



Caractérisation des perturbations ionosphériques itinérantes induites par les ondes de gravité générées par les orages à l'aide d'un réseau dense de capteurs GNSS

Thomas Farges (1), Elvira Astafyeva(2), et Elouan Princelle (1,2)

(1) CEA, DAM, DIF, F-91297 Arpajon, France

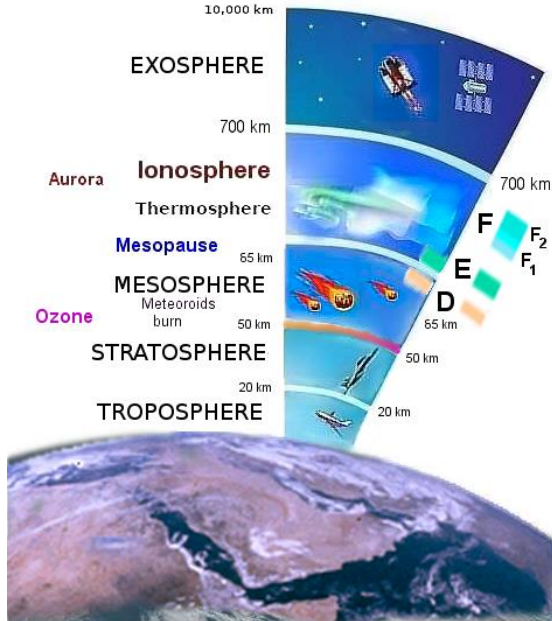
(2) Institut de Physique du Globe de Paris (IPGP), Université de Paris, CNRS UMR 7154, Paris, France



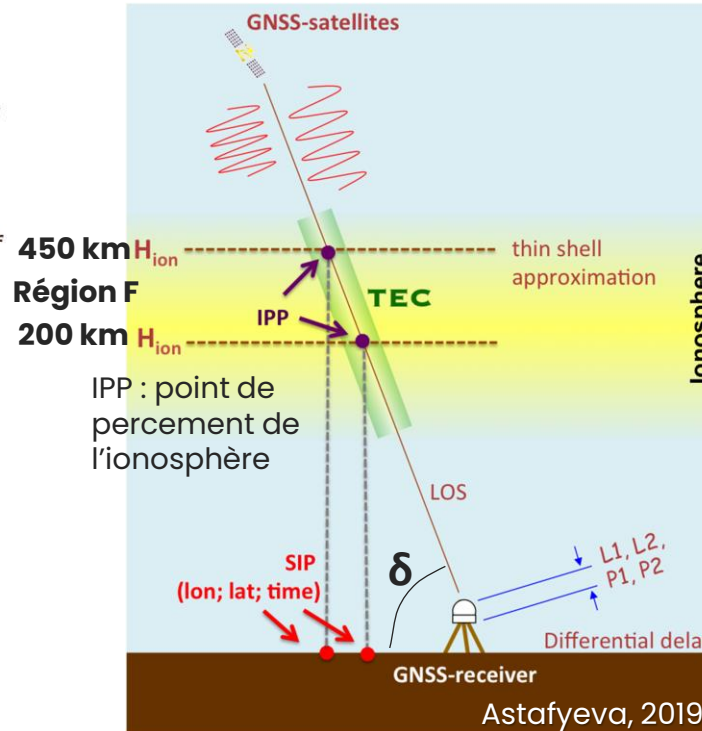
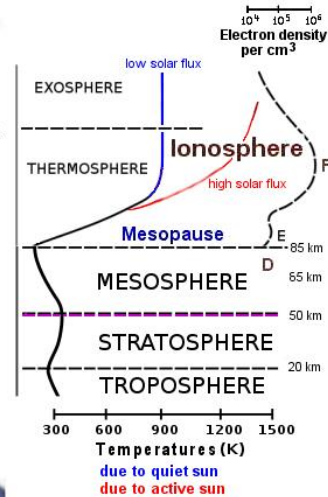
Plan de la présentation

- 1. Ionosphère et mesures GNSS**
- 2. Contexte de notre étude**
- 3. Effet des ondes de gravité sur l'ionosphère et leur mesure avec réseaux GNSS**
- 4. Analyse de cinq orages en Europe occidentale**
- 5. Conclusion**

Ionosphère et sondage par mesure GNSS



<https://www.qsl.net/4x4xm/Propagation/Radio-Communication-and-the-Ionosphere.htm>



$$TEC = \int_{raypath} N_e dl$$

exprimé en
unité TEC ou
TECU (= 10¹⁶
e/m²)

TEC (contenu électrique total) avec phases L₁ et L₂ des porteuses du signal GNSS [fréquences **f₁ = 1575,42 MHz** et **f₂ = 1227,6 MHz**, pour GPS, et longueurs d'onde respectives λ₁ et λ₂].

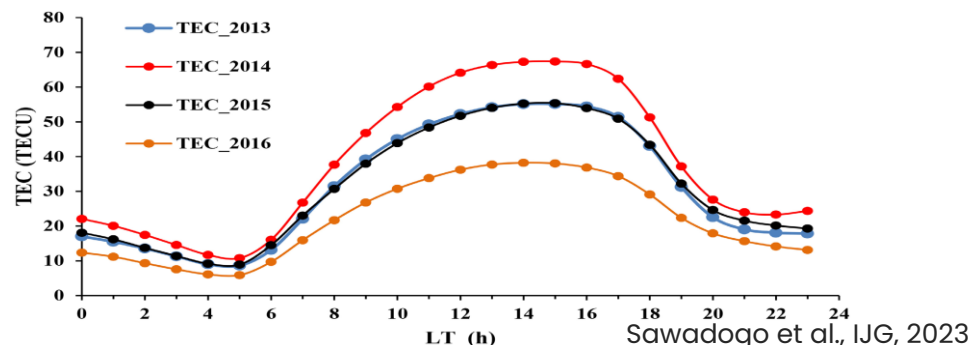
$$STEC = \frac{1}{40.26} \times \frac{f_1^2 f_2^2}{(f_1^2 - f_2^2)} \times (L_1 \lambda_1 - L_2 \lambda_2 + nL)$$

Pour normaliser l'amplitude du TEC et d'éviter les effets liés aux **faibles angles d'élévation** δ, STEC peut être converti en TEC vertical ainsi :

$$VTEC = STEC \times \cos \left[\sin^{-1} \left(\frac{R_E}{R_E + H_{ion}} \times \cos \delta \right) \right]$$

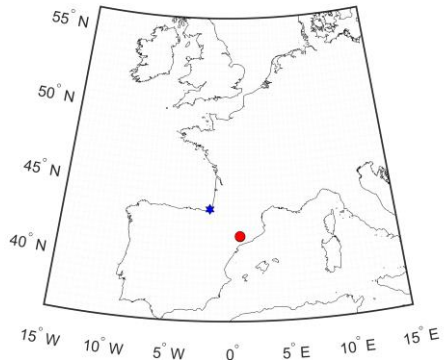
avec R_E le rayon terrestre et H_{ion} l'altitude de la couche mince ionosphérique.

