

Interférométrie radar appliquée à l'étude des séismes: apport des données de la constellation Sentinel-1

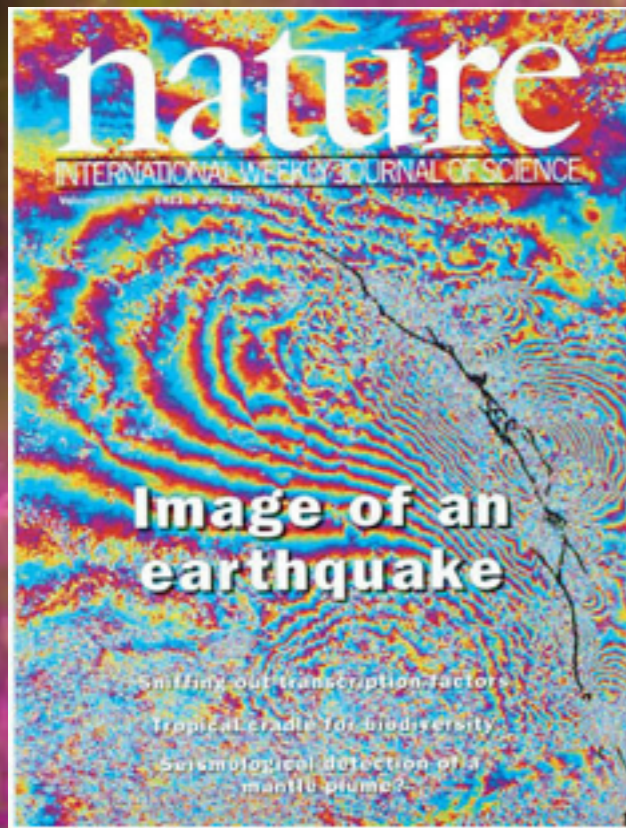


Raphaël GRANDIN

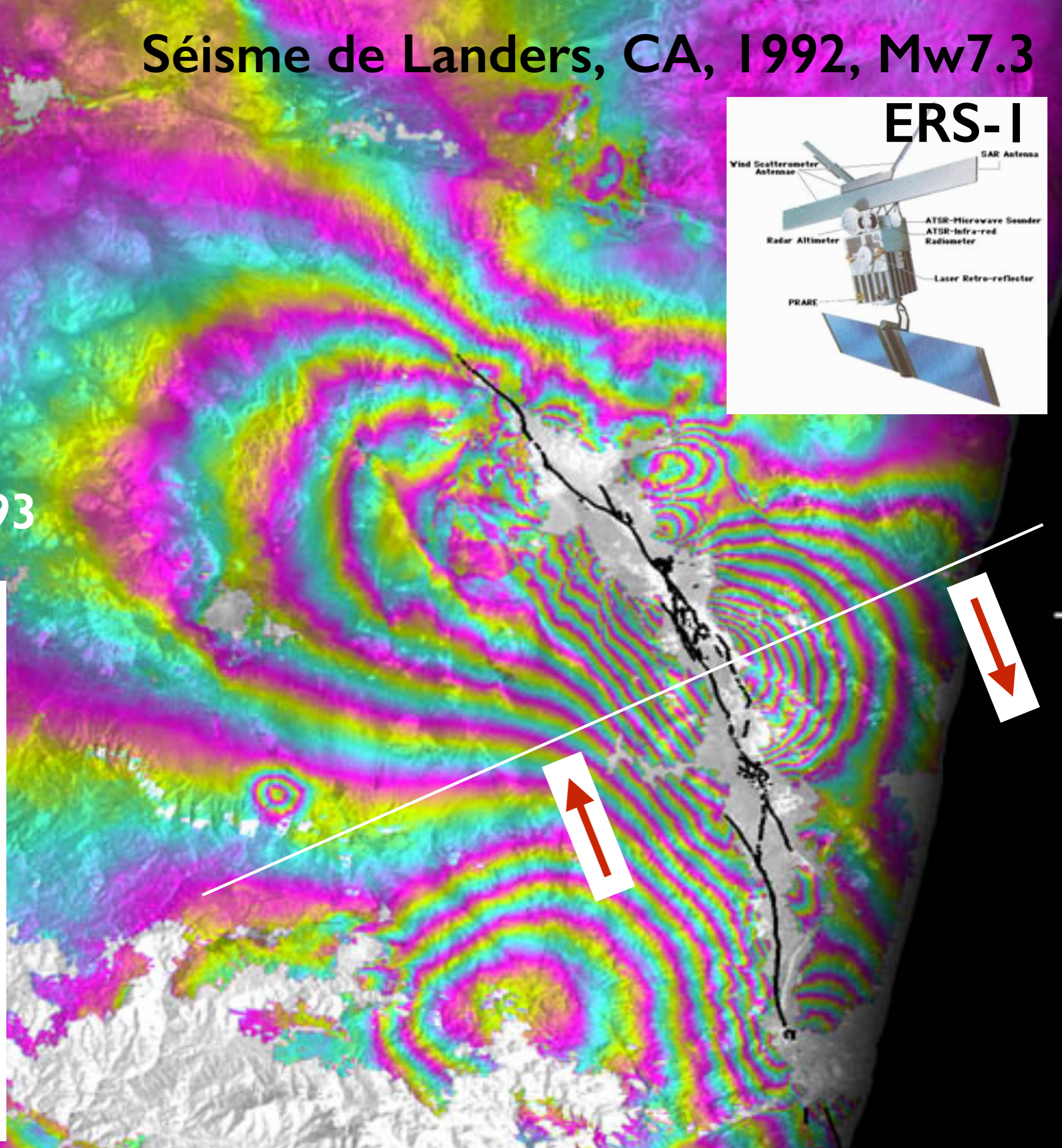
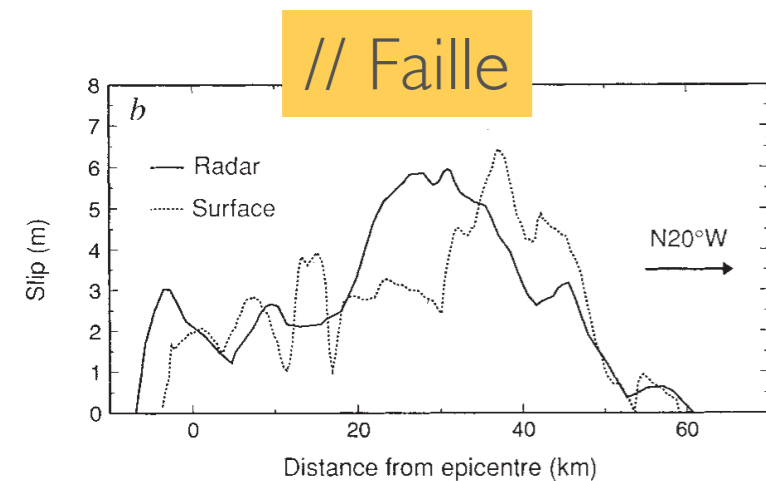
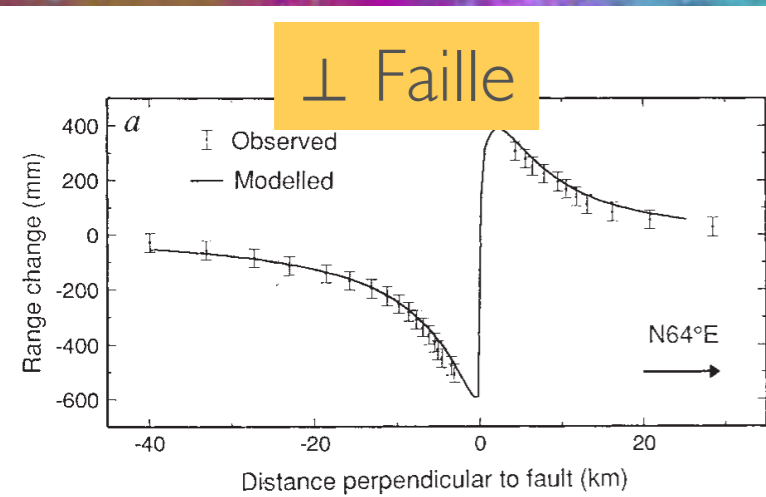
grandin@ipgp.fr

Marie-Pierre Doin, Yann Klinger,
Cécile Lasserre, Robin Lacassin,
Marianne Métois, Martin Vallée

