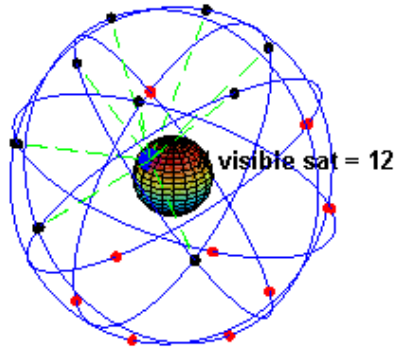




***Restitution du champ de vapeur d'eau 3-D
par tomographie GPS
sur la zone du Piton de la Fournaise
Ile de La Réunion***

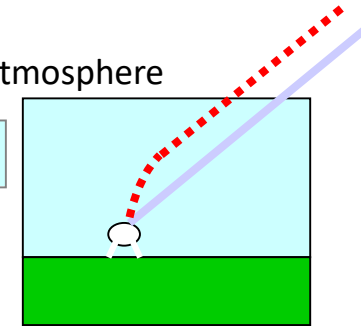
Etat de l'art

Depuis la fin des années 90's, il est établi que les signaux GPS peuvent fournir un observable lié à la vapeur d'eau atmosphérique.



n : atmospheric refractive index
function of the vertical structure of the atmosphere
 P, e, T

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



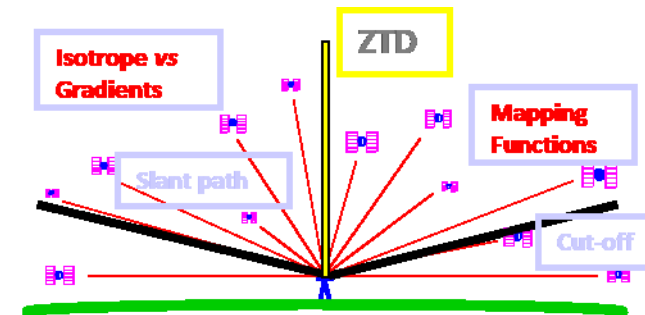
$$ZTD = ZHD + ZWD$$

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

$$T_m = a_0 + a_1 \times T_s$$

→ **IWV = function**

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



Etat de l'art



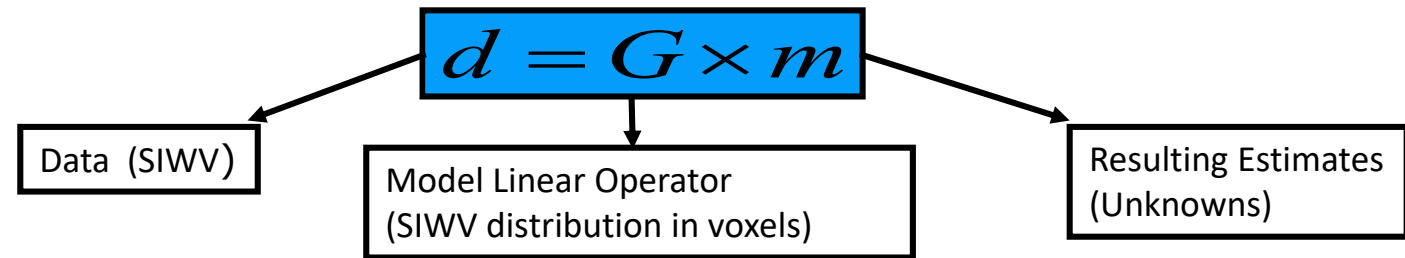
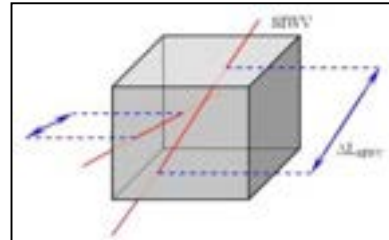
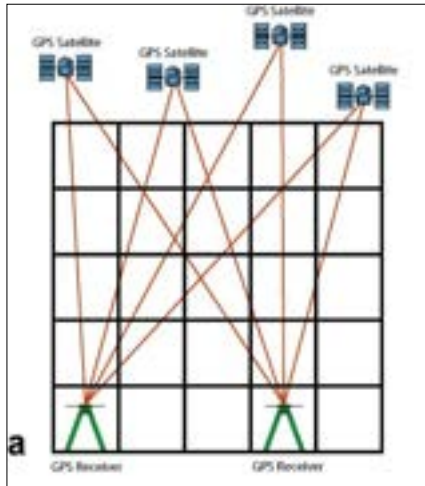
GPS atmosphérique et tomographie GPS: champ de vapeur d'eau

