

Apport des images optiques dans l'étude des grandes déformations continentales

Arthur Delorme¹, Yann Klinger¹, Raphaël Grandin¹, Lulin Zhang¹, Ewelina Rupnik²,
Marc Pierrot-Deseilligny², Wenqian Yao^{1,3}, Solène Antoine^{1,4}, Arthur Hauck¹

¹ : Université Paris Cité, Institut de physique du globe de Paris, CNRS, F-75005 Paris, France

² : LaSTIG, Univ. Gustave Eiffel, IGN-ENSG

³ : Institute of Surface-Earth System Science, School of Earth System Science, Tianjin University, Tianjin 300072, China

⁴ : NASA Jet Propulsion Laboratory, California Institute of Technology, Pasadena, California, USA



DINAMIS,
CIEST²,
...



Ajustement de faisceaux

MNS pré-séisme

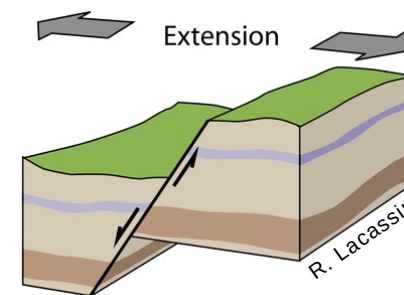
MNS post-séisme

Ortho-images

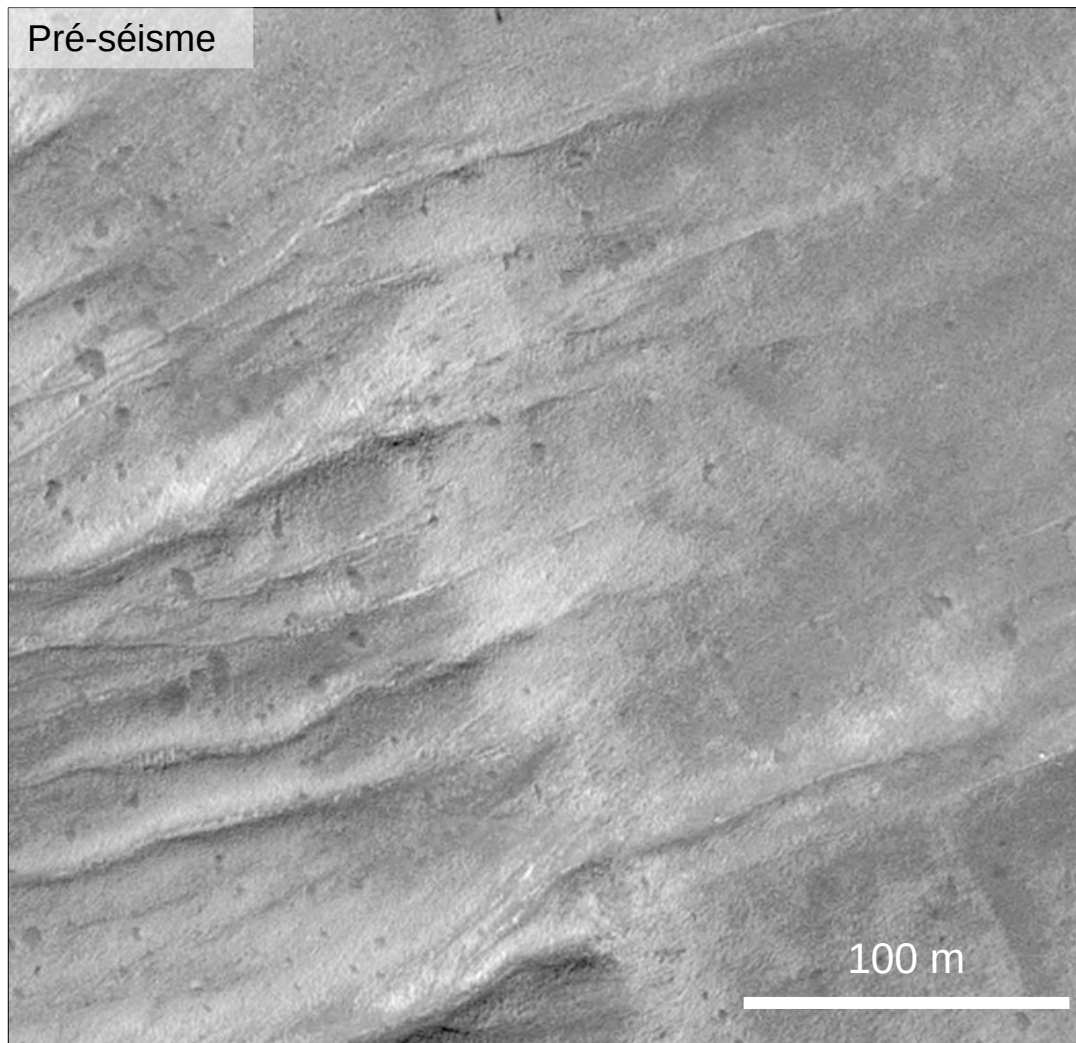
Ortho-images

Corrélation d'images

Champ de déplacement horizontal



Pré-séisme



Extrait d'ortho-image Pléiades
(séisme de Norcia, Italie, 2016)



DINAMIS,
CIEST²,
...



Ajustement de faisceaux

MNS pré-séisme

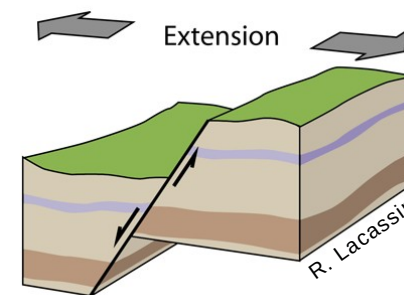
MNS post-séisme

Ortho-images

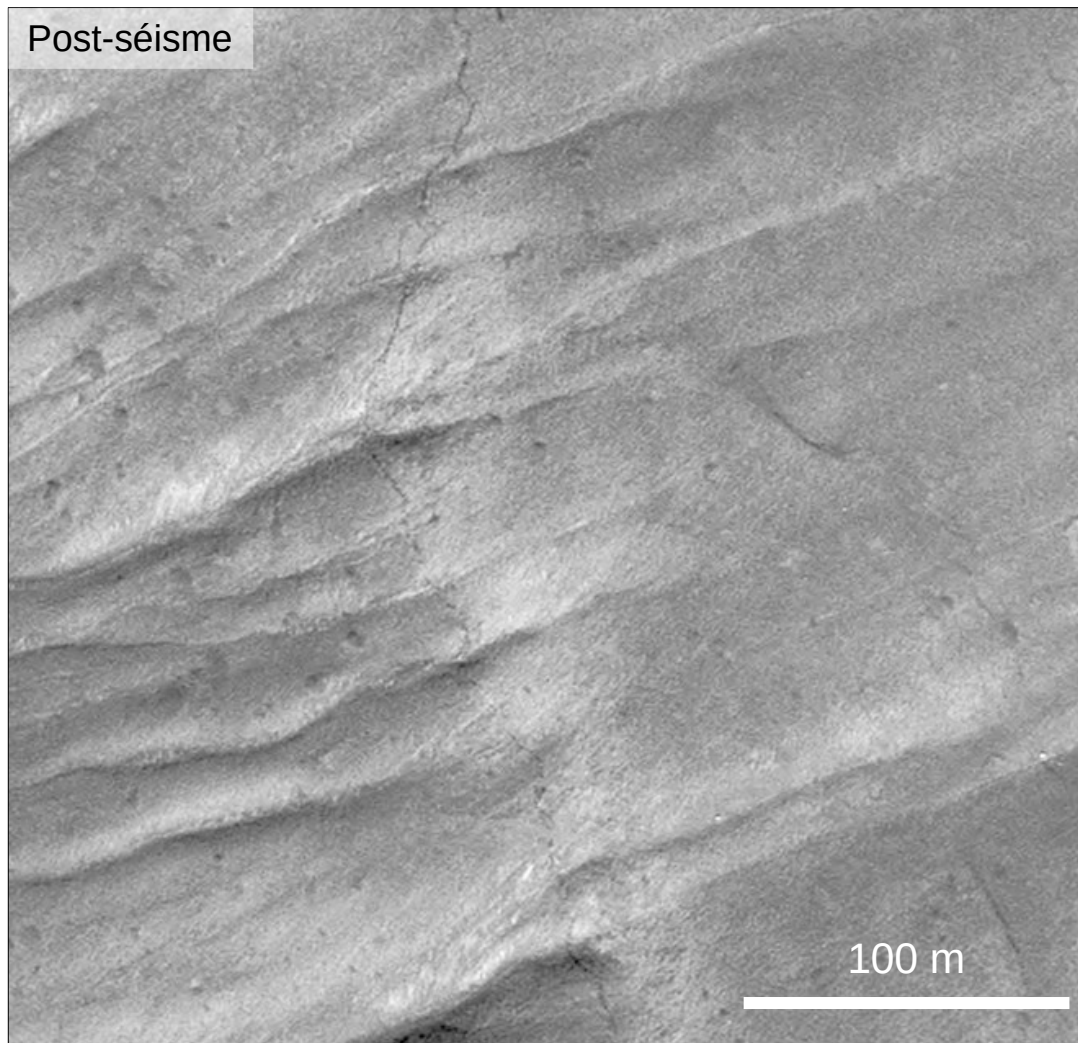
Ortho-images

Corrélation d'images

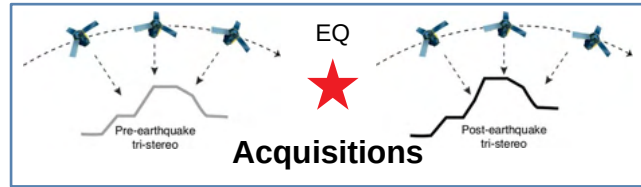
Champ de déplacement horizontal



Post-séisme



Extrait d'ortho-image Pléiades
(séisme de Norcia, Italie, 2016)