Séisme de Landers, CA, 1992, Mw7.3

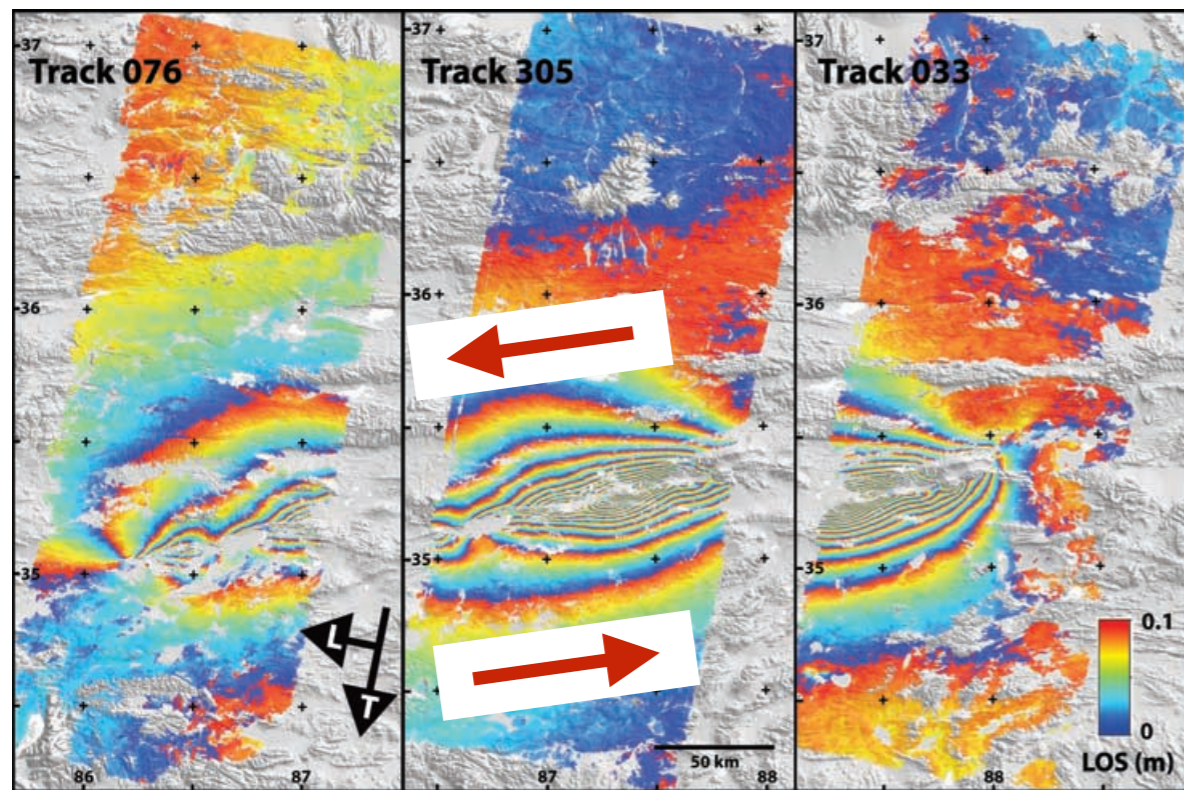


Massonnet et al., 1993

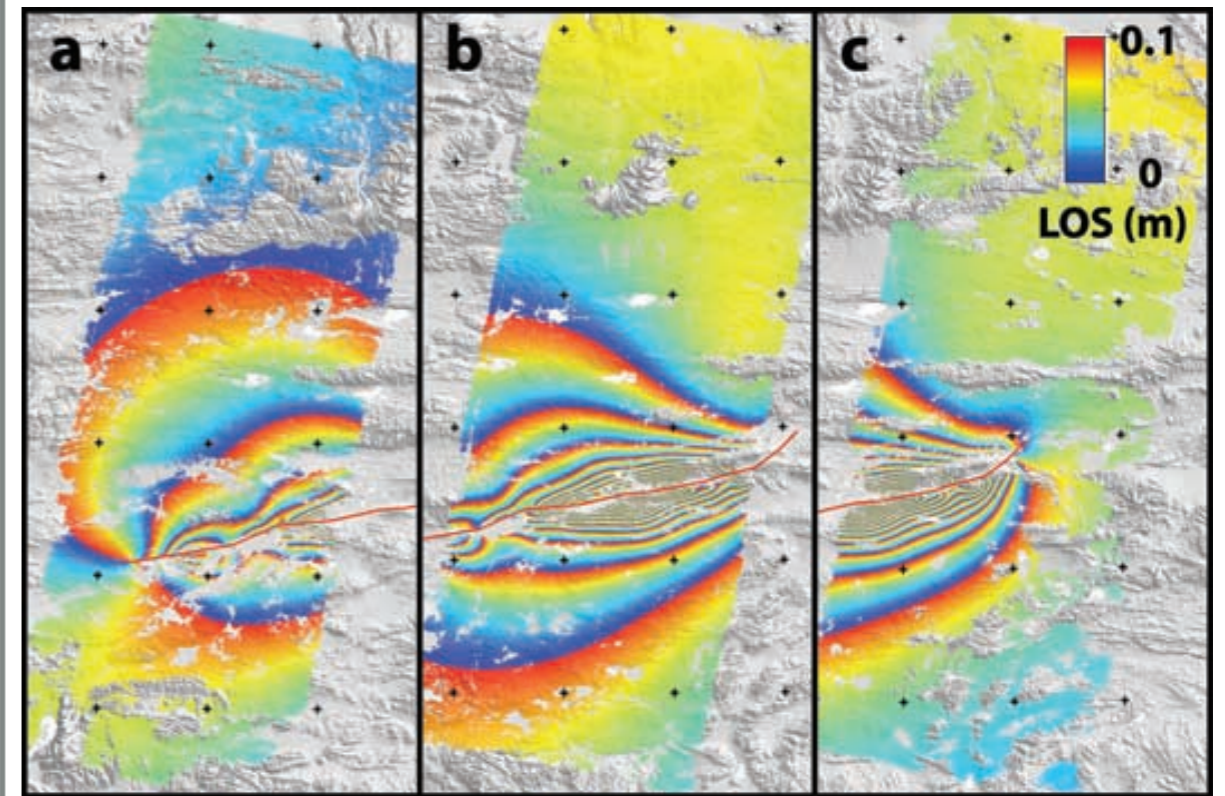


Déformation élastique cosismique

Données

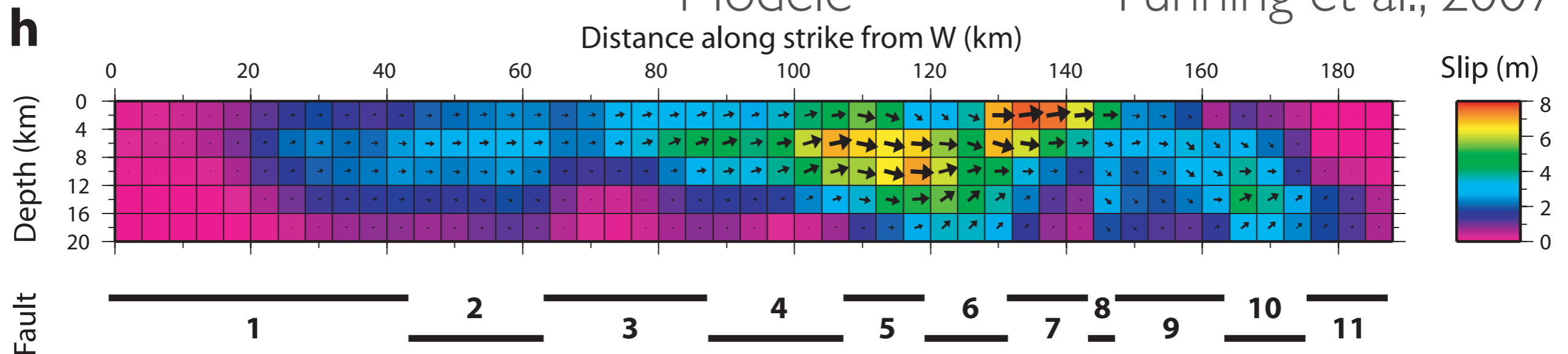


Prédiction



Modèle

Funning et al., 2007



Ce qui a changé depuis Landers...

Découverte de nouveaux
phénomènes sismiques

Difficultés
pour l'InSAR

Grands séismes (subduction)

Petits séismes

Post-sismique

Inter-sismique

Transitoires

Bruit atmosphérique

(turbulence, stratification)

Distortions ionosphériques

Perte de cohérence temporelle

Besoins

Haute résolution spatiale

Fauchée large

Temps de revisite raccourci

Faible ligne de base spatiale

Diversité géométrique

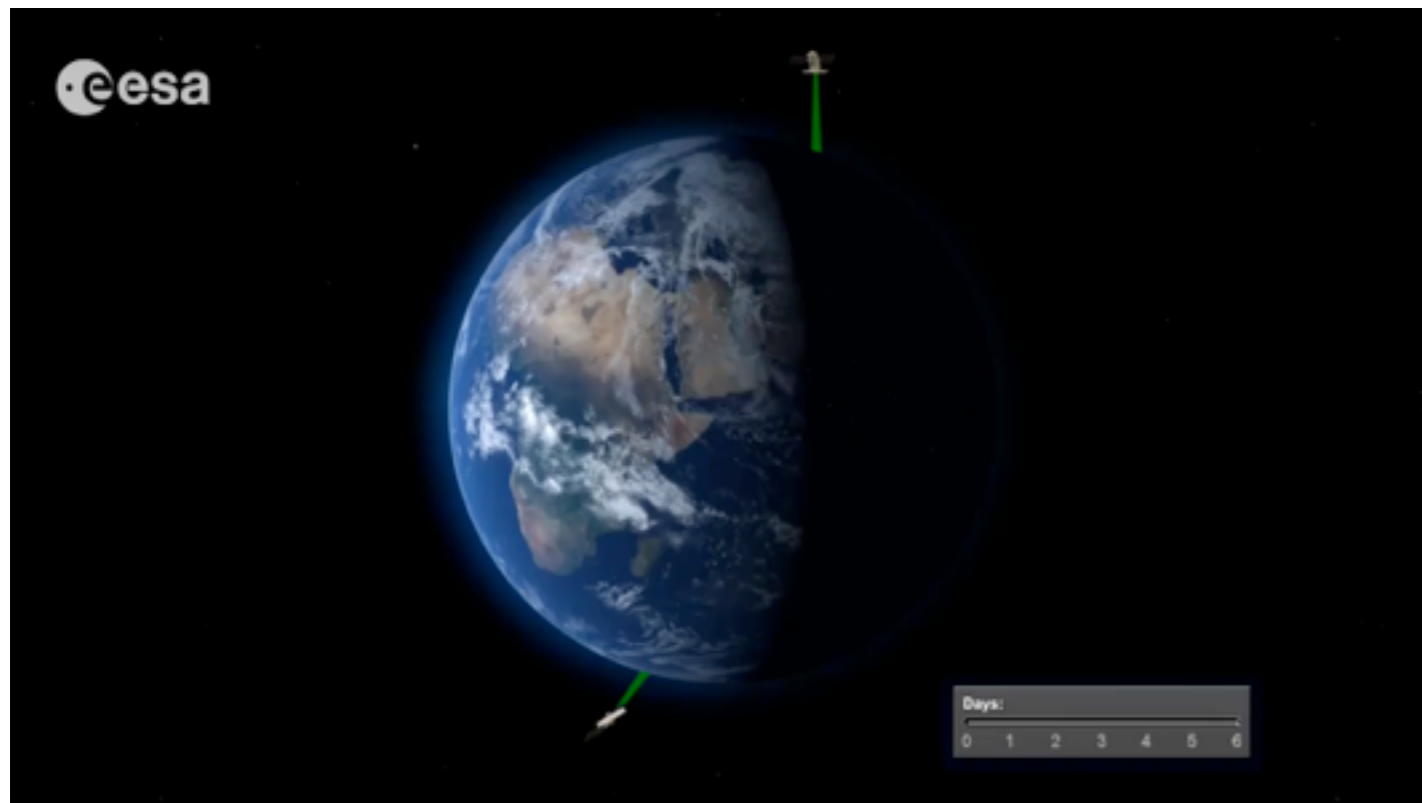
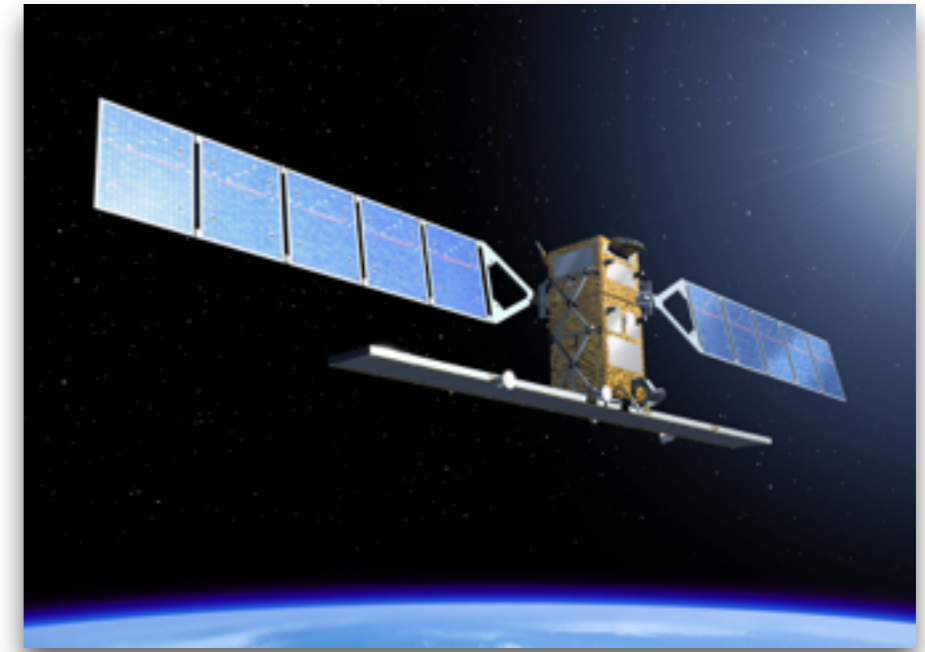
Concept de la mission Sentinel-1

SAR en bande C, dual-polarisation

Tube orbital diamètre $< 200\text{m}$

Cycle de 12 jours

Constellation de 2 satellites :
S1A (2014) et S1B (2016) ... +S1C +S1D!



Acquisitions systématiques

Temps réel ($\sim 3\text{h}$)

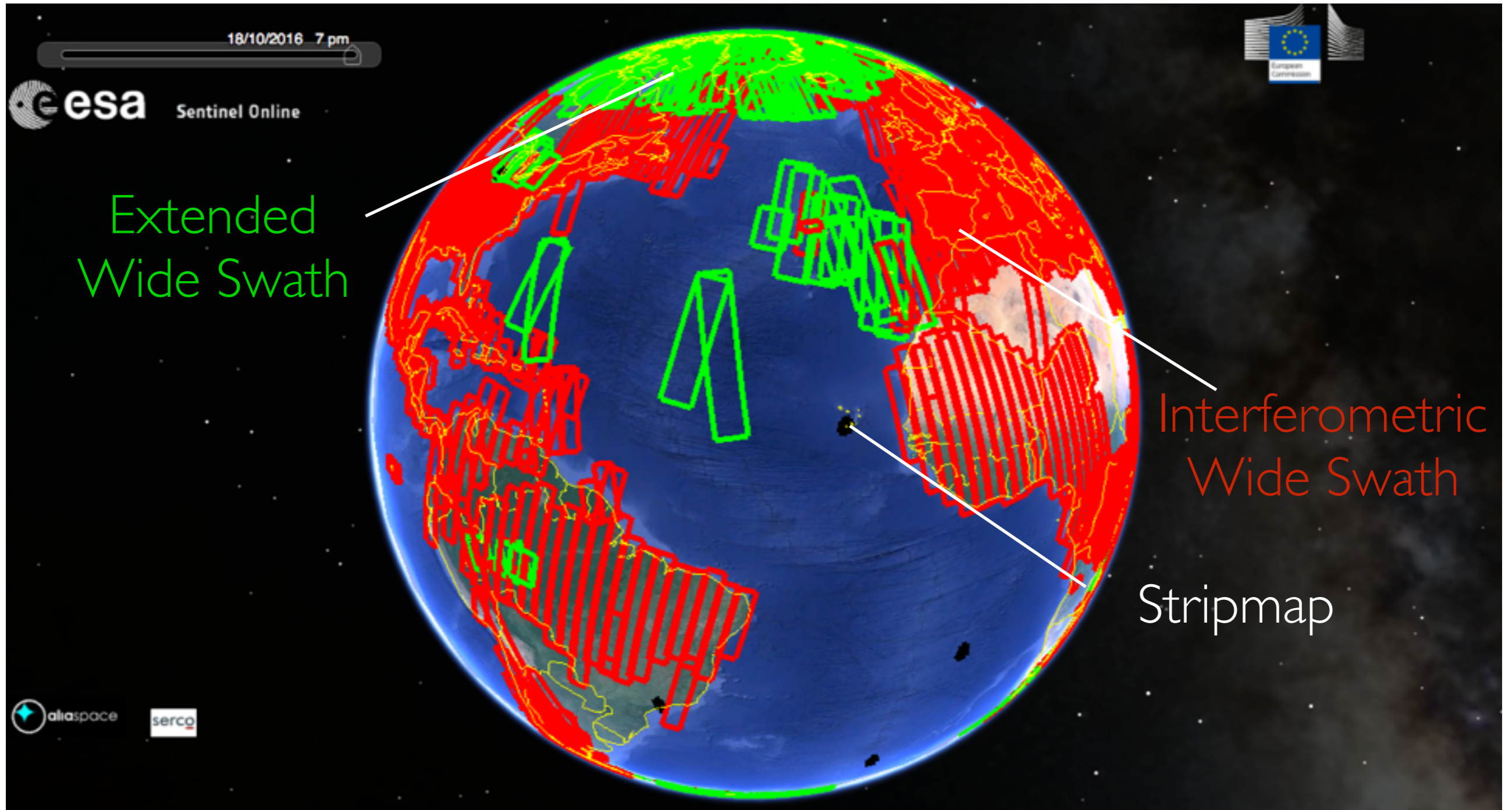
Données en libre accès

Sentinel-1 : un seul mode d'acquisition

Priorité : fréquence de revisite

Cycle : 12 jours

Sentinel-1A – 22 sept. ➔ 18 oct. 2016



30 acquis./an en Europe!