- Station GPS ou quelques stations éparses:
 - Séries temporelles locales à long terme (ZTD, gradients, IWV, ...)
 - Etudes de la variabilité du contenu intégré de la vapeur d'eau (IWV) en lien avec d'autres paramètres météorologiques (taux de pluie, ensoleillement, ...)
 - Mesures combinées avec d'autres instruments (radiomètres, profileurs de vent, ...)
- Réseau large mais peu dense de stations GPS:
 - Cartes 2-D du contenu intégré de vapeur d'eau sur une large zone
 - Etude de l'évolution globale du champ de vapeur d'eau pour des études de cas
- Réseau dense de stations GPS:
 - Tomographie GPS

Etat de l'art



Inversion tomographique pour la restitution du champ 3D de vapeur d'eau



Inversion :

$$m^{est} = m_0 + L \times (d - G \times m_0) \quad (\text{LSWF method})$$

With

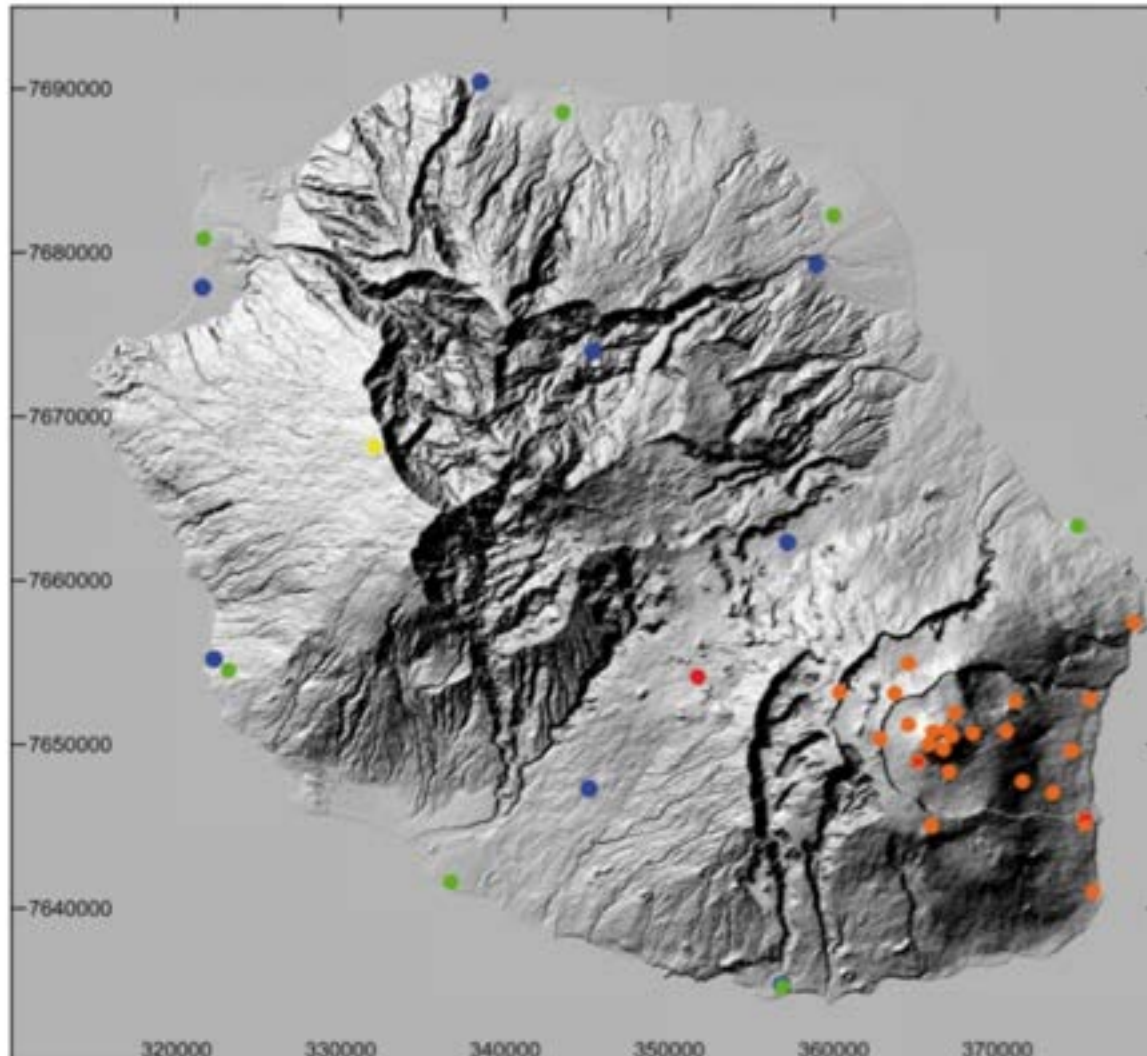
$$L = (G' \times W_e \times G + \alpha^2 \times W_m)^{-1} \times G' \times W_e$$