Variation diurne de **quelques dizaines de TECu**

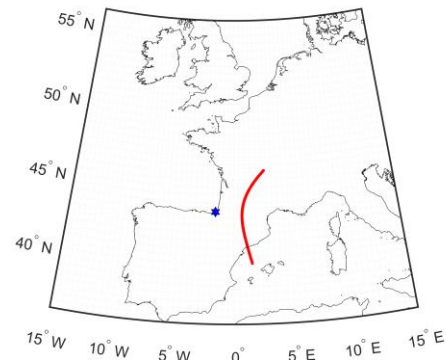


Intérêt des mesures avec un réseau dense de capteurs GNSS

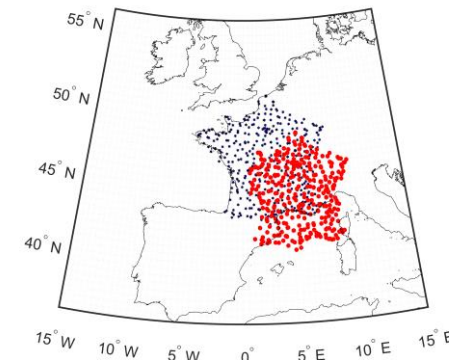
1 récepteur, 1 satellite, 1 pas de temps



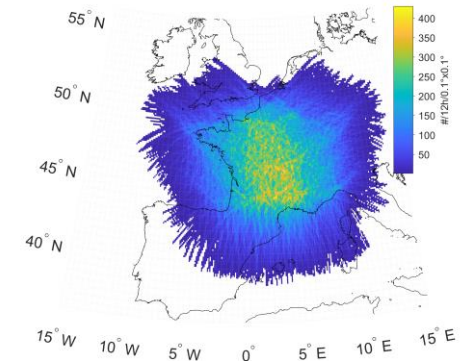
1 récepteur, 1 satellite, 12 h



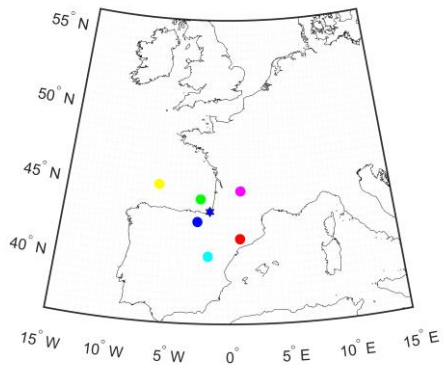
389 récepteurs, 1 satellite, 1 pas de temps



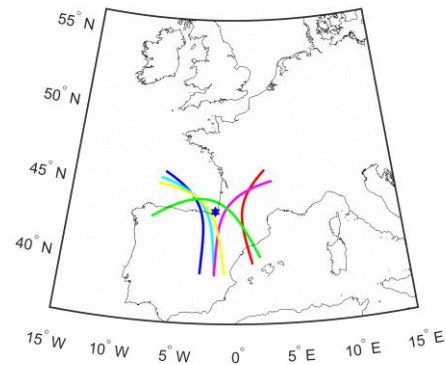
Densité de mesures en 12 h par
389 récepteurs du réseau de l'IGN
et 20 satellites
(moyenne : ~90 mesures par $0,1^\circ \times 0,1^\circ$)



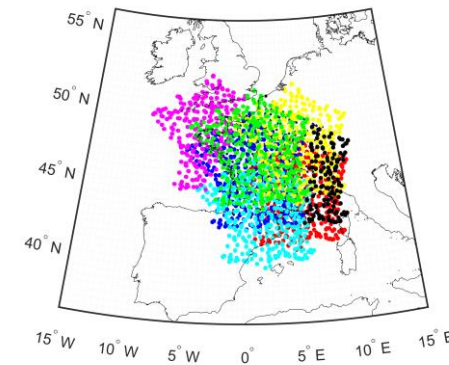
1 récepteur, 6 satellites, 1 pas de temps



1 récepteur, 6 satellites, 12 h



389 récepteurs, 6 satellites, 1 pas de temps



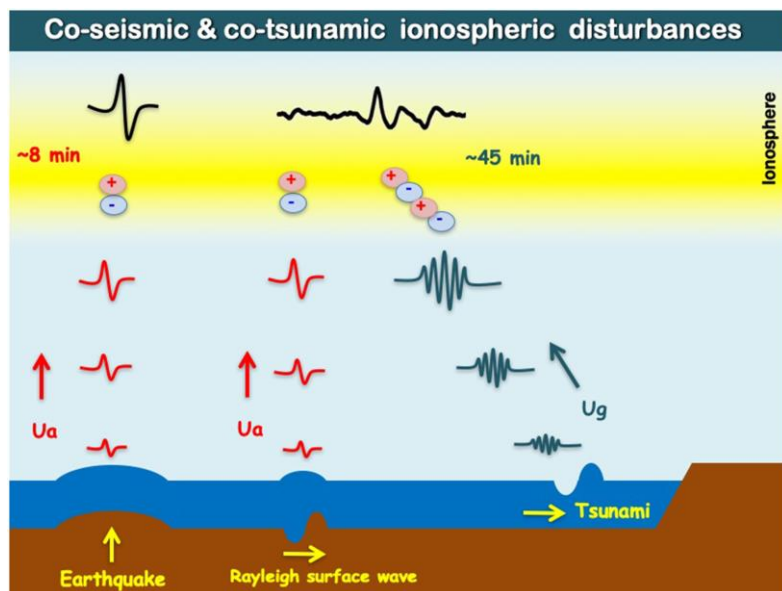
Contexte : suivi des aléas naturels



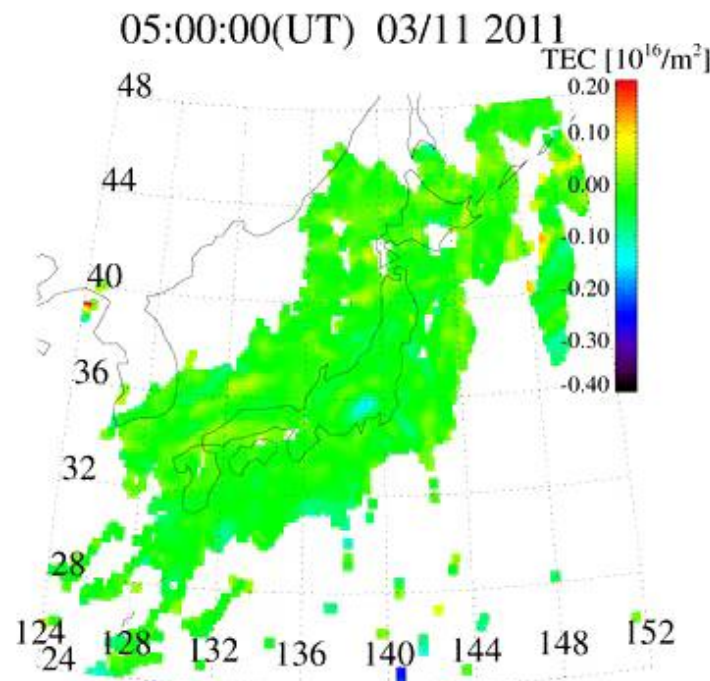
Séismes et éruptions volcaniques génèrent des ondes acoustiques. **Les tsunamis émettent des ondes de gravité.** Ces ondes sont mesurables dans l'ionosphère grâce à l'amplification due à la diminution exponentielle de la densité atmosphérique.