Ajustement de faisceaux

MNS pré-séisme

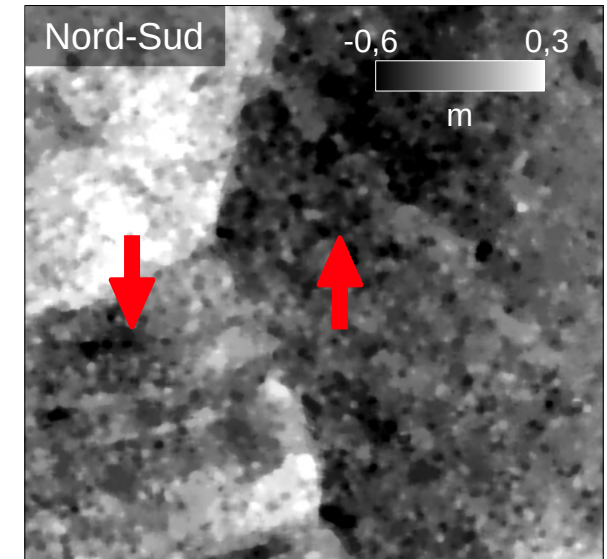
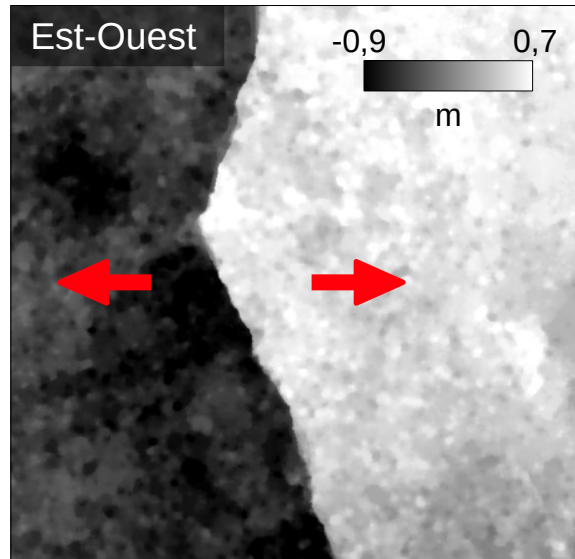
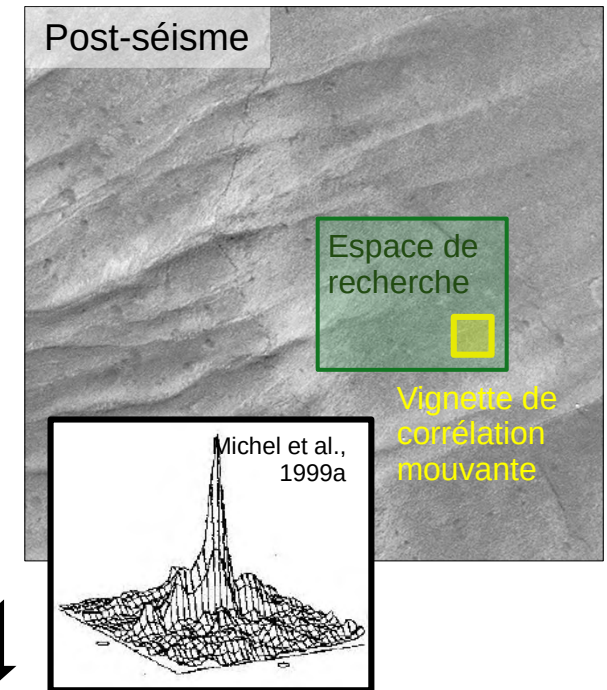
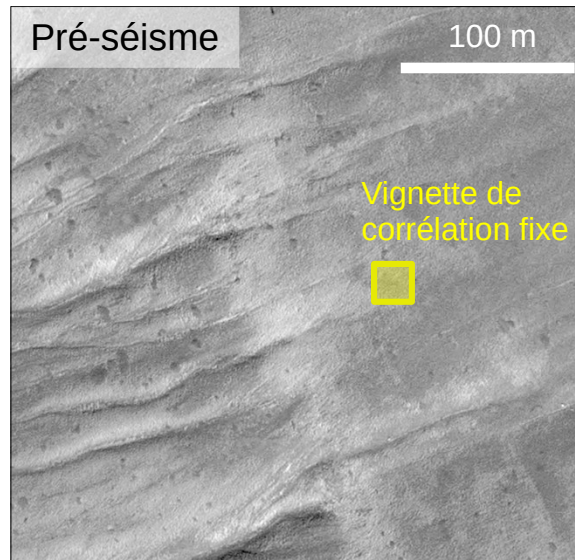
MNS post-séisme

Ortho-images

Ortho-images

Corrélation d'images

Champ de déplacement horizontal



Champ de déplacement cosismique (composantes horizontales)

Seuil de détection : $\sim 0,1$ px



Ajustement de faisceaux

MNS pré-séisme

MNS post-séisme

Ortho-images

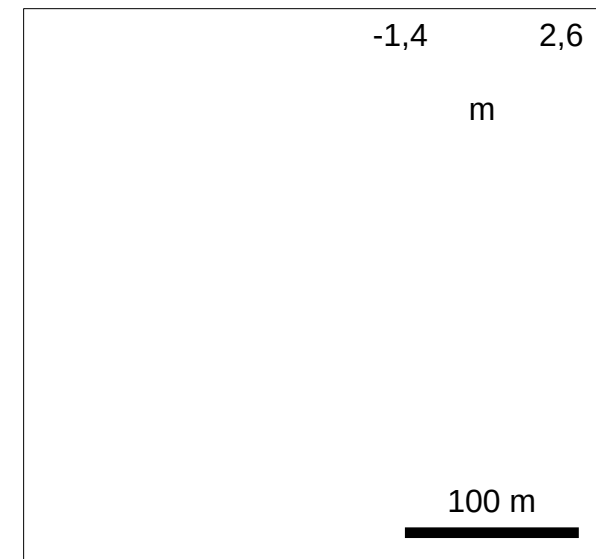
Ortho-images

Corrélation d'images

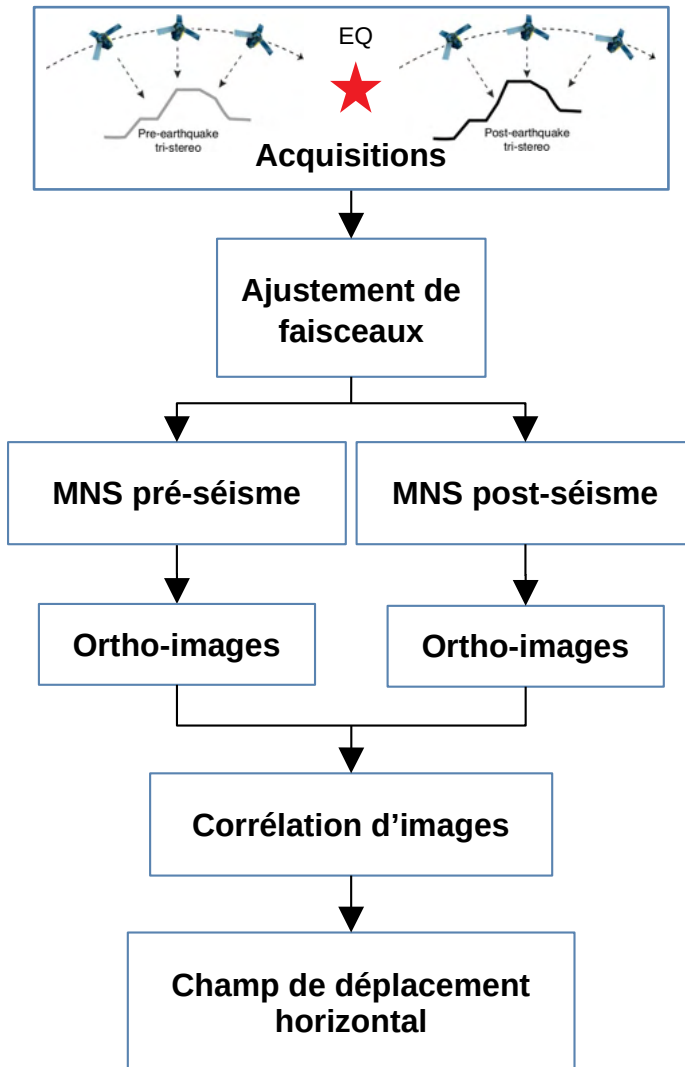
Champ de déplacement horizontal

Champ de déplacement vertical

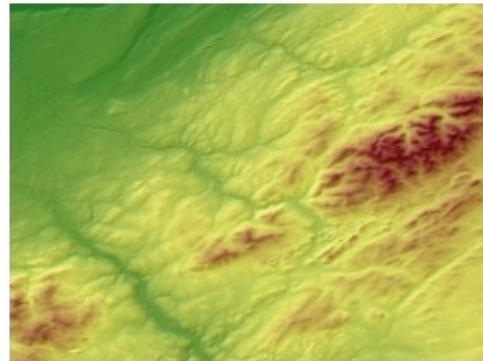
Différence de MNS



Champ de déplacement cosismique (composante verticale)



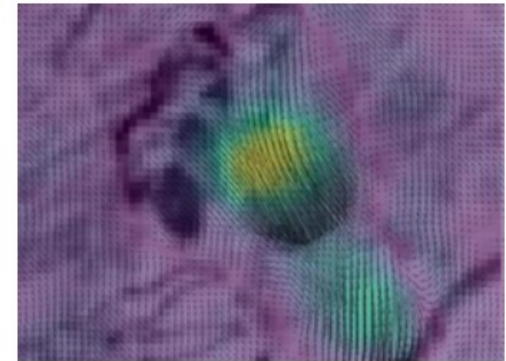
MicMac (IGN / IPGP ; financements CNES) est un maillon essentiel des services de calcul à la demande de FormaTerre



DSM-OPT

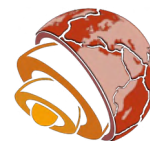
DSM-OPT signifie «Digital Surface Models from OPTical stereoscopic very-high resolution imagery.». (Modèle Numérique de Surface à partir d'images stéréo très haute résolution)

[Page de présentation](#)



GDM-OPT

GDM-OPT signifie Ground Deformation Monitoring with OPTical image time series (Suivi des déformations du sol à partir de séries temporelles d'images optiques).

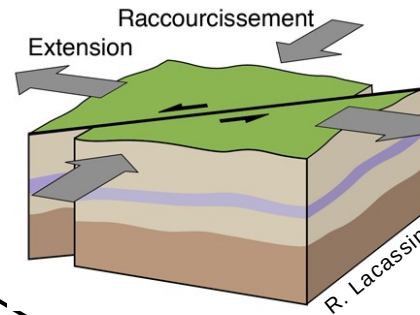


FormaTerre
DATA TERRA

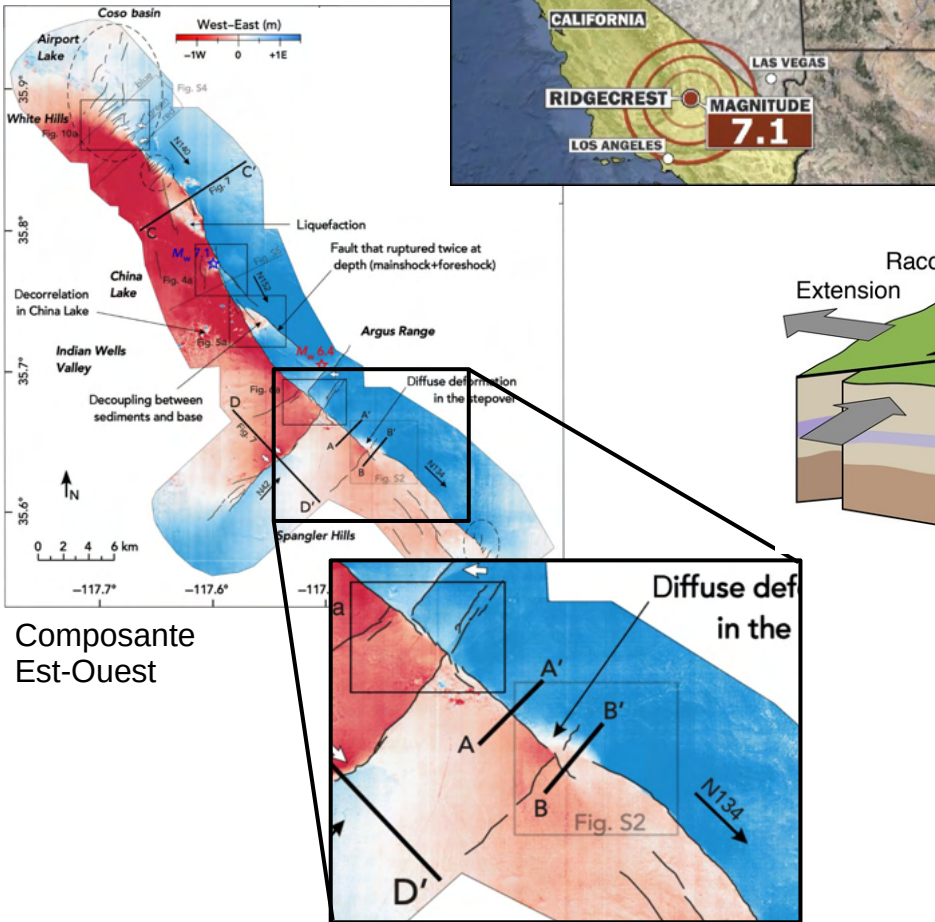
<https://www.poleterresolide.fr/services-de-calculs-a-la-demande>