$W = \text{variances/covariances inverse matrices}$

$\alpha = \text{weighting factor}$

Etat de l'art

Réseaux GPS et données



- Existence d'un réseau grande échelle sur le SOOI (IOGA4MET), d'un réseau à l'échelle de l'île de La Réunion et d'un réseau à l'échelle locale sur le Piton de la Fournaise.
- Traitement des données de l'ensemble des stations de l'île de La Réunion effectué par l'OVPF de façon automatisée.
- Séries temporelles sur le long terme de positionnement mais aussi des paramètres atmosphériques (ZTD et gradients):
- Interface existant avec les bases

Verrous scientifiques et perspectives

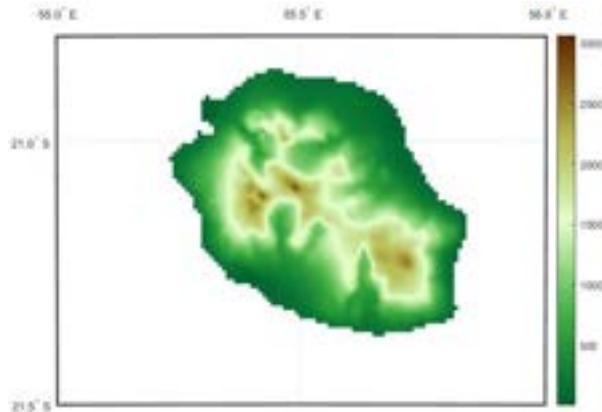


- Accès, formatage, flux des données (GPS, météo, ...) & Traitement des données
- Mise à jour, développement et adaptation de l'algorithme de tomographie GPS
 - Algorithmes développés dans la thèse de Mathieu Reverdy (2008) avec des améliorations successives (2011) et des évolutions notables lors de stages ESGT.
 - Questions d'initialisation cruciales pour la prise en compte des forts gradients topographiques du réseau de stations GPS (voxels de surface vides, atmosphère « standards », calcul T_m , ...).
 - Prise en compte de la forte hétérogénéité géographique du réseau GPS
- Restitution du champ de vapeur d'eau 3-D:
 - Impact du réseau et de sa géométrie/topologie sur la restitution.
Réseau Optimum?
 - Evaluation de la représentativité du champ restitué et de la zone couverte de façon optimum.
 - Extension de la zone du Piton de la Fournaise au territoire de La Réunion
 - Possibilité d'utiliser le champ restitué pour estimer de façon adéquate les biais atmosphériques de mesures INSAR.
- Quid de l'impact sur l'observable atmosphérique GPS du référentiel des stations lors de déplacements induits par l'activité volcanique?

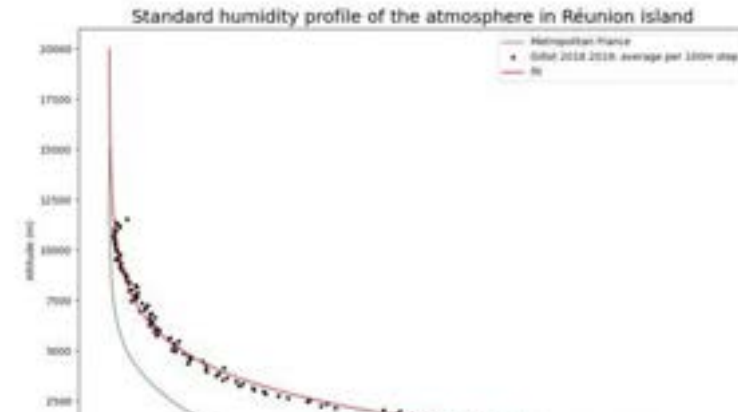
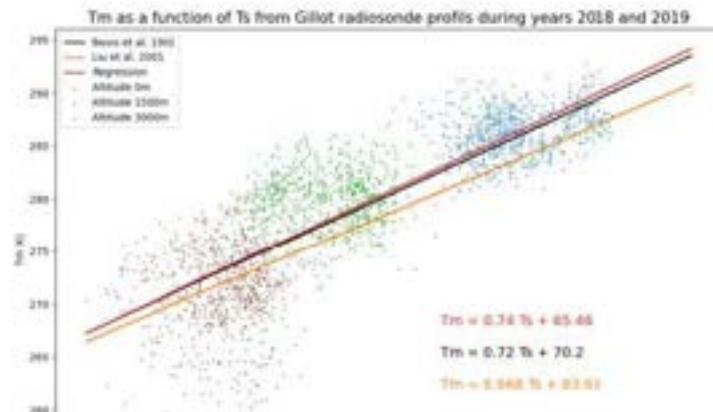
Réalisations (Ludovic HARTER, 2021)