La couverture des récepteurs GNSS largement au-delà des côtes pourrait permettre la détection et l'alerte en cas de tsunamis. Des algorithmes de détections temps réel sont en cours de développement (Maletckii & Astafyeva, 2024).

Est-ce que les ondes de gravité générées par les orages peuvent perturber cette détection ?



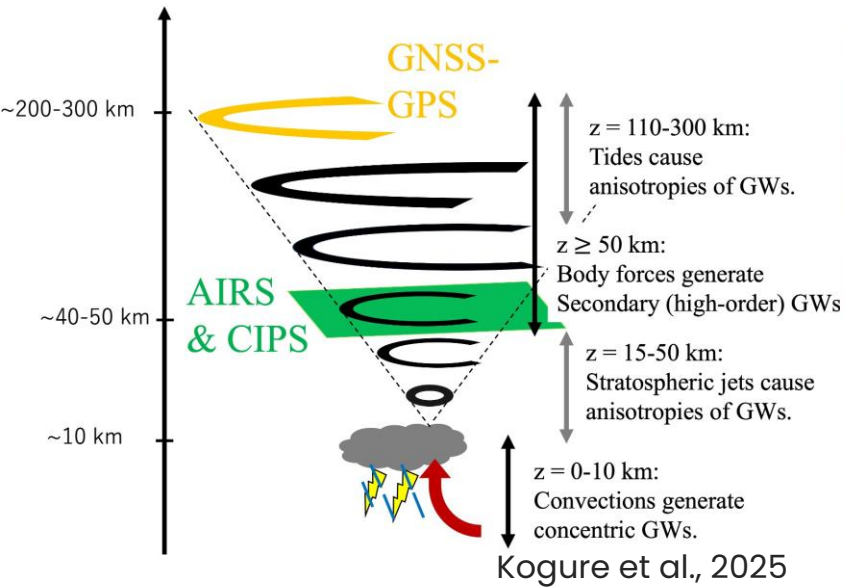
Astafyeva, 2019



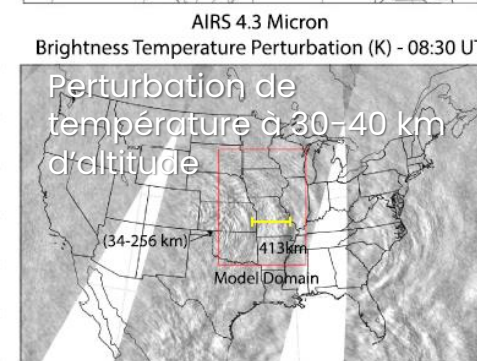
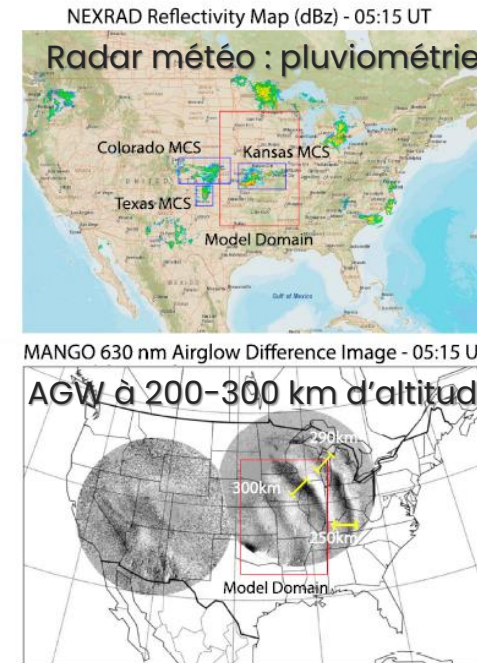
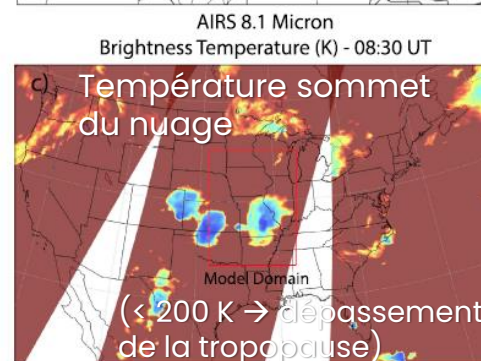
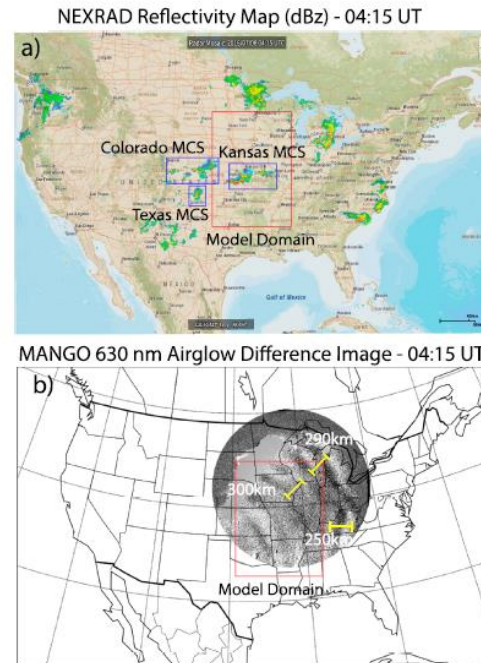
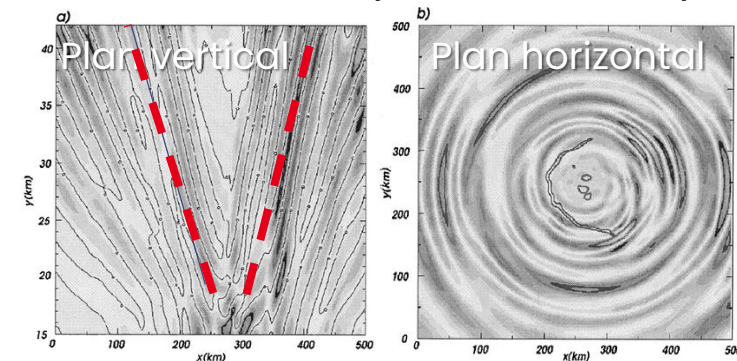
Ondes acoustiques et de gravité générées lors du séisme de Tohoku M9,1 (11 mars 2011)

Maruyama, 2011

Ondes de gravité générées par les orages (T-GW) et leur couplage avec l'ionosphère



Vitesse verticale au dessus d'une zone convective (Piani et al., 2000)



Propagation onde de gravité (GW) :

- oblique :

$$\sin \theta = \frac{\tau_B}{\tau_{GW}}$$

avec θ l'angle de l'GW avec l'horizontale, τ_{AGW} sa période et τ_B la période de Brunt-Väisälä (~8 minutes)