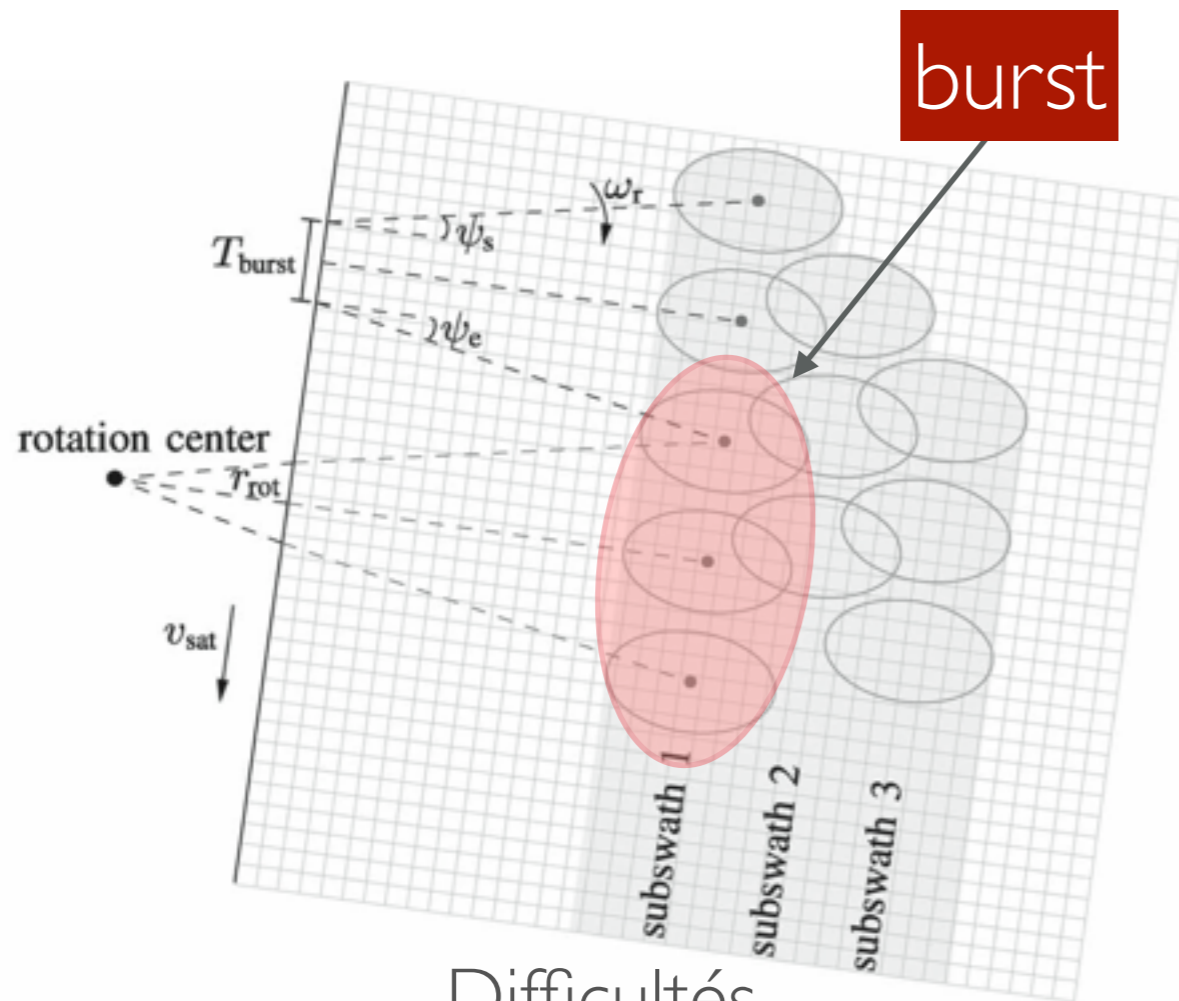
60 acquis./ an avec S I B!

Mode d'acquisition TOPS

Rotation du faisceau { périodique en portée (cycle=3s)
progressive en azimuth



Mode d'acquisition TOPS



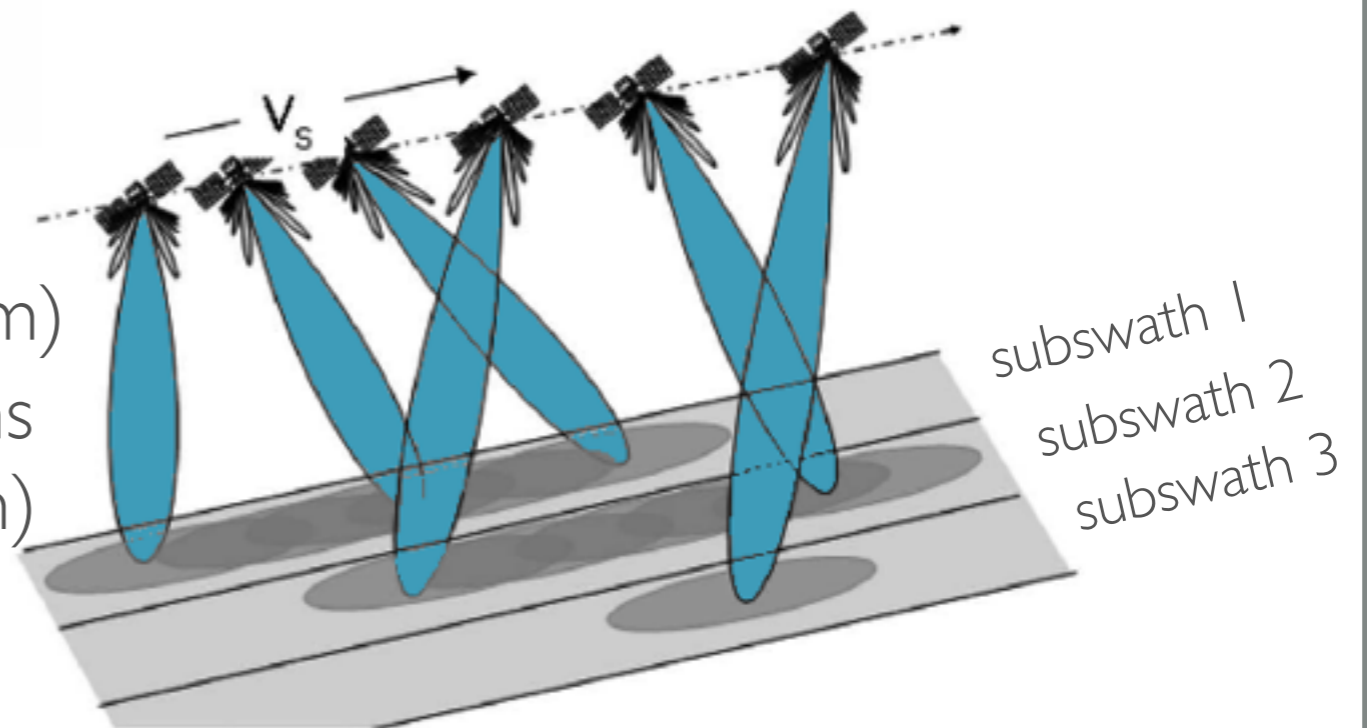
burst

Intérêts

- mode wide-swath
- les cibles sont toujours « vues » par le centre du faisceau \Rightarrow meilleure radiométrie
- bursts plus longs \Rightarrow moins de temps de latence entre les bursts

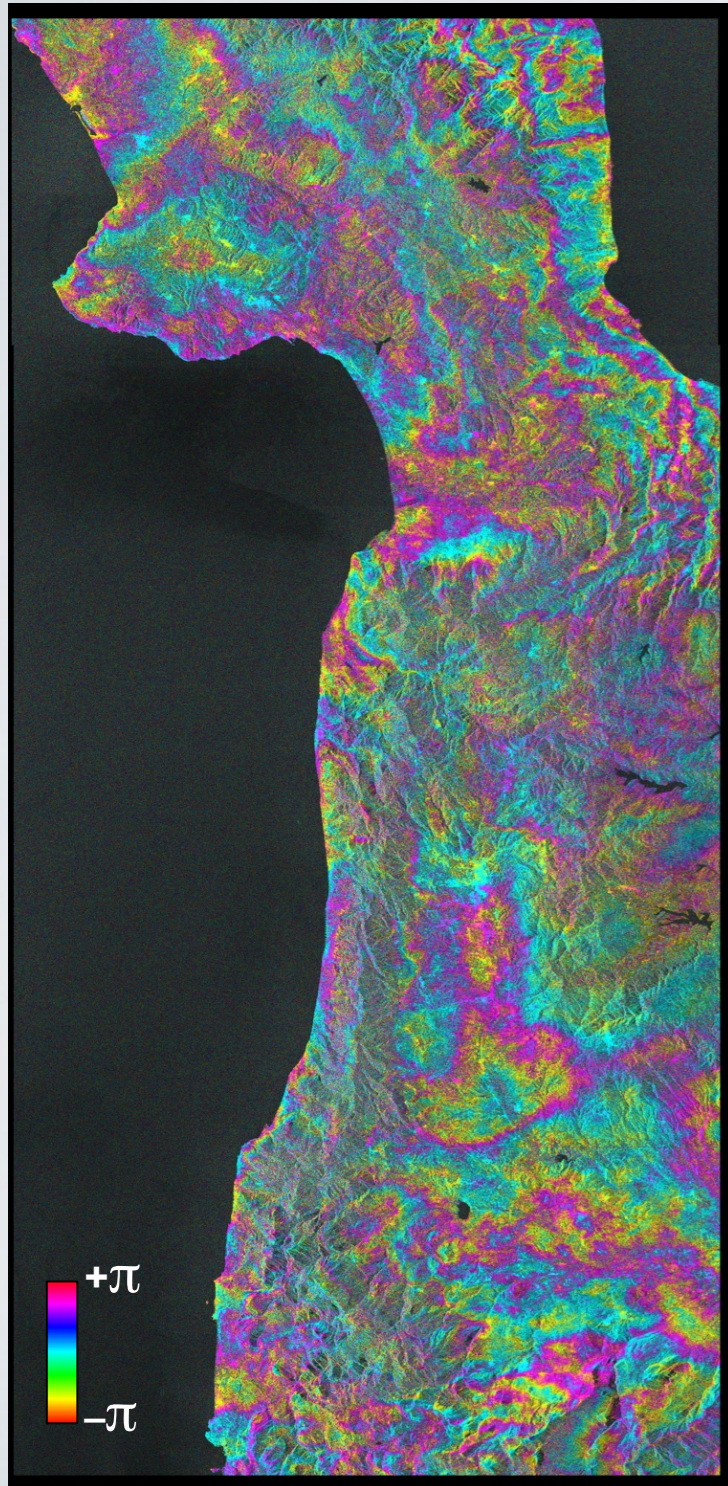
Difficultés

- l'InSAR requiert une parfaite synchronisation en vol (~ 10 ms \Leftrightarrow 7m)
- focalisation plus complexe (variations du Doppler en fonction de l'azimuth)
- requiert une coregistration parfaite (rampe de phase en azimuth)

