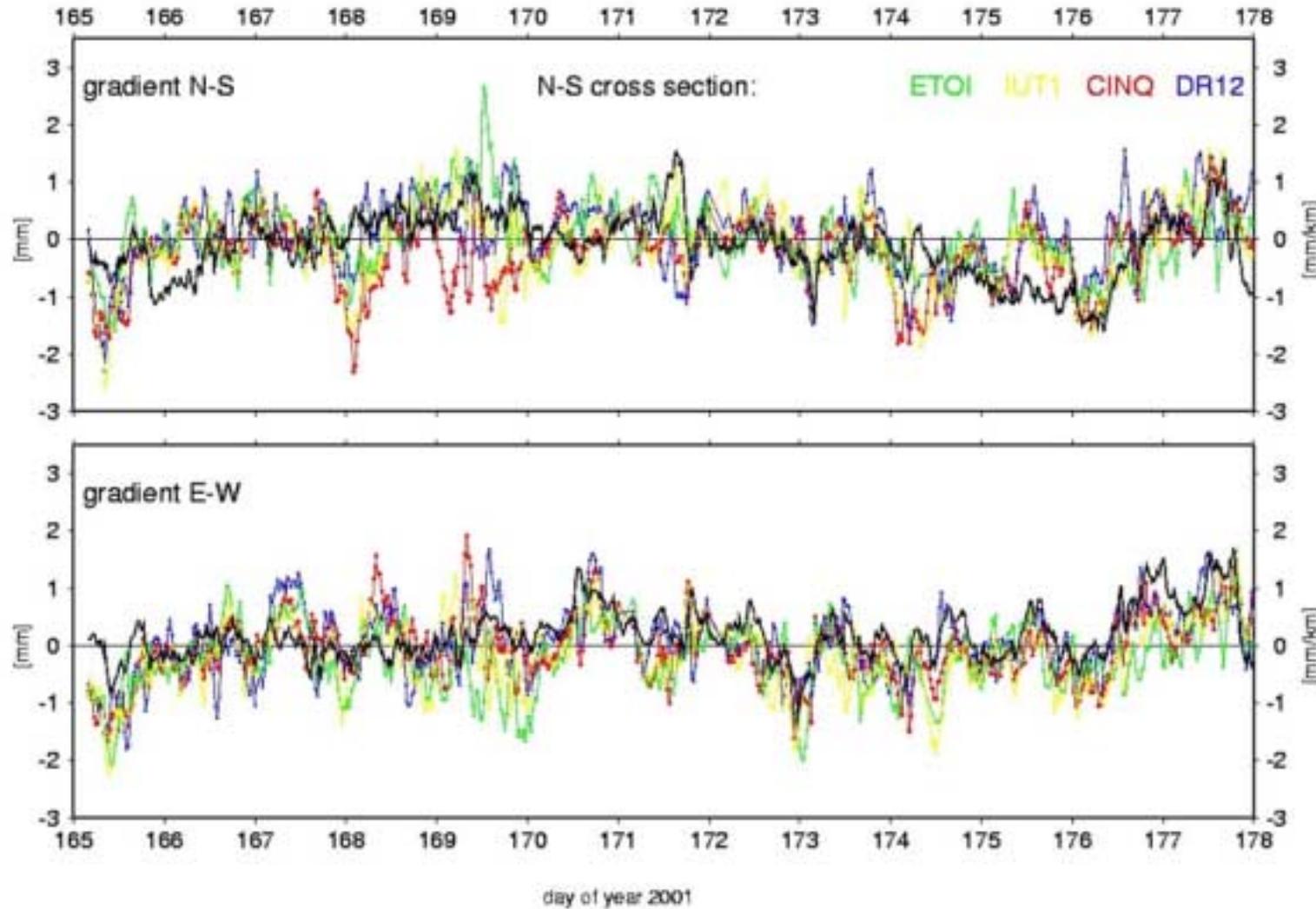
ZWD normalisé avec hauteur d'échelle de la vapeur d'eau de H=3 km



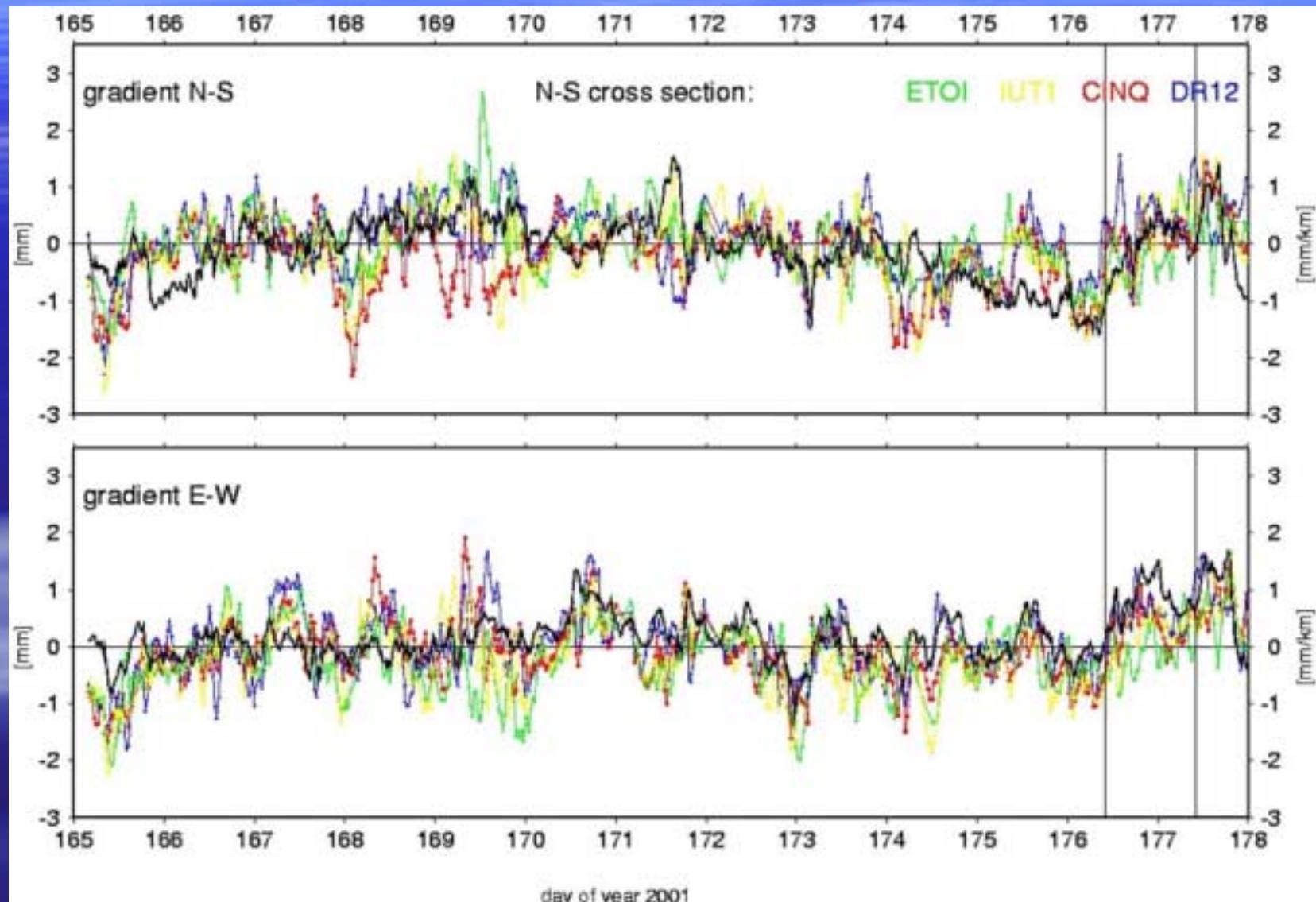
Gradients ZWD et gradients individuels à 4 sites proches



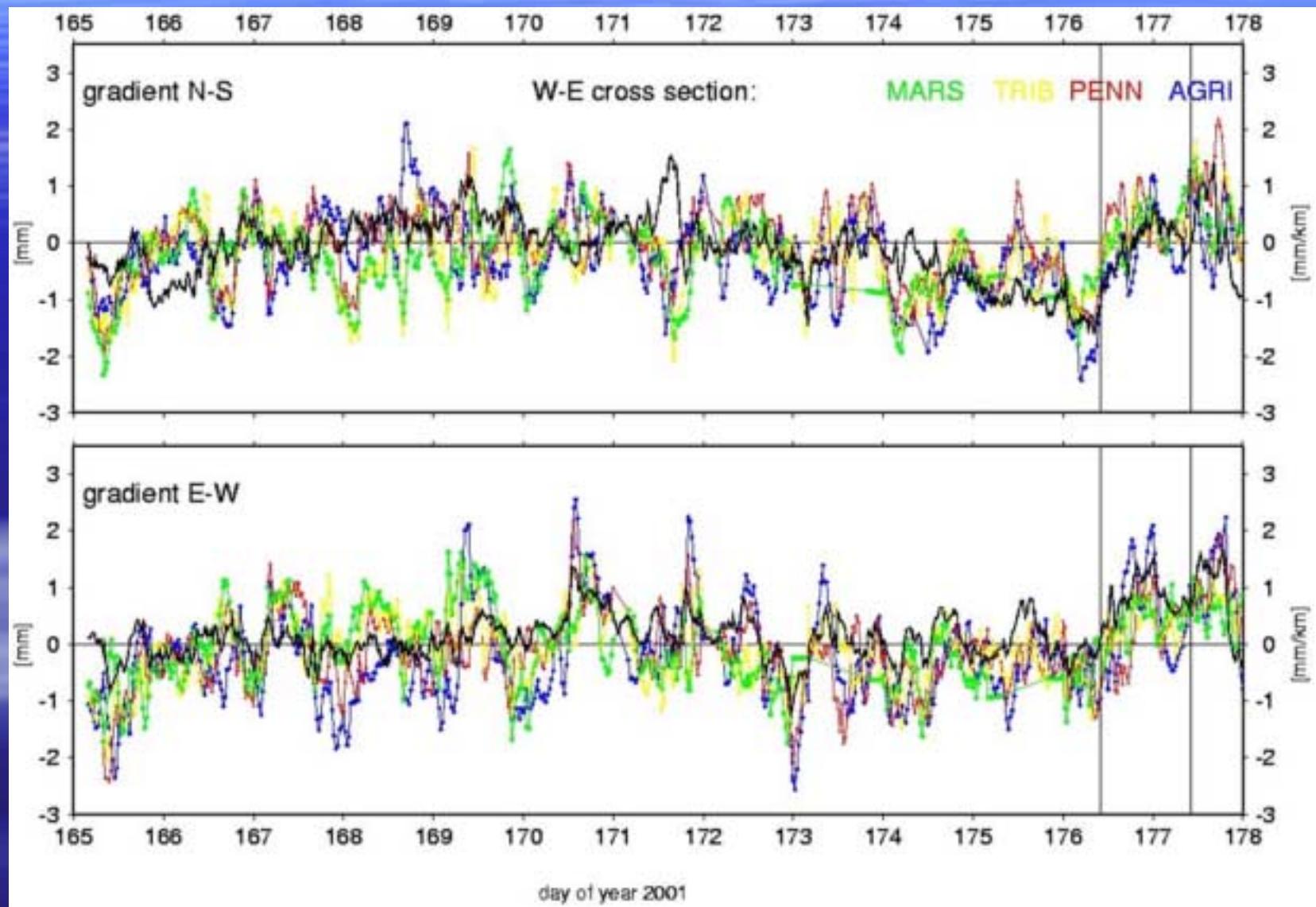
Gradients ZWD et gradients individuels à 4 sites éloignés



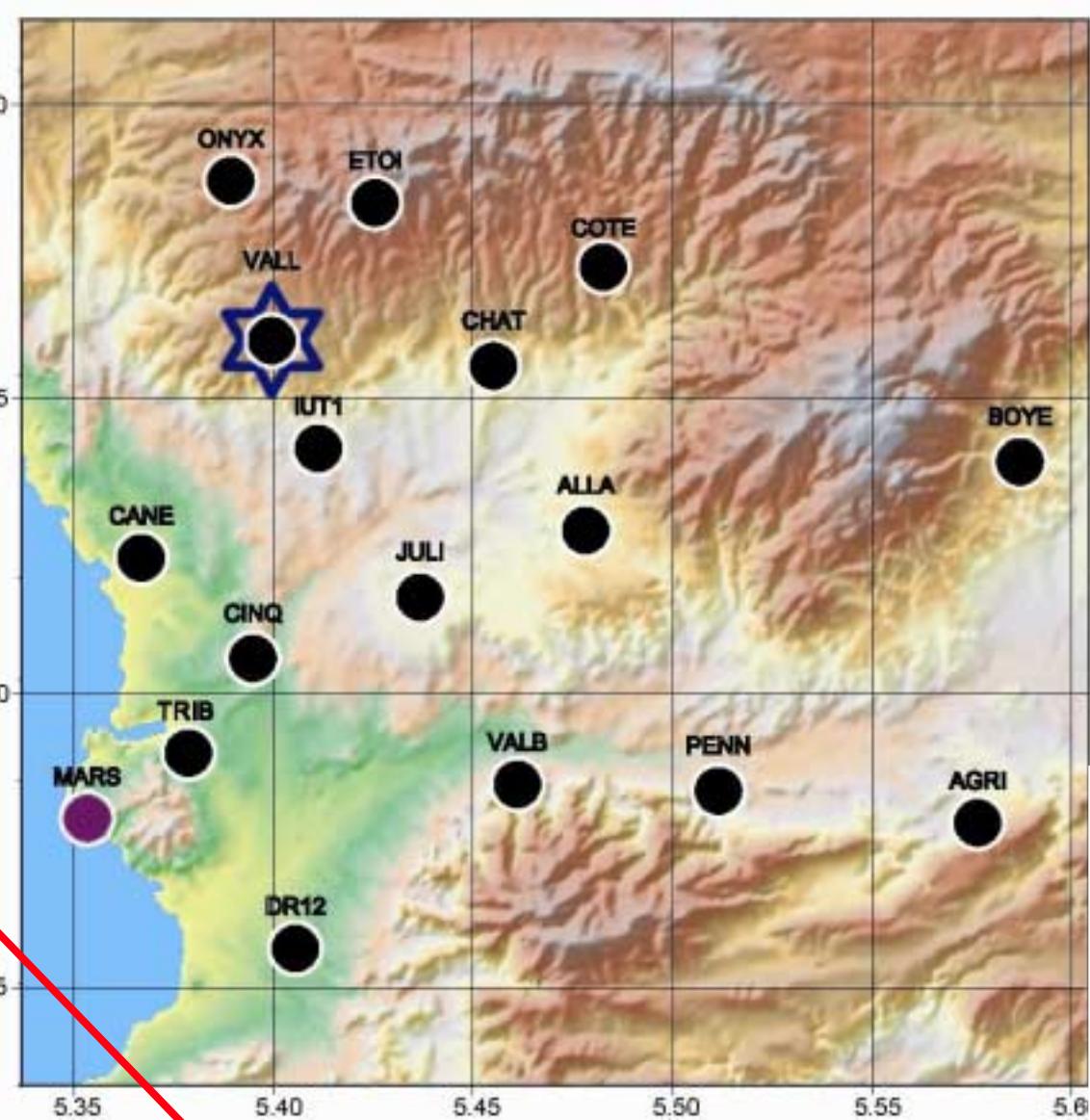
Gradients ZWD et gradients individuels: coupe N-S



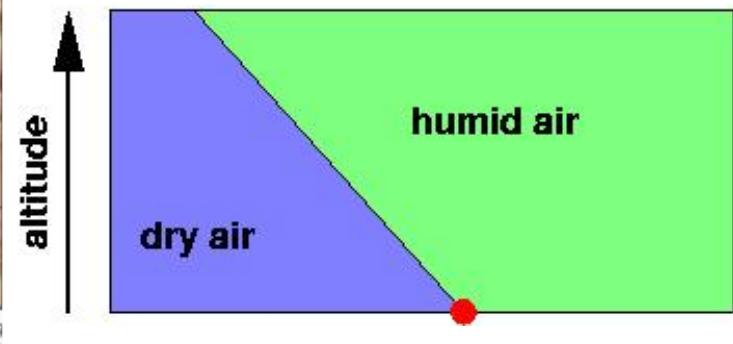
Gradients ZWD et gradients individuels: coupe O-E



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:

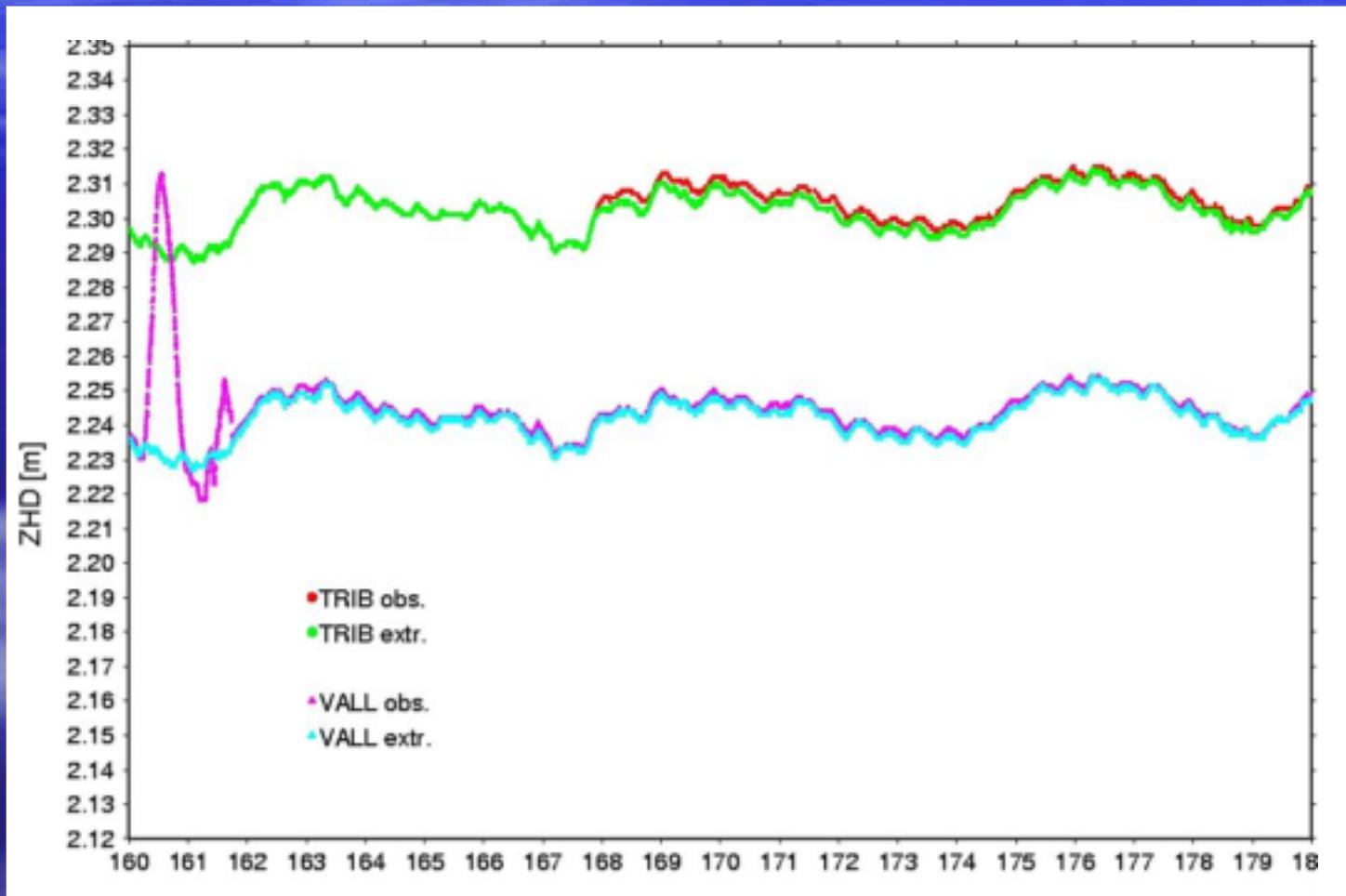
- Gradient hydrostatique dans réseau de petite taille (20 x 20 km) négligeable, unique mesure de pression à CINQ

2ème approximation:

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

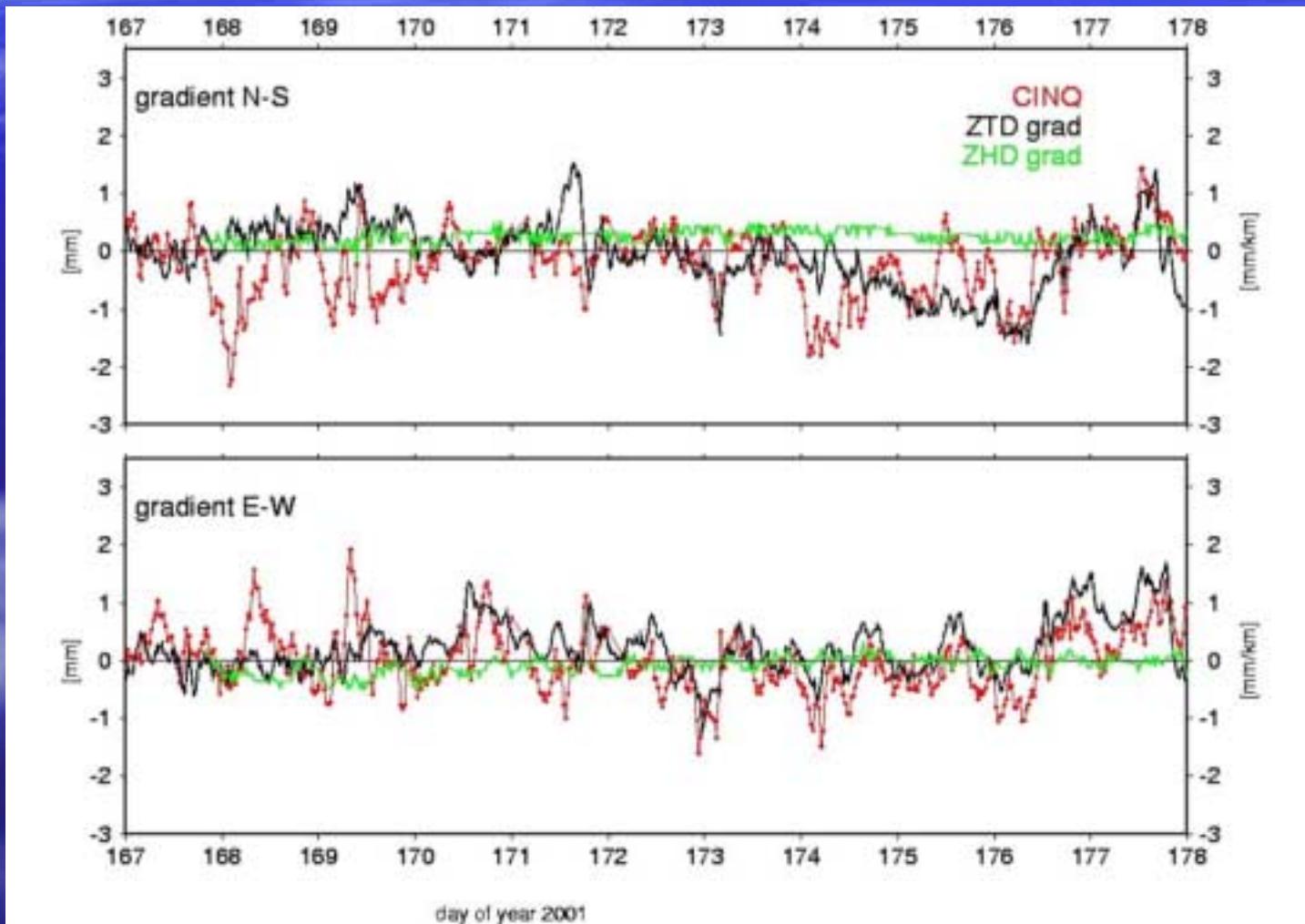
ZHD à partir de pression

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



Gradients

- 1) individuels (GPS CINQ)
- 2) entre ZTD (tout le réseau GPS)
- 3) hydrostatique (mesures pression à CINQ, 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