- Adaptation du logiciel
 - Modèle numérique de terrain , positionnement « dynamique » des stations

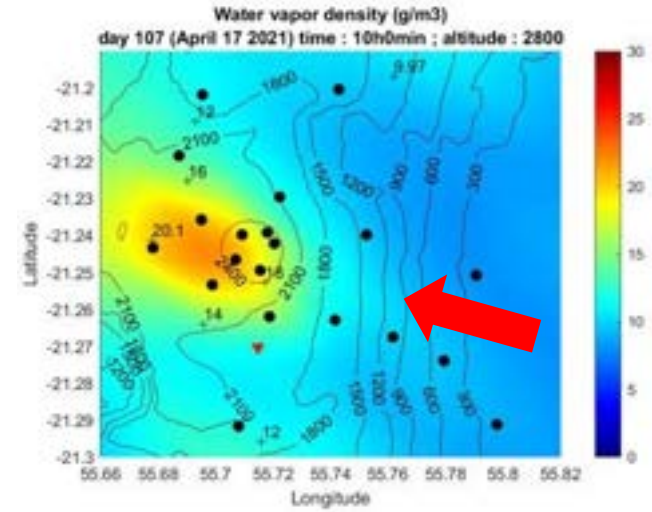
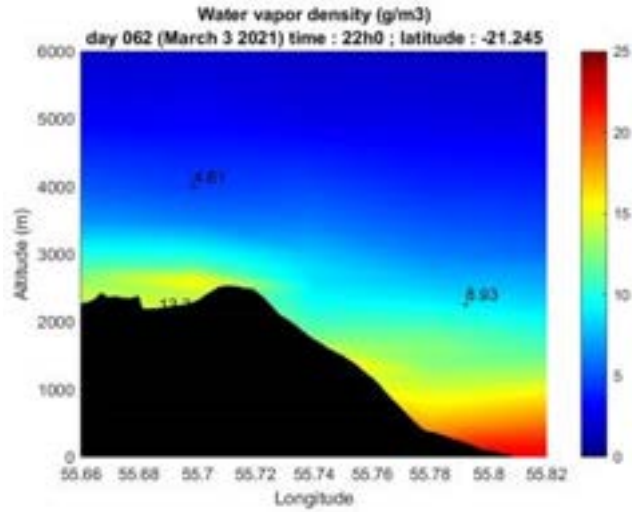


- Atmosphère de référence (calcul de T_m et profil standard de pression)