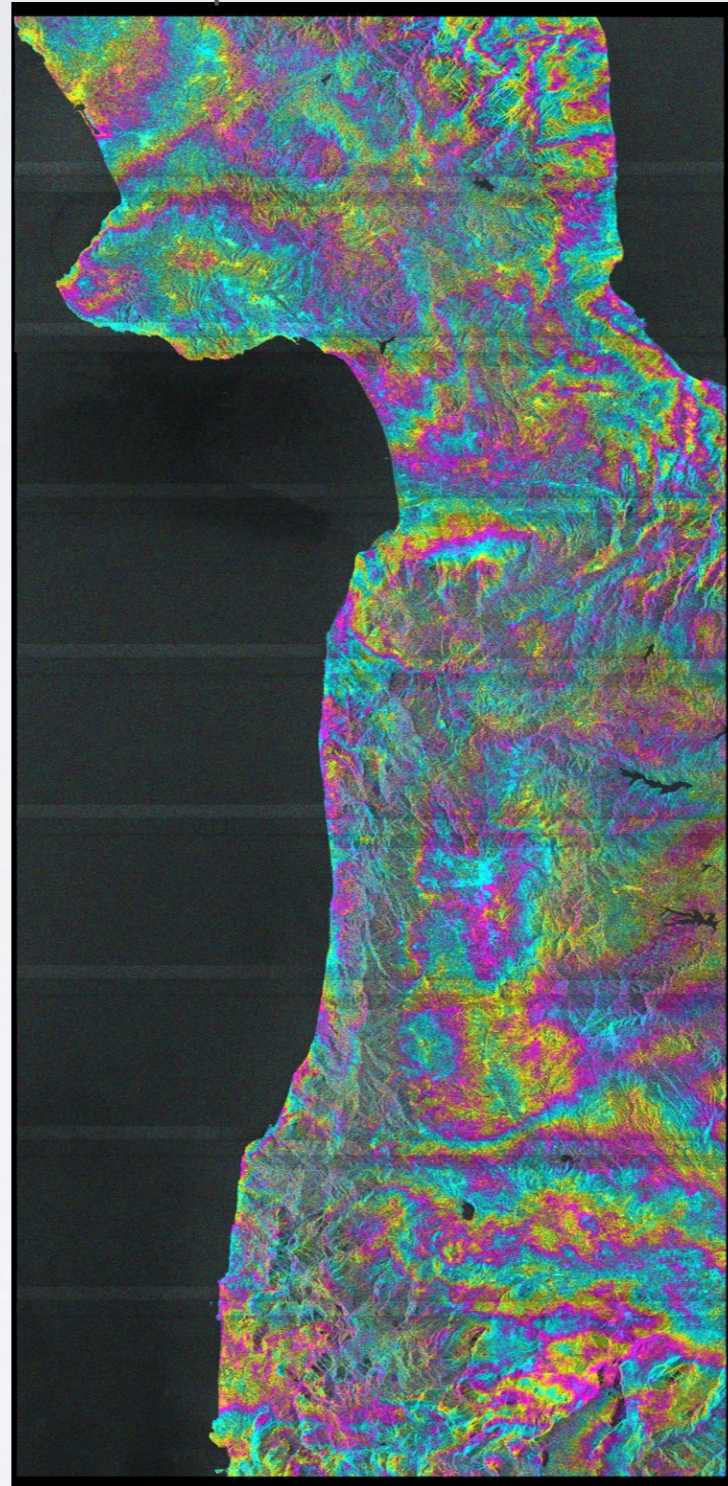


Effet d'une petite erreur de coregistration

Référence



Erreur de positionnement
de 0.1 pixel en azimuth

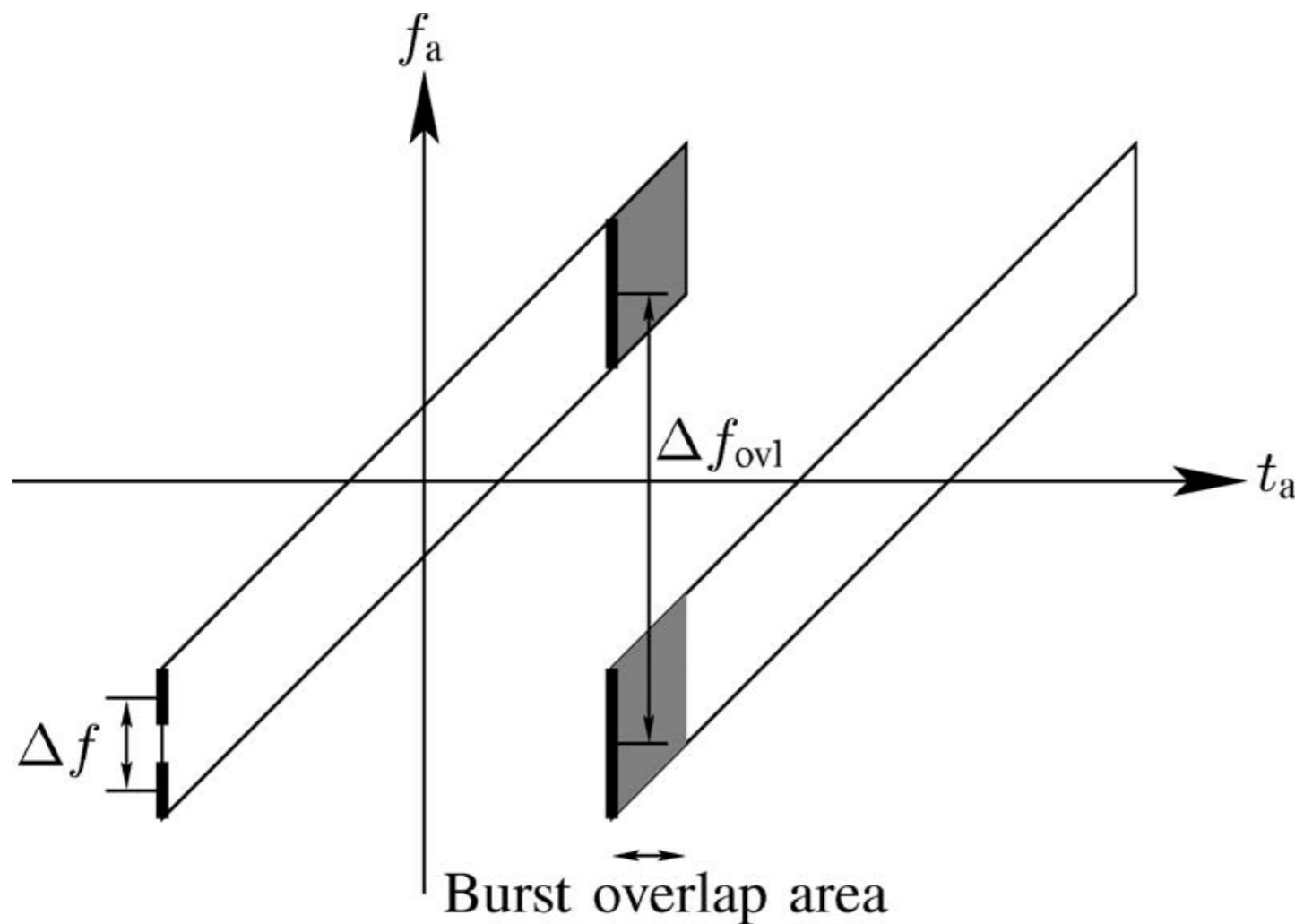


Différence



Phase

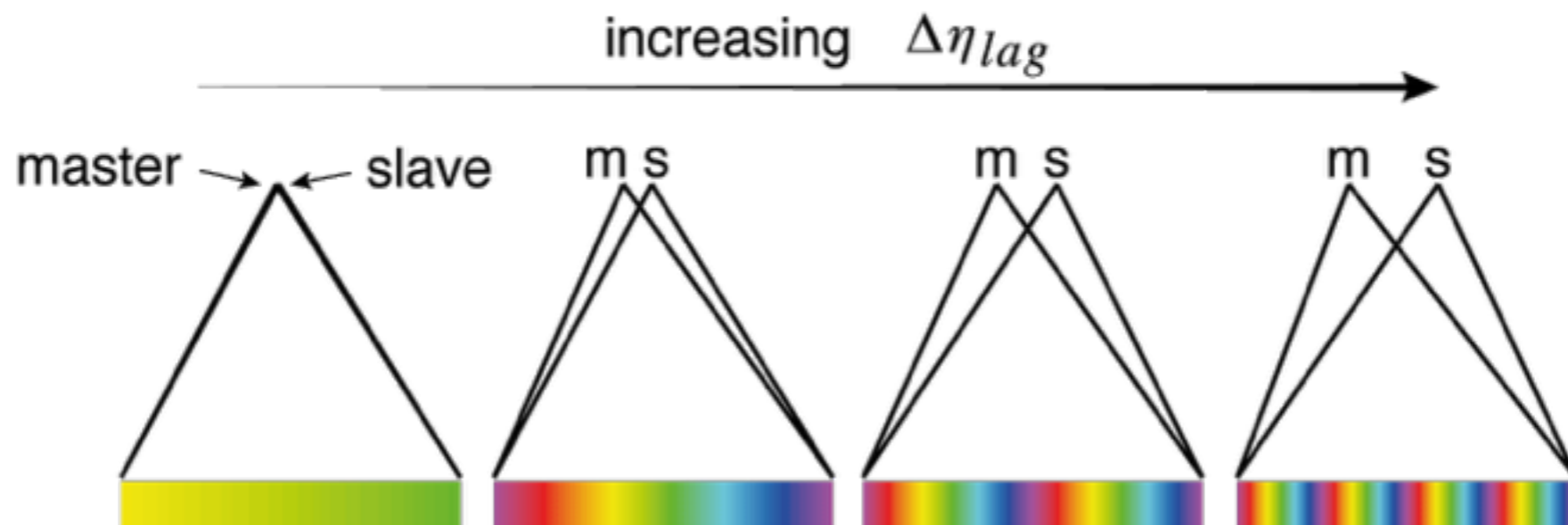
Coregistration précise : diversité spectrale



Double-différence

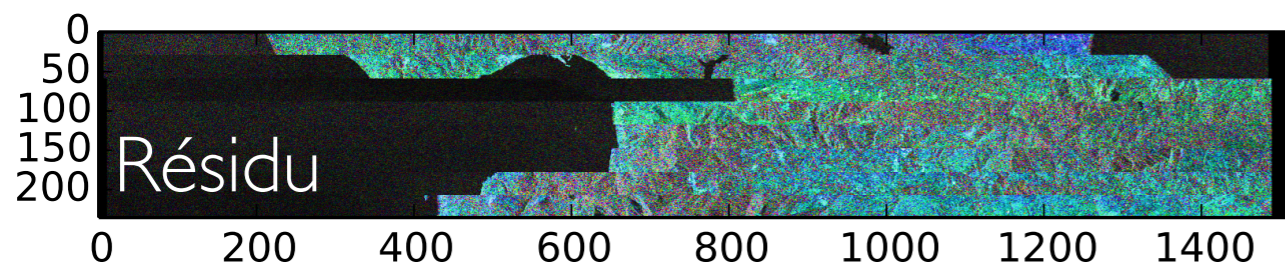
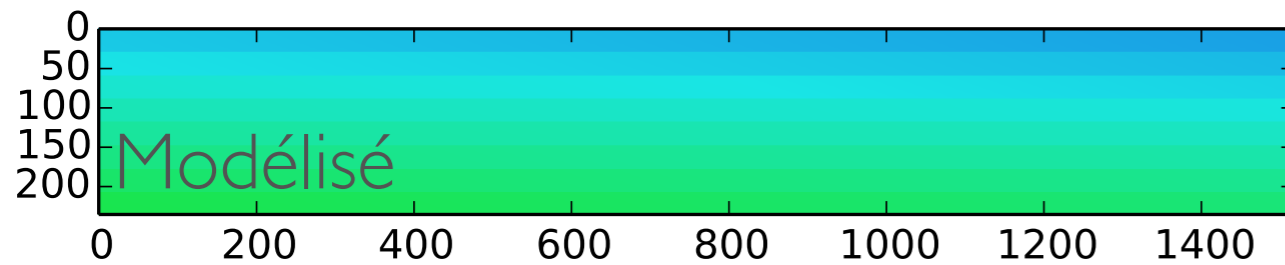
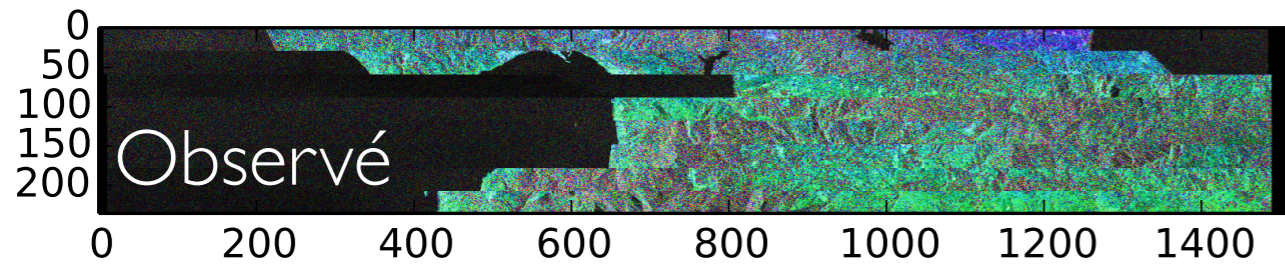
{ interférogramme avant }
moins
{ interférogramme arrière }