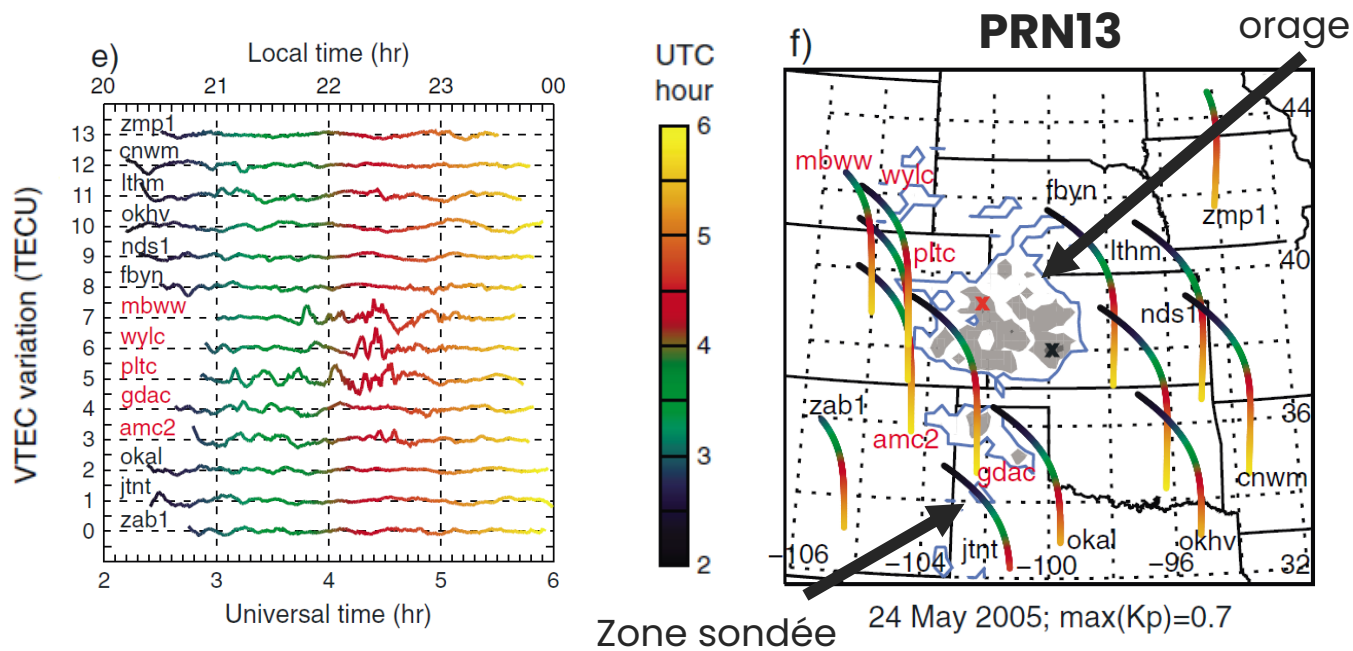
- effet des vents stratosphériques et thermosphériques : direction de propagation privilégiée **dans le sens contraire des vents.**

Heale et al., 2019

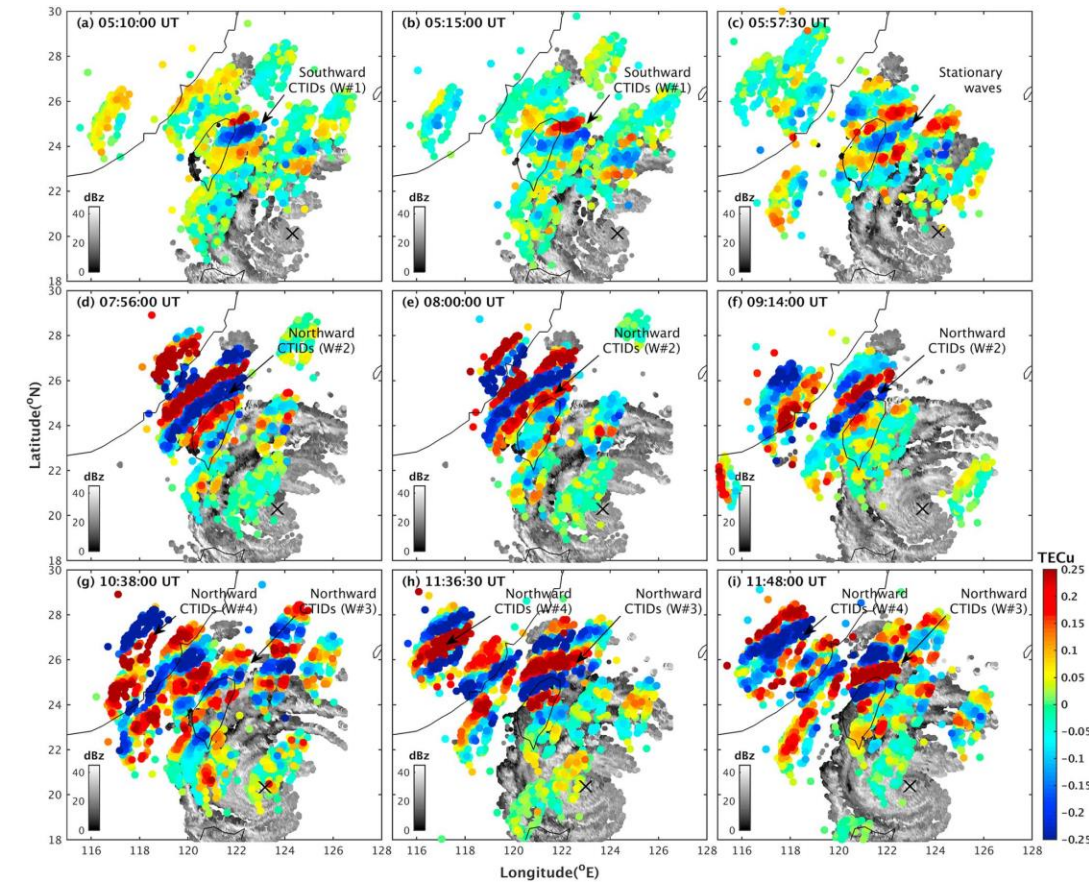
Observations de T-GW avec mesures GNSS

Depuis 2013, observations de T-GW après différents types d'orages en Amérique et en Asie :

- système convectif méso-échelle (MCS)
- tornade
- ouragan



Lay et al., 2013



Chou et al., 2017

Observations de T-GW avec mesures GNSS

Depuis 2013, observation de T-GW après différents types d'orages en Amérique et en Asie :

- système convectif méso-échelle (MCS)
- tornade
- ouragan

Principales caractéristiques (Nishioka et al., 2013; Azeem et al., 2015; Lay et al., 2015; Kumar et al., 2017; Chou et al., 2017; Lay, 2018) :

	Gamme
Amplitude (TECu)	0,1 – 1,5
Période (min)	6 – 45
Longueur d'onde (km)	100 – 300
Vitesse horizontale de phase (m/s)	100 – 250
Durée	Plusieurs heures

T-GW dans l'ionosphère sont la plupart du temps associées à la présence simultanée d'onde de gravité dans la stratosphère (Kogure et al., 2025).

T-GW sont de forme semi-circulaire associée à la dissymétrie liée aux vents.

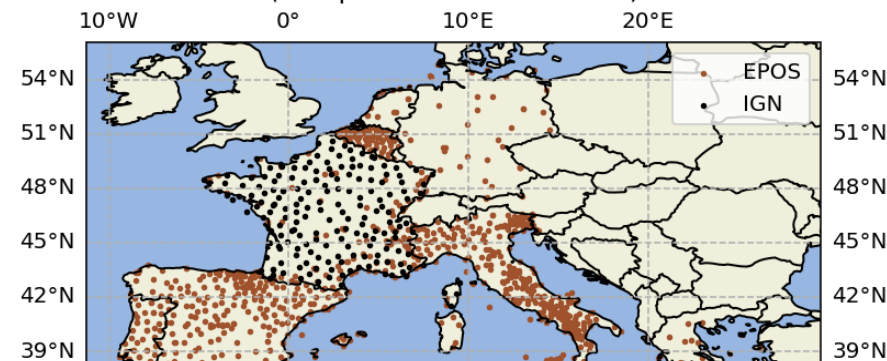
Critères d'émission de T-GW mesurables dans le TEC (Lay et al., 2015; Lay 2018) :

- Surface de la zone orageuse définie par la réflectivité radar [> 30 dBZ (précipitations > 3 mm/h)] supérieure à $25\,000\text{ km}^2$
- Activité orageuse $> \sim 10$ flashes/10min/ $0,5^\circ \times 0,5^\circ$ (après correction de l'efficacité de détection du réseau de détection d'éclairs utilisé)

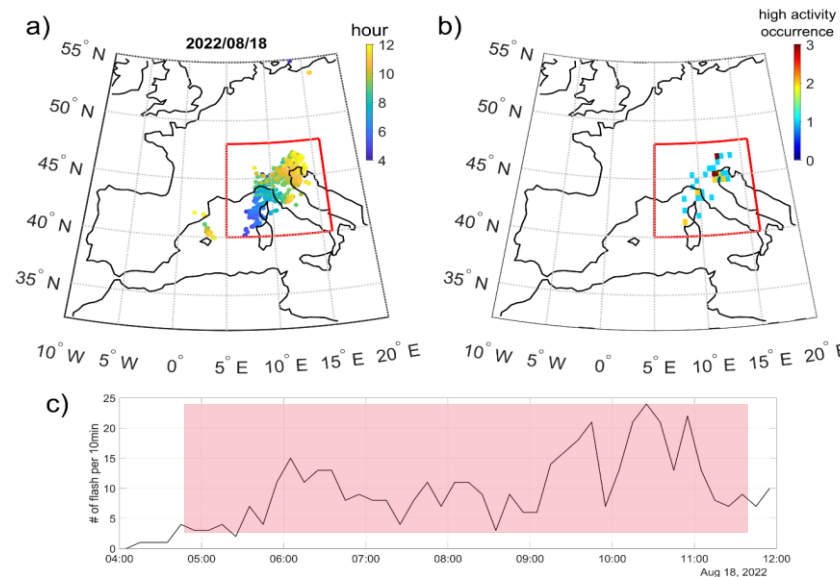
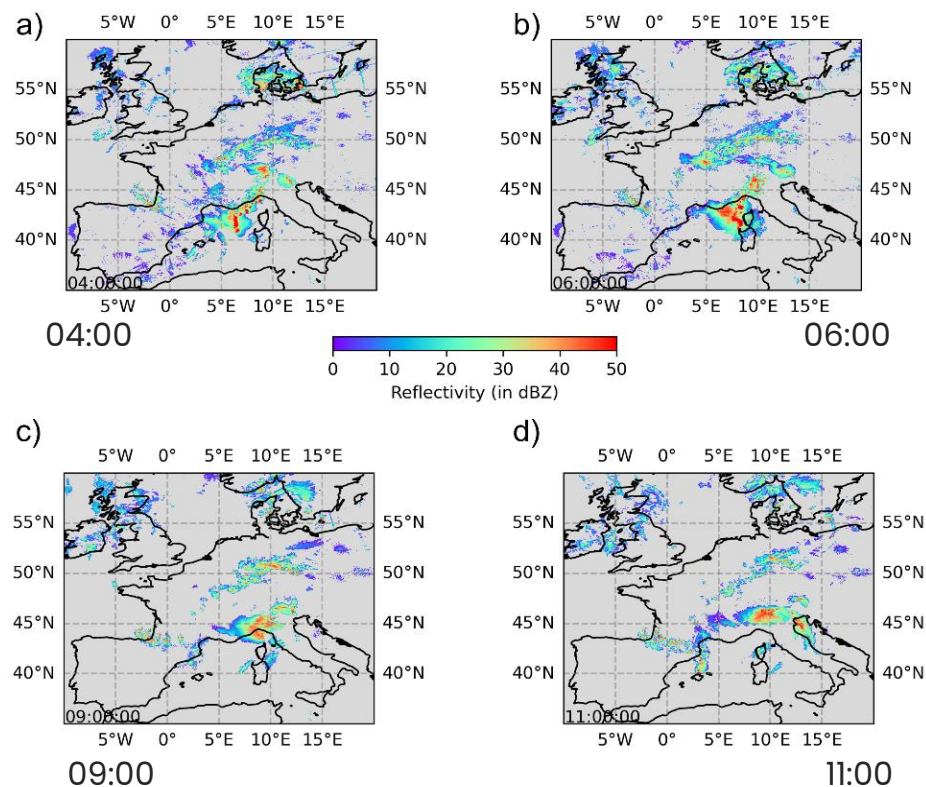
Sélection des orages

Recherche de perturbation ionosphériques circulaires générées par des orages en utilisant des réseaux de capteurs GNSS (EPOS et IGN) dans des orages d'Europe occidentale entre 2019 et 2024 respectant les critères de Lay:

Carte des récepteurs GNSS - EPOS/IGN
(Europe de l'ouest et Grèce)

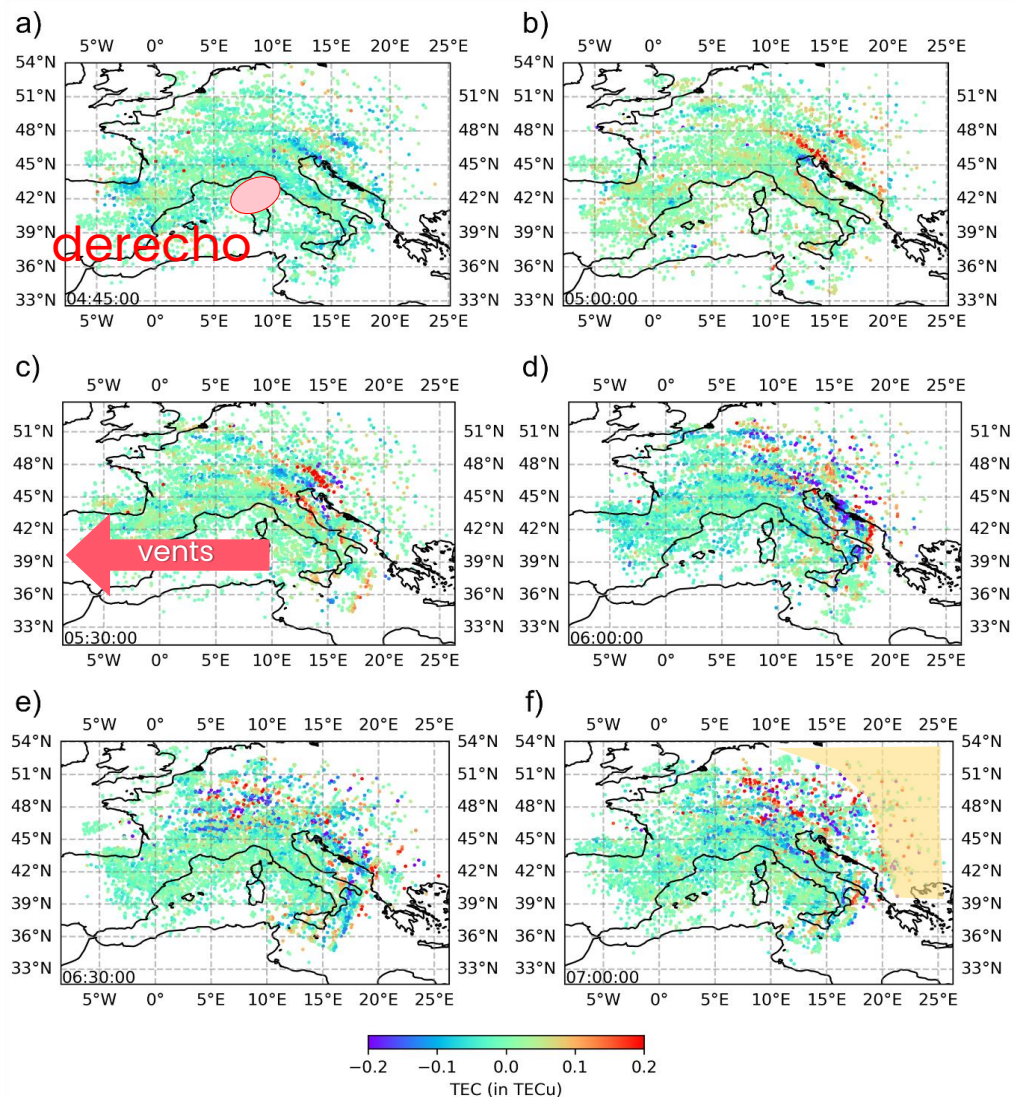


Date	Position	Type d'orage
21/09/2019	Méditerranée	Orage avec sprites
19/09/2020	Cévennes	Orage cévenol
18/08/2022	Du sud de Marseille à Milan (au dessus de la mer)	Derecho
08/10/2024	Europe occidentale	Ex-tempête tropicale Kirk
29/10/2024	Valence (Espagne)	Goutte froide (orage dévastateur)

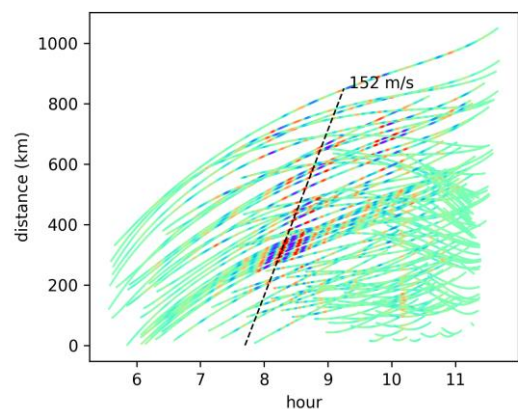


Critère de détection

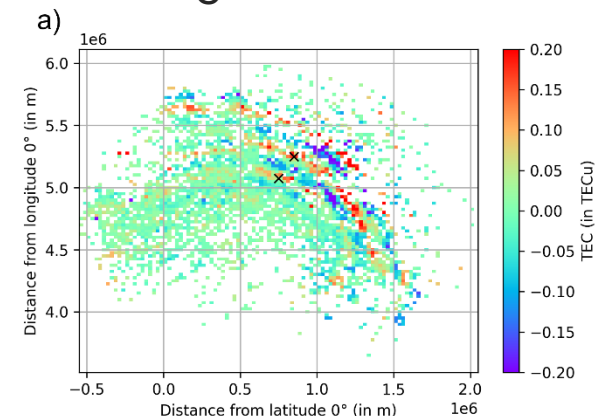
Analyse du Derecho du 18 aout 2022



Vitesse horizontale de phase



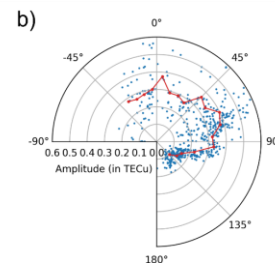
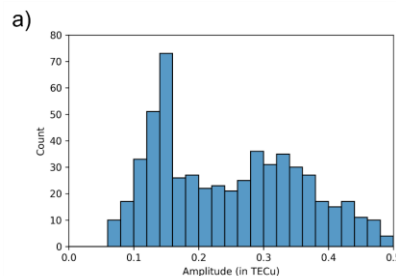
Longueur d'onde



152 m/s

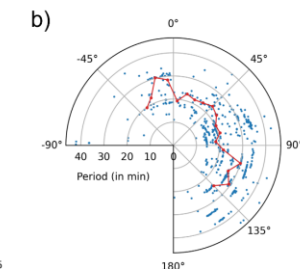
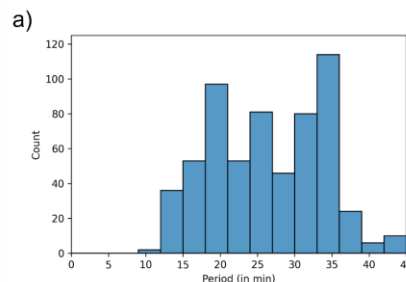
216 km (FFT2D → 193 km)

TEC (in TECu)



Distribution bimodale de l'amplitude :

- 0,15 TECu (au SE)
- 0,35 TECu (du NNO au NE)



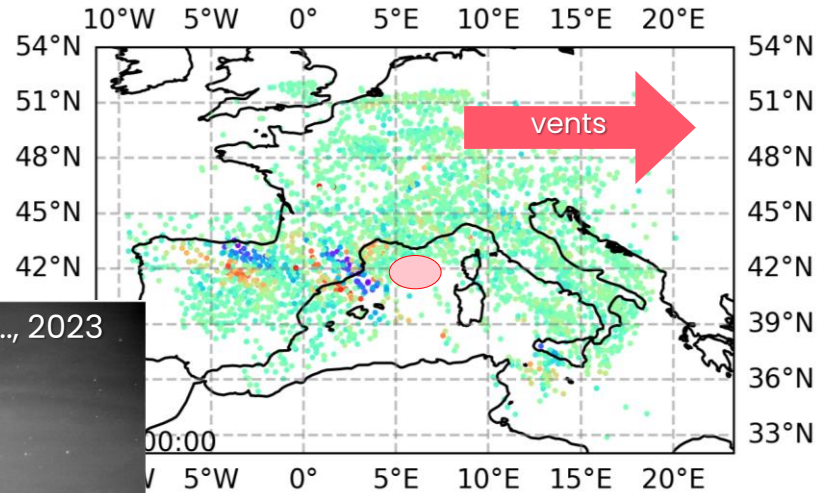
Distribution de la période :

- 15 – 35 minutes

Bilan des observations pour les 4 autres orages

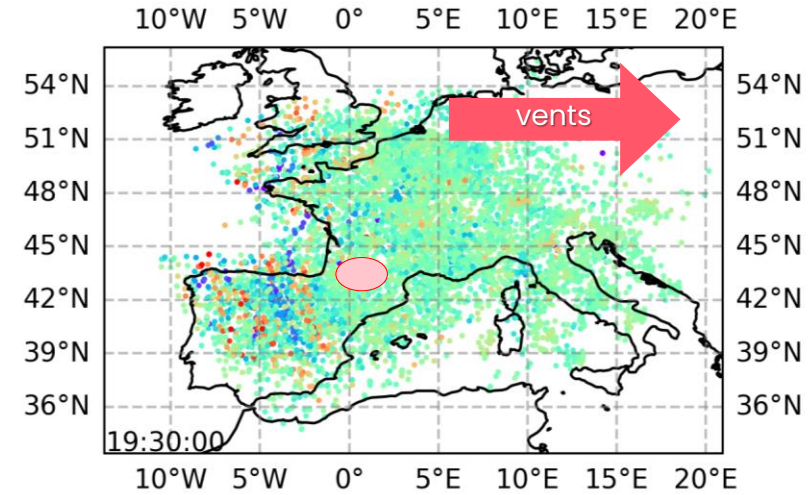


21/09/2019

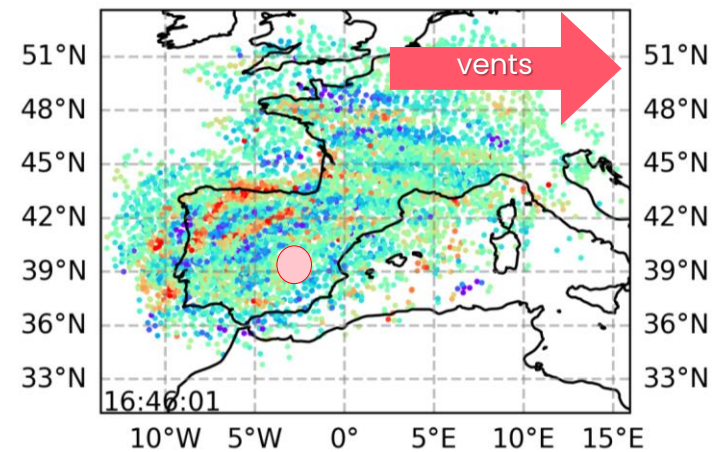


Passas-Varo et al., 2023

19/09/2020



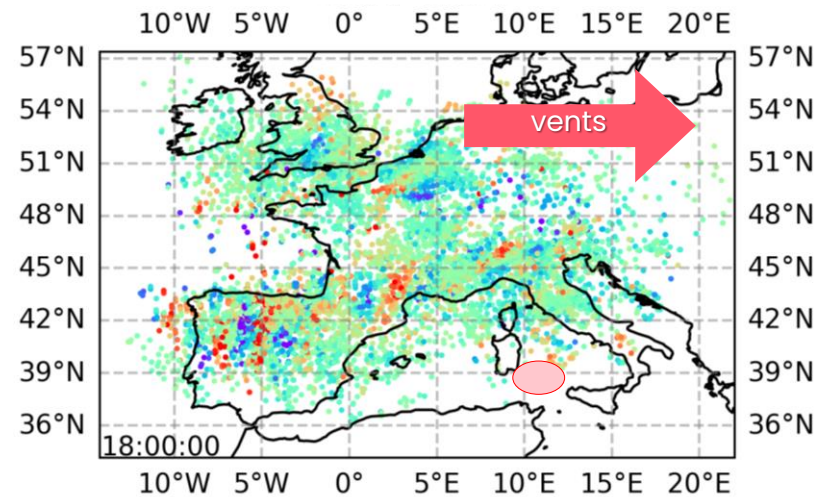
29/10/2024



/06/26

11

08/10/2024



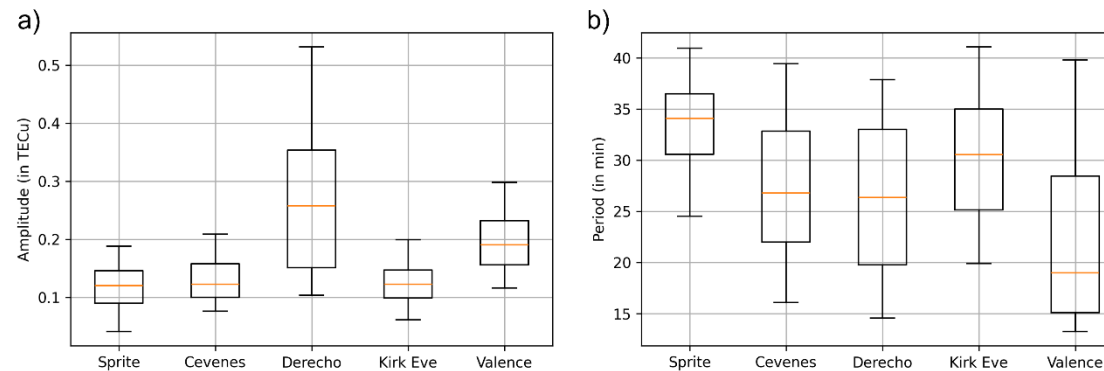
Colloque /

TEC (in TECu)

TEC (in TECu)

Bilan pour les 5 orages

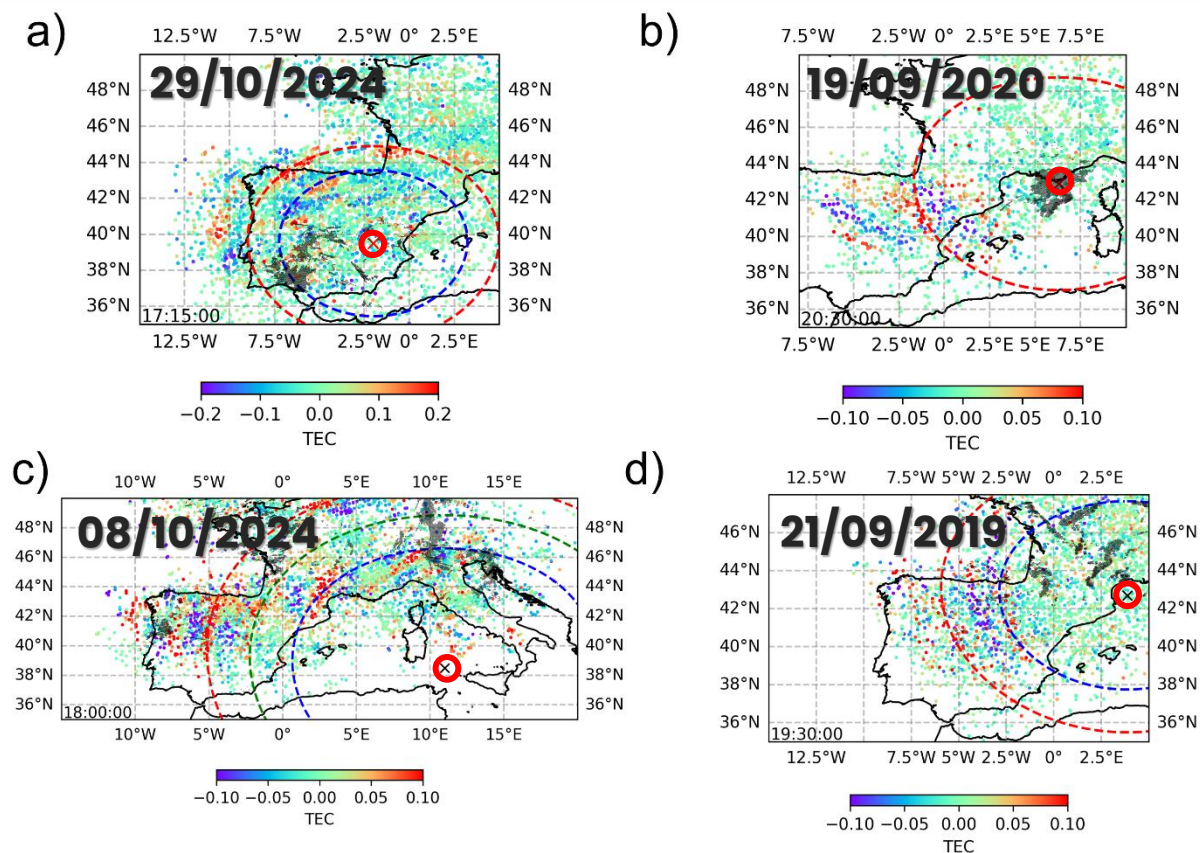
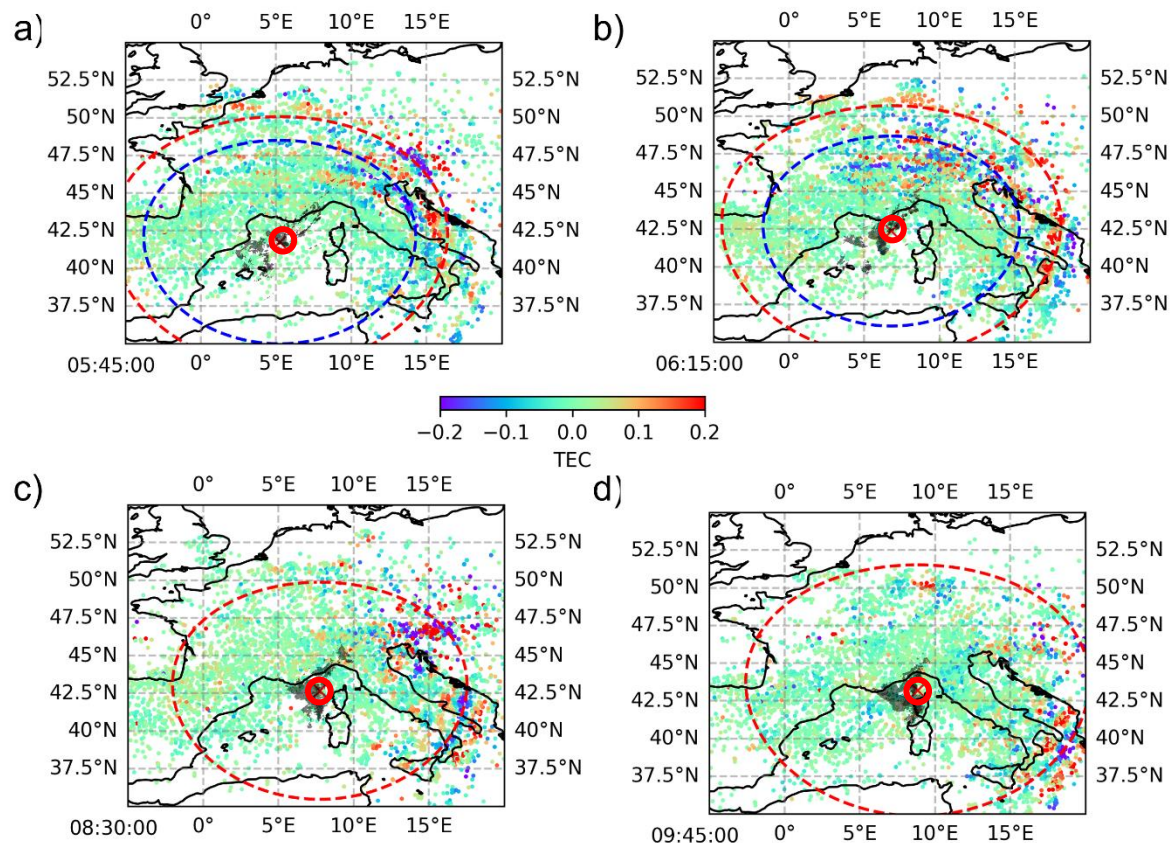
- Ondes partiellement circulaires dans le sens opposé des vents stratosphériques.
- Confirmation des conditions d'observation des ondes de gravité dans l'ionosphère de Lay (2018).
- « statistiques » : caractéristiques des perturbations ionosphériques similaires à celles trouvées dans les études précédentes.



Cases	Horizontal phase speed (m/s)	Amplitude (TECu)	Period (min)	Wavelength (km)	Main propagation direction
Sprite producing storm	162	0.05-0.18	27-38.5	312	SW
Mediterranean storm	123	0.08-0.19	18.5-37	205	SW/(NW)
Derecho	152	0.12-0.45	16-35	202	NE/SE/(NW)
ex-Kirk	98	0.08-0.19	23-38.5	221	W
Valencia	156	0.13-0.27	13.5-37	237	NW

Origine orageuse de ces perturbations ionosphériques

Derecho (18/08/2022)



- Le centre des ondes circulaires se situe au-dessus des zones les plus convectives de l'orage (entre 2h et 2,5h avant).

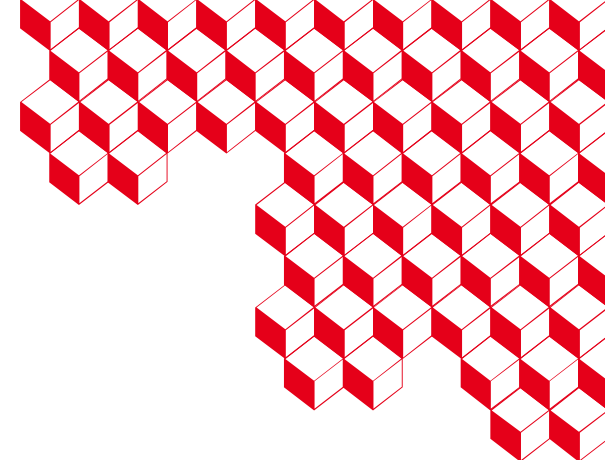
Conclusion

Les mesures GNSS peuvent être utilisées pour détecter les ondes générées par les tsunamis et possiblement être utilisées pour lancer une alerte. Néanmoins il faut déterminer les cas de fausses alarmes. Les ondes de gravité générées par les orages peuvent être à l'origine de telles fausses alarmes (même gamme de fréquence et amplitude similaire).

Résumé de nos observations :

- Observation de perturbations ionosphériques lors de 5 orages en Europe occidentale.
- Caractéristiques de ces perturbations similaires à celles trouvées en Amérique et en Asie.
- Conditions d'observation (critères de Lay (2018)) de ces perturbations confirmées.
- Ondes partiellement circulaires dont le centre est superposable aux zones les plus convectives des orages.
- Effet des vents stratosphériques dominant confirmé.

➔ Étude soumise à Frontiers in Astronomy and Space Sciences – Space Physics



Merci de votre attention

Thomas Farges
CEA, DAM, DIF
F-91297 Arpajon, France
Thomas.farges@cea.fr