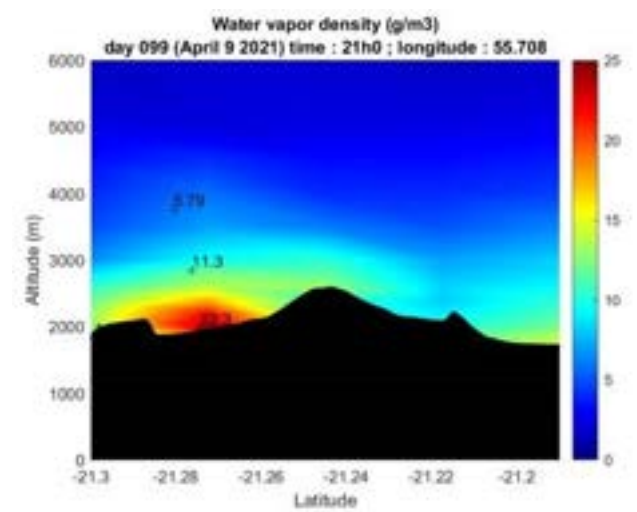
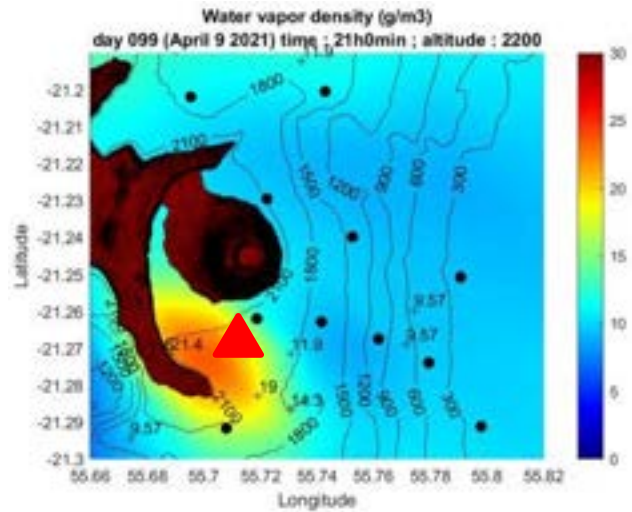


Quelques résultats (Ludovic HARTER, 2021)

- Dynamique atmosphérique

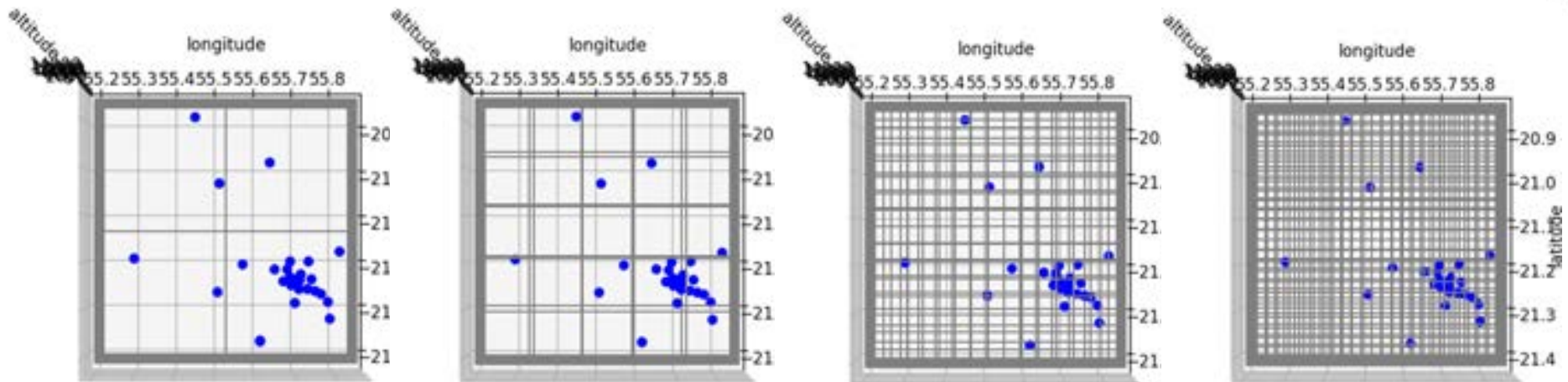


- Panache volcanique



Quelques résultats (Nicolas BASTIEN, 2022)

- Discrétisation horizontale (nombre de voxels)

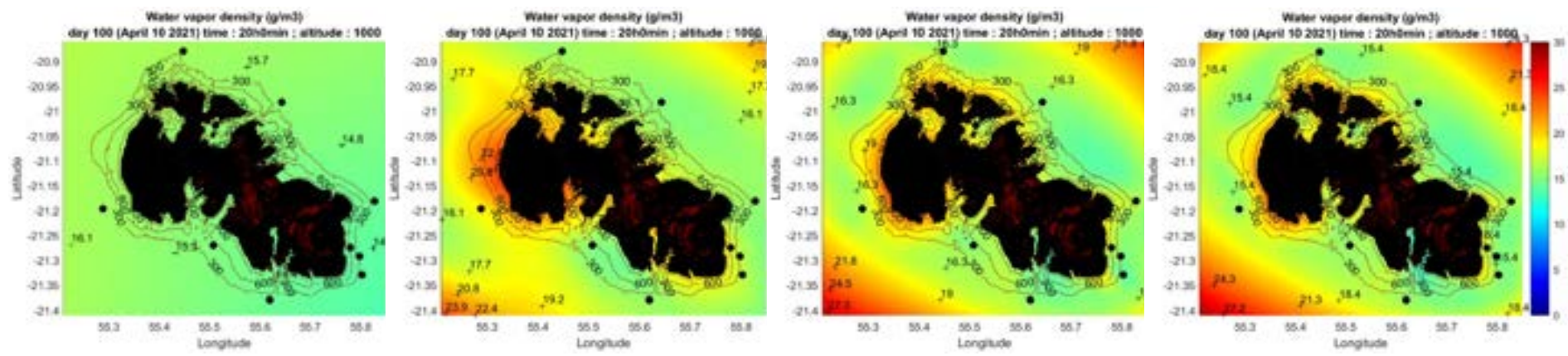


2 X 2 voxels

5 X 5 voxels

15 X 15 voxels

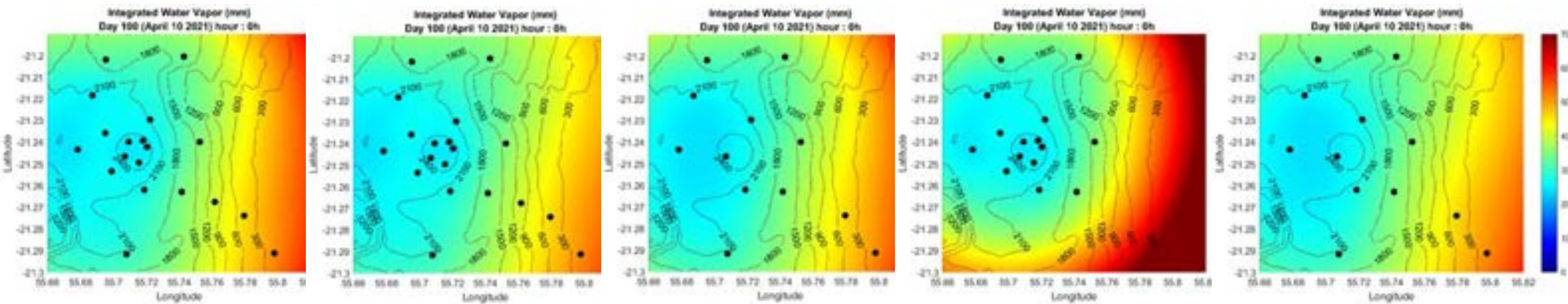
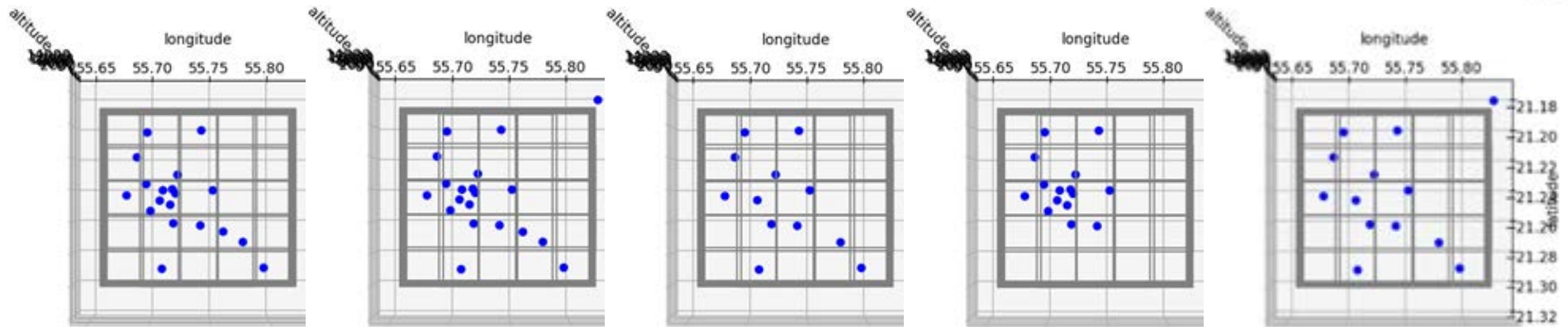
25 X 25 voxels



Densité de vapeur d'eau à 1 000 m

Quelques résultats (Nicolas BASTIEN, 2022)

- Géométrie du réseau

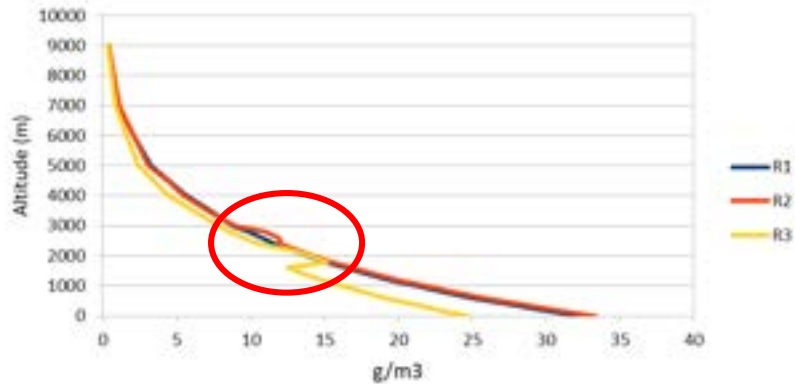


IWW

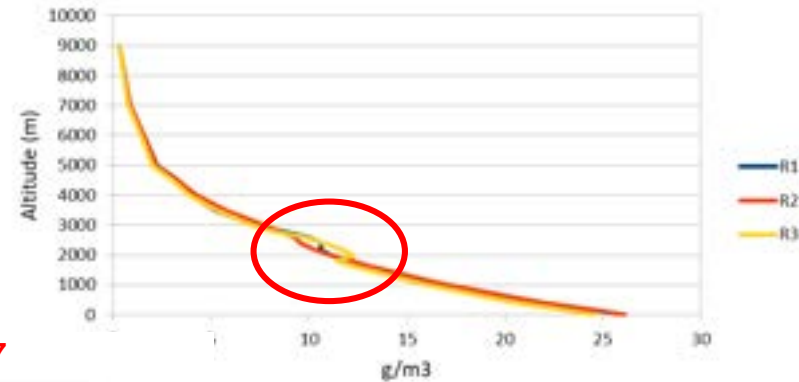
Quelques résultats (Nicolas BASTIEN, 2022)

- OSSE (synthétiques Més0-NH)

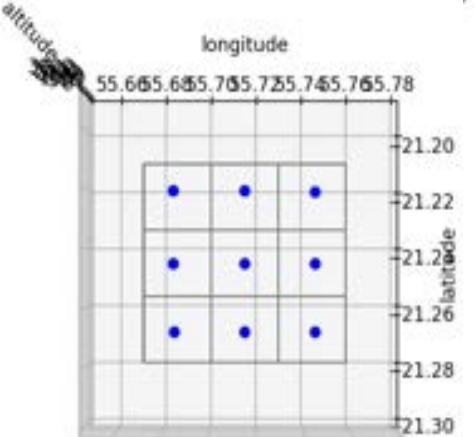
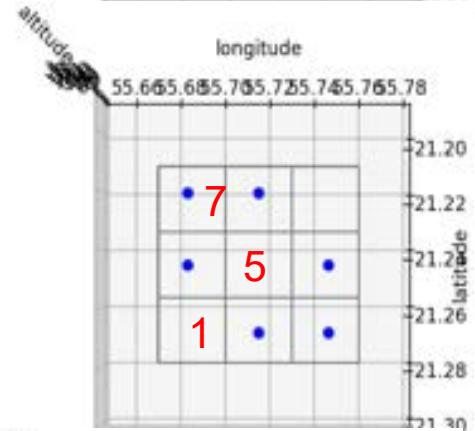
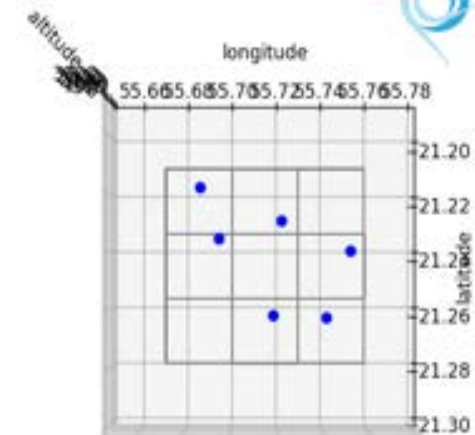
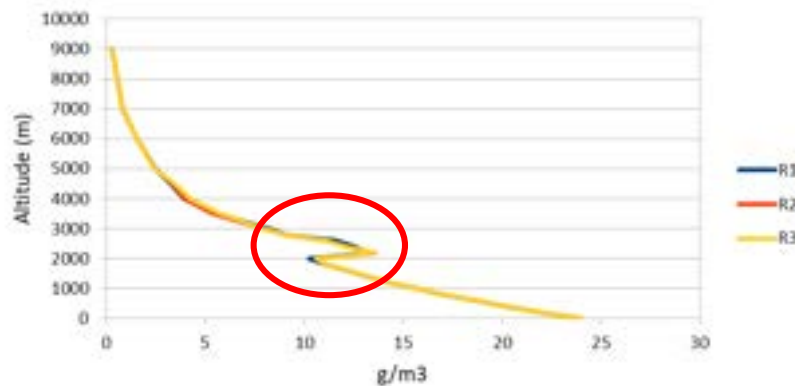
Profils verticaux, colonne de voxels 1 **1**



Profils verticaux, colonne de voxels 5 **5**



Profils verticaux, colonne de voxels 7 **7**



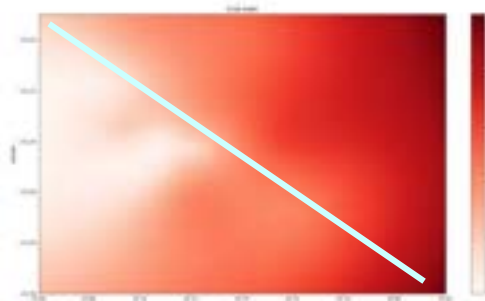


Éléments de conclusion

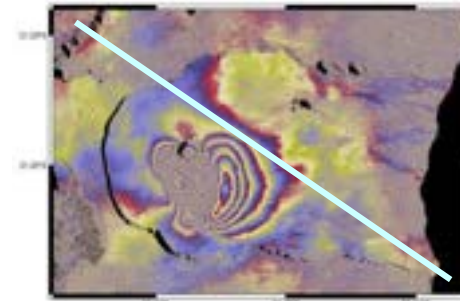
- Calcul des ZTD automatisé robuste à l'OVPF incluant toutes les stations Réunion et quelques stations OI
- Flux de données établi via OSU-R (GPS) et Météo France (météo)
- Algorithme d'inversion tomographique adapté et robuste pour son application à la Réunion, notamment autour du Piton de la Fournaise et potentiellement sur l'ensemble du territoire de la Réunion
- Outils de simulation de réseau GPS disponible pour l'optimisation du dispositif et son extension la plus adéquate pour renforcer les mesures
- Intérêts évident illustrés par des études de cas sur la dynamique du champ de vapeur d'eau.

Éléments de prospective ...!

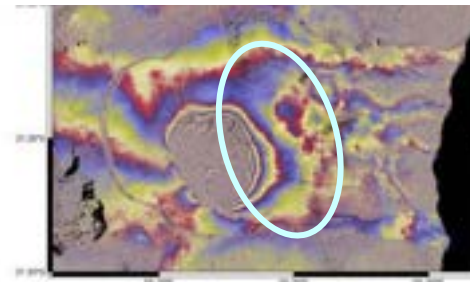
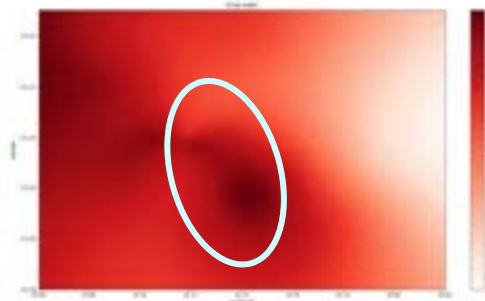
- Consolidation méthodologique et corrections InSAR...
ce qui nécessite également l'élargissement du domaine de restitution !!



Absolute values of the differences of the inclined IWV with respect to the satellite aiming angle of the ascending interferogram (in mm) between its two acquisition dates



Sentinel-1 ascending interferogram of the Piton de la Fournaise of 2021/03/30 at 14h52 UTC and 2021/04/11 at 14h52 UTC (Jean-Luc Froger)



Sentinel-1 descending interferogram of the Piton de la Fournaise of 2021/03/31 at 01h46 UTC and 2021/04/12 at 01h46 UTC (Jean-Luc Froger)

- Extension de l'utilisation du champ de vapeur d'eau restitué de façon opérationnelle en plus des études de cas ad 'hoc, notamment vers la météorologie et vis-à-vis des modèles (assimilation).



Merci pour votre attention!

Questions ?