$$\phi_{sd} = 2\pi \Delta f \Delta t$$

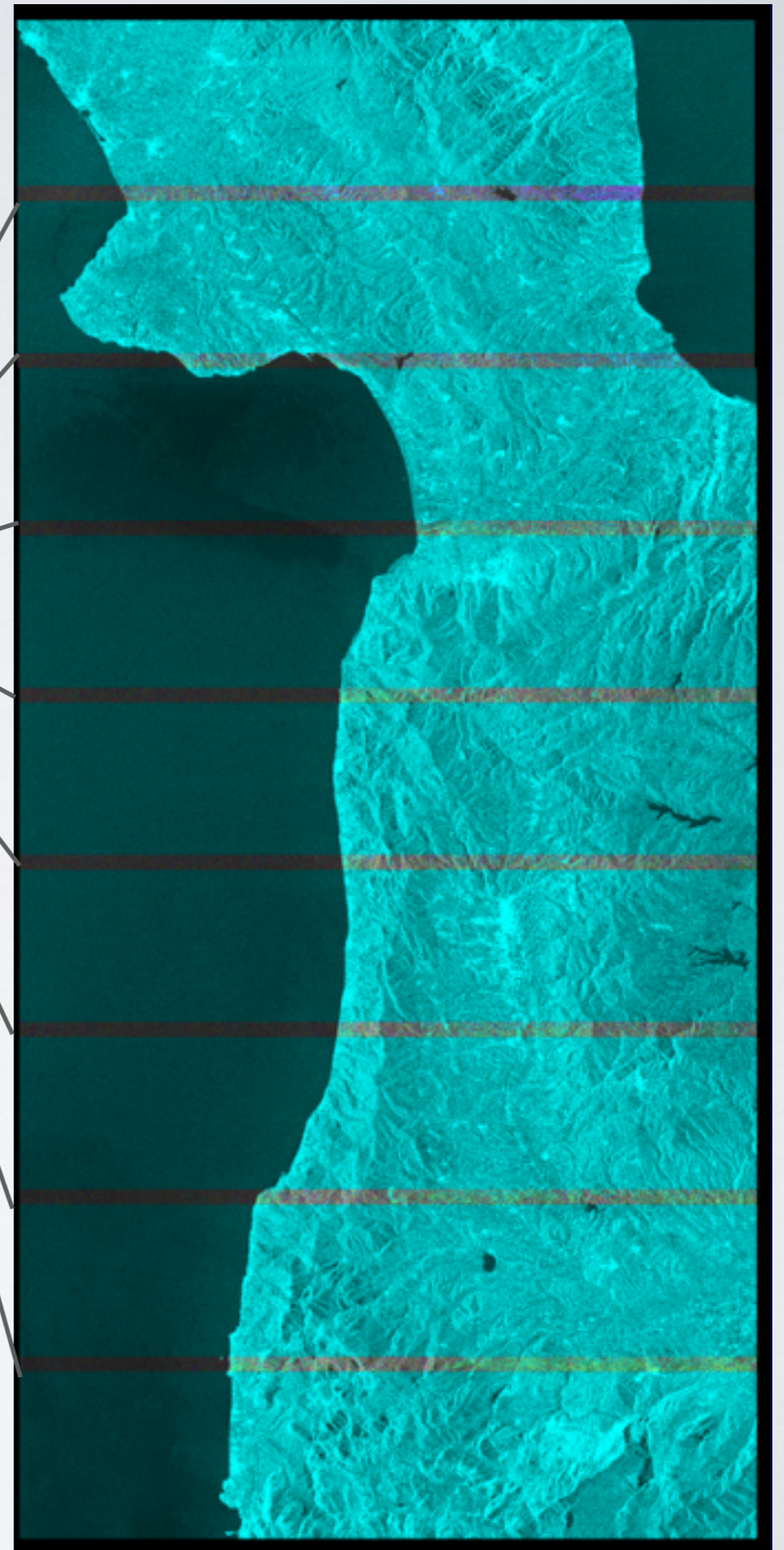


Diversité spectrale

{ interférogramme avant }
moins
{ interférogramme arrière }

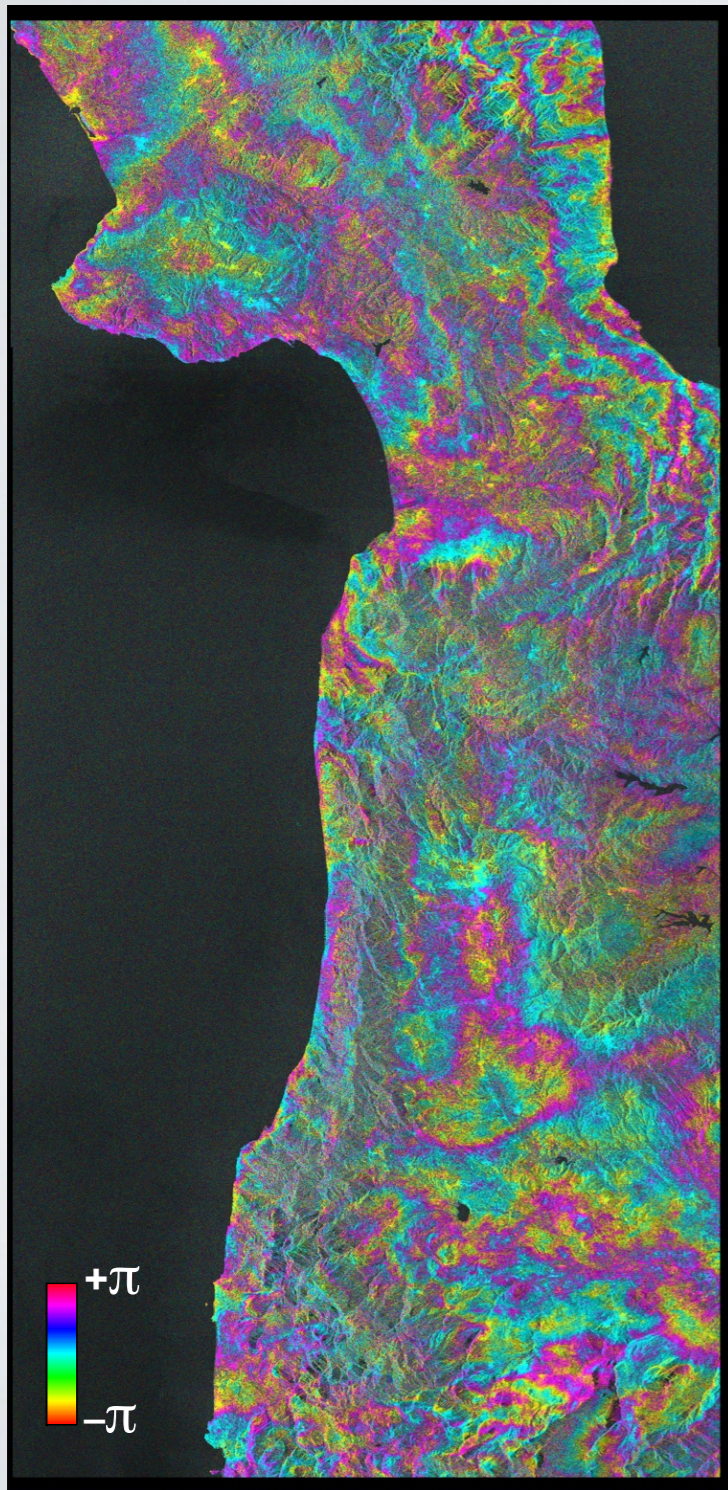


$$\phi_{sd} = 2\pi \Delta f \Delta t$$

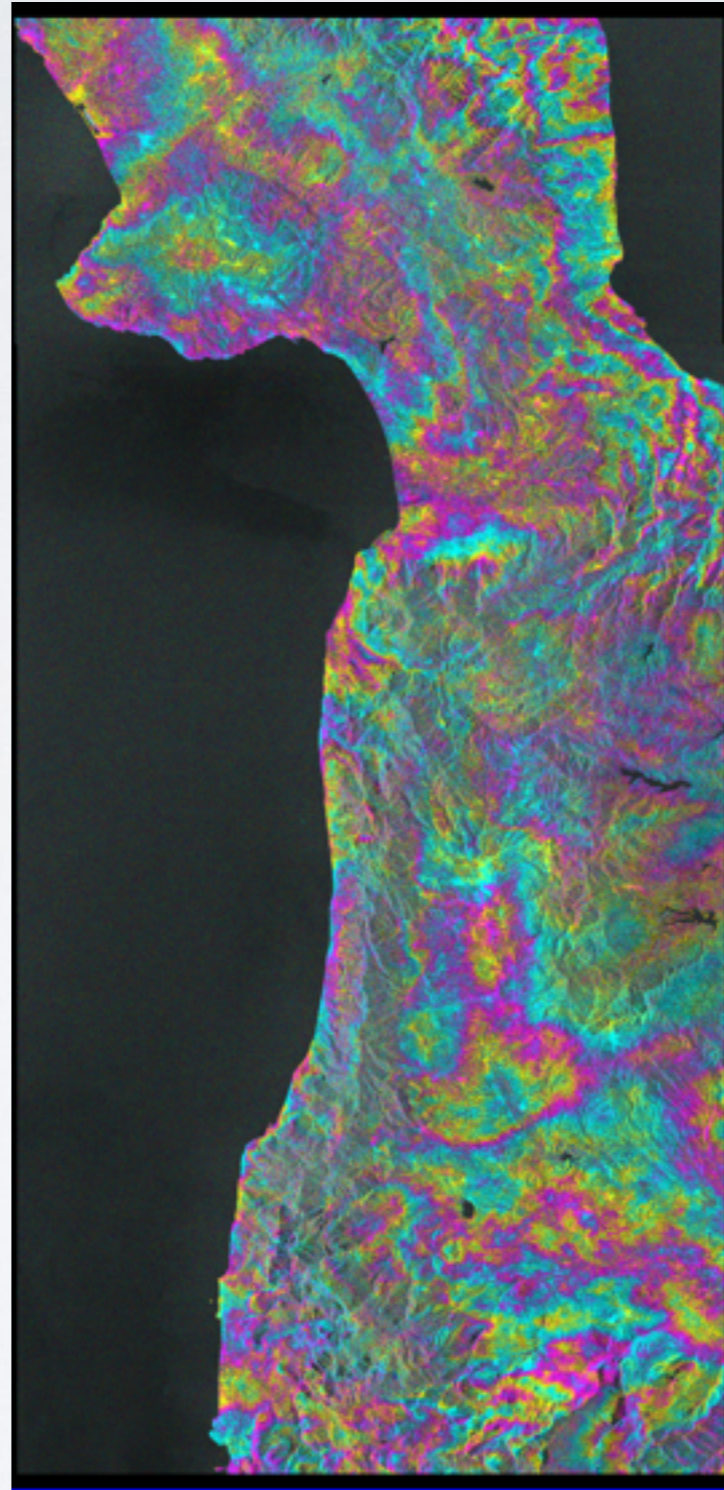


Diversité spectrale