Séismes de Ridgecrest (M_w 6,4 & 7,1), Californie, 2019

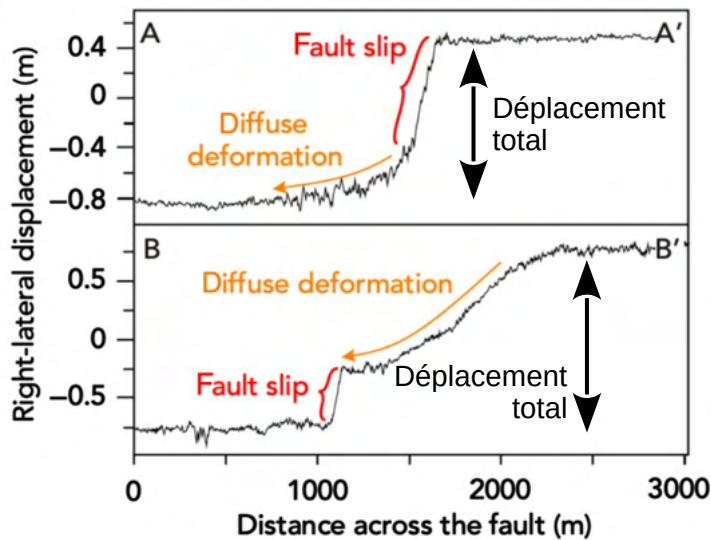
Antoine et al., 2021



- Corrélation multi-capteurs : Pléiades-WorldView
- Résol. spatiale : 50 cm $\Rightarrow$ seuil de détection $\sim$ 5 cm

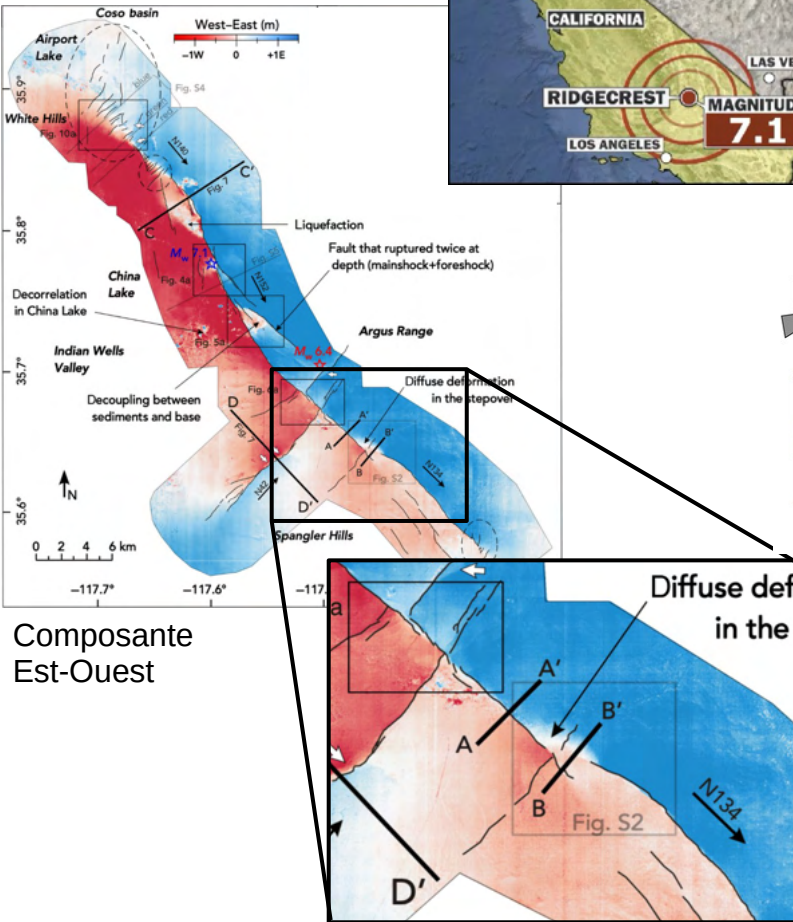
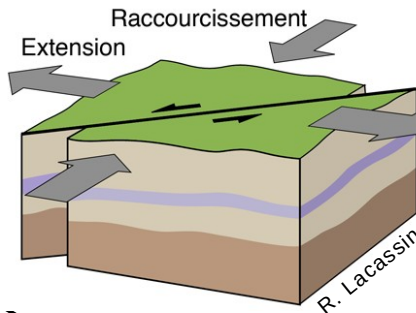
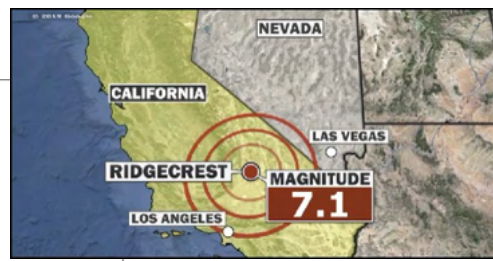


Composante
Est-Ouest



Séismes de Ridgecrest (M_w 6,4 & 7,1), Californie, 2019

Antoine et al., 2021

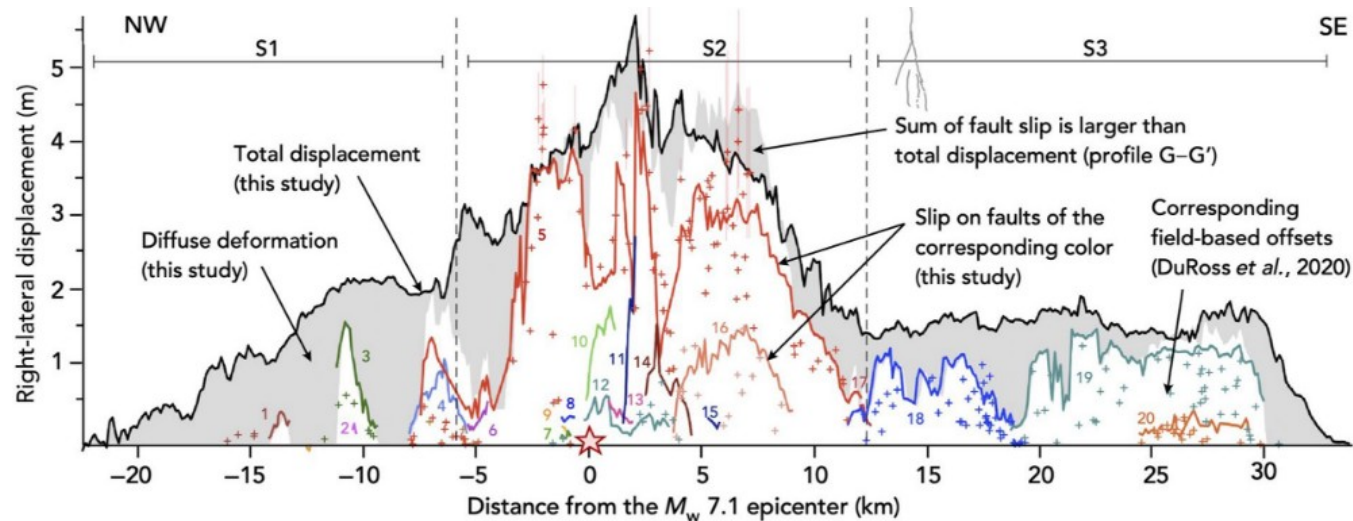
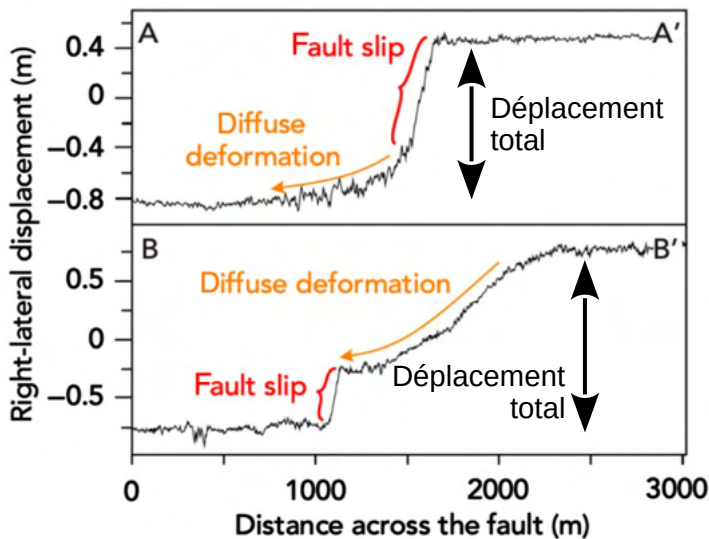


Composante
Est-Ouest

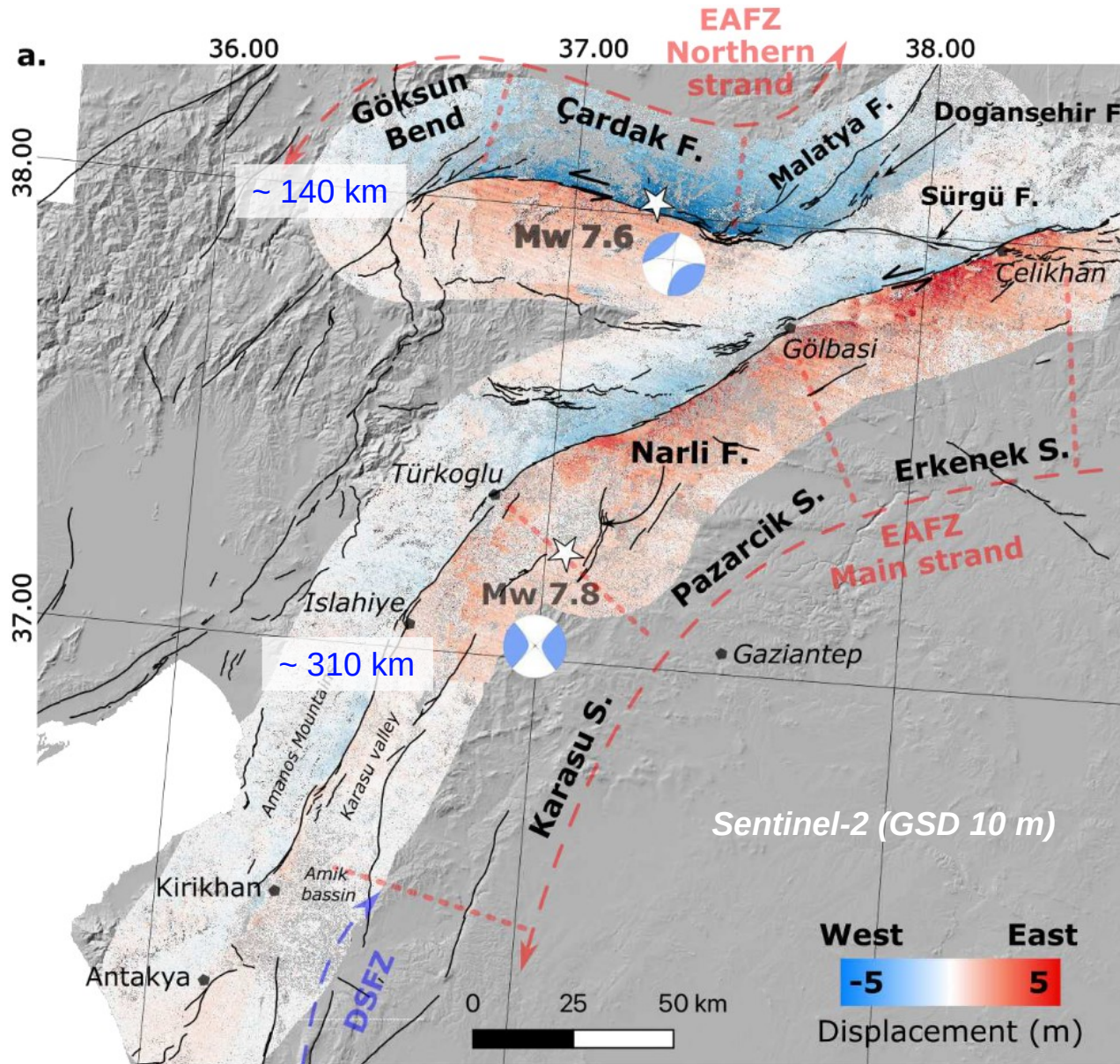
• Corrélation multi-capteurs : Pléiades-WorldView

• Résol. spatiale : 50 cm $\Rightarrow$ seuil de détection $\sim$ 5 cm

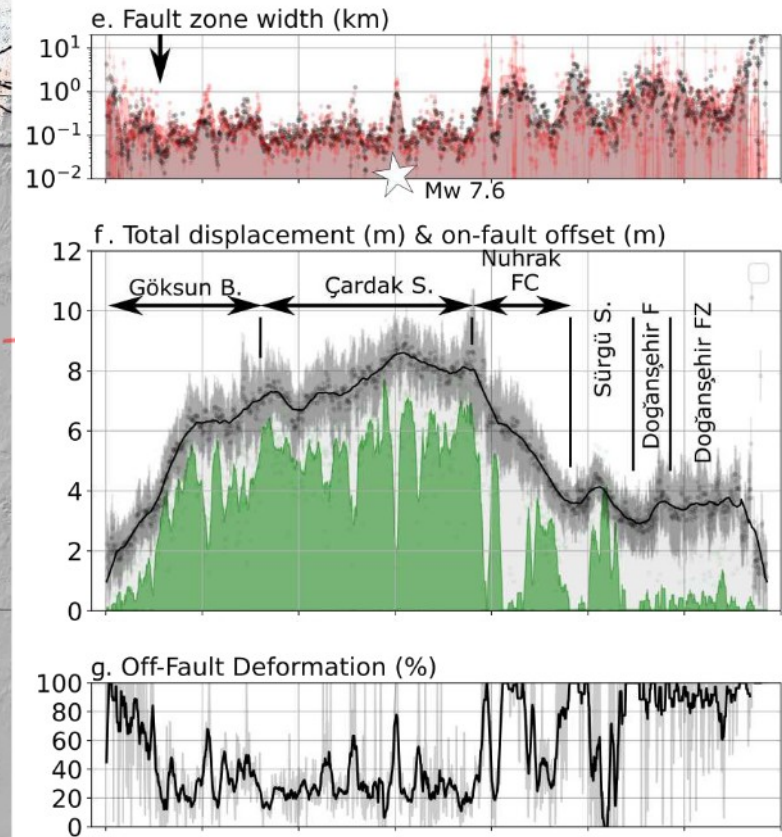
$\Rightarrow$ Quantification des différents modes de déformation le long des ruptures (localisée, distribuée, diffuse)



Séismes de Kahramanmaraş (M_w 7.8 & 7.6), Turquie, 2023



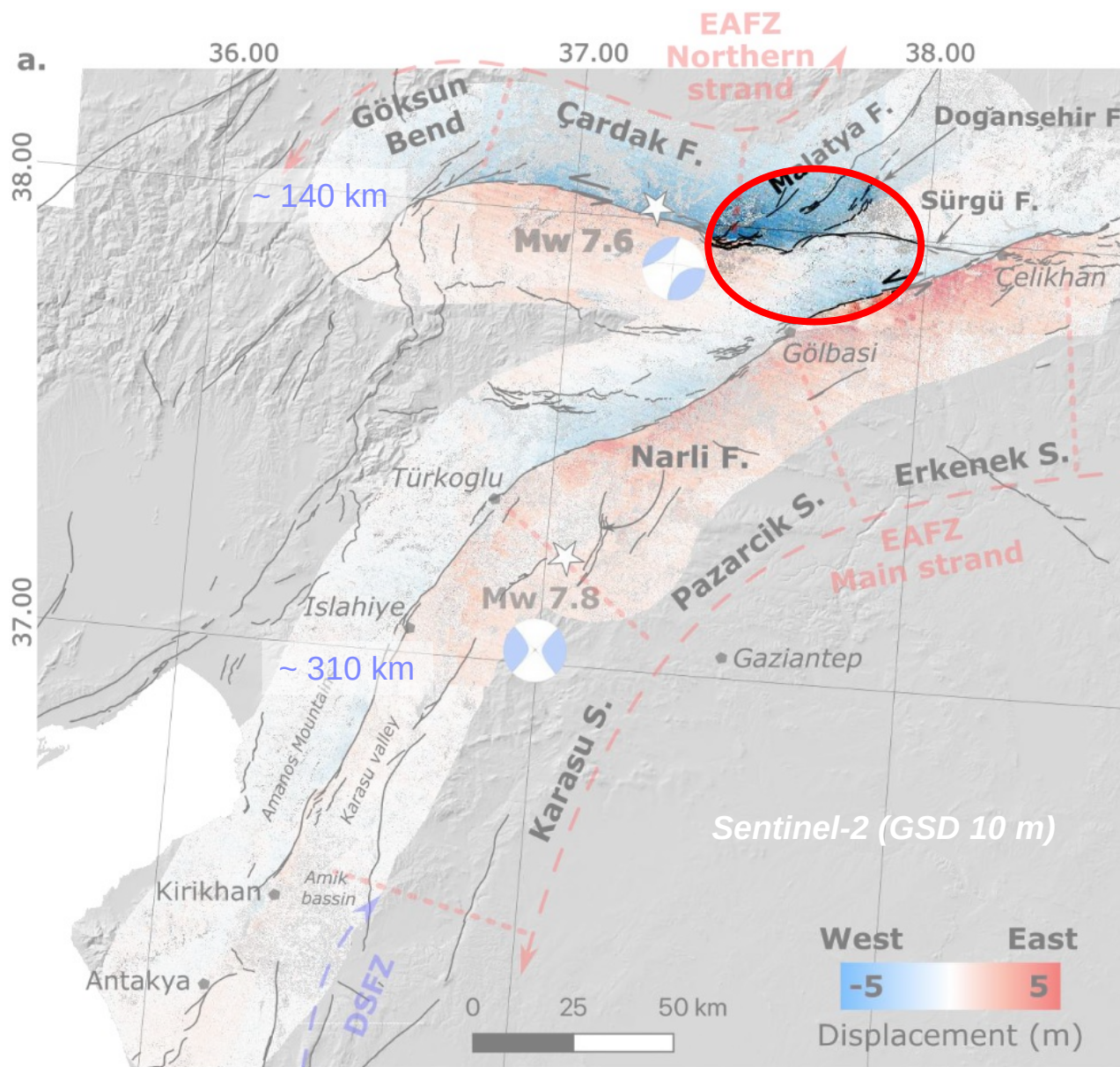
(Provost et al., 2024)



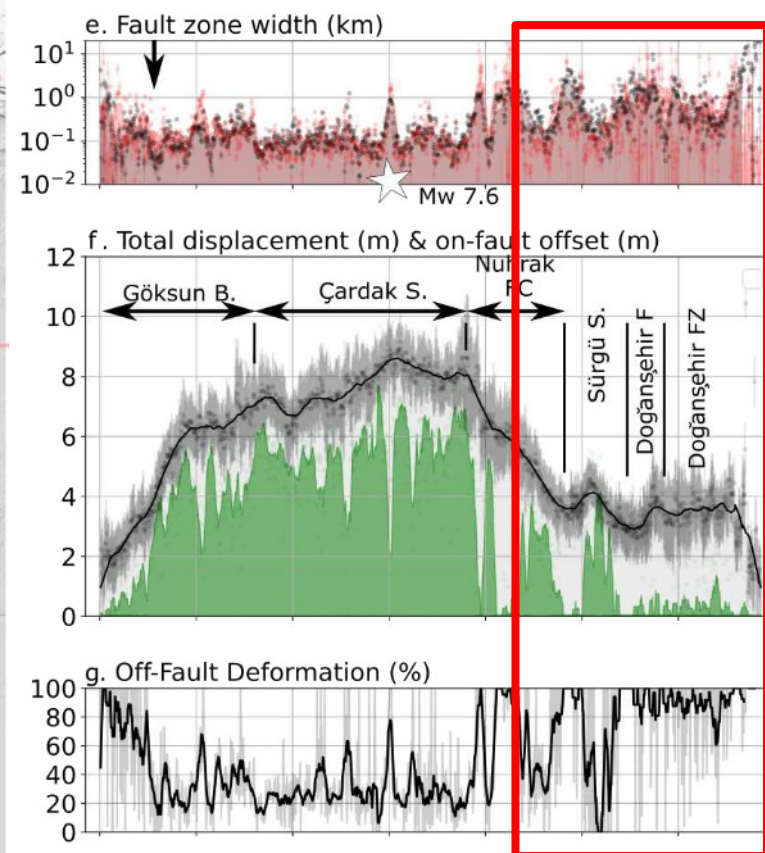
Déplacement max : $8,7 \pm 0,8$ m

Déformation distribuée : 47 %

Séismes de Kahramanmaraş (M_w 7.8 & 7.6), Turquie, 2023



(Provost et al., 2024)



Déplacement max : $8,7 \pm 0,8$ m

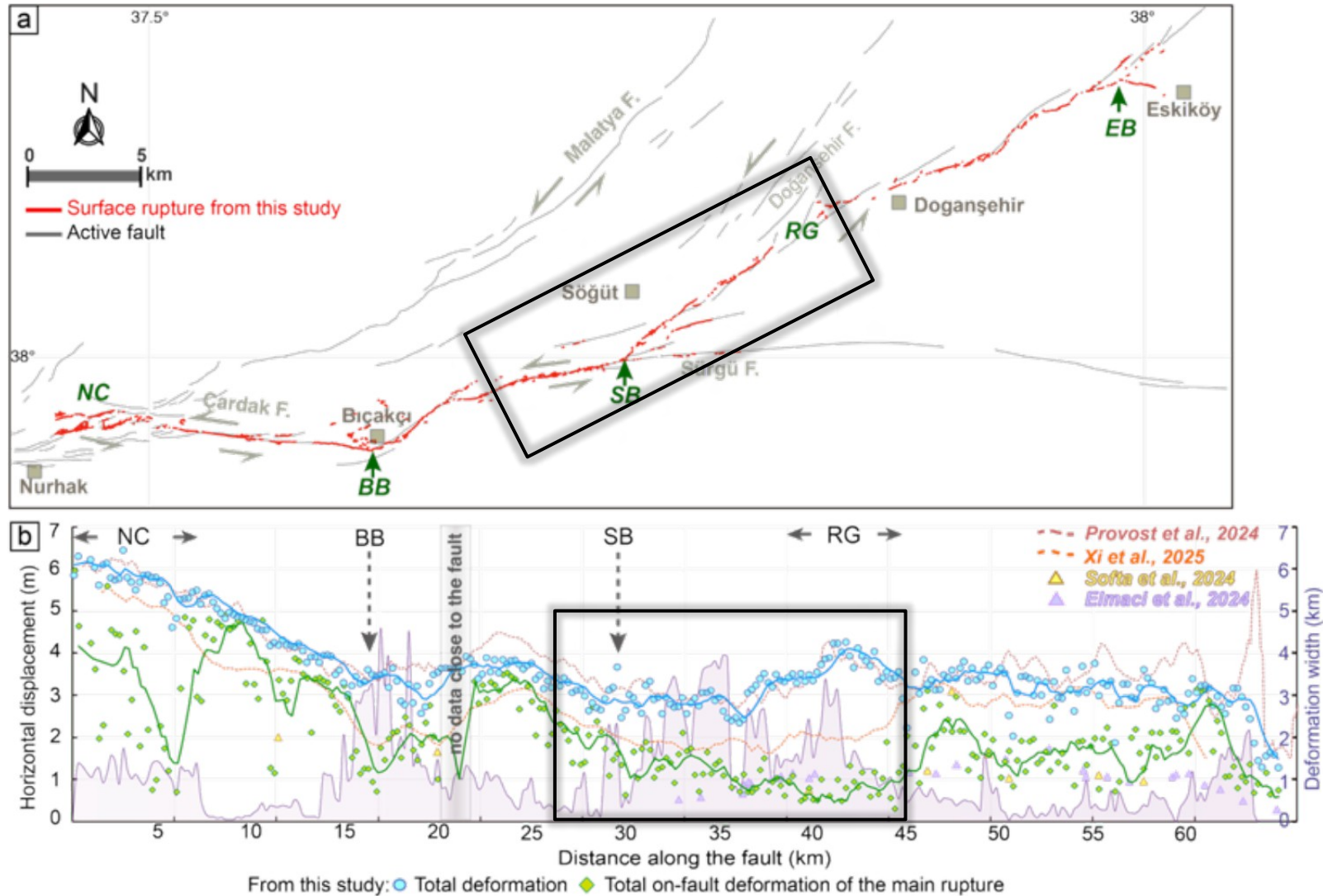
Déformation distribuée : 47 %

Séismes de Kahramanmaraş (M_w 7.8 & 7.6), Turquie, 2023

- Corrélation Sentinel-2 et corrélation multi-capteurs SPOT-Pléiades
- Résolution spatiale : 1,6 m

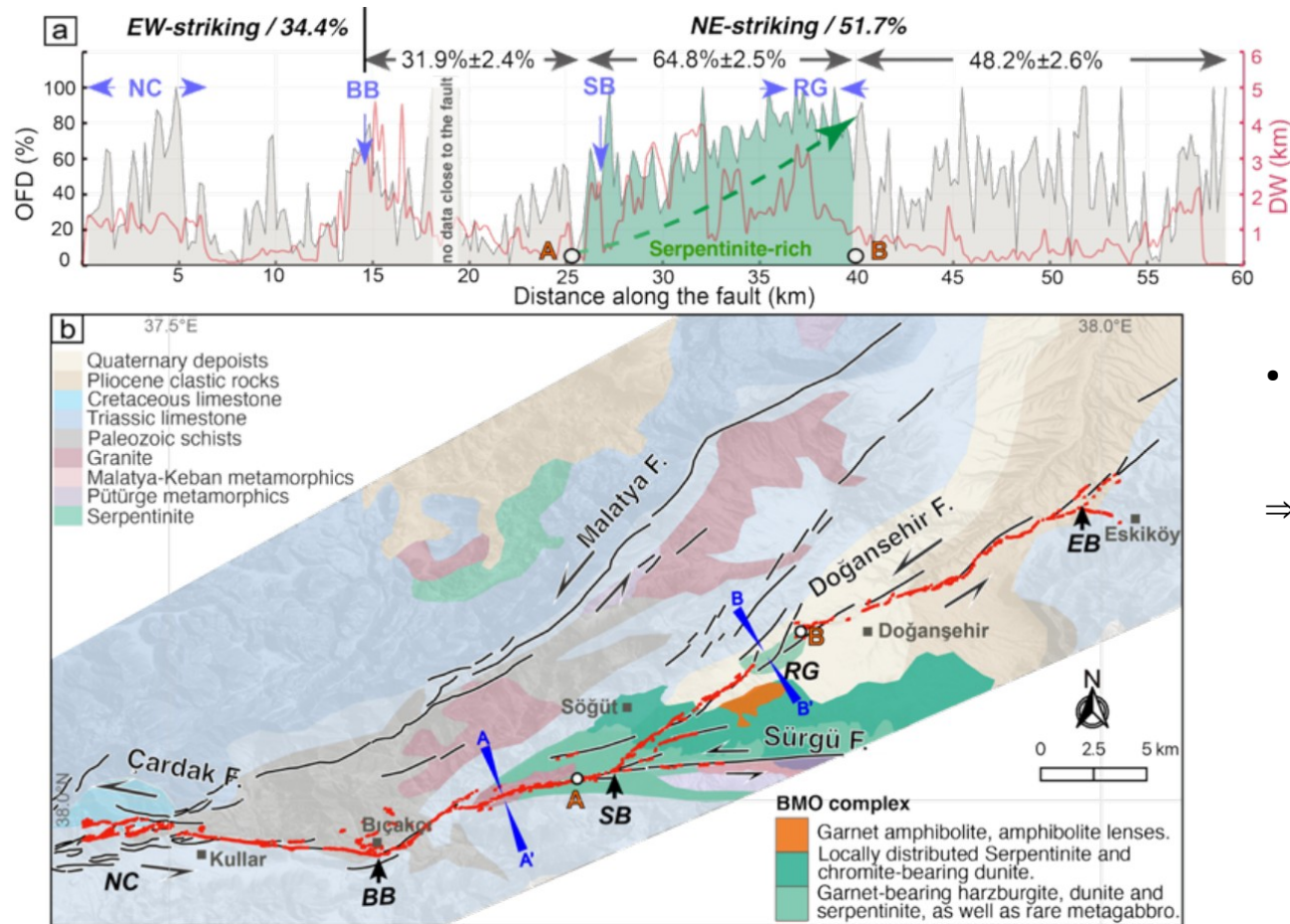
Séismes de Kahramanmaraş (M_w 7.8 & 7.6), Turquie, 2023

(Yao et al., en révision)



- Apport crucial de la THR pour quantifier précisément les différents modes de déformation
- Déformation distribuée anormalement large

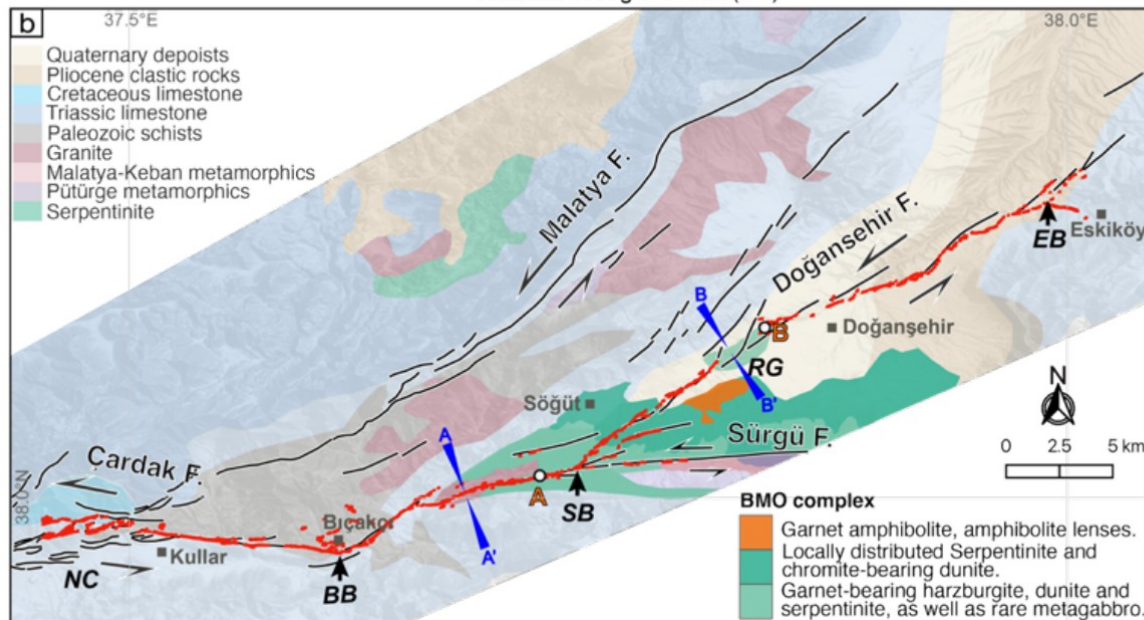
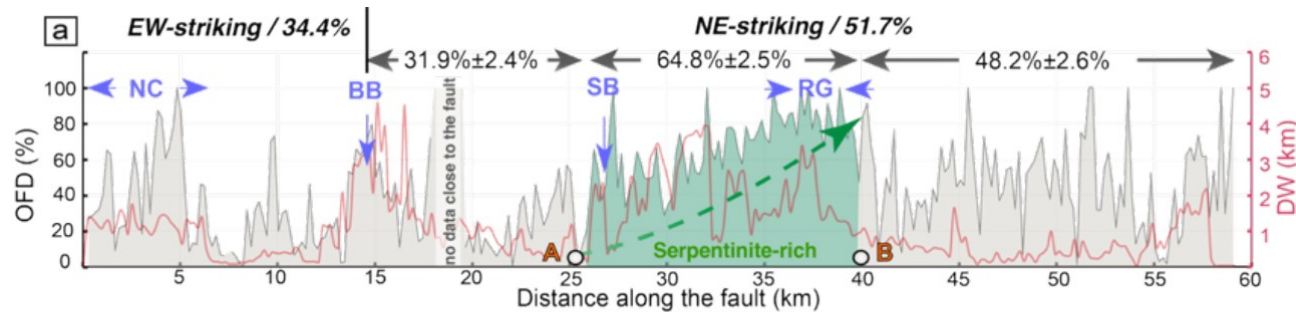
Séismes de Kahramanmaraş (M_w 7.8 & 7.6), Turquie, 2023



- La faille est-anatolienne se situe le long d'une ancienne suture océanique
- ⇒ Présence de roches riches en serpentine

(Yao et al., en révision)

Séismes de Kahramanmaraş (M_w 7.8 & 7.6), Turquie, 2023



(Yao et al., en révision)

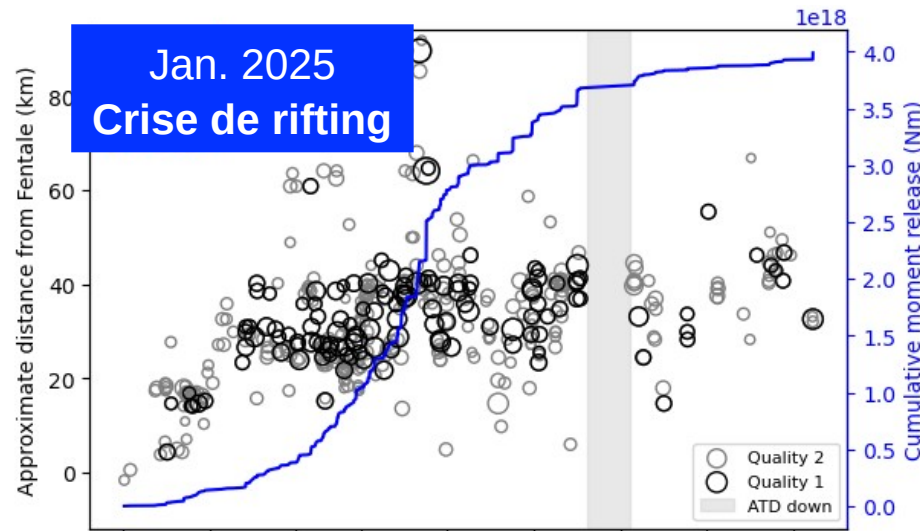
- La faille est-anatolienne se situe le long d'une ancienne suture océanique
- ⇒ Présence de roches riches en serpentine

Granite VS roche riche en serpentine

Le volcan Fentale, Éthiopie, 2025

- Décembre 2024 : début d'une crise de rifting (~3 m d'ouverture sur un segment du rift long de 60 km)
- 14 fév. 2025 : effondrement partiel de la caldéra

InSAR Sentinel-1
(1 frange = 2,8 cm LOS)

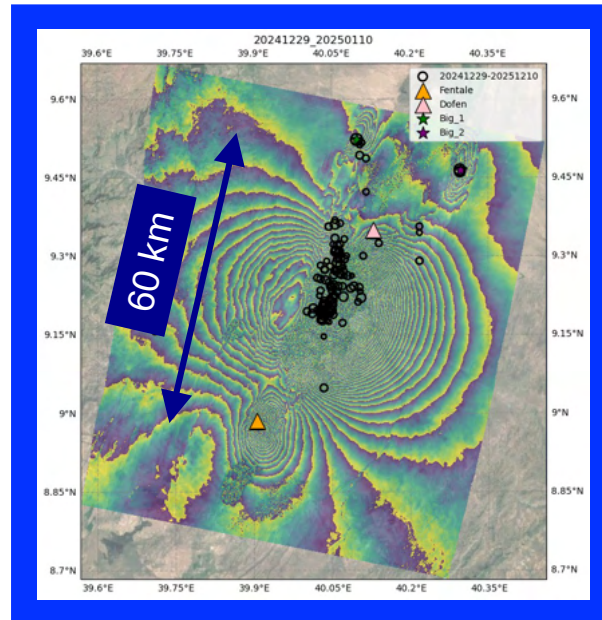


Sismicité VS temps

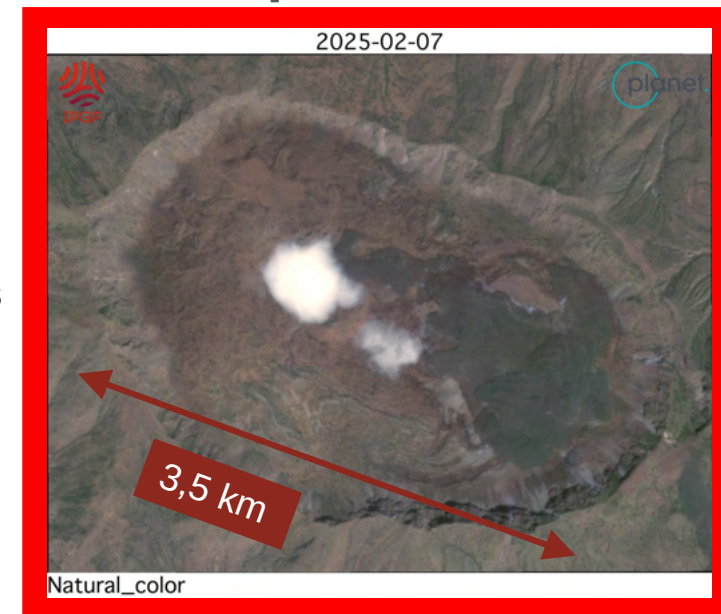
Migration de l'activité depuis le volcan vers le Nord

(Martin Vallée, IPGP)

14 fév. 2025
Effondrement partiel de la caldéra



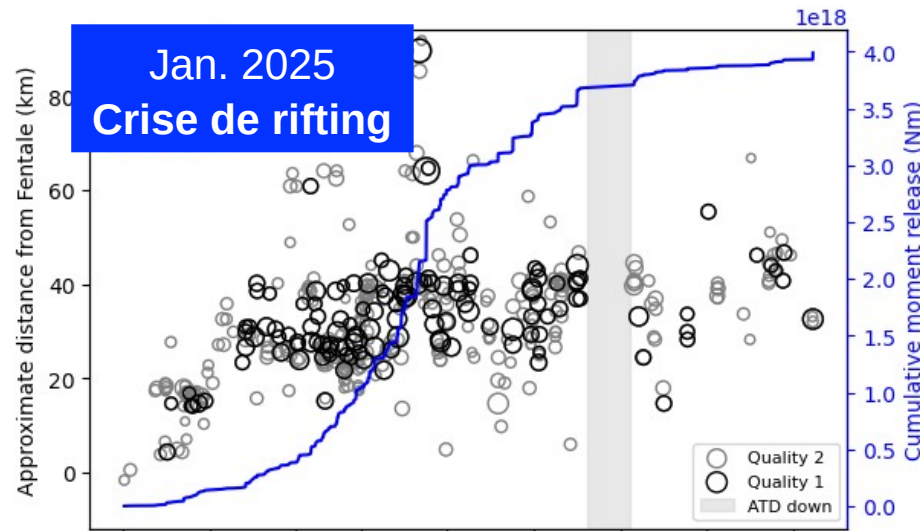
Images Planet



Le volcan Fentale, Éthiopie, 2025

- Décembre 2024 : début d'une crise de rifting (~3 m d'ouverture sur un segment du rift long de 60 km)
- 14 fév. 2025 : effondrement partiel de la caldéra

InSAR Sentinel-1
(1 frange = 2,8 cm LOS)

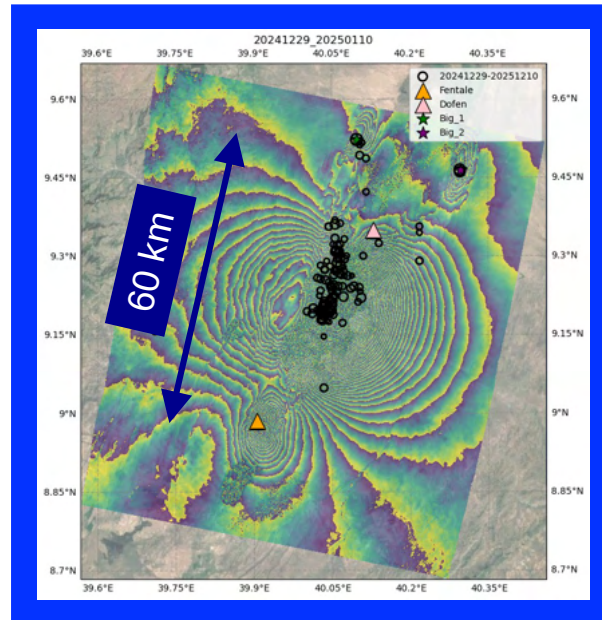


Sismicité VS temps

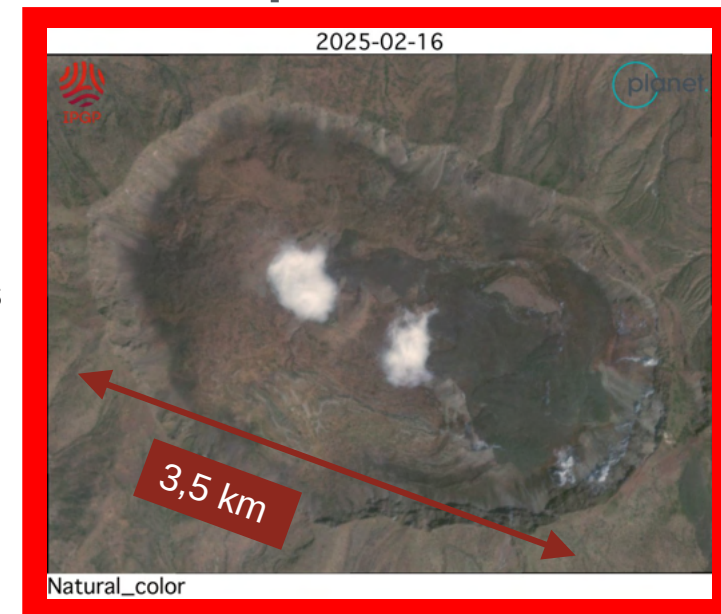
Migration de l'activité depuis le volcan vers le Nord

(Martin Vallée, IPGP)

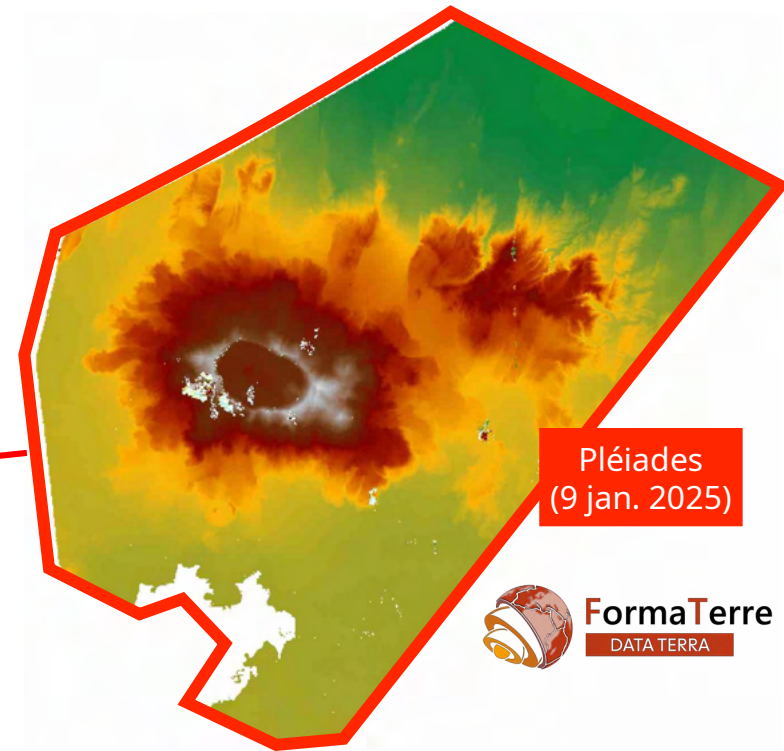
14 fév. 2025
Effondrement partiel de la caldéra



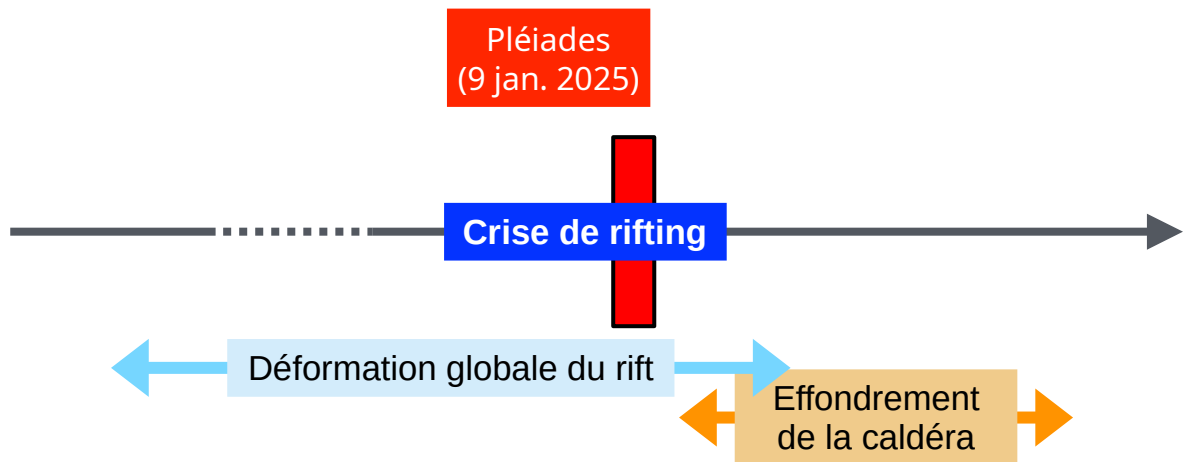
Images Planet



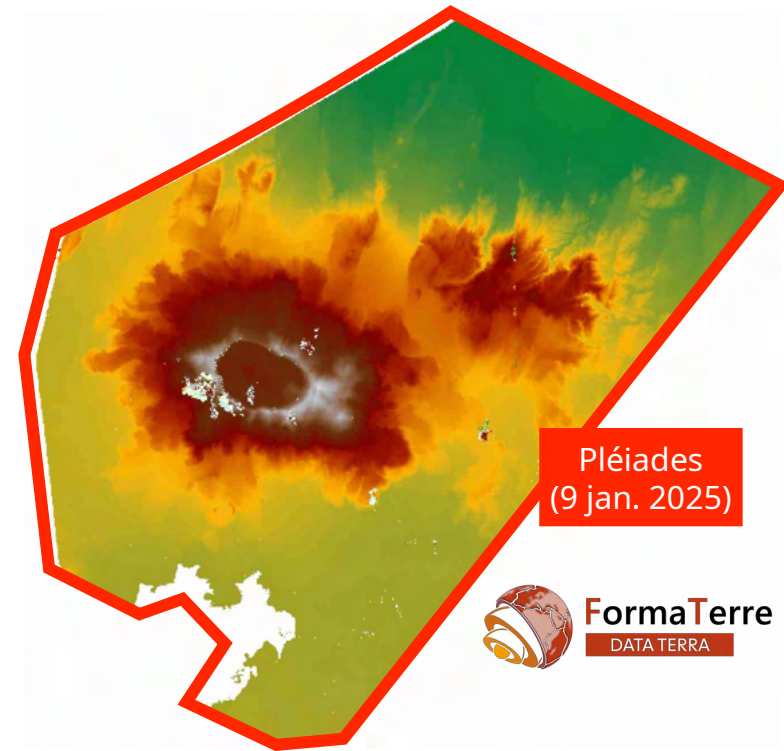
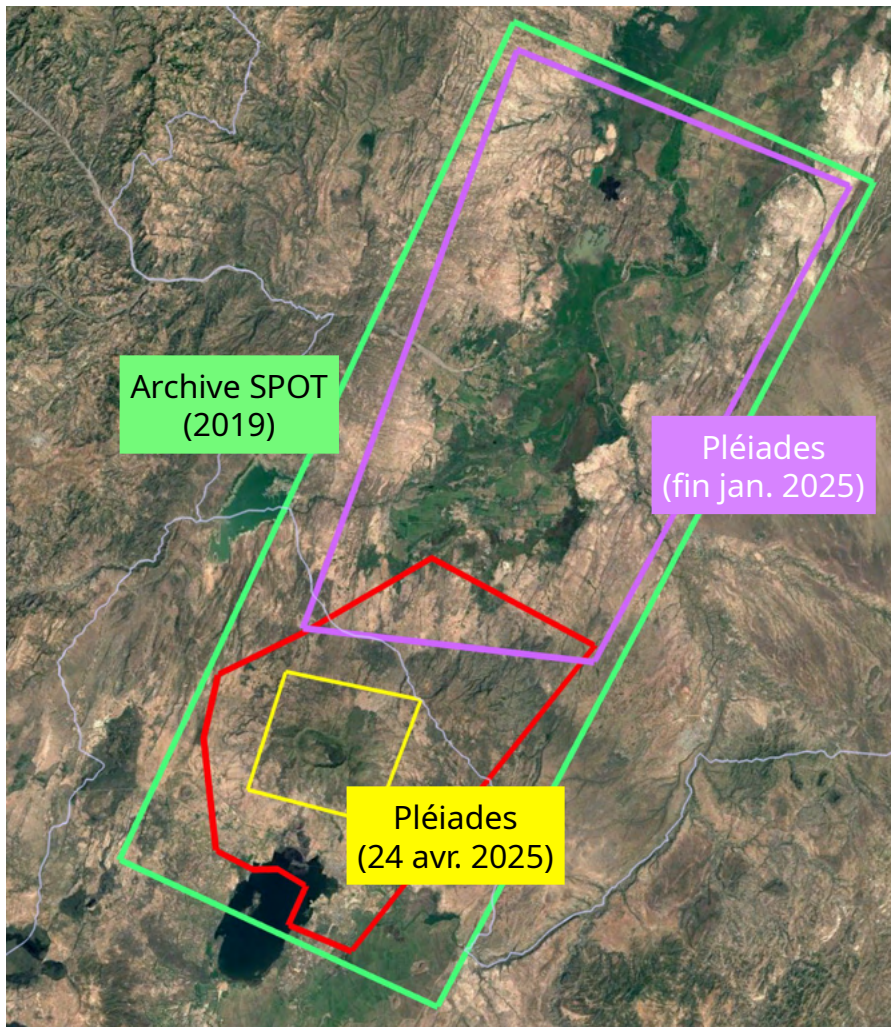
Le volcan Fentale, Éthiopie, 2025



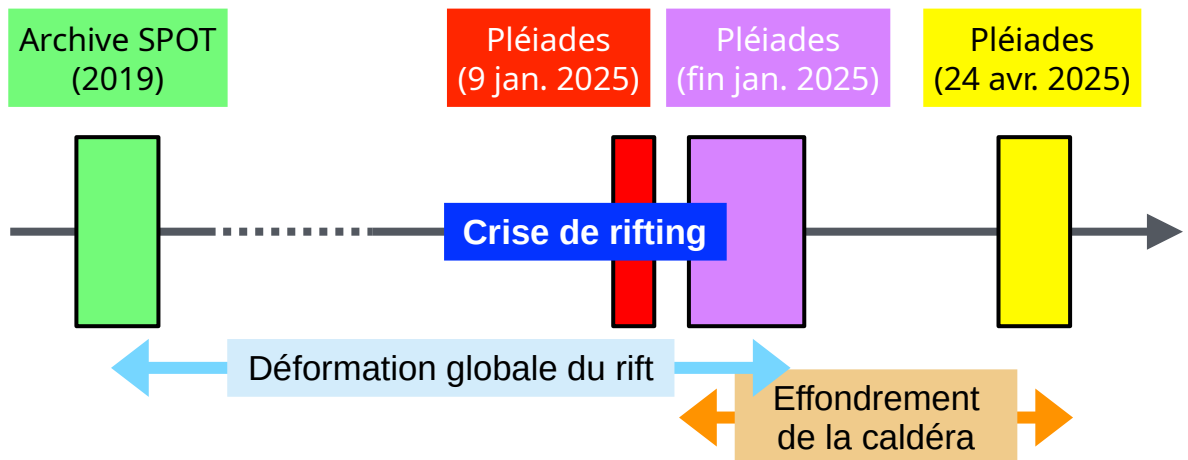
- Activation de la CREST² le 8 jan. 2025
- Acquisition Pléiades sans nuages le 9 jan. 2025
- Calcul automatique du MNS par le service DSM-OPT (FormaTerre) le 9 jan. 2025



Le volcan Fentale, Éthiopie, 2025



- Activation de la CREST² le 8 jan. 2025
- Acquisition Pléiades sans nuages le 9 jan. 2025
- Calcul automatique du MNS par le service DSM-OPT (FormaTerre) le 9 jan. 2025
- Couverture pré- et post-crise via DINAMIS

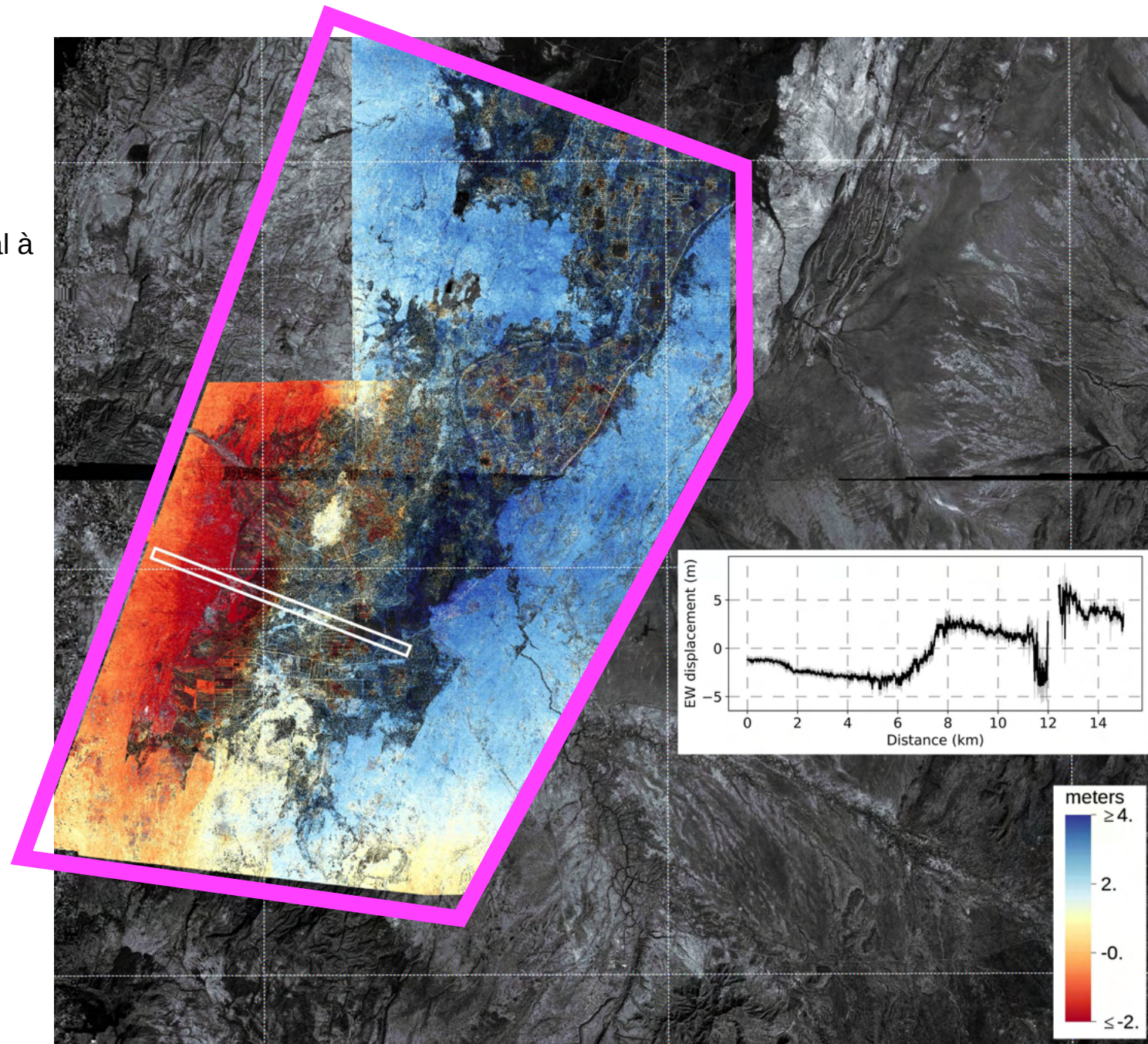
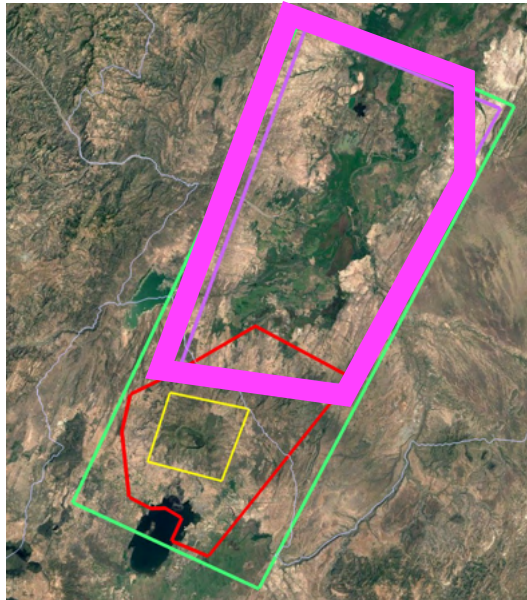


Le volcan Fentale, Éthiopie, 2025

Déformation globale du rift

- Corrélation SPOT-Pléiades
- ~5 m de déplacement horizontal à travers le rift

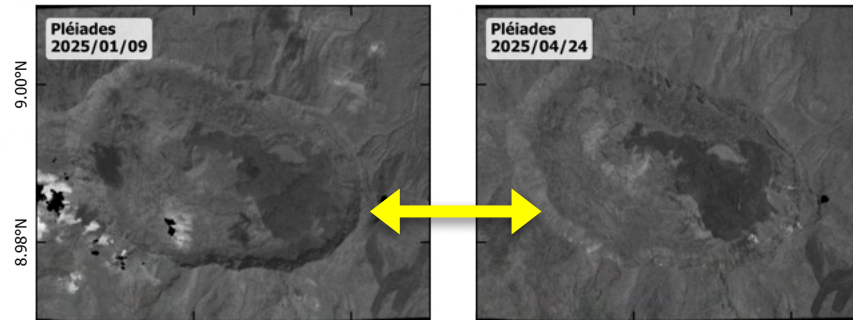
Emprise commune



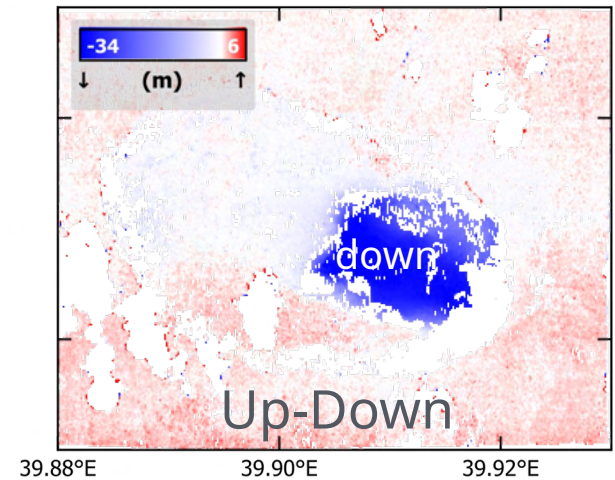
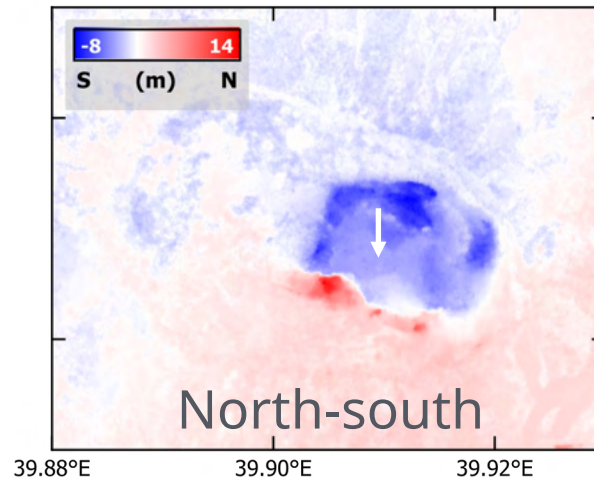
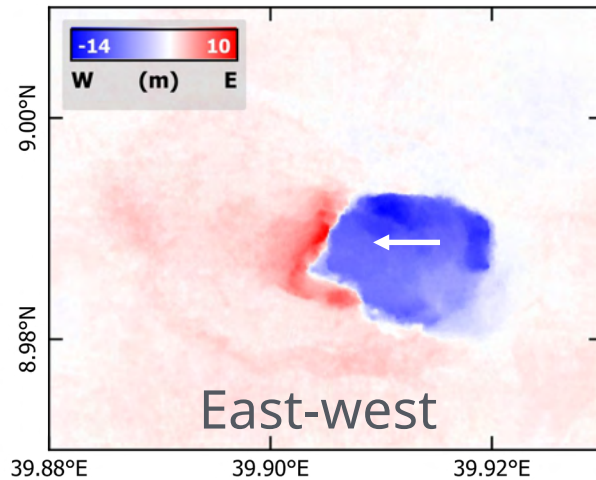
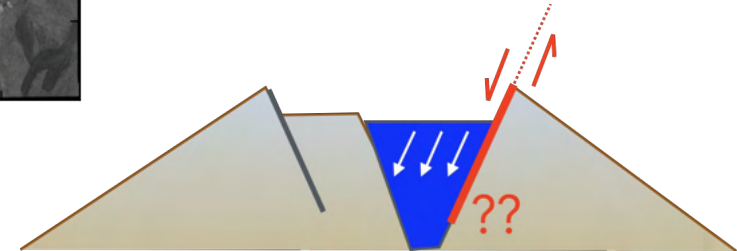
Le volcan Fentale, Éthiopie, 2025

Effondrement de la caldéra (déplacement 3D Pléiades-Pléiades)

- Deux acquisitions
Pléiades : 9 jan. et 24
avr. 2025
- Corrélation sub-pixel
- Différence de MNS



=> Plus de 35 m de subsidence
et 10 m d'affaissement dus au
retrait du magma



Horizontal

Vertical

Conclusion

- Les images THR permettent la **quantification des modes de déformation** de la surface lors de séismes : déformations localisée, distribuée, diffuse
- Les dispositifs d'accès aux données (DINAMIS, CIEST², ...) facilitent grandement l'étude des crises sismiques et volcaniques
- Mais la **réactivité** est un facteur crucial :
 - Volcans :
 - Évolution potentiellement rapide, besoin d'acquérir dans des délais très courts et de façon répétée
 - Nécessité de saisir les (rares) fenêtres météo sans nuages / fumeroles
 - Séismes :
 - Non-prévisibles, acquisition ponctuelle (post), mais potentiellement sur de grandes surfaces
 - Délais d'acquisition (météo, gestion des priorités entre les demandes de programmation) peuvent être défavorables à l'étude : décorrélation, disparition des marqueurs de la déformation
- La combinaison de différents capteurs (par ex. SPOT - Pléiades) est souvent la clef quand on regarde l'archive stéréo (SPOT : fauchée = 60 km)
- La retraite annoncée de SPOT et Pléiades va réduire drastiquement l'accès à la THR
⇒ Pléiades Neo (Airbus), CO3D (CNES - Airbus)