



GPS Applications in Atmospheric Research

Joël Van Baelen

*Laboratoire de Météorologie Physique (LaMP)
(UMR-6016 CNRS / UBP)*

j.vanbaelen@opgc.univ-bpclermont.fr

Tel: 04 73 40 54 26 Bureau 5211 (Bat. 5 / 2ème étage)



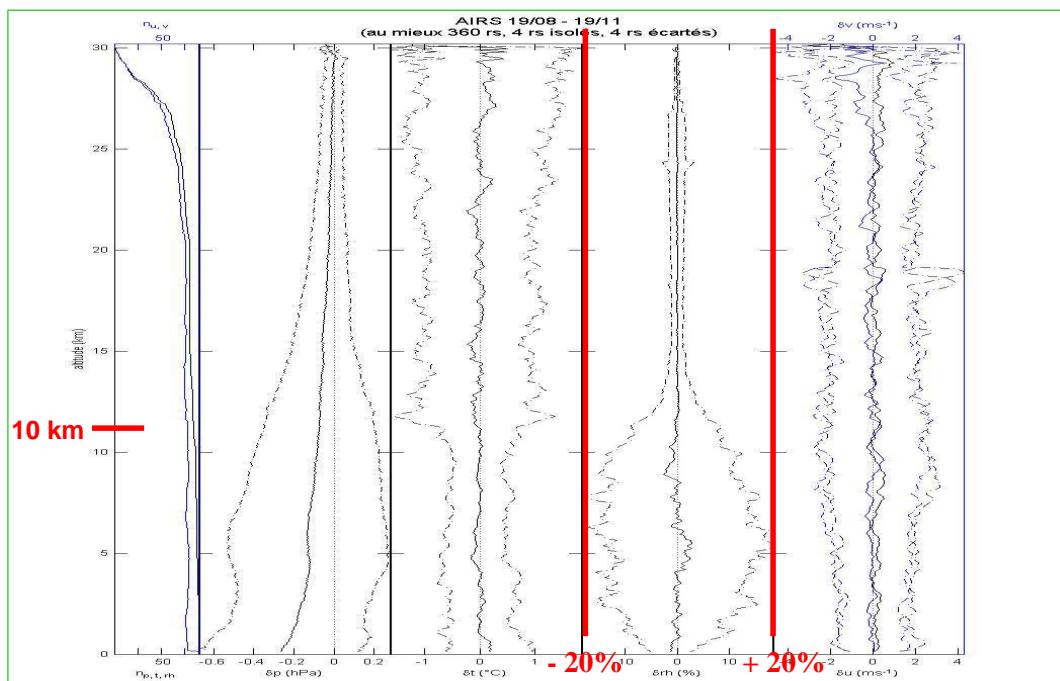
OVERVIEW

- Atmospheric water vapor
- GPS principles
- GPS integrated water vapor estimation
- Validation of GPS estimates: comparisons with radiosoundings and microwave radiometer measurements
- Case study: The Gard flood event of Sept. 9, 2002
- GPS water vapor tomography
- Use of GPS in operational meteorology
- Other topics

I. Atmospheric Water Vapor

- Water vapor plays a major role in many atmospheric processes concerning physics, thermodynamics and dynamics
- Particularly important for
 - Energy budget and radiative transfer
 - Clouds formation and composition
 - Convective initiation and feeding
 - Precipitation processes
 - Atmospheric chemistry
- Extremely variable both in time and space
- BUT... it is still a physical parameter difficult to measure ₃

Atmospheric water vapor variability: statistics on consecutive RS with $\Delta t = 1\text{h}$



Water vapor Measurement method limitations

- Radiosondes (RS): Time resolution, operation costs
- Microwave Radiometer (MWR): rain, cost, calibration, weighting functions
- Spectrometer : sun, mapping functions, weighting functions
- Lidars : night, clear air, operation cost, cost
- **➔ Interest of GPS:**
 - All weather
 - Continuous unattended operation
 - Good time resolution

5

II. GPS Principles

- GPS system
- GPS signals
- Pseudo-range and phase measurements
- Absolute and relative positioning
- Uncertainties
- GPS signal perturbations
- Network GPS solutions
 - Positioning
 - Atmospheric parameters

6

The GPS system

■ History:

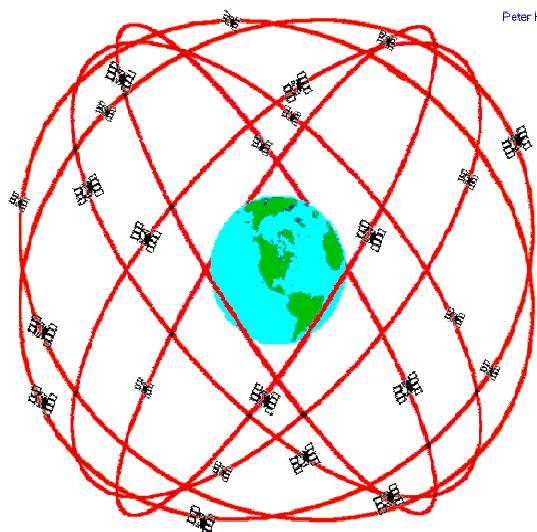
- NAVSTAR-GPS
(NAViigation System by Timing and Ranging / Global Positioning System)
- US military program in the '70s
- 1st satellite in 1978
- Operational system completed in 1994 (limited service since 1986)
- Full access (non degraded signal) since May 2001

■ Three segments:

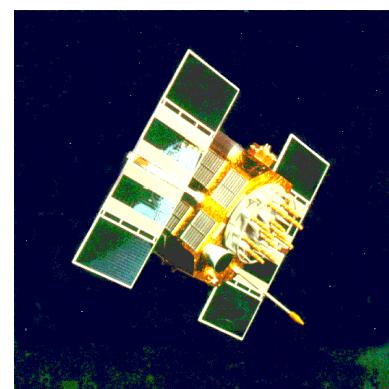
- Space:
24 satellites in operations + 4 reserve satellites
- Control:
5 ground stations for satellites follow-up and command
- Users

7

Space



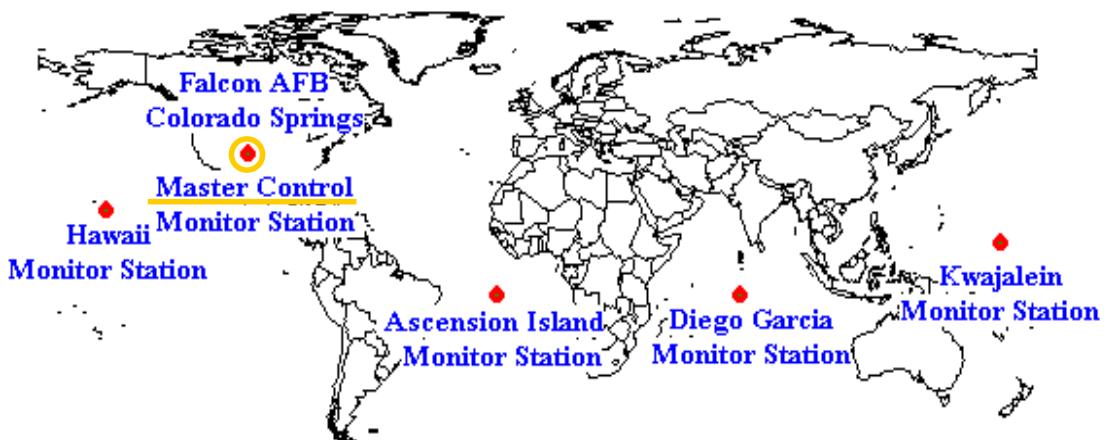
GPS Nominal Constellation
24 Satellites in 6 Orbital Planes
4 Satellites in each Plane
20,200 km Altitudes, 55 Degree Inclination



8

Control

Peter H. Dana 5/27/95



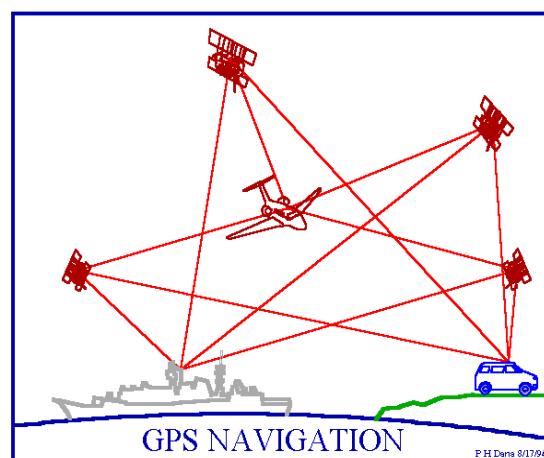
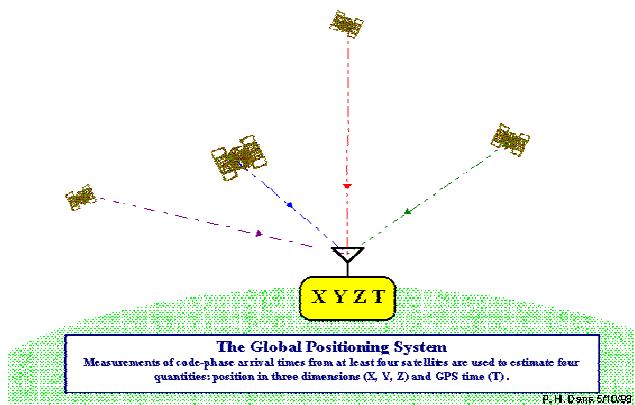
Global Positioning System (GPS) Master Control and Monitor Station Network

9

Users

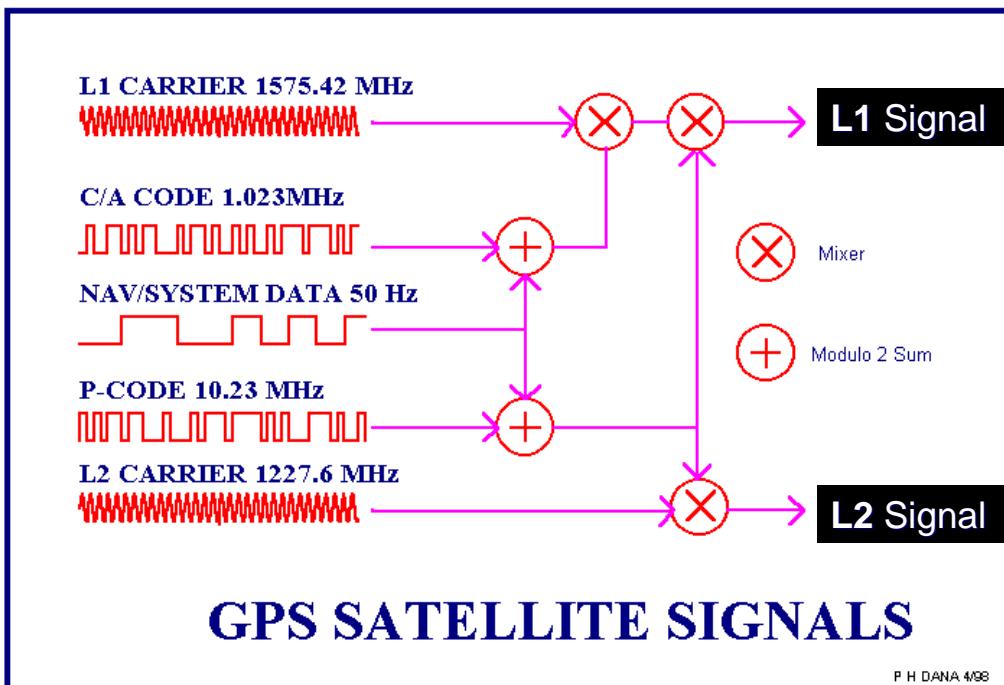
GPS solution: (X, Y, Z, T)

- Positioning
- Timing



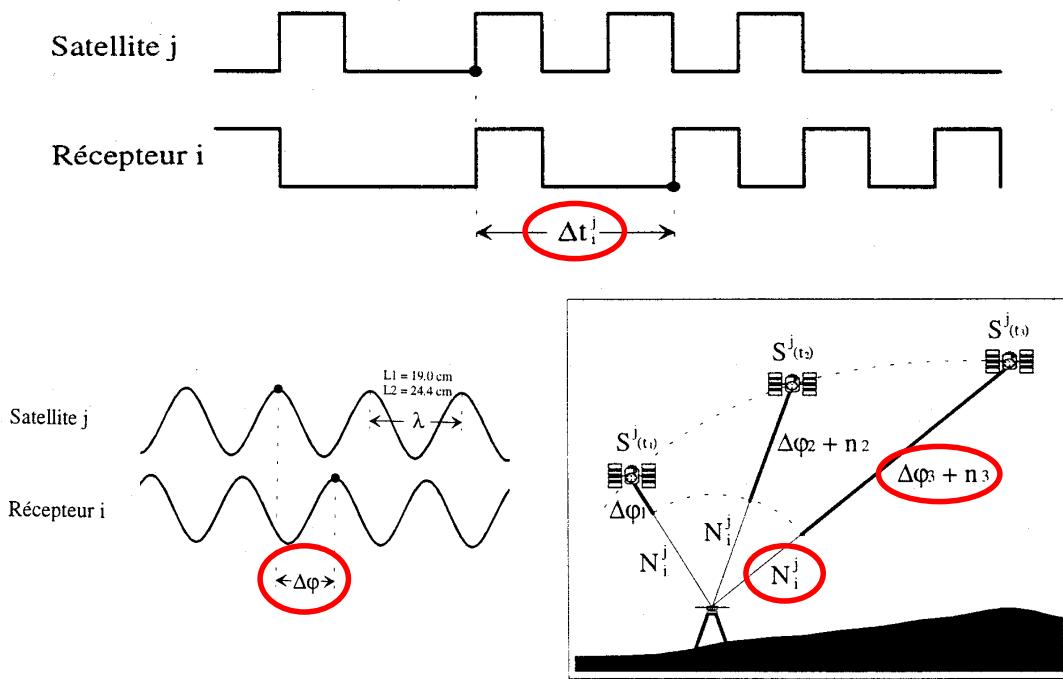
10

GPS Signals



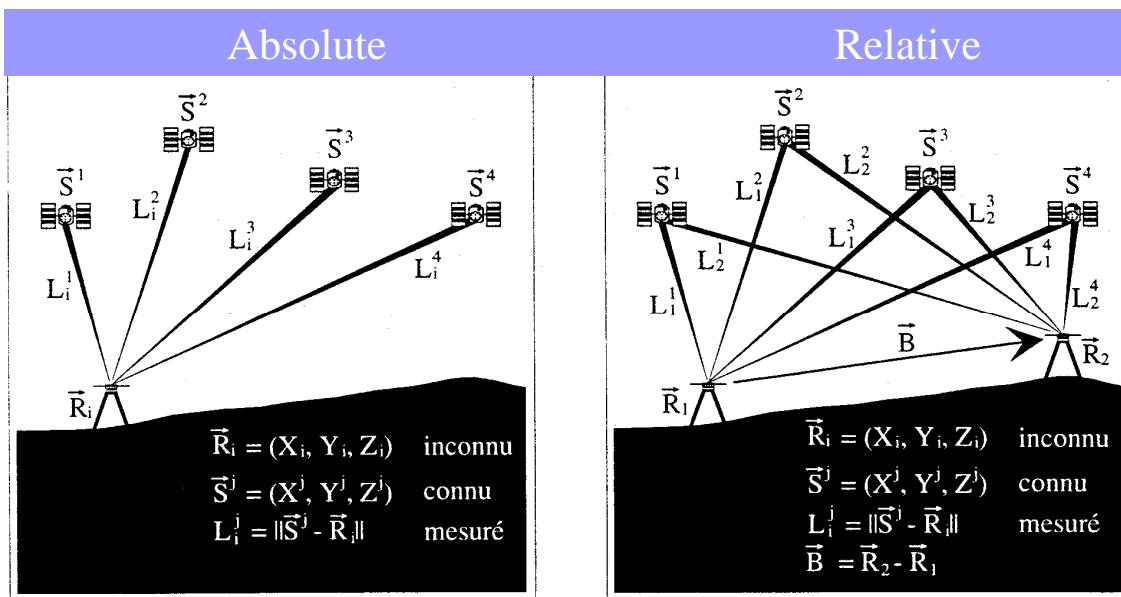
11

Pseudo-range and phase measurements



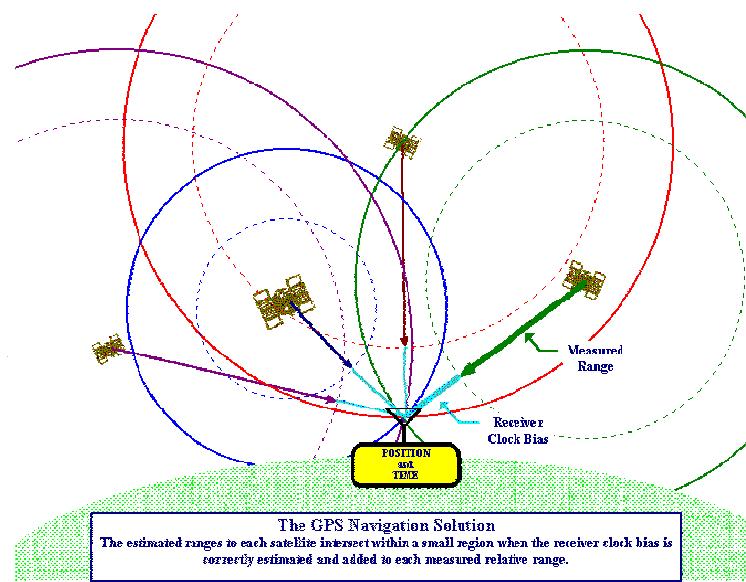
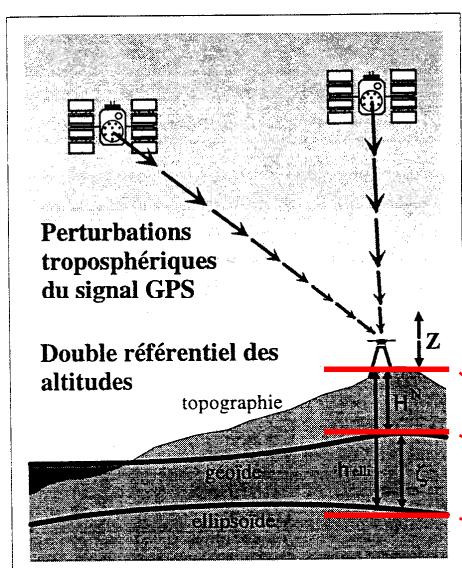
12

Absolute vs Relative Positioning



Note: { **Differential** => Information transfer
(corrections) from R1 (reference station)
to R2 (mobile) 13

Uncertainties



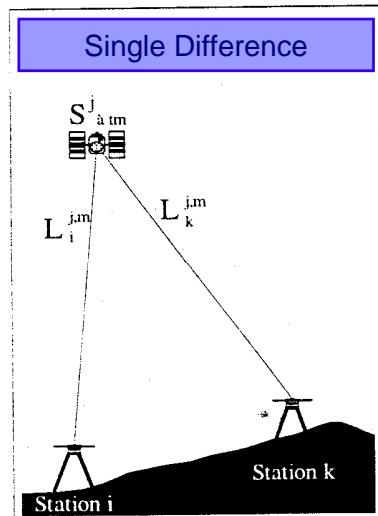
Topography
Geoid
Ellipsoid

Signal perturbations

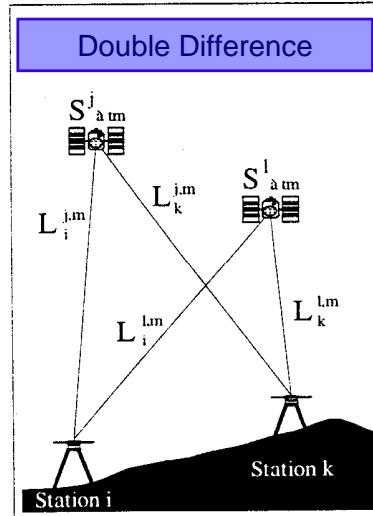
- Satellites orbit and yaw
- Satellite and receiver clock drifts
- Cycle slips
- A priori coordinates of GPS stations
- Multi-path
- Antenna phase center variations
- Solar and lunar tides
- Ocean and Atmospheric loading
- Ionospheric effect

All these can be addressed with frequency combinations, single/double/triple differences, models, and “care”¹⁵.

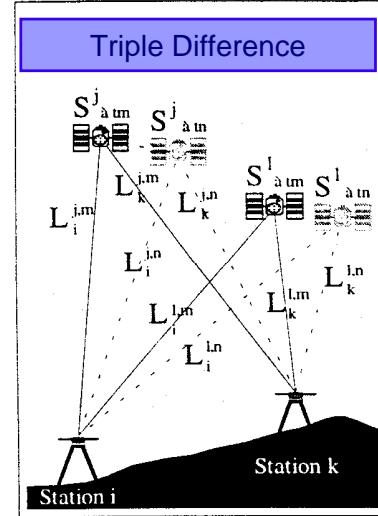
Expl: Simple / double / triple differences



Effect: suppress satellite clock drift



Effect: suppress receiver clock drift



Effect: suppress cycle ambiguities

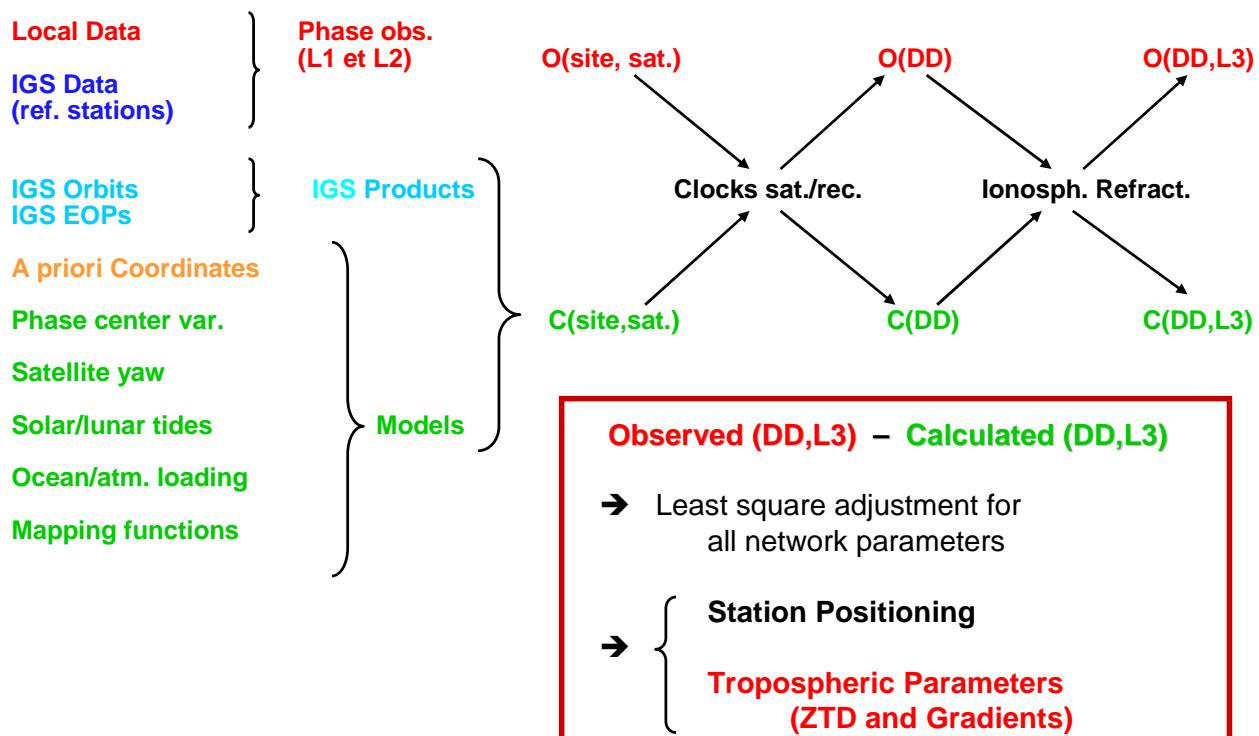
Signal perturbations (cont'd)

- Only the troposphere effect cannot be accounted for in a reasonable manner due to its high variability both in time and space
 - No representative standard atmosphere (considering water vapor)
 - No universal model
 - Non dispersive medium at GPS frequencies such that frequency combinations are not effective

=> Most advanced GPS processing softwares provide atmospheric parameter estimates (ZTD and ZTD gradients)

17

GPS network solutions



18

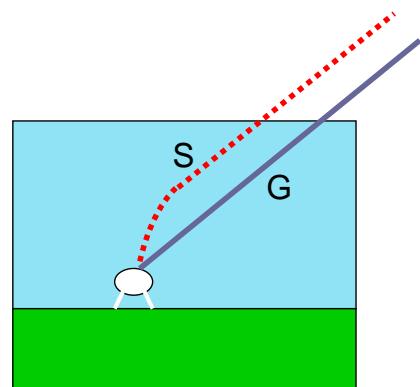
III. GPS IWV estimates

Tropospheric effect : Path elongation

$$\Delta L = \int_S (n - 1) dS + [S - G] \approx \int_S (n - 1) dS$$

n : atmospheric refractive index
function of the vertical structure of the atmosphere

$$10^6 (n - 1) \approx k_1 \cdot \frac{P_d}{T} + k_2 \cdot \frac{e}{T} + k_3 \cdot \frac{e}{T^2}$$



Total Delay (ZTD)

$$\Delta L = \Delta L_h + \Delta L_w$$

Hydrostatic Delay (ZHD)

Wet Delay (ZWD)

19

Atmospheric parameters calculations

$$ZHD = \Delta L_h = \left[\frac{k_1 \times 2.9340 \cdot 10^{-5} \times P_s}{1 - 0.00266 \times \cos(2\Psi) - 0.00028 \times H} \right]$$

$$ZWD = \Delta L_w = 10^{-6} \cdot \left(k_2 + \frac{k_3}{T_m} \right) \cdot \int_H^\infty \frac{e}{T} dz \quad \text{where } T_m = a_0 + a_1 \times T_s$$

With

$$IWV = \frac{10^{-1}}{R_w} \times \int_H^\infty \left(\frac{e}{T} \right) dz$$

One gets :

$$\Delta L_w = 10^{-5} \times 461.51 \times \left(k_2 + \frac{k_3}{T_m} \right) \times IWV$$

20

GPS IWV calculation

$$ZTD = ZHD + ZWD$$

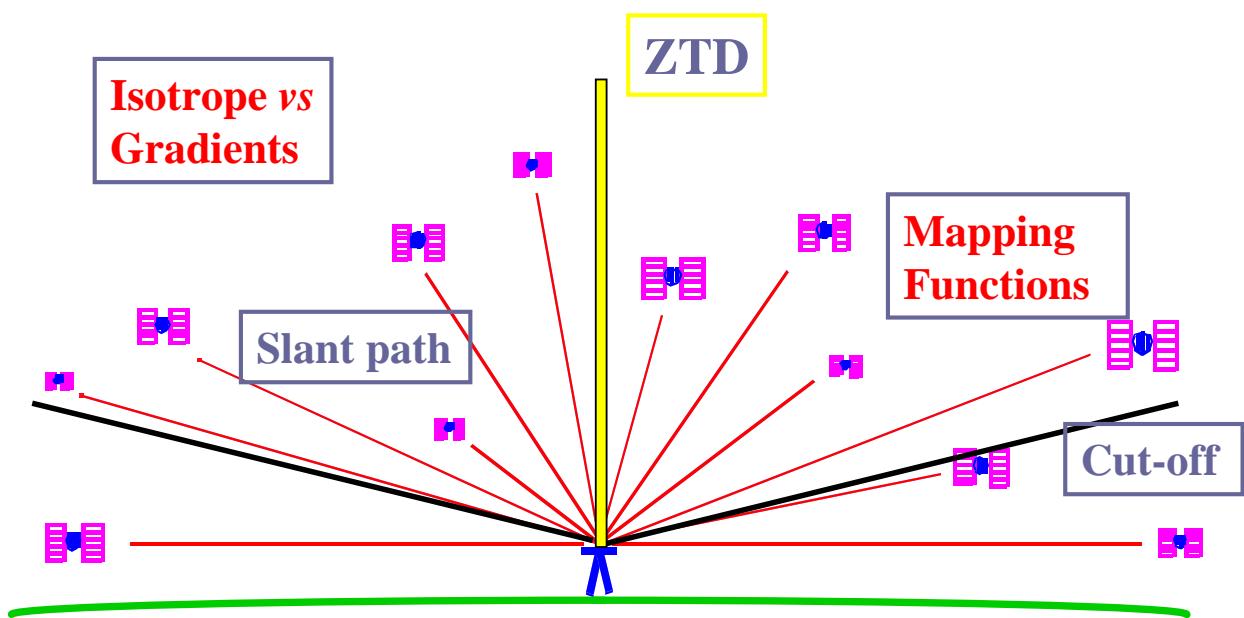
$$IWV = \frac{10^5}{461.51 \times \left(k_2 + \frac{k_3}{T_m} \right)} \times \left[ZTD - \frac{2.9349 \times 10^{-5} \times k_1 \times P_s}{(1 - 0.00266 \times \cos(2\Psi) - 0.00028 \times H)} \right]$$

=> **IWV = function**

- GPS observable
 - ZTD
- GPS station coordinates
 - Ψ, H : latitude & altitude
- Ground atmospheric parameters
 - P_s and T_s (to estimate T_m)

21

ZTD estimates hypotheses



22

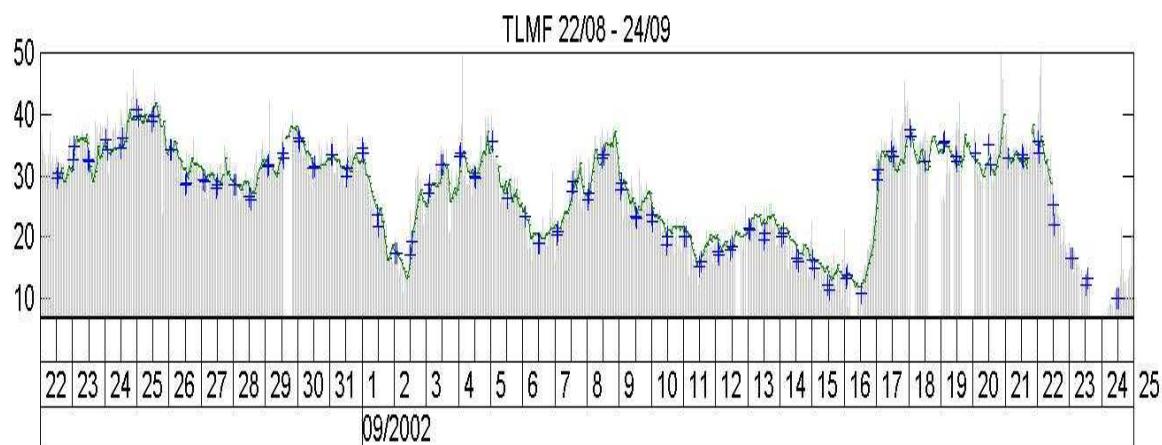
IV. IWV GPS estimates validation: instrument comparisons

(Van Baelen et al. 2005, JAOT)

- Framework of experiment
 - Validation campaign for AIRS instrument on board satellite *EOS-Aqua* (Aug. – Nov. 2002)
- Near real time determination of ZTD
 - Rapid orbits
 - Short sessions
- Radiosoundings (RS)
 - 2 soundings twice a day (1h et 5' before satellite overpass)
 - Two daily periods: 0h - 3h TU / 11h - 14h TU
- Microwave radiometer on a nearby site
- Common measurement period: 22 Aug. to 24 Sept.

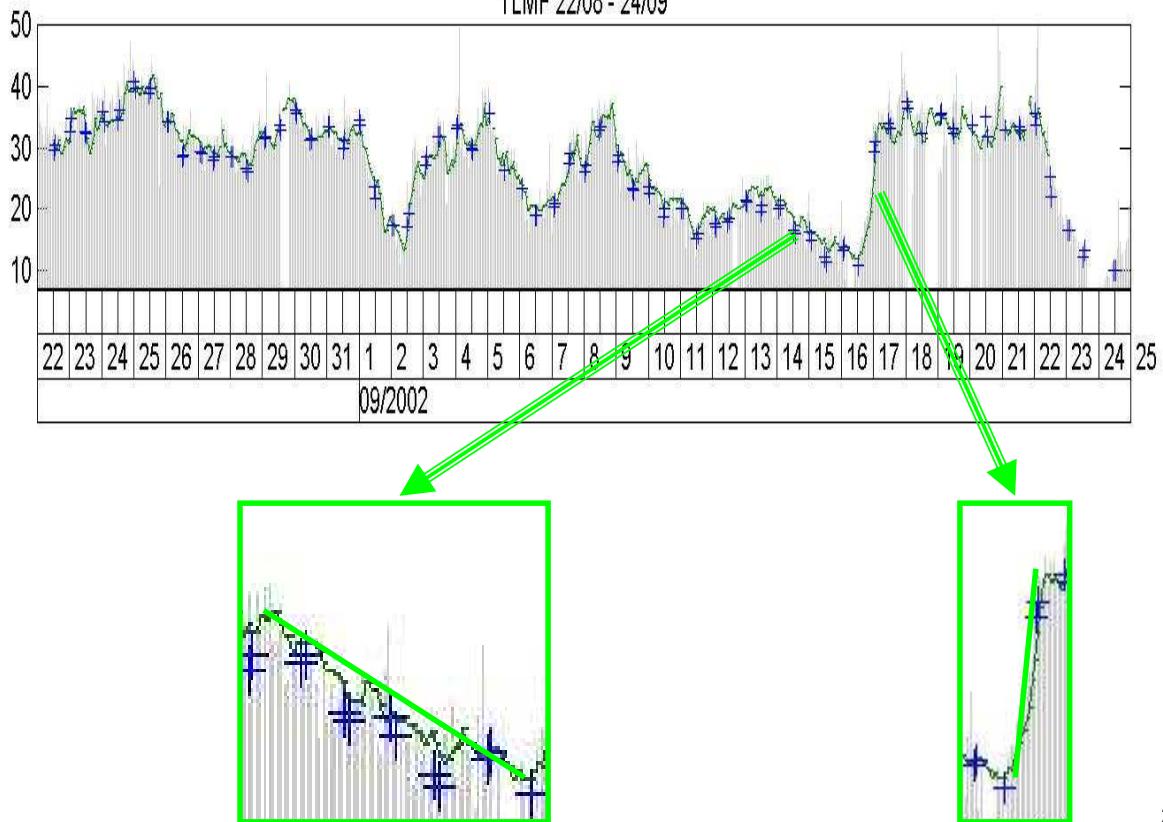
23

Time series

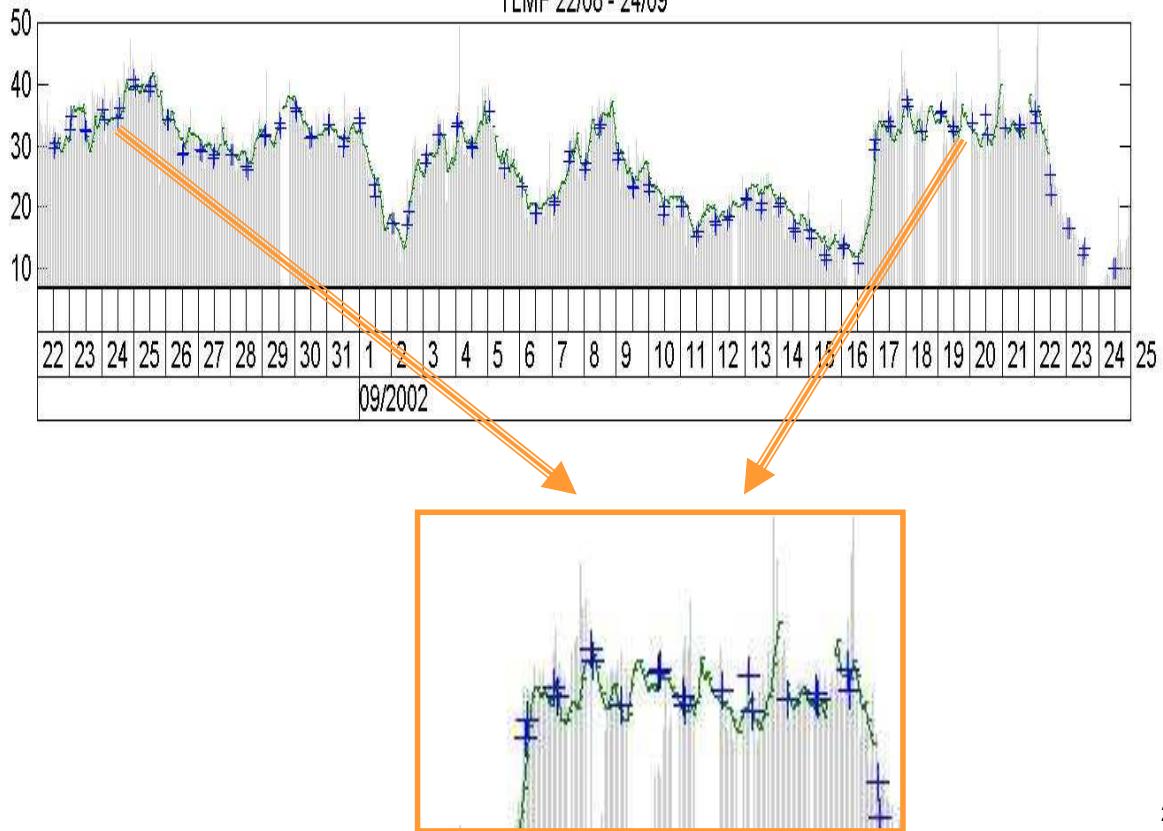


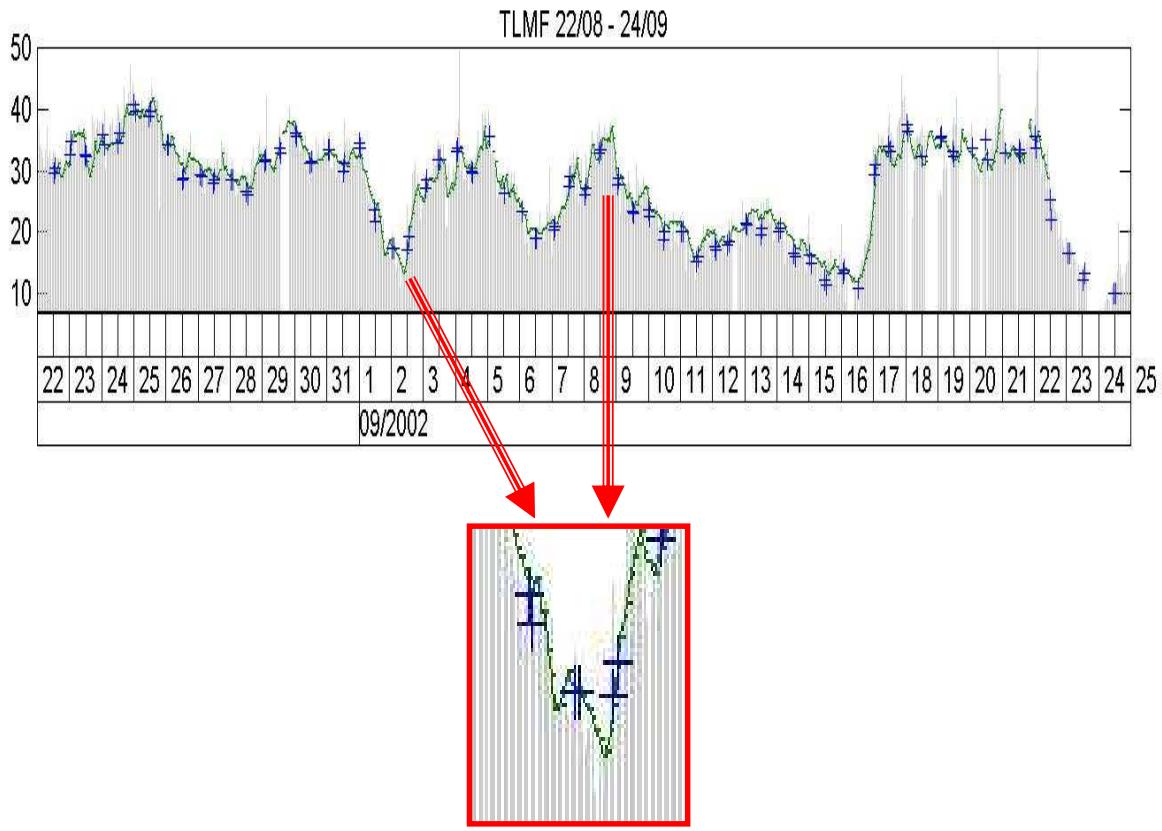
24

TLMF 22/08 - 24/09

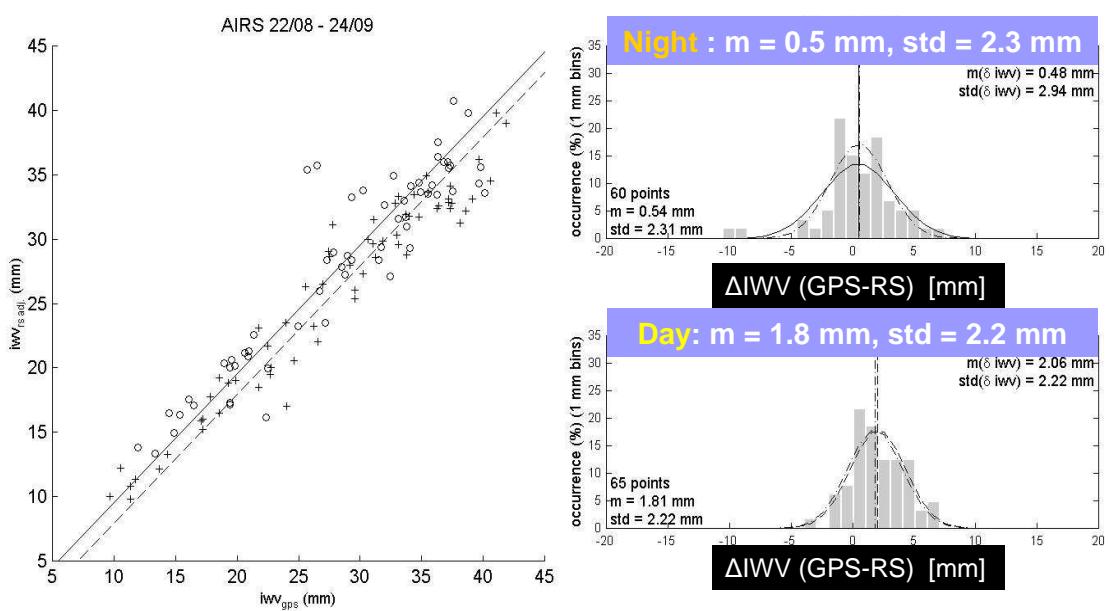


TLMF 22/08 - 24/09

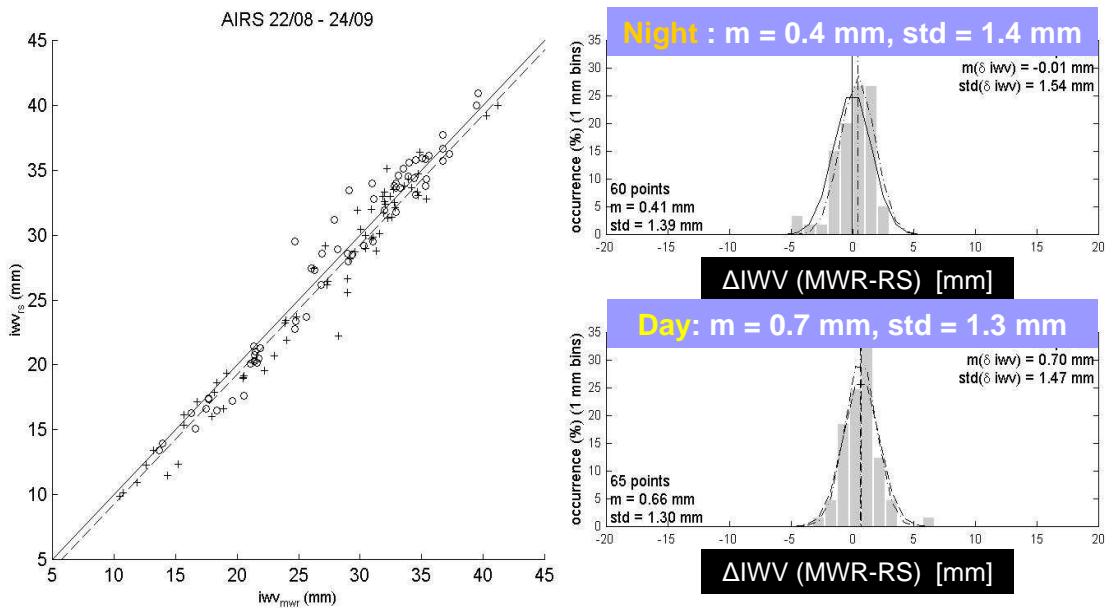




IWV_{GPS} vs IWV_{RS}

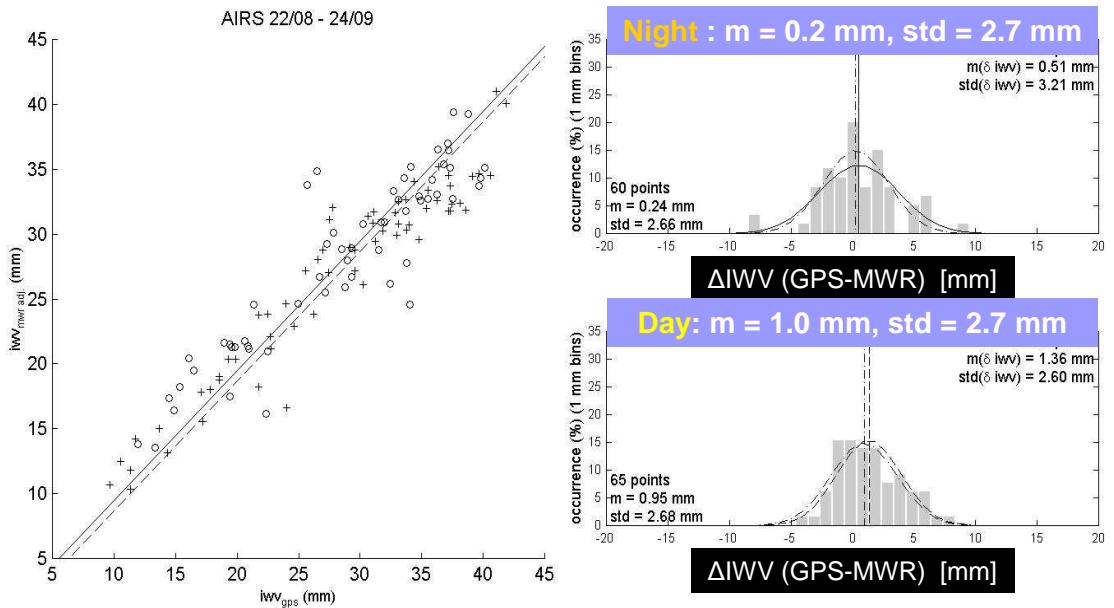


IWV_{MWR} vs IWV_{RS}



29

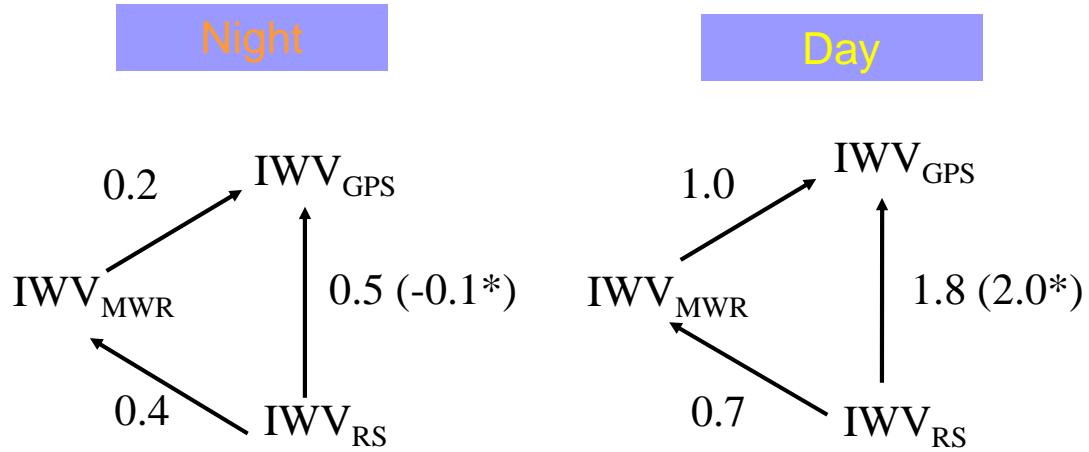
IWV_{GPS} vs IWV_{MWR}



Note: $\text{IWV}_{\text{GPS}} - \text{IWV}_{\text{MWR}} \sim 0$ with all 24 hours of data

30

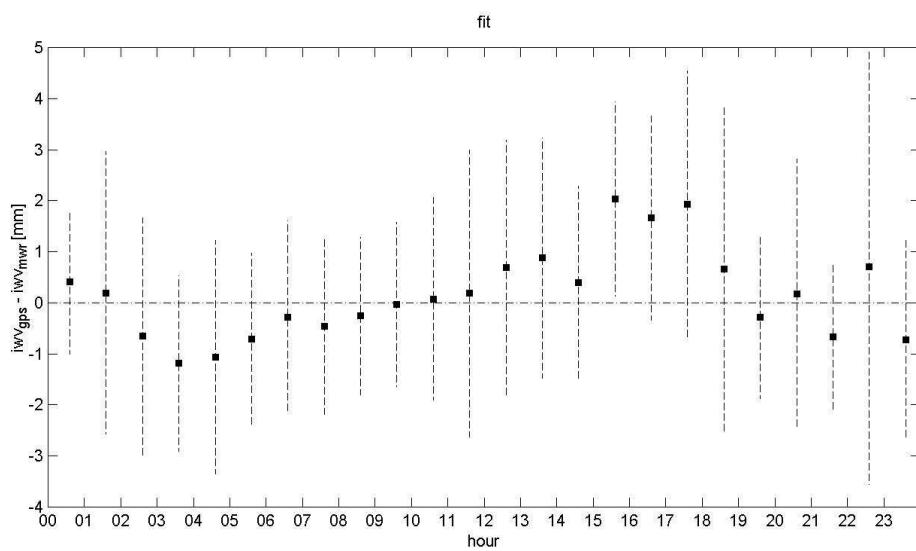
Bias between instruments



(*) : Over the three months of the campaign

31

Diurnal cycle



32

GPS IWV total water vapor dependency

	IWV<15mm	Global	IWV>35 mm
GPS – RS	-1.0	0.9	3.0
GPS – MWR	-1.4	0.0	2.4

Conclusion:

Relative variation of IWV estimated by GPS 15% larger than with two other means of measurements (RS et MWR)

33

Conclusions for these comparisons

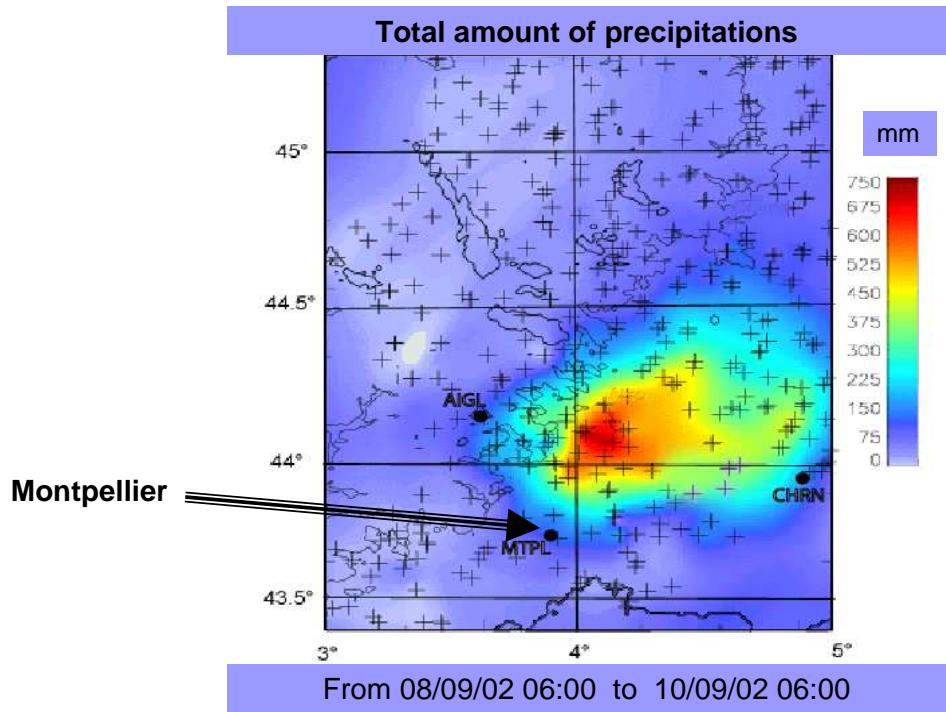
- $\text{IWV}_{\text{GPS}} > \text{IWV}_{\text{MWR}} > \text{IWV}_{\text{RS}}$
- Diurnal effect : differences larger at day than at night
- Bias « global » GPS – MWR $\approx 0.02 \text{ mm}$
- Bias « global » GPS – RS $\approx 0.86 \text{ mm}$
- Dry bias of radiosondes (RS 90) at day
- Slight dry bias of microwave radiometer at day
- GPS estimates sensitive to total water vapor in atmosphere
- Larger noise in GPS estimates (std $\sim 2.4 \text{ mm}$)

34

V. Case study:

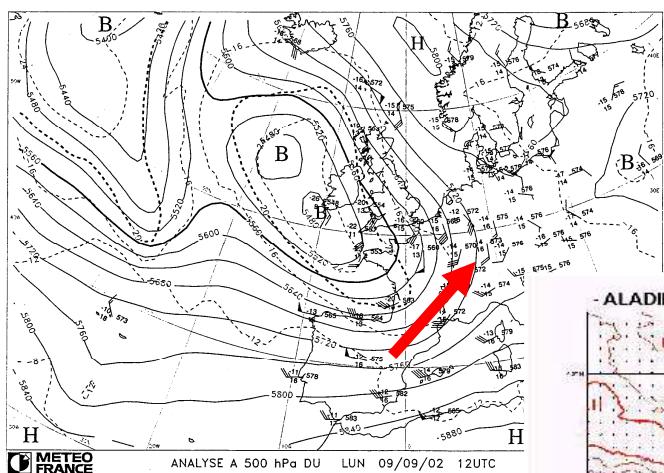
(Champollion et al., 2005, JGR)

The Gard flooding of September 9, 2002



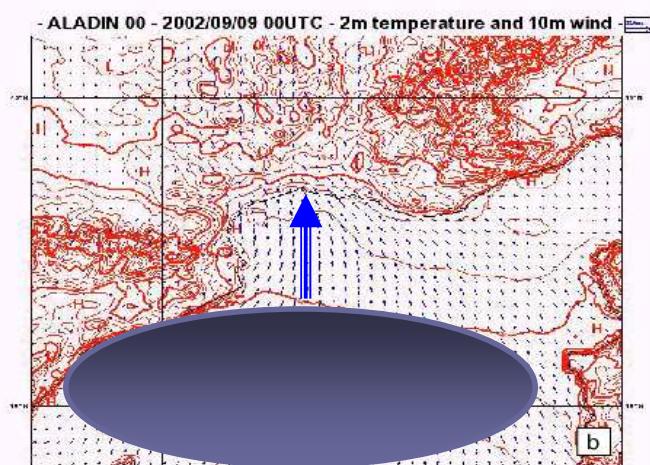
35

Synoptic conditions



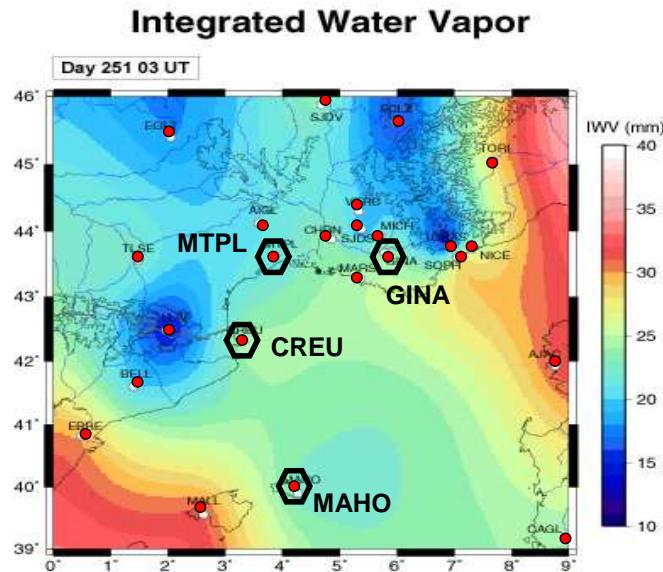
500 hPa Analysis

09/09/02 12:00 TU



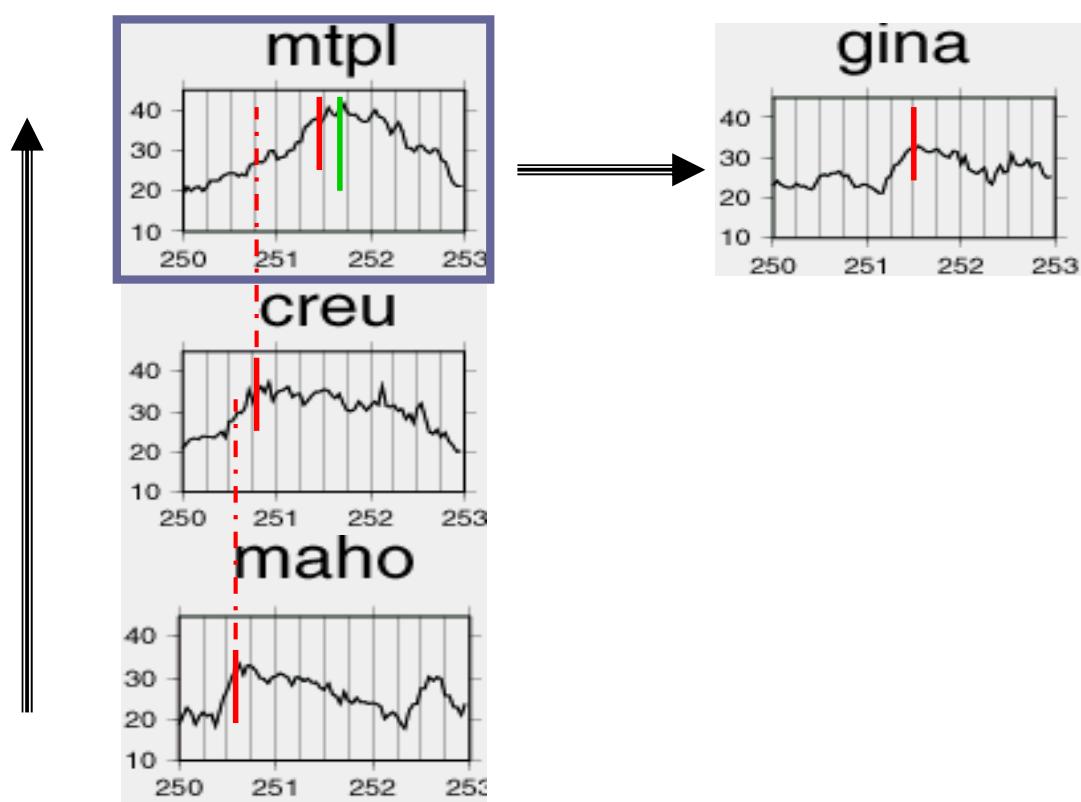
36

GPS network stations



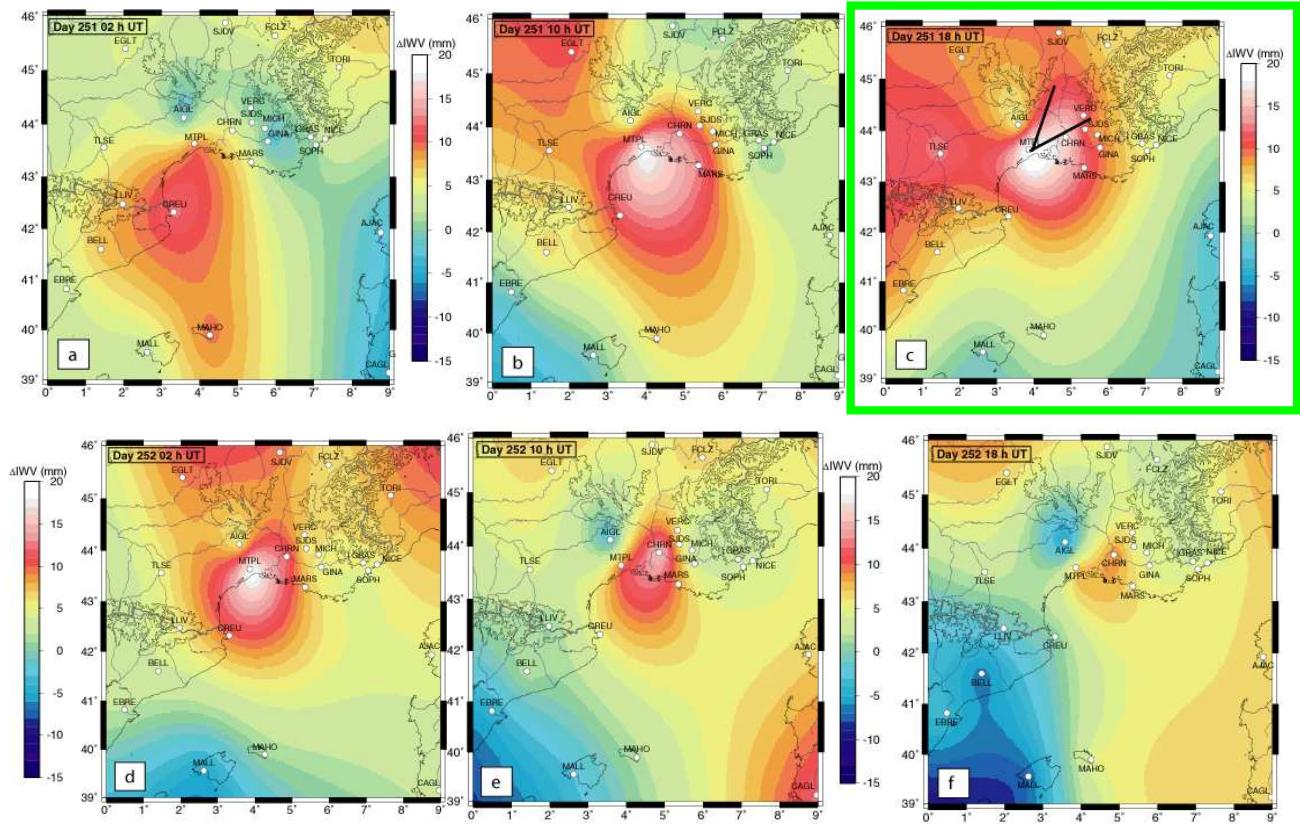
37

Time evolution of IWV

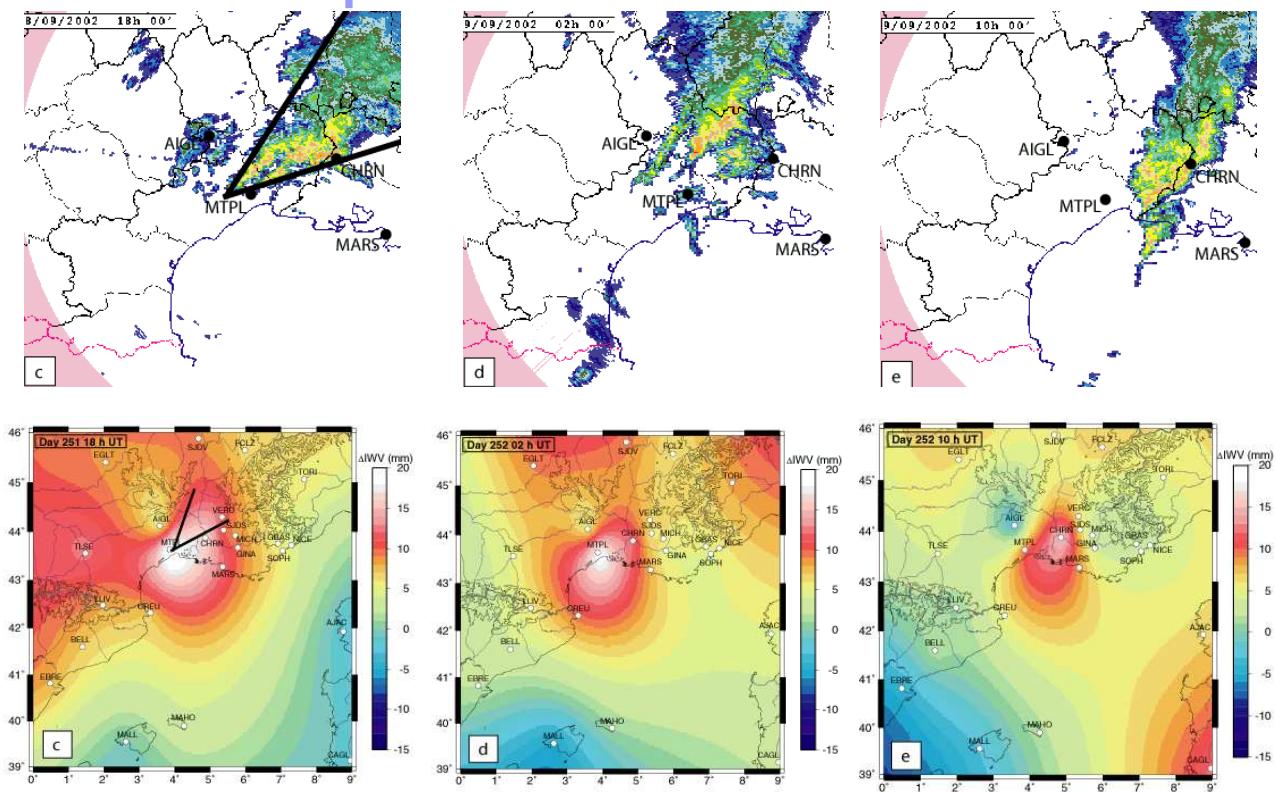


38

Evolution of relative IWV field



Comparison of GPS IWV with Nîmes Precipitation Radar Echoes



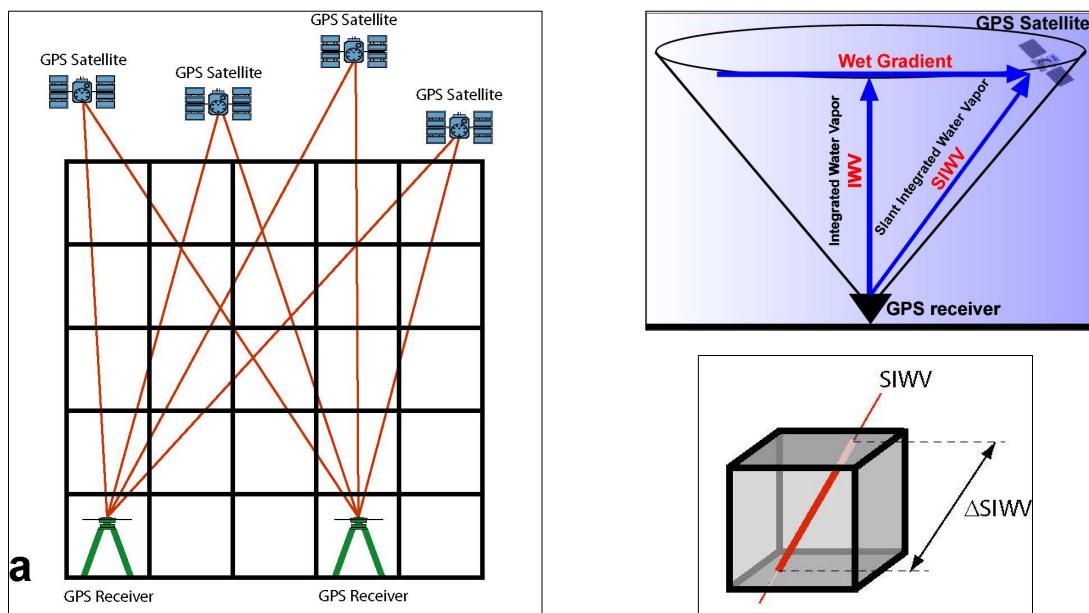
Description of the event

- Typical “Cévenole” Episode
 - Thalweg and altitude jet
 - Convergence of surface hot and moist air
 - Stationary precipitation location
 - V shape system
- Humidity advection as a “precursor” of the intense convection
- Precipitating system sustained by a zone of high humidity:
 - Early stagnation
 - Upstream positioning
 - Convective system dilution linked to its disappearance

41

VI. GPS Water Vapor Tomography

Tomography Principles :



42

Le problème inverse

- Données → Modèle → Estimation des paramètres
- Minimiser au plus les écarts aux valeurs réelles.
- De manière générale :
 - N mesures d'un paramètre (données d).
 - M mesures à estimer (inconnues m).
- Postulat : il existe un lien entre les inconnues et les données appelé modèle et noté G.
- Forme la plus simple $d = G * m$

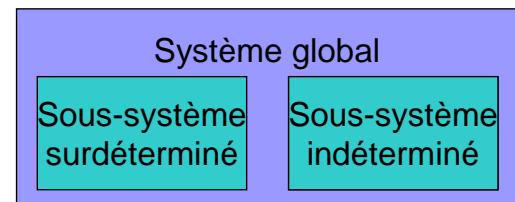
43

- Si données > inconnues : problème surdéterminé
- Si données = inconnues : problème déterminé
- Si données < inconnues : problème :

- Partiellement déterminé.

Ou

- Sous-déterminé.



Système global sous-déterminé

- Tomographie GPS correspond au cas données < inconnues sous-déterminé.

44

II.1. PROBLEME INVERSE

- Solution du problème inverse via la formule suivante : méthode des moindres carrés pondérés amortis.

$$m = m_0 + \underbrace{W_m^{-1} \bullet G^t \bullet \left(G \bullet W_m^{-1} \bullet G^t + \alpha^2 \times W_e^{-1} \right)^{-1}}_{\text{1}} \bullet \underbrace{\left(d - G \times m_0 \right)}_{\text{2}}$$

m : solution recherchée.

m_0 : valeurs initiales.

W_m et W_e : matrice de pondération.

G : modèle → matrice de répartition des données.

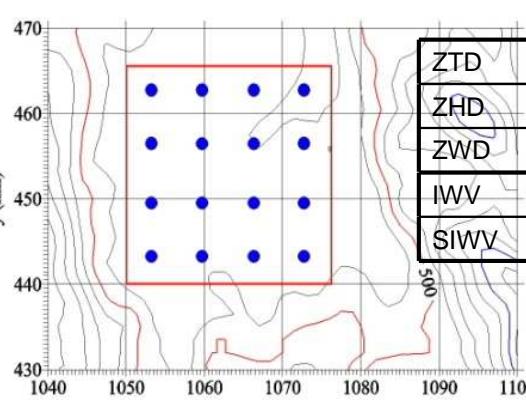
d : données → SIWV contenu en vapeur d'eau intégrée oblique.

α : facteur de pondération.

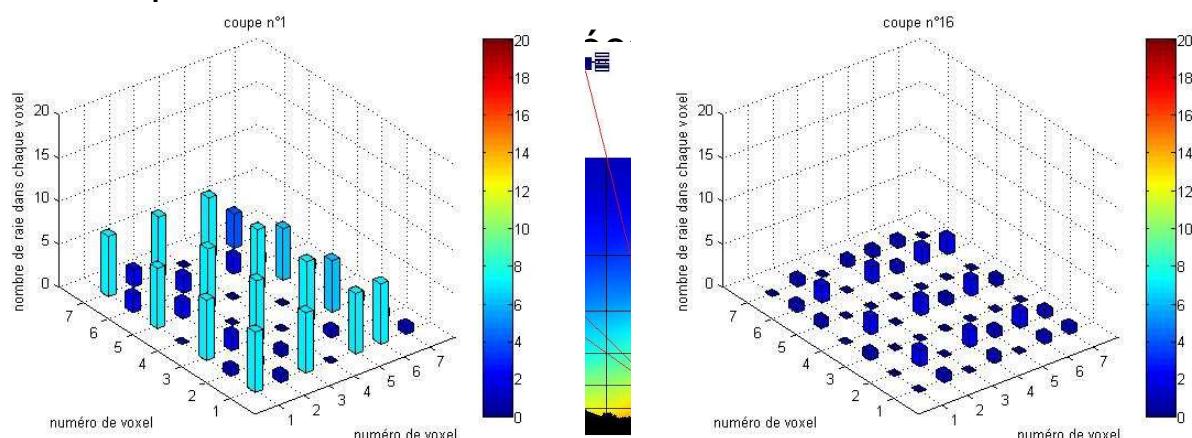
45

II.1. PROBLEME INVERSE

- Collecte ou calcul des paramètres atmosphériques
 - ZTD, ZHD,
 - IWV et SIWV
- Définition d'un domaine GPS découpé en éléments de volume . les voxels.



Récapitulatif



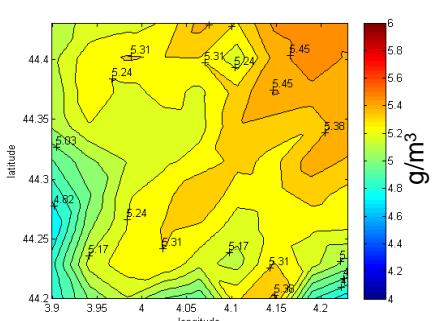
Méthodologie

- Utilisation d'un modèle atmosphérique non-hydrostatique méso-échelle pour connaître la répartition synthétique de la densité de vapeur d'eau.
- Crédit de différents réseaux GPS en faisant varier le nombre et la géométrie des stations ainsi que le nombre de voxels.
- Extraction de SIWV synthétiques à travers le modèle atmosphérique.
- Inversion tomographique.
- Comparaison de la tomographie avec le modèle atmosphérique.

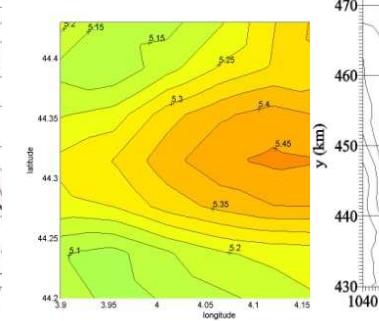
47

Tests de sensibilité et validation

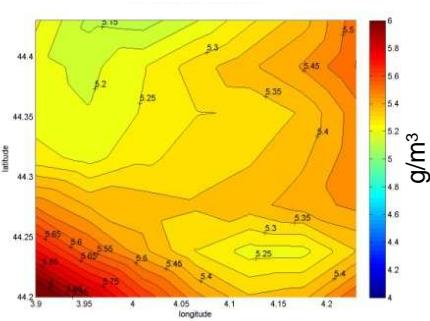
- Résultat concernant la géométrie du réseau:
 - 1 réseau composé de 16 stations GPS réparties de manière optimale.
 - 1 réseau correspondant à un cas réel.



Modèle atmosphérique
Coupe horizontale.



Résultat tomographique. Densité de vapeur d'eau en g/m³. Coupe horizontale à 500 m



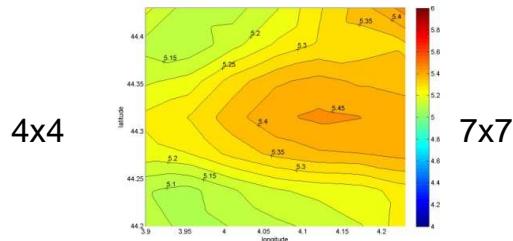
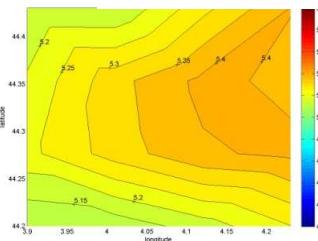
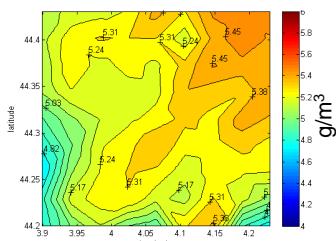
- Importance de couvrir au mieux le terrain pour:

- Éviter les effets de bords.
- Diminuer le caractère sous-déterminé du problème.

48

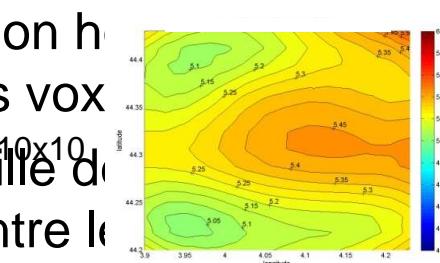
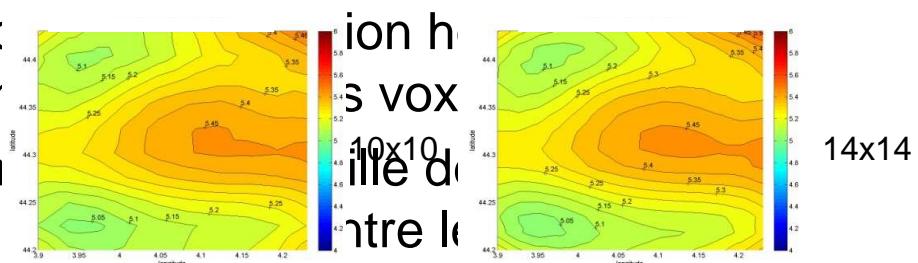
II.2. TESTS DE SENSIBILITE ET VALIDATION

■ Influence du nombre de voxels



Modèle atmosphérique
Coupe horizontale.

- Augmentation de la densité de voxel
- La diminution de la densité de voxel
- Limite atteinte par la correspondance
- Facteur clef pour optimiser le temps de calcul de la tomographie.

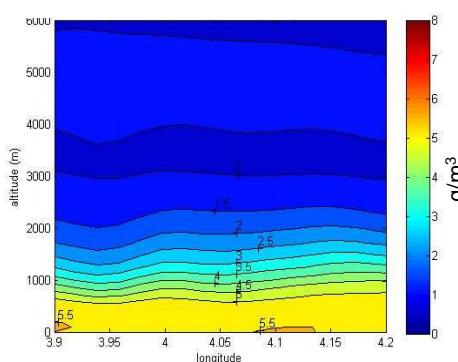


en g/m^3 . Coupe horizontale à 500 m

49

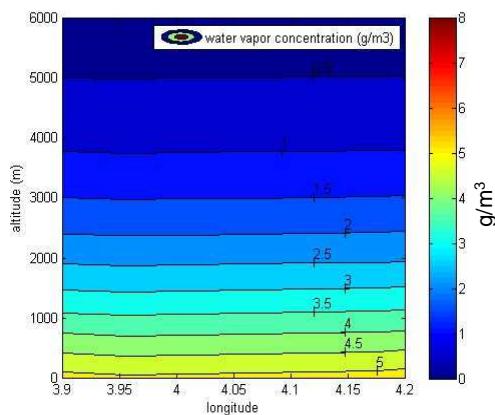
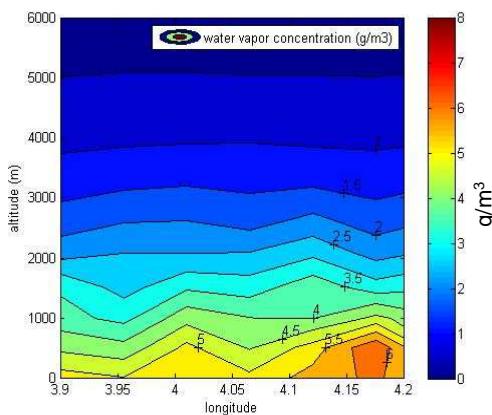
II.2. TESTS DE SENSIBILITE ET VALIDATION

- Coefficient alpha
- Permet l'initialisation des informations
- Alpha petit
- Alpha grand



els sans
données.
l'initialisation.

Modèle atmosphérique : coupe verticale.



Coupe verticale de densité de vapeur d'eau en g/m^3 . Alpha petit à gauche. Alpha grand à droite.

50

II.2. TESTS DE SENSIBILITE ET VALIDATION

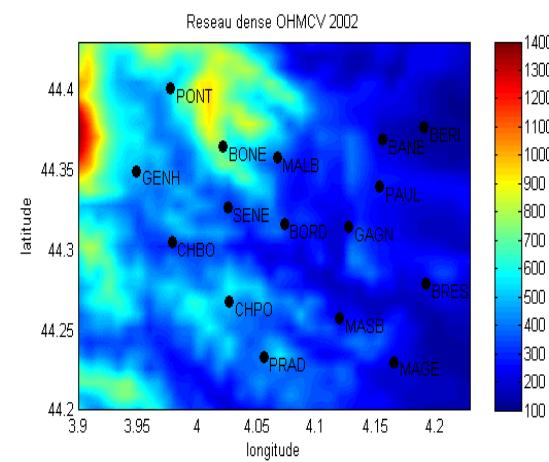
- Les tests de validation et de sensibilité ont montré :
 - Restitution de la densité de vapeur d'eau au dixième de g/m³.
 - Différence entre 0% et 20% (effets de bord. 1 g/m³) par rapport au modèle.
 - Moyenne de 9%. (0.45 g/m³).
- Critère pour effectuer une tomographie :
 - Nombre minimum de stations GPS :
Superficie(km²) / 100 ou 1000
 - Nombre optimum de stations GPS à partir de :
2 * Superficie(km²) / 100 ou 1000
- Nécessité de bien positionner les stations.

51

III.1. OHMCV

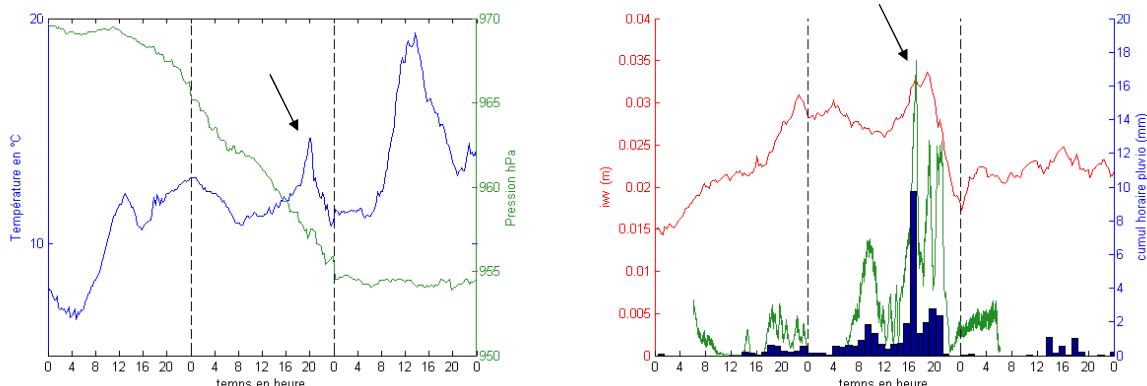
Campagne OHMCV

- Observatoire hydrométéorologique Méditerranéen Cévennes-Vivarais.
- But: étudier et comprendre les phénomènes de pluies intenses conduisant à des crues éclairis.
- En 2002, déploiement d'un réseau dense GPS composé de 16 stations. Réseau de 26x26 km². Distance entre les stations ~5 km.



III.1. OHMCV

- Période du 20 au 22 octobre 2002.
- Passage d'un front chaud le 21 octobre 2002 entre 16h et 20h.

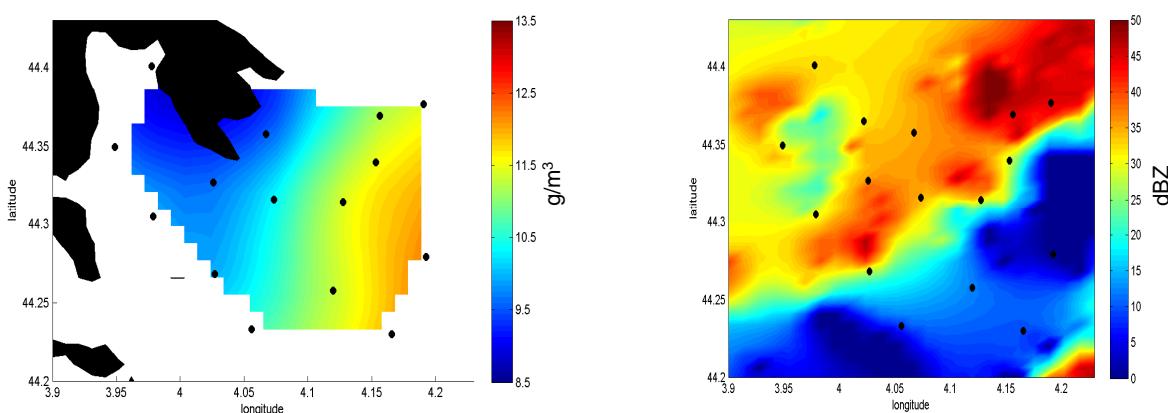


- Augmentation des IWV avant le front
- Déclenchement des précipitations avec le passage du front chaud (réflectivité et pluviomètres)
- Baisse d'IWV pendant l'épisode orageux

53

III.1. OHMCV

Comparaison entre les résultats tomographiques et les cartes radars.

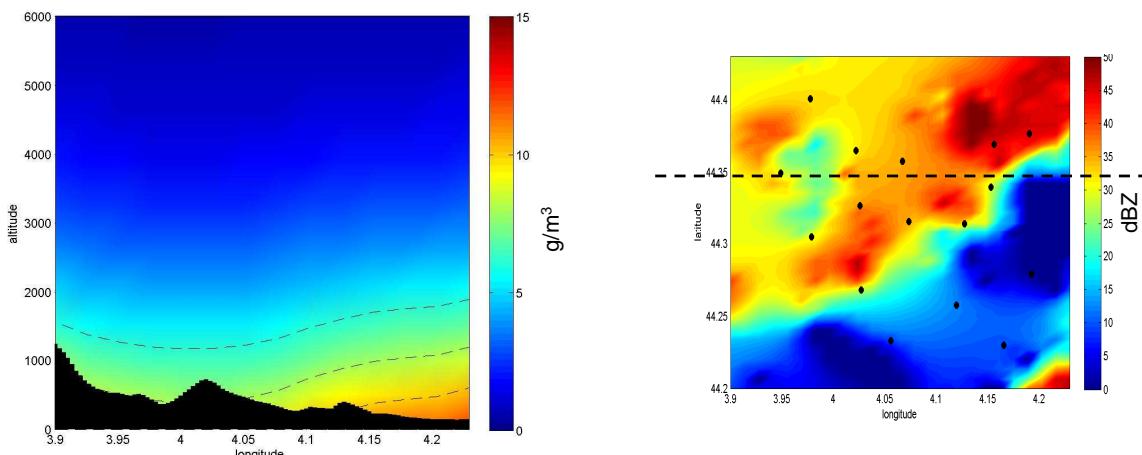


Densité de vapeur d'eau en g/m^3 .
Coupe horizontale à 500 m d'altitude.

Réflectivité du radar de Bollène en dBZ. Angle de site : 0.8°

54

Comparaison entre les résultats tomographiques et les cartes radars.



Coupe verticale Est-Ouest de la densité de vapeur d'eau en g/m³.

Réflectivité du radar de Bollène en dBZ. Angle de site : 0.8°

55

Conclusion OHMCV

- Vapeur d'eau présente avant les précipitations.
- Diminution de la densité de vapeur d'eau à l'approche du front.
- Humidité entraînée au sol au-dessous du front.
- Variation verticale entre 1000m (début d'épisode) et 100m (fin d'épisode).

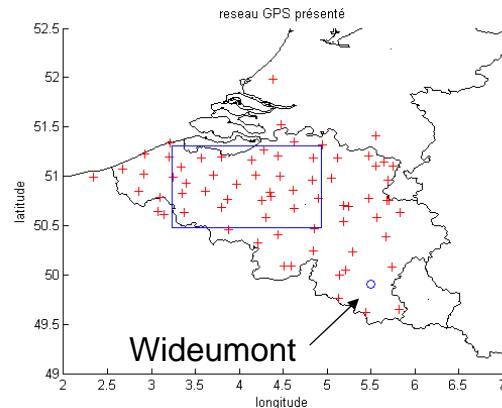
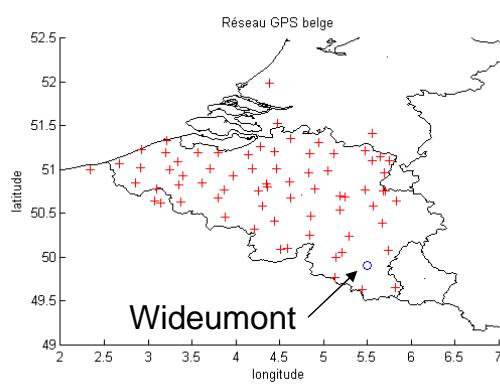
- Déplacement de l'humidité dû au vent ?

- Réseau dense permettant des études fines à l'échelle d'une cellule de précipitation.
- Petite taille du réseau → probabilité d'avoir une cellule traversant le réseau faible.

56

Tomographie IRMB

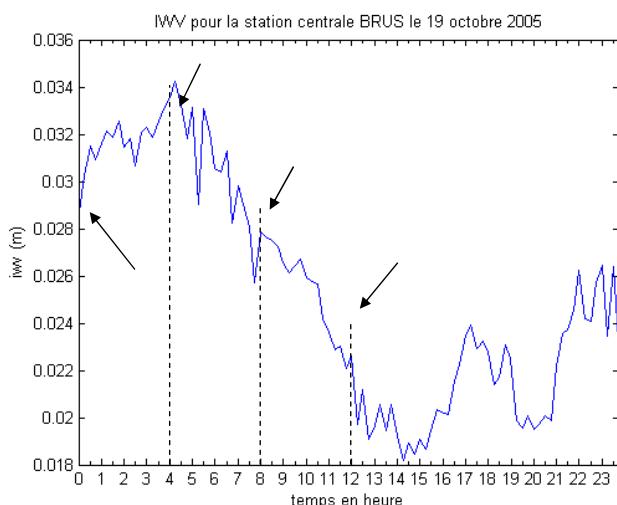
- Environ 70 stations sur l'ensemble du pays.
- Distance entre les stations de 20 à 40 km.



- Permet de suivre l'évolution de phénomènes synoptiques.
- Vérifier le comportement du logiciel de tomographie pour de plus grands réseaux.

57

- Cas du 19 Octobre 2005.
- Passage d'un front de faible activité pluvieuse sur le pays entre 0h et 12h.
- Pluie stratiforme, bruine.

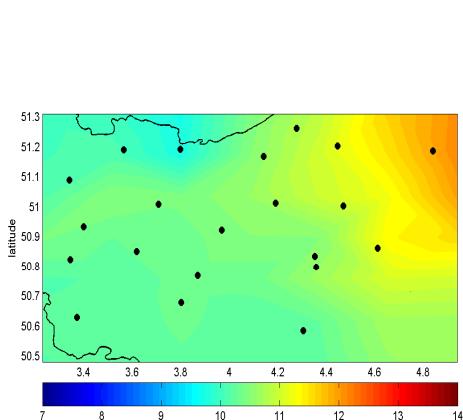


- Augmentation des IWV lorsque la perturbation arrive sur le réseau. 4h
- Diminution progressive pendant la traversée du réseau. 4h-8h
- Résidus observés après 8h

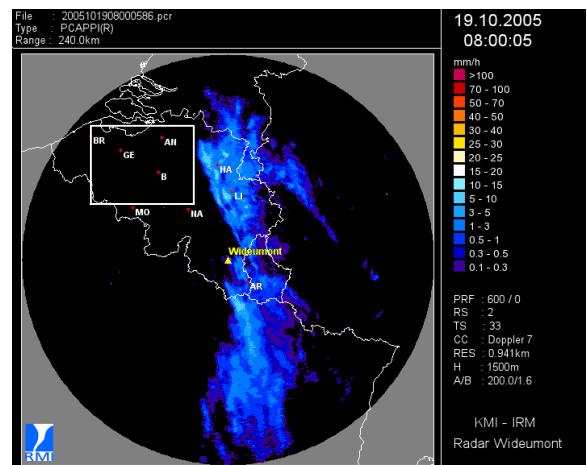
58

III.2. IRMB

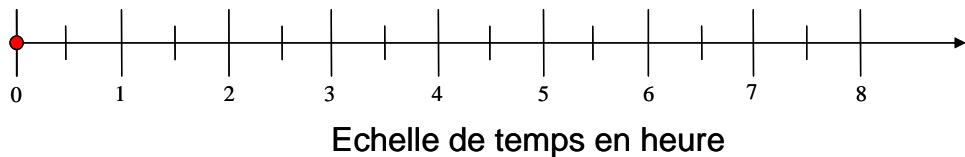
Comparaison entre les résultats tomographiques et les cartes radars.



Densité de vapeur d'eau en g/m³.
Coupe horizontale à 500 m d'altitude.



Précipitation radar en mm/h

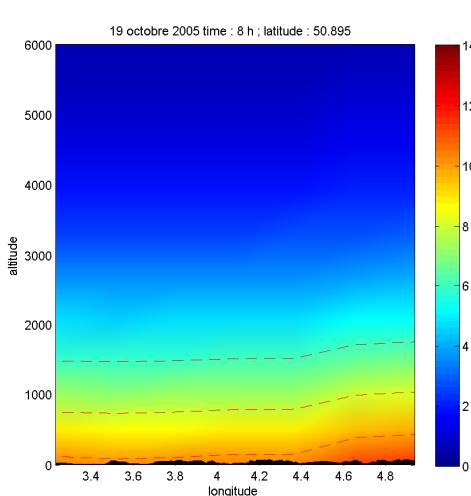


Echelle de temps en heure

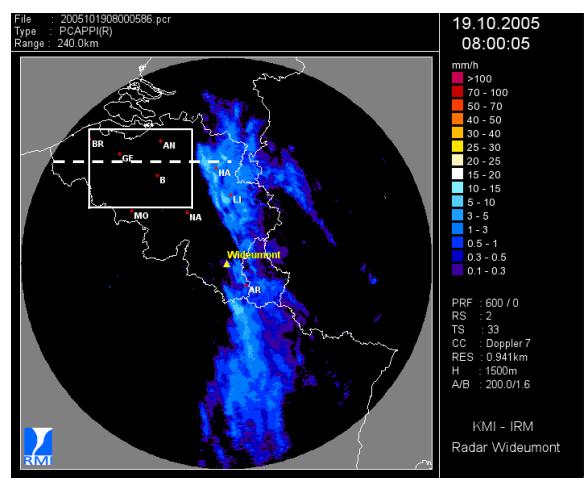
59

III.2. IRMB

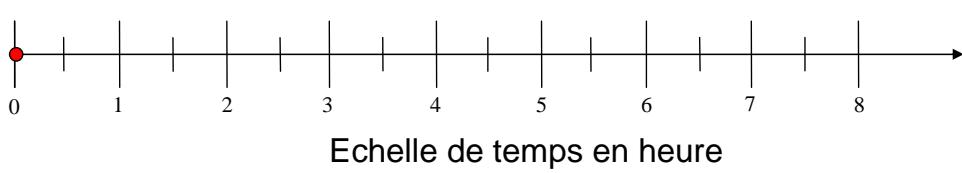
Comparaison entre les résultats tomographiques et les cartes radars.



Coupe verticale Est-Ouest
de la densité de vapeur d'eau en g/m³.



Précipitation radar en mm/h



Echelle de temps en heure

60

Conclusion IRMB

- La vapeur d'eau ne précède pas la perturbation, elle arrive en même temps.
- Saturation d'humidité par la bruine de l'atmosphère.
- Variation verticale entre 1200m (milieu d'épisode) et 100m (début et fin d'épisode).

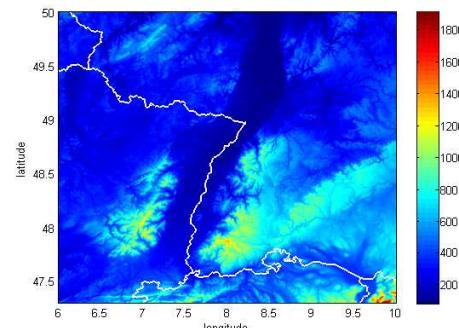
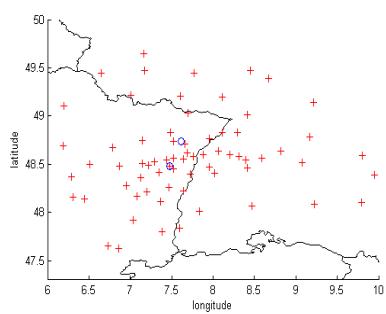
- Petites variations de la série temporelle des IWV correspondant aux passages des bandes pluvieuses ?

- Très bonne couverture quelque soit la zone d'étude.
- Mais peu de relief.

61

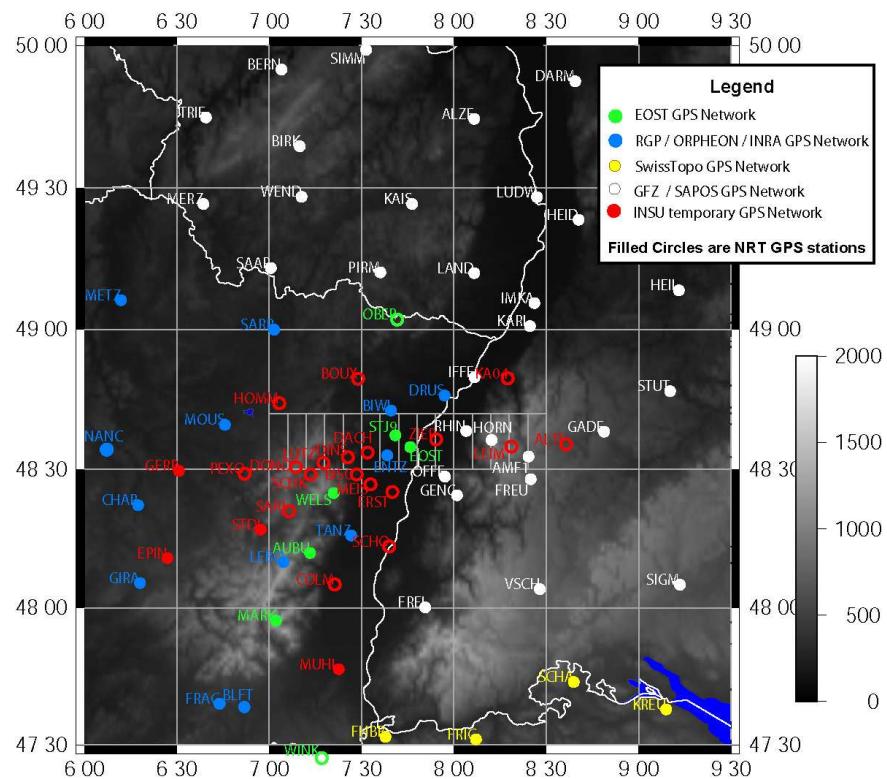
Campagne COPS

- Convective and Orographically-induced Precipitation Study.
- Campagne durant l'été 2007. Déploiement de divers instruments (radar, GPS, etc...) pour étudier des phénomènes météorologiques.
- Réseau GPS d'environ 50 stations avec un espacement d'environ 50 km.
- Localisation intéressante pour connaître l'évolution de la vapeur d'eau dans la vallée du Rhin et pour comprendre les mécanismes liés aux reliefs.



62

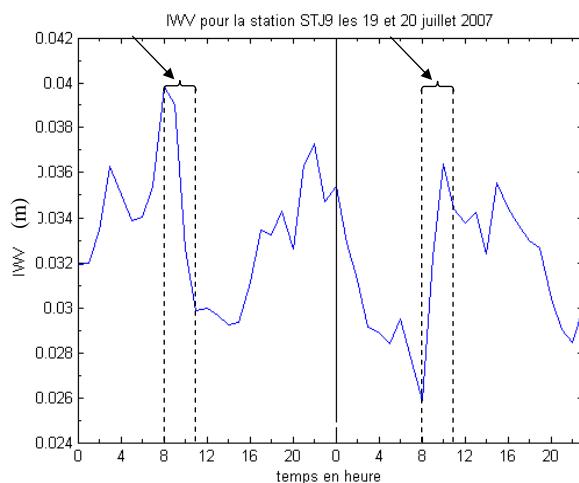
COPS Network



63

III.3. COPS

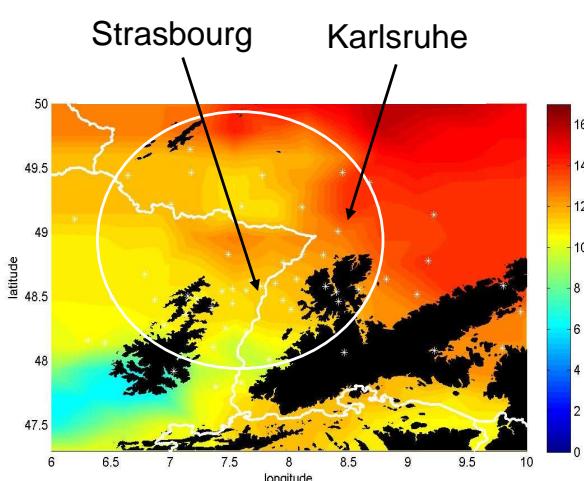
- Cas du 19 juillet entre 8h et 11 h
- Augmentation des IWV au début de l'épisode puis diminution avec les précipitations.



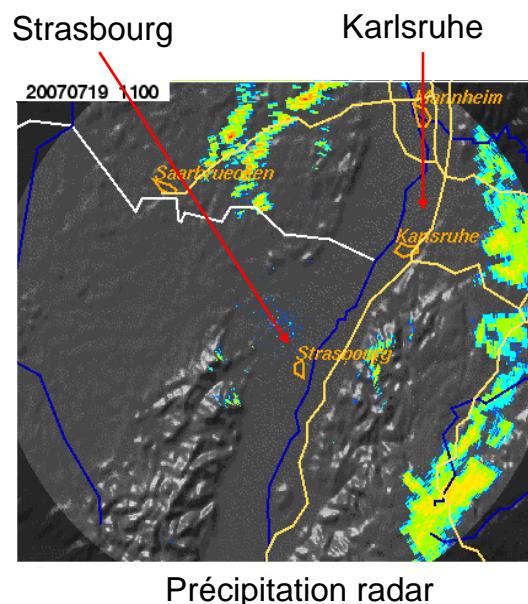
64

III.3. COPS

Comparaison entre les résultats tomographiques et les cartes radars.



Densité de vapeur d'eau en g/m³.
Coupe horizontale à 500 m d'altitude

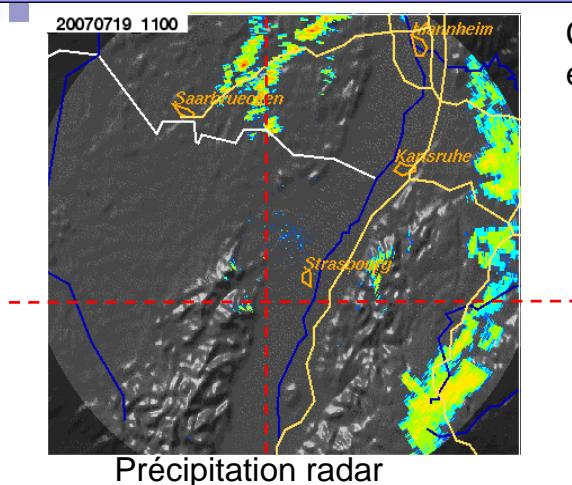


Précipitation radar

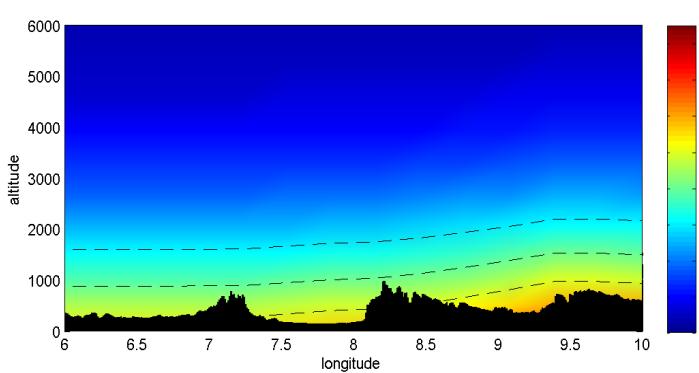
65

III.3. COPS

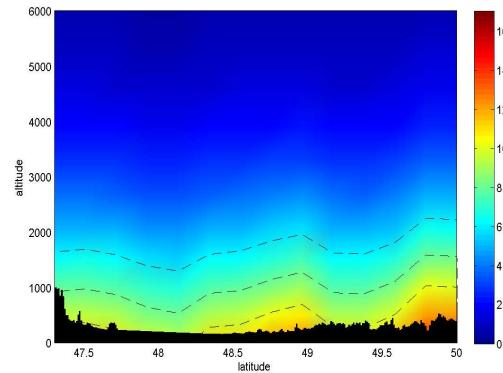
Comparaison entre les résultats tomographiques et les cartes radars.



Précipitation radar



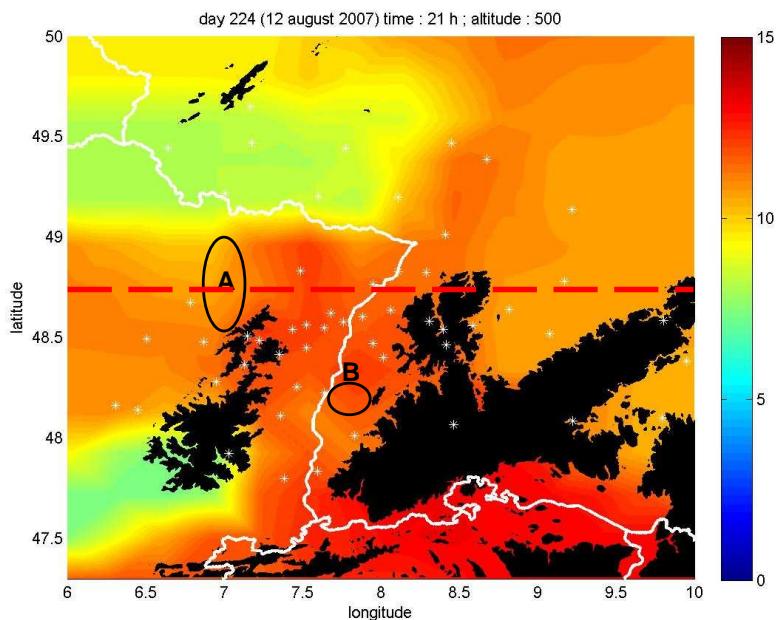
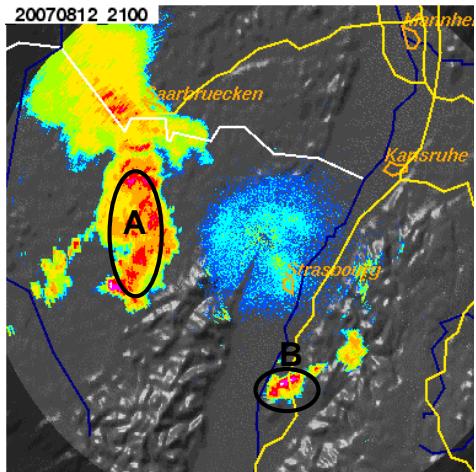
Coupe verticale Est-Ouest (gauche) et Nord-Sud (droite) de la densité de vapeur d'eau en g/m³.



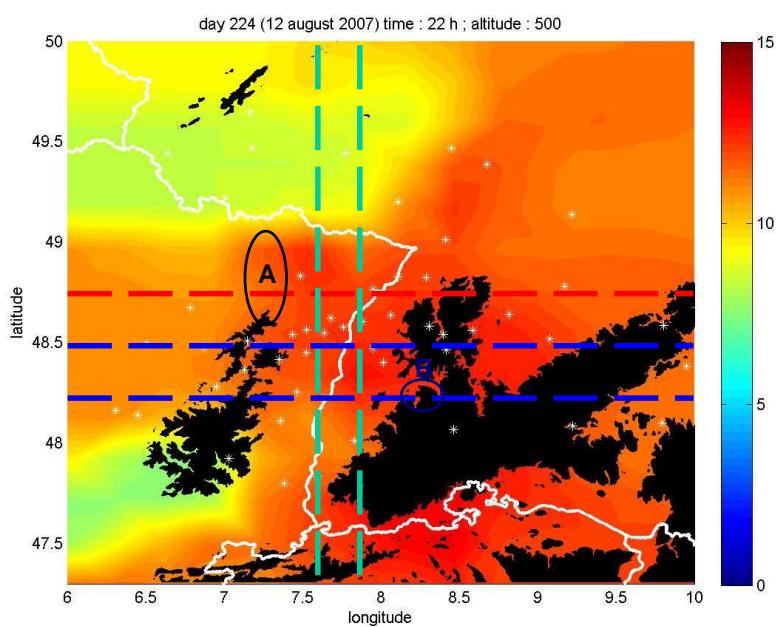
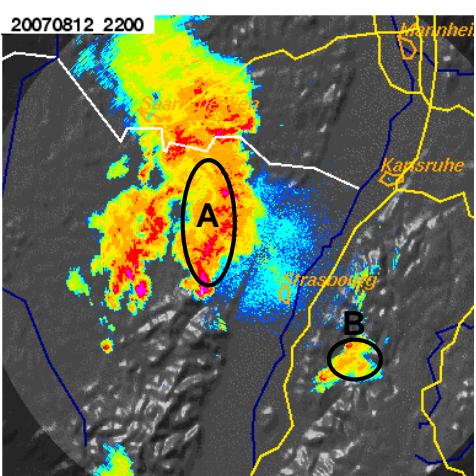
66

GPS Water vapor tomography

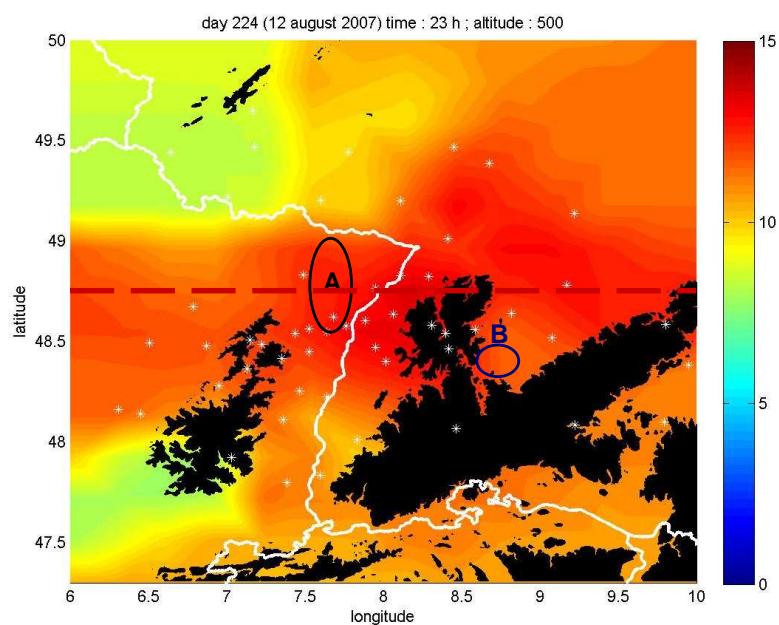
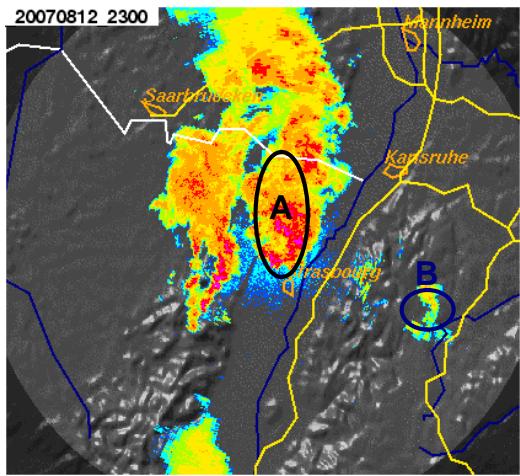
12 AUG. 2007, 21:00 UTC



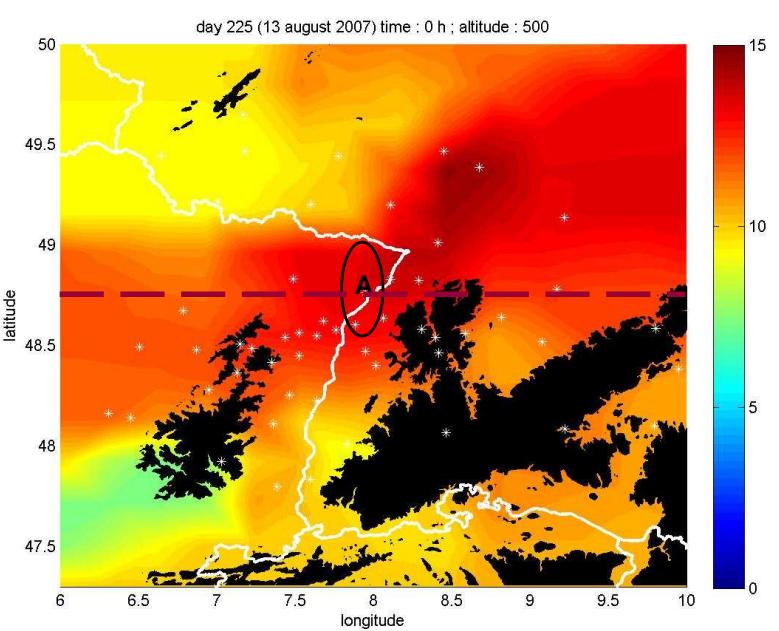
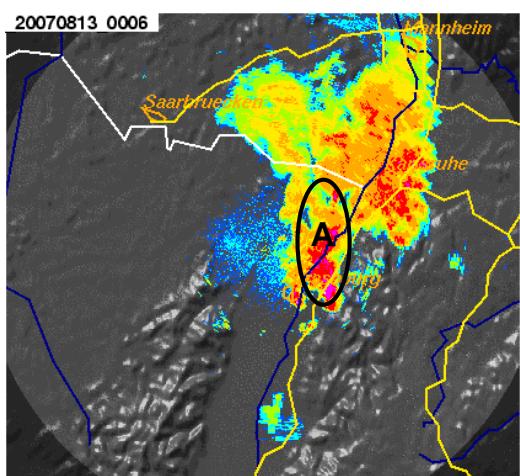
12 AUG. 2007, 22:00 UTC



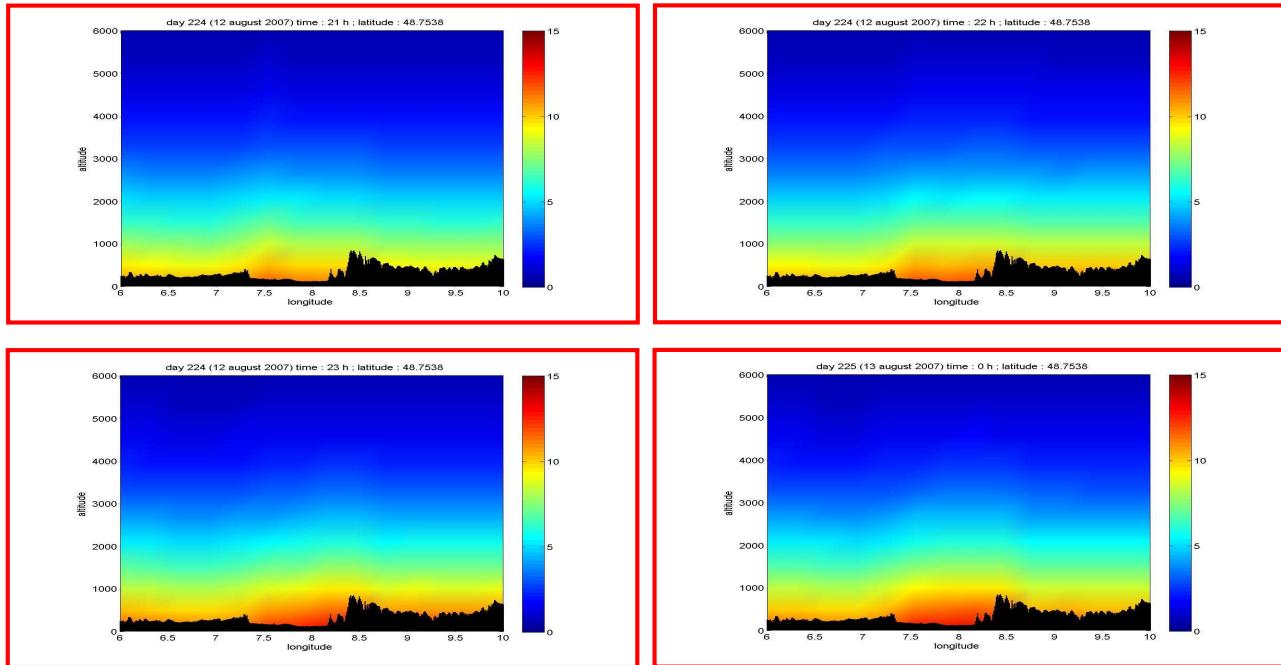
12 AUG. 2007, 23:00 UTC



13 AUG. 2007, 00:00 UTC

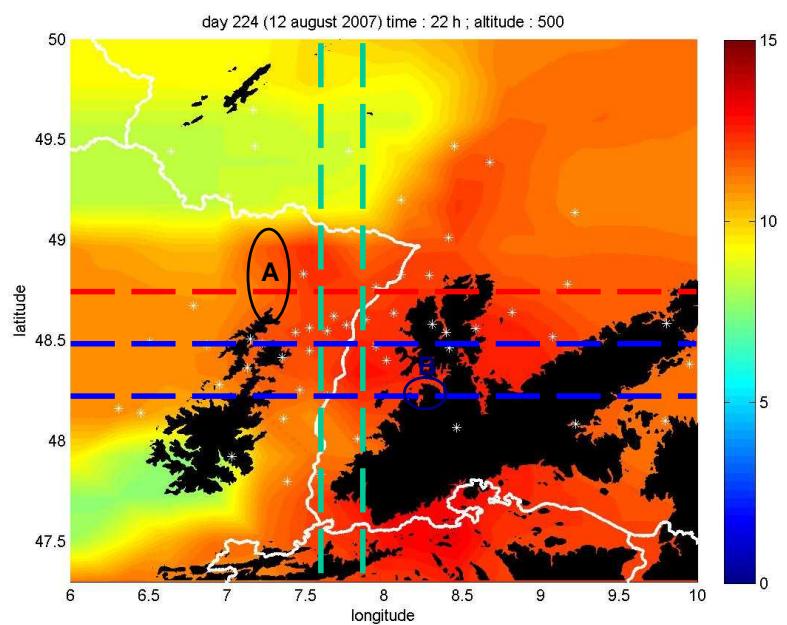
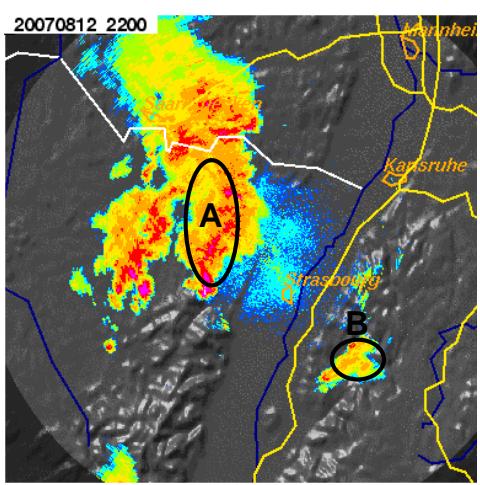


Vertical cut time series



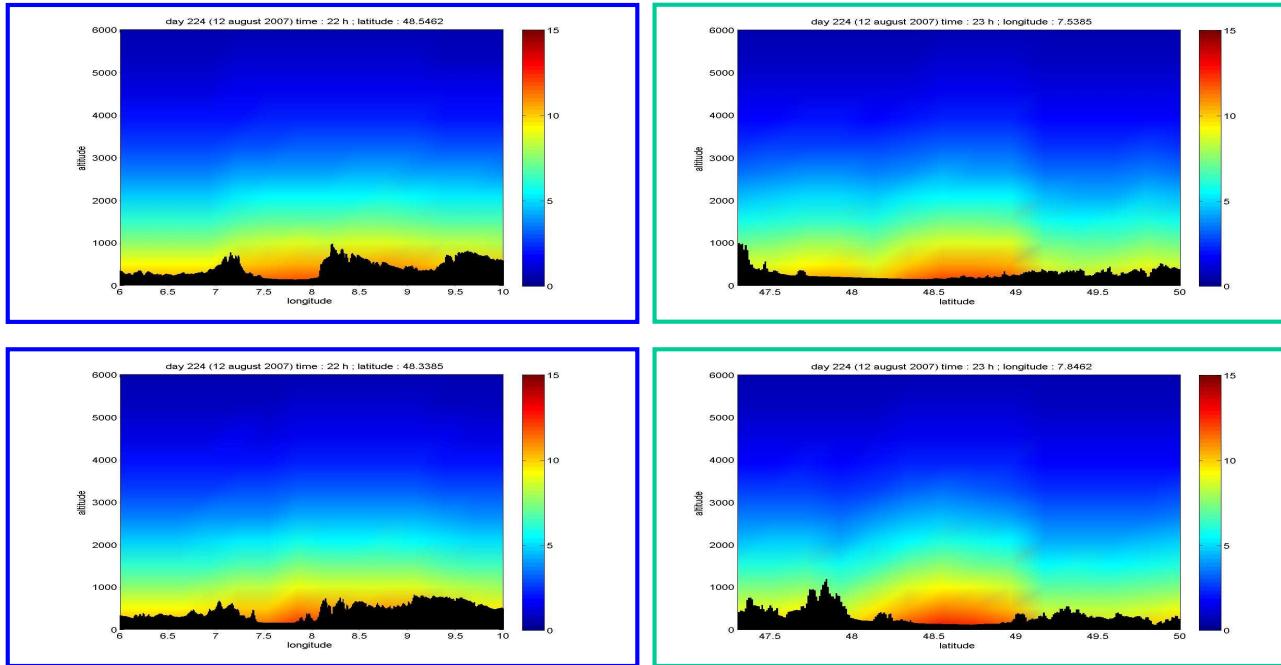
71

12 AUG. 2007, 22:00 UTC





Vertical cuts



73

III.3. COPS

Conclusion COPS

- Humidité présente à la verticale du front pluvieux.
- Déplacement de la vapeur d'eau avec la bande pluvieuse.
- Pas d'humidité entraînée au sol malgré les précipitations fortes.
- Variation verticale entre 1200m (début d'épisode) et 500m (fin d'épisode).

- Bonne couverture de la zone d'étude mis à part quelques effets de bord.
- Relief important.

74

VII. Towards Operational Meteorology

- Large spatial distribution
- Continuous and all-weather operations
- Autonomous and low-cost operations
- Support to radiosoundings
- 4-Dvar models now capable to exploit such data
 - Atmospheric humidity parameterization
 - Data assimilation periodicity

75

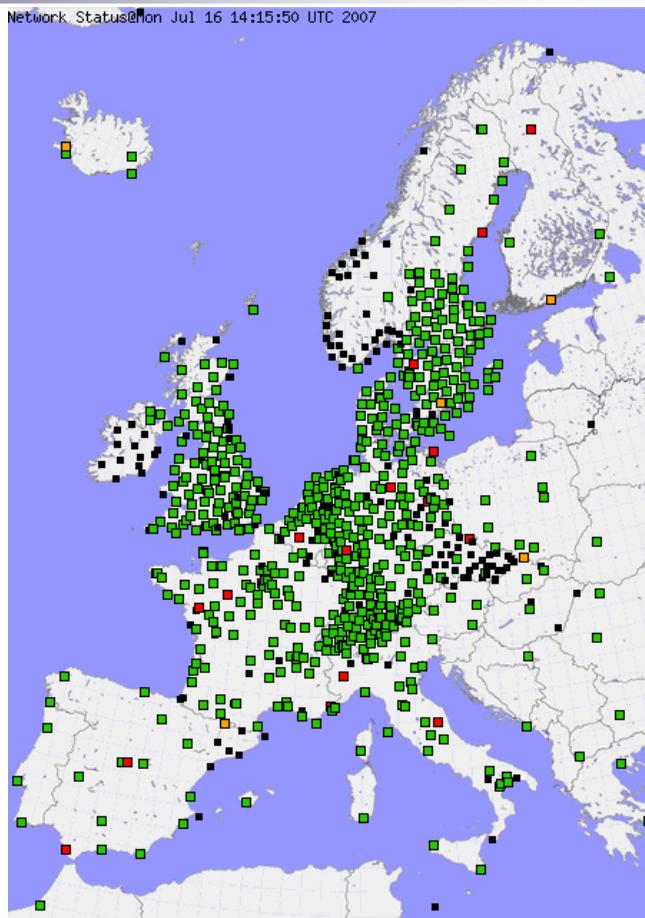
Use of GPS in Operational Meteorology

WMO requirements

	Global	Regional
Horizontal Sampling	100-300 km	50-100 km
Time Resolution	1 - 2 h	15 min – 1 h
Accuracy : IWV	1 - 5 kg/m ²	0.5 – 1 kg/m ²
ZTD	5 - 30 mm	3 – 10 mm
Latency	1 – 2 h	30 min – 2 h

76

Current European Network of GPS Real Time Stations



Use of GPS in Climatology

WMO requirements

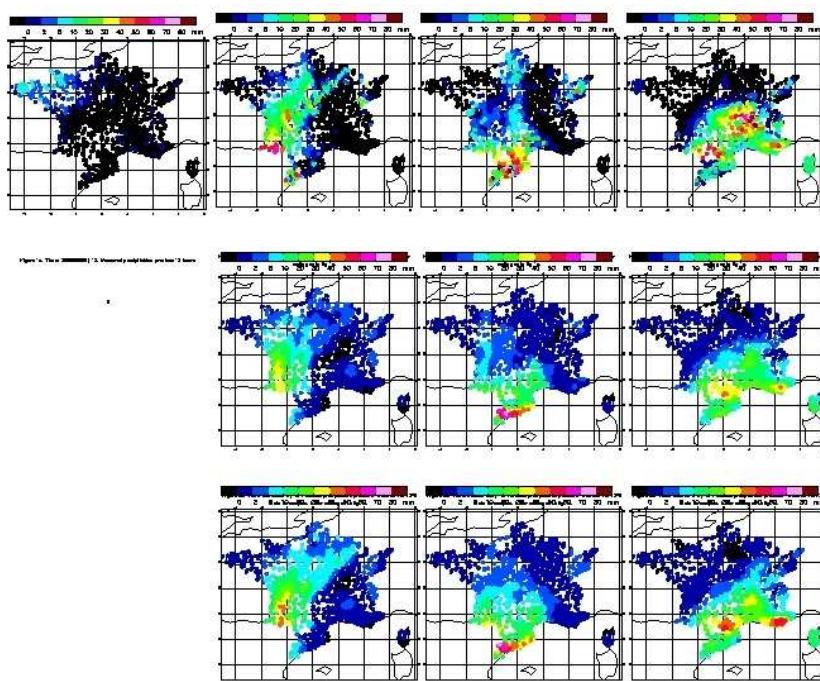
	Column Specific Humidity	Column Specific Humidity	Column Specific Humidity
Horizontal Domain	Global	Local	Special
Horizontal Sampling	1°x 1°/ 2.5°x 2.5°(1)	(2)	(3)
Time Domain	>> 10 years	> 5 years	weeks
Time Resolution	5 days	1 day	hrs
Absolute Accuracy	1 kg/m ²	1 kg/m ²	1 kg/m ²
Long Term Stability	0 – 2 g/m ² /decade	0 – 2 g/m ² /decade	---
Timeliness	1-2 months	1-2 months	1-2 months

Use of GPS data in Numerical Weather Prediction Models

- Experiences have been carried out in the USA (MM5) and in Europe (HIRLAM, LM, ALMo, UKmodel)
- Assimilation of IWV has a generally positive impact upon the restitution of precipitation area and the estimation of precipitation amounts
- Assimilation of IWV provides little impact upon the atmospheric water vapor vertical structure
- Future: assimilation of ZTD (not tributary on P or T), or even assimilation of slant delays
- Experimental: Use of GPS IWV (and wet gradients) to support nowcasting of precipitation and storm development

79

Precipitation forecast effect

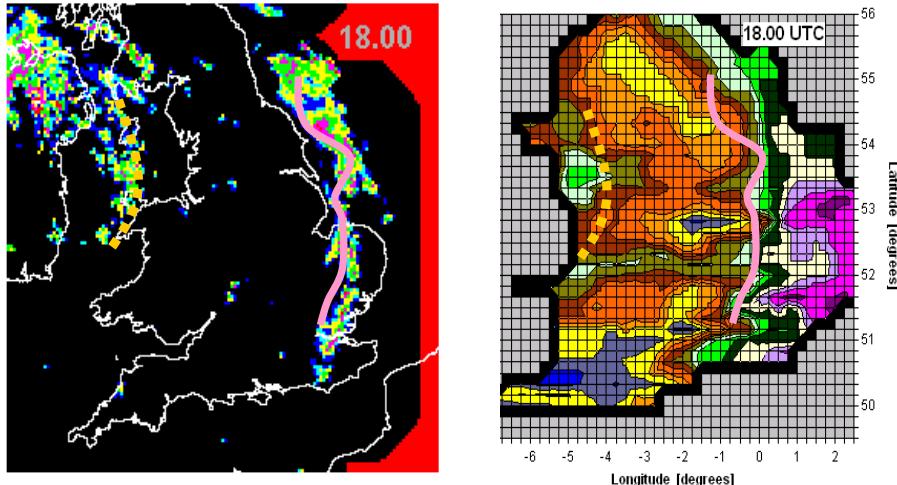


Observations

NWP without
GPS

NWP with
GPS

Now-casting try-outs



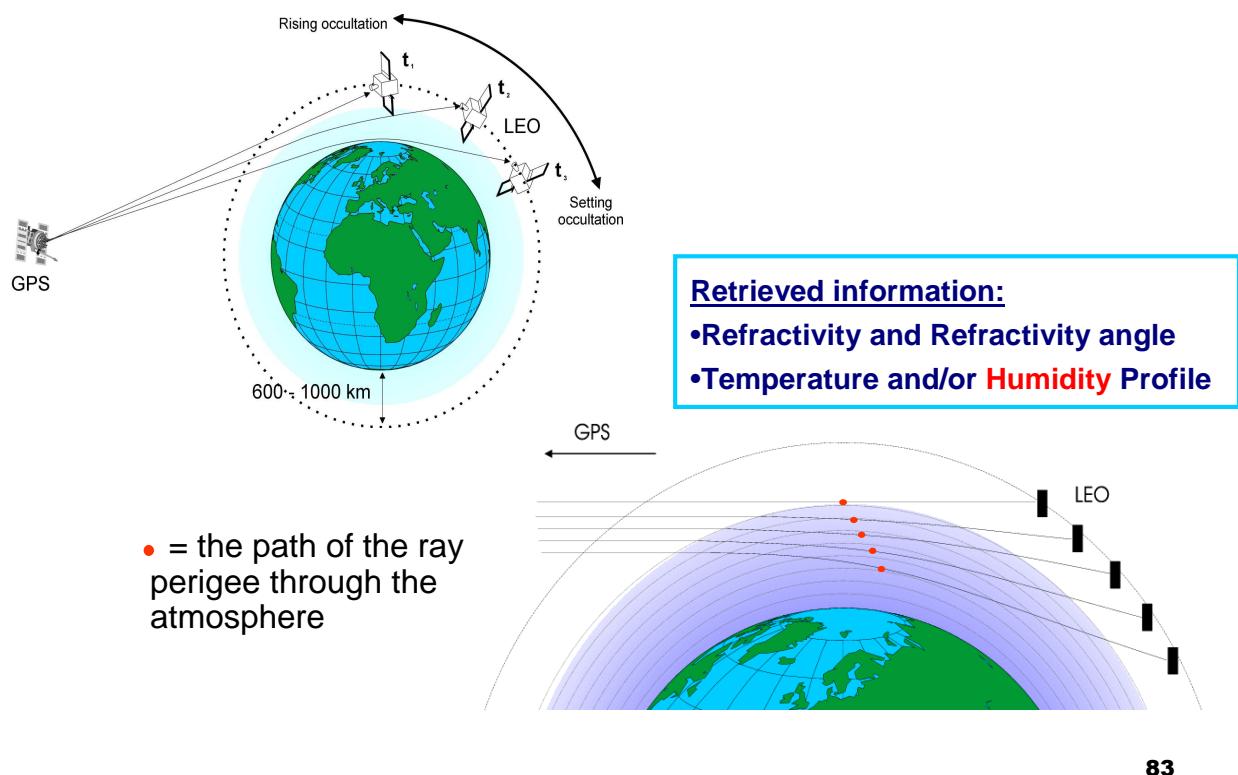
81

VIII. Other applications

- Atmospheric studies with GPS Radio Occultation
- Many other campaigns
 - Puy de Dôme
 - Escompte
 - IHOP
 - COPS
- Combining GPS and Wind Profiler to retrieve the atmospheric humidity profiles
- Using GPS to correct the atmospheric effect on satellite radar interferometry (volcanology)

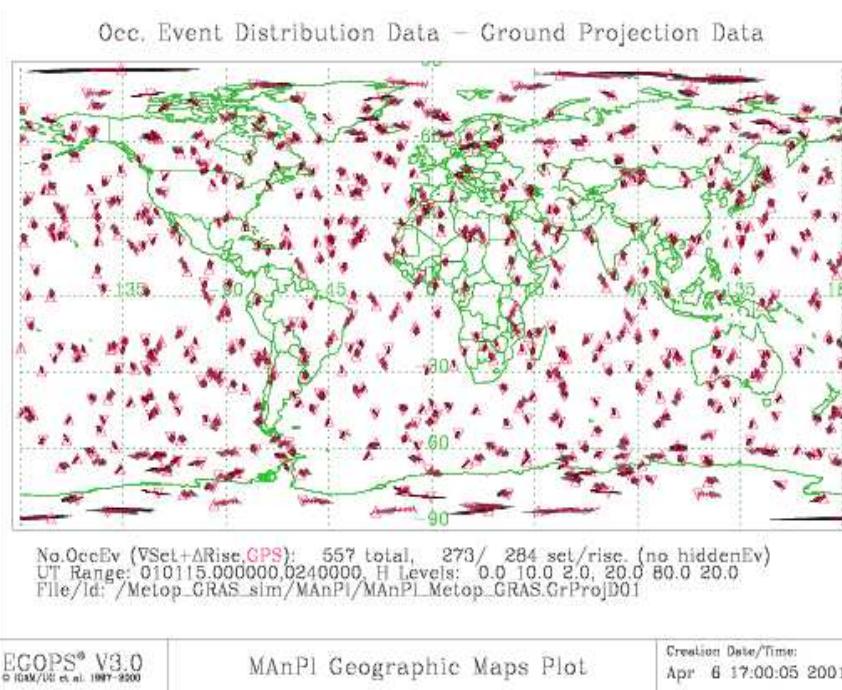
82

GPS radio occultation



83

24 Hours of Radio Occultation (GRASS)

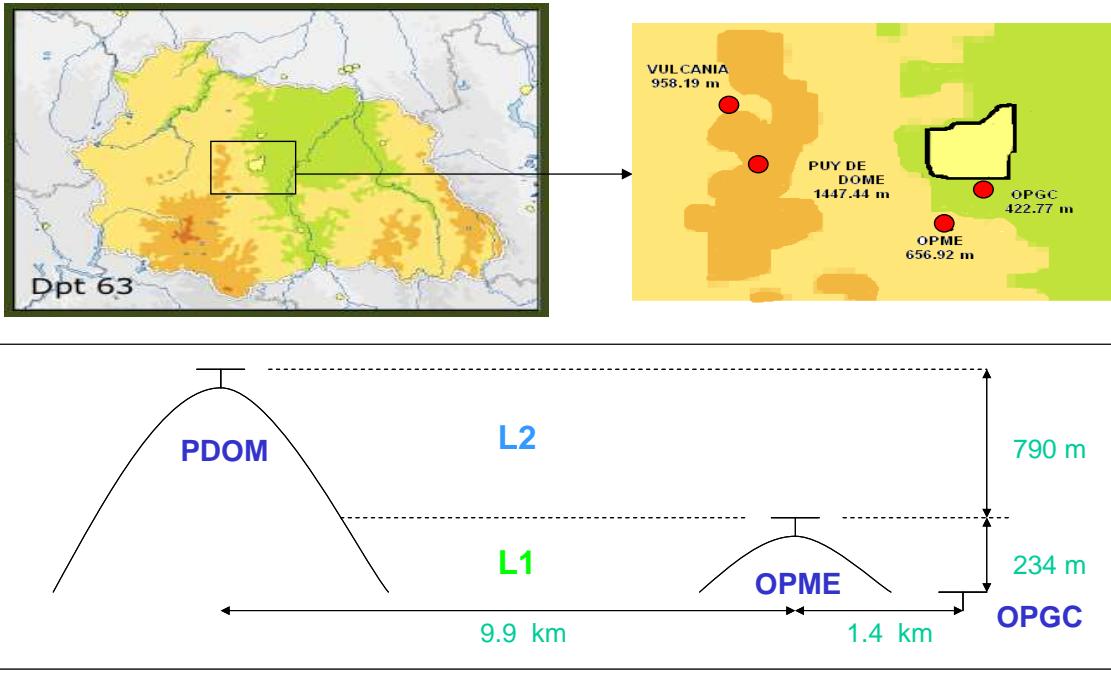


84



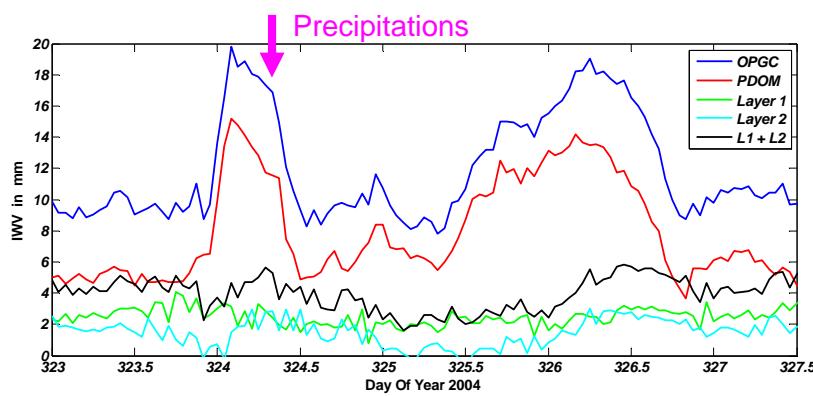
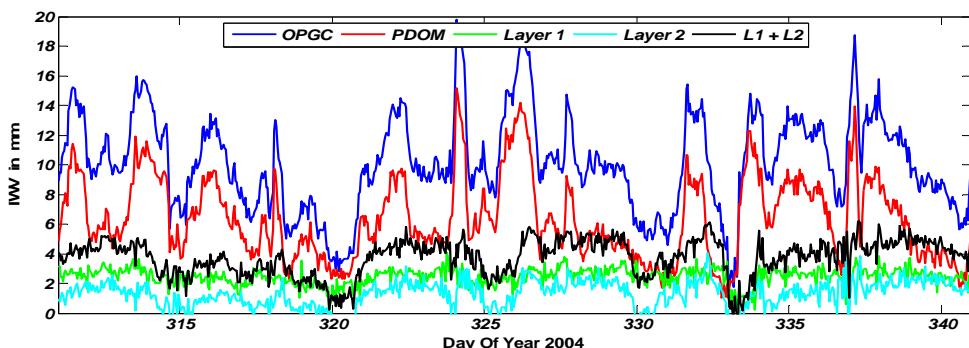
The Puy de Dôme experiment: Vertical variability of water vapor

(Van Baelen et Penide, 2007, to be submitted)



85

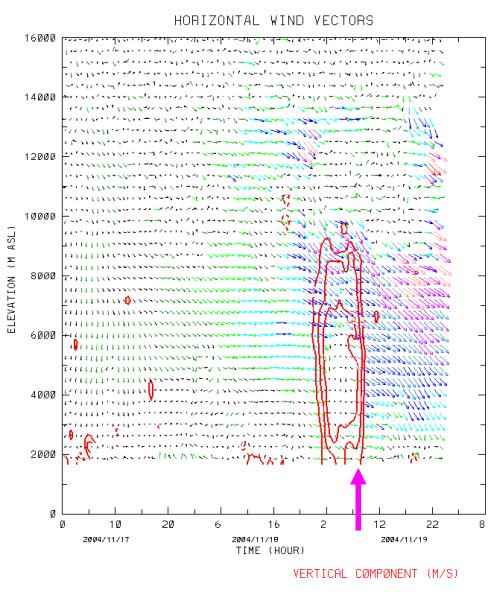
Time series



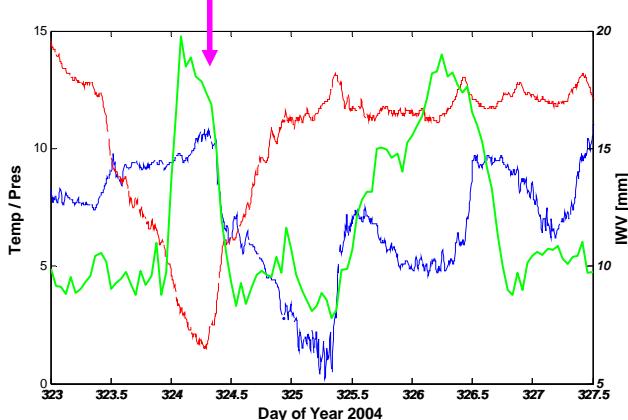
86

Vertical Wind

Pressure and Temperature

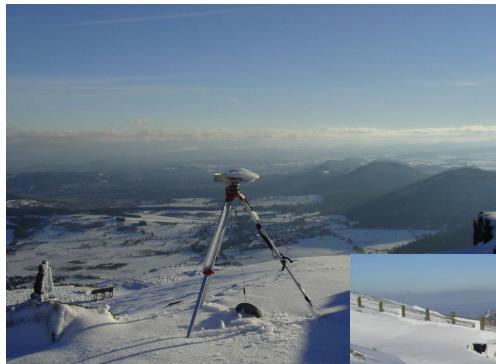


FROM THE 2004/11/17 AT 0:37,15 TO THE 2004/11/19 AT 23:27,26 RADAR = VHF CODE
CFD QVAL = -7



OPGC IWV

87



88



89

* * * * *

90