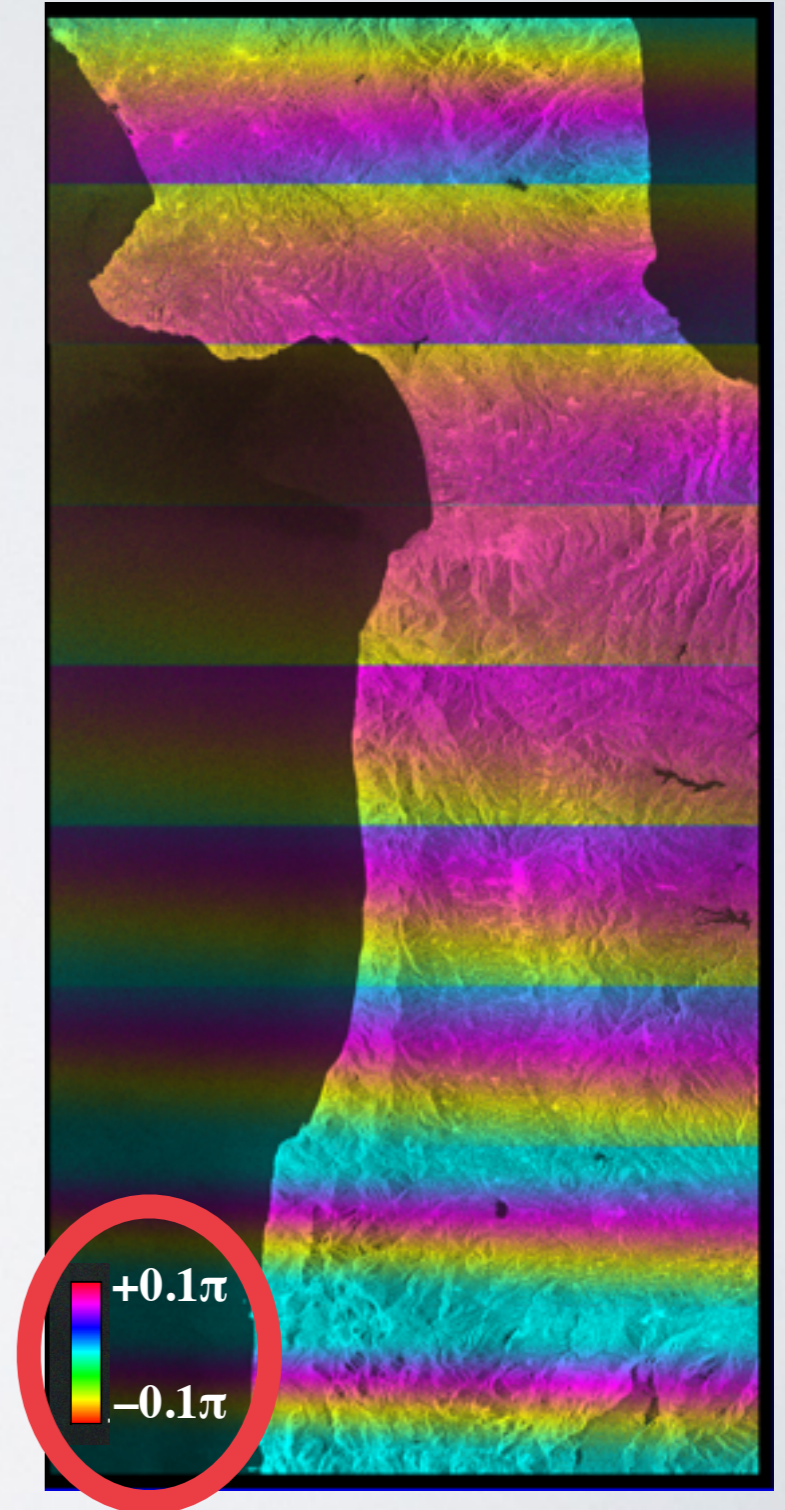
Avant correction



Après correction



Différence

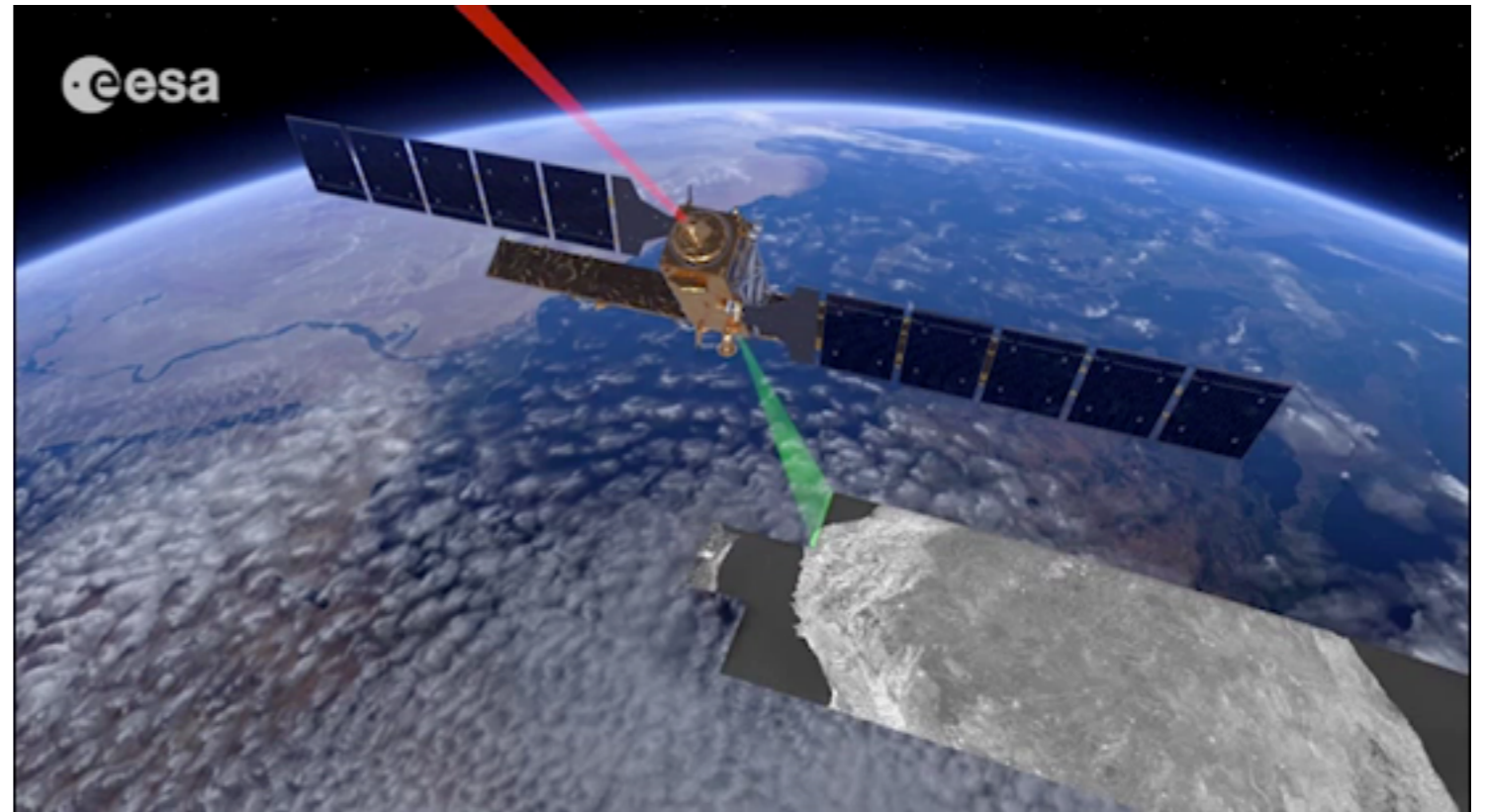


European Data Relay System (EDRS)

2 satellites en orbite géostationnaire:

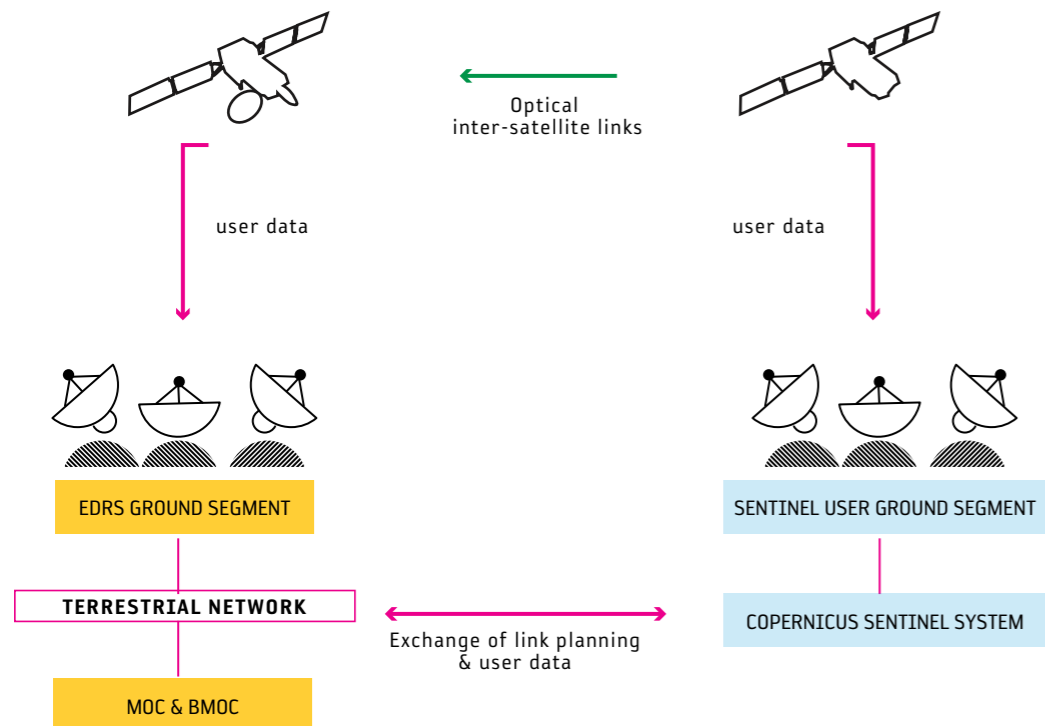
EDRS-A : 09°E (2016)

EDRS-C : 31°E (2018)



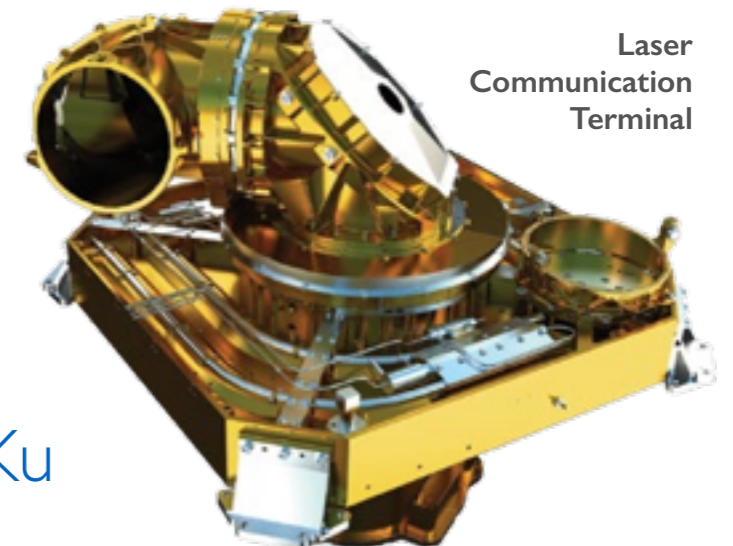
EDRS-A & -C

Sentinel-1A, 2A, 1B & 2B

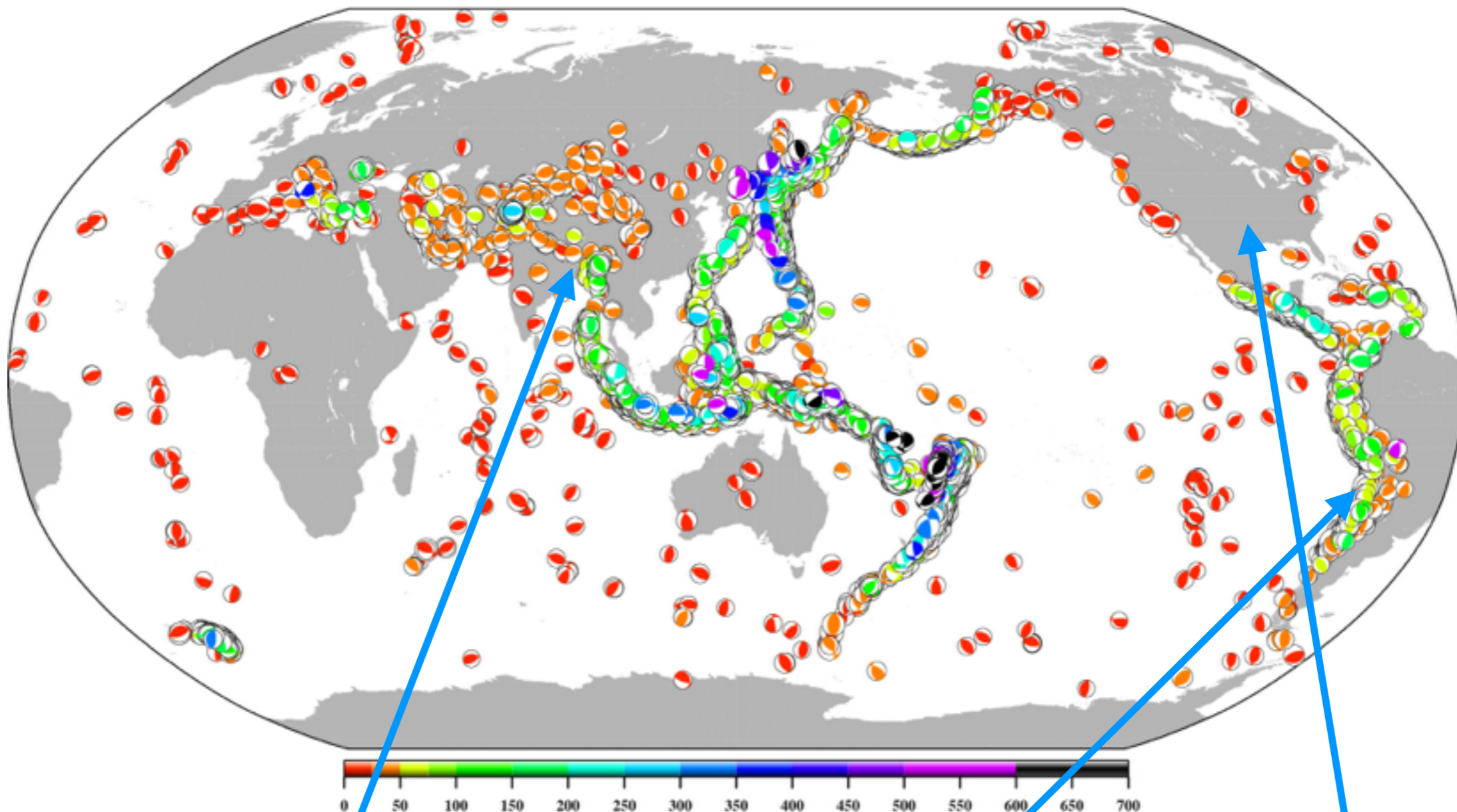


Comm. inter-sat.
laser @ 1.8Gb/s

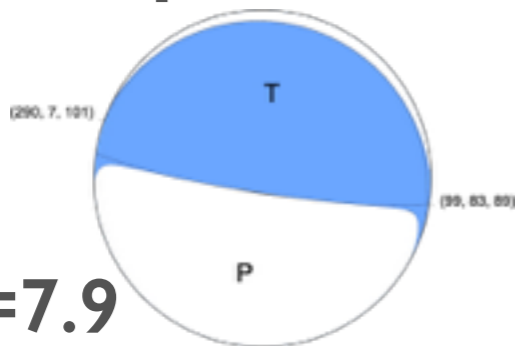
Liaison sol en bande Ku



Trois séismes récents

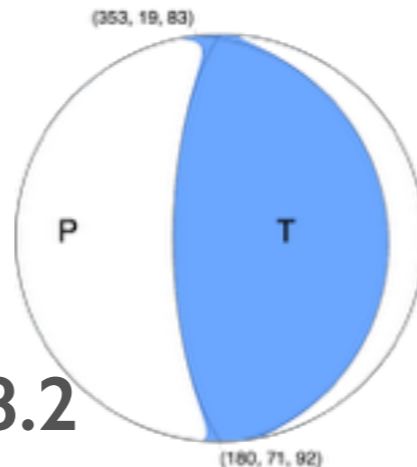


Nepal 2015



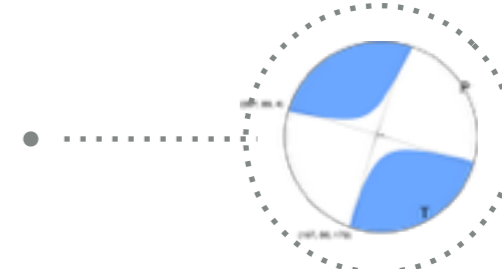
M=7.9

Chili 2015



M=8.2

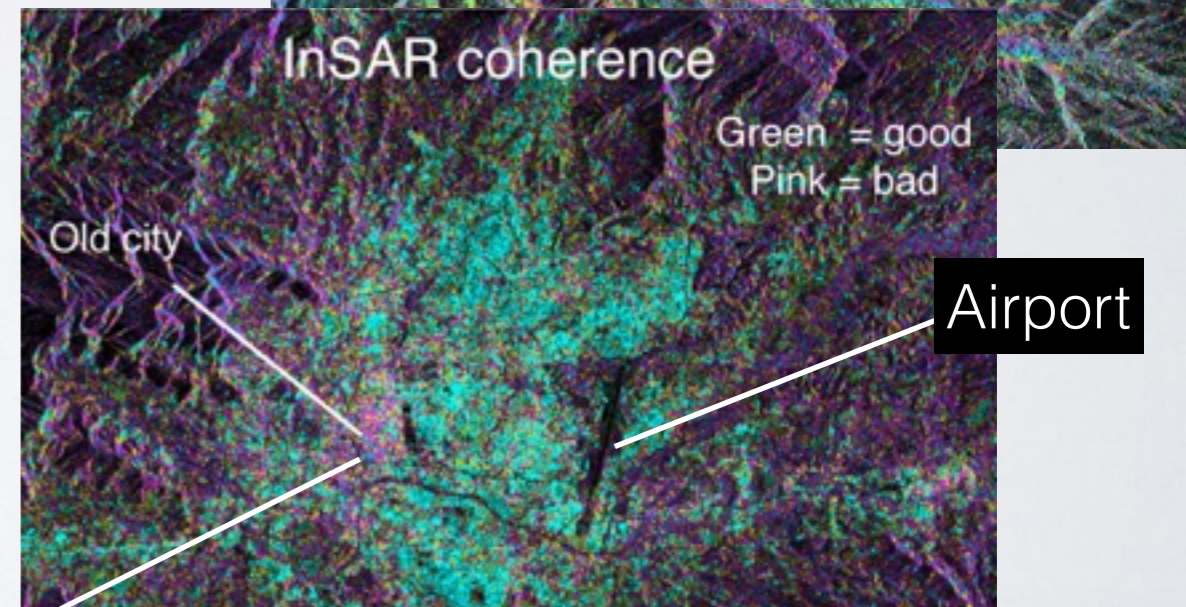
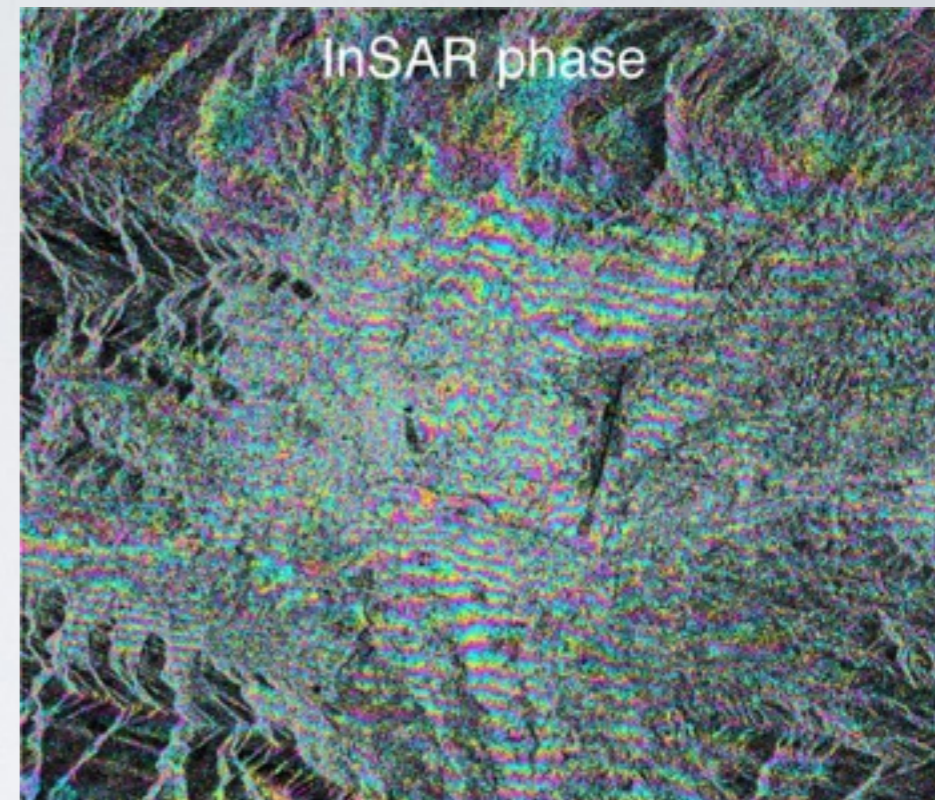
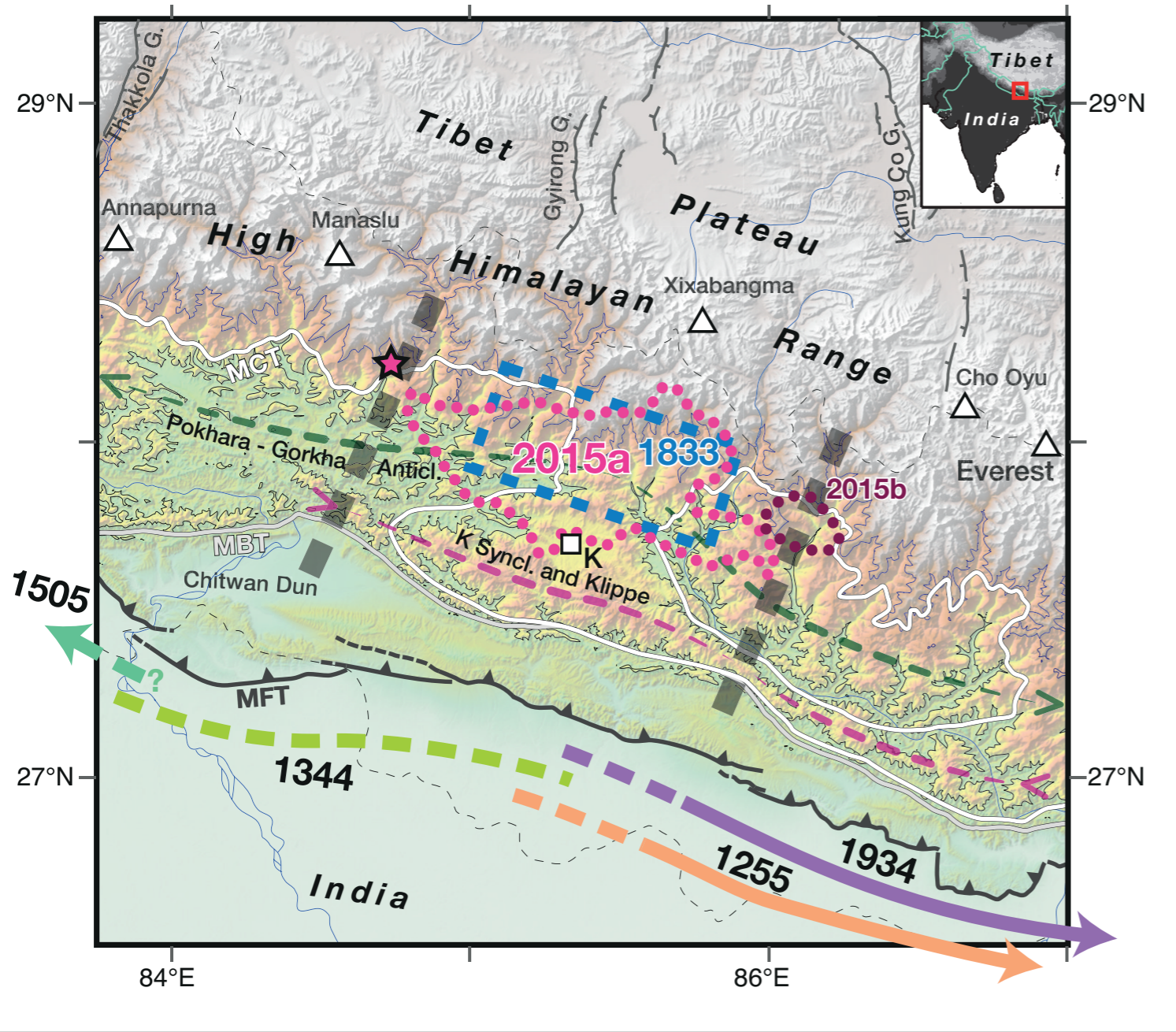
Oklahoma 2016



M=5.7

Séisme du Népal, 25 Avril 2015 (Mw7.9)

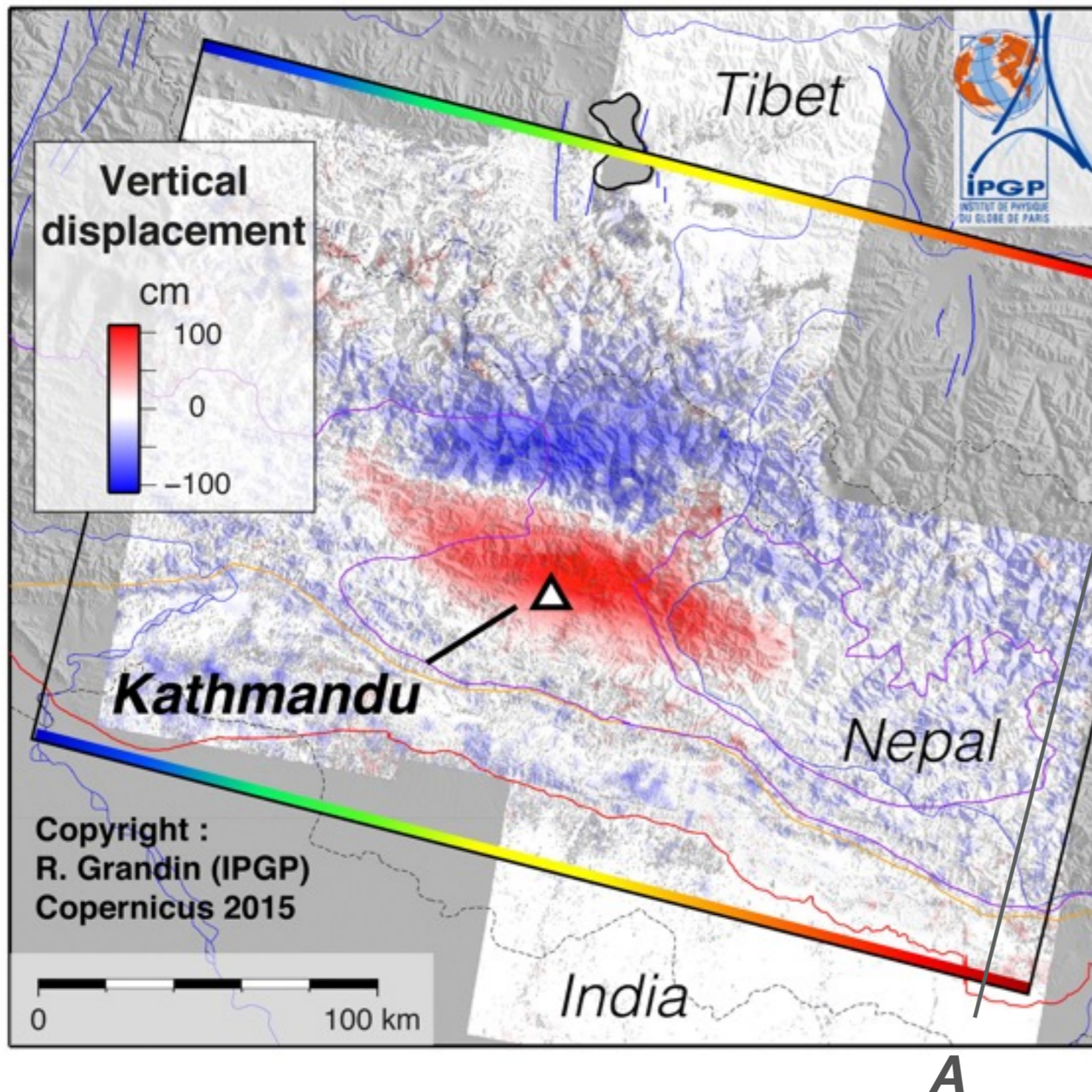
Estimation rapide
des dégâts



Grandin et al., 2015

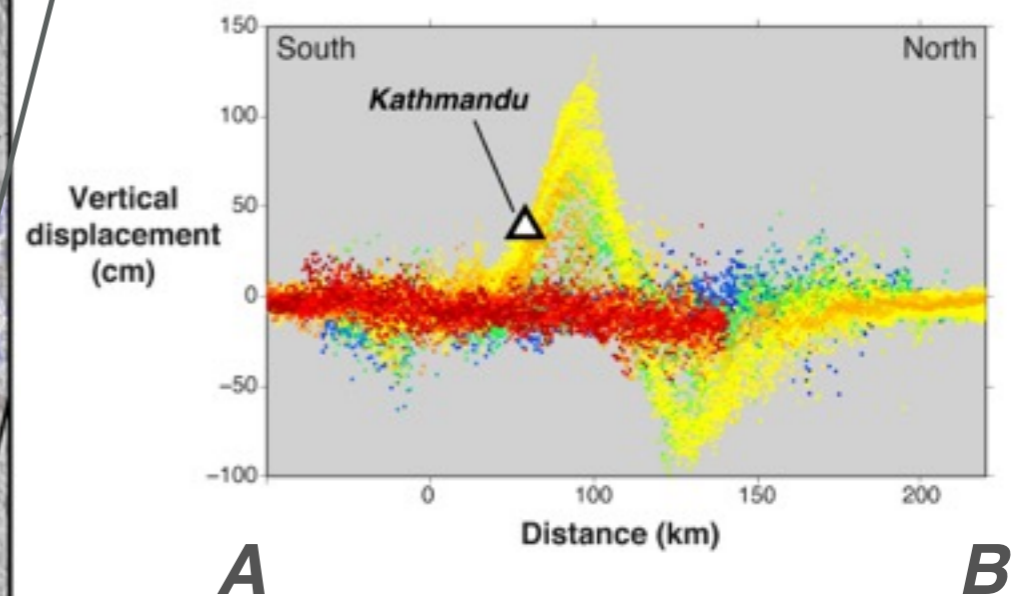
Interferométrie wide-swath

Déplacements cosismiques



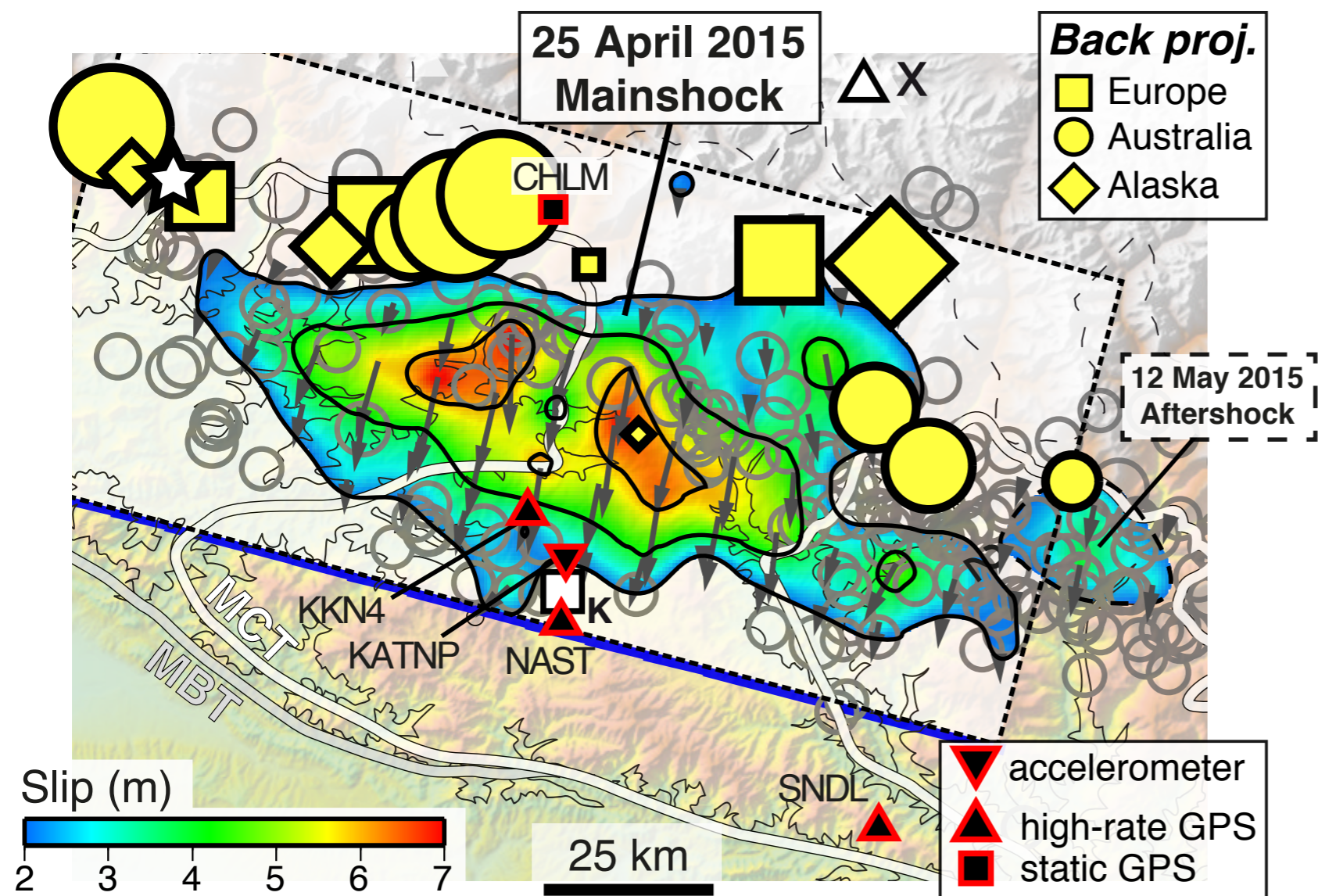
Absence de
rupture de surface
(séisme aveugle)

Profils stackés



Couplage géodésie - sismologie

Cinématique de la rupture

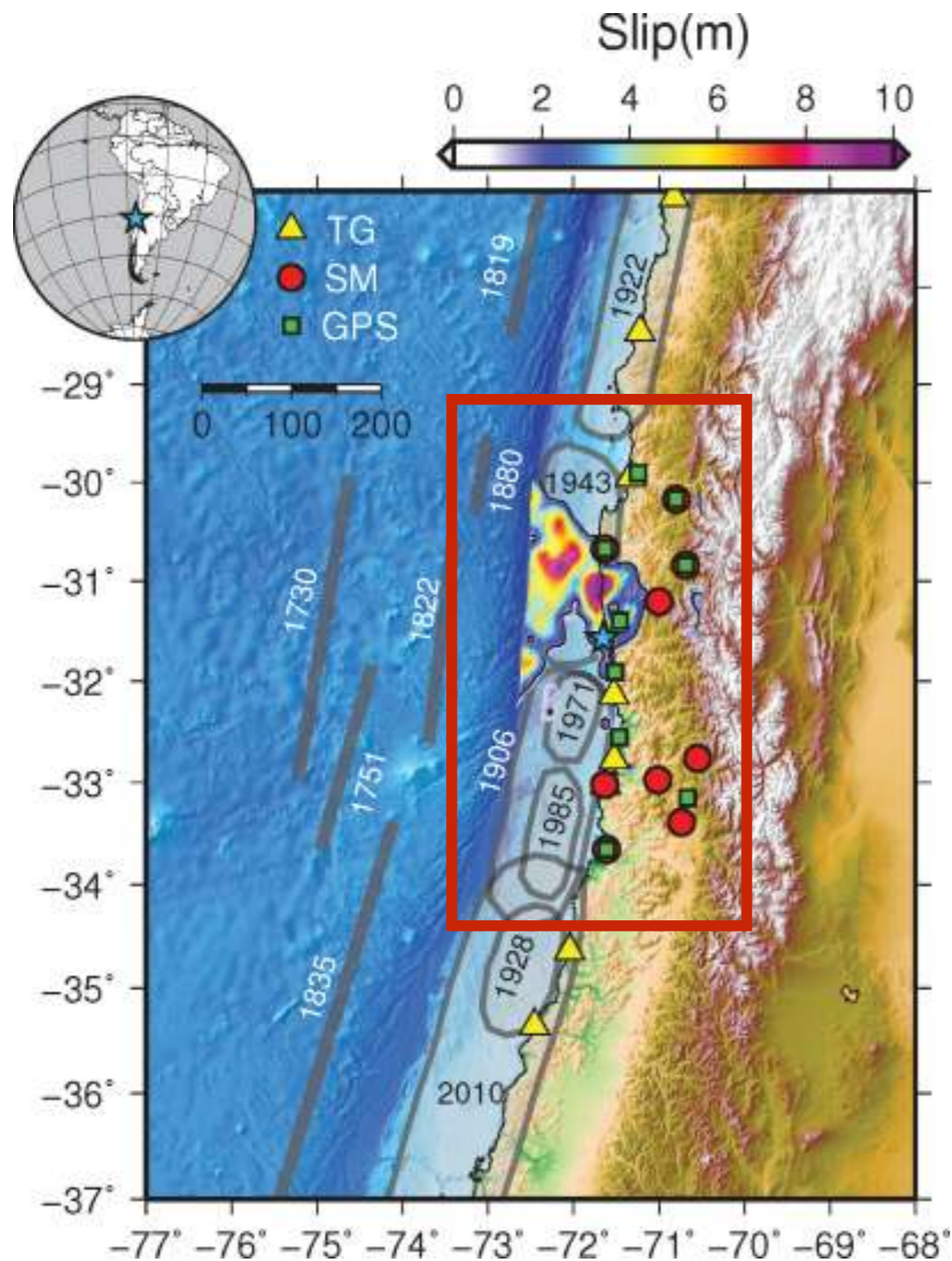


InSAR :
distribution
de glissement

Sismologie :
déroulement
de la rupture

Séisme d'Illapel (Chili), Septembre 2015 (Mw8.3)

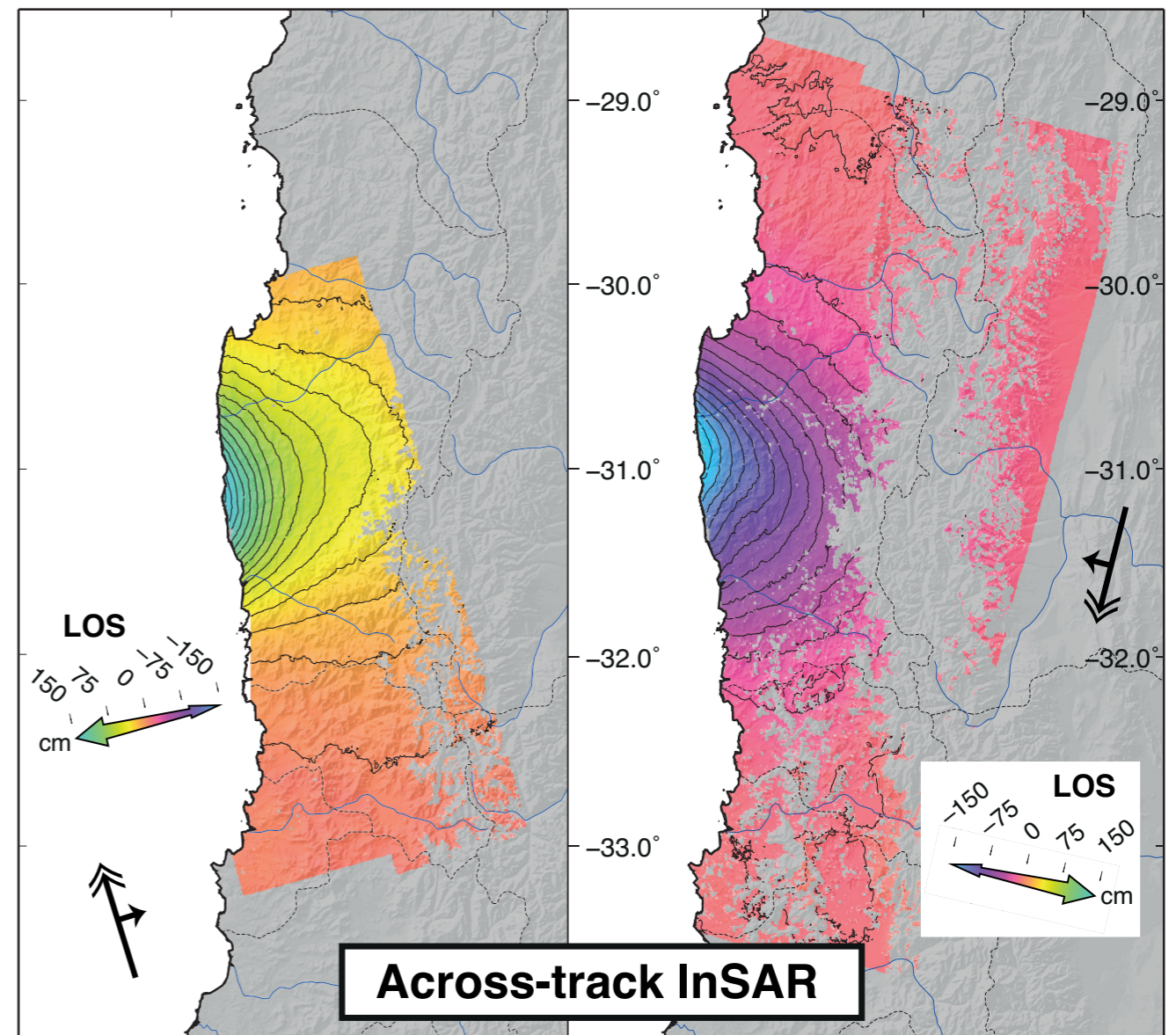
Grandin et al., 2016



Interférogrammes
wide-swath « standards »

ASCENDING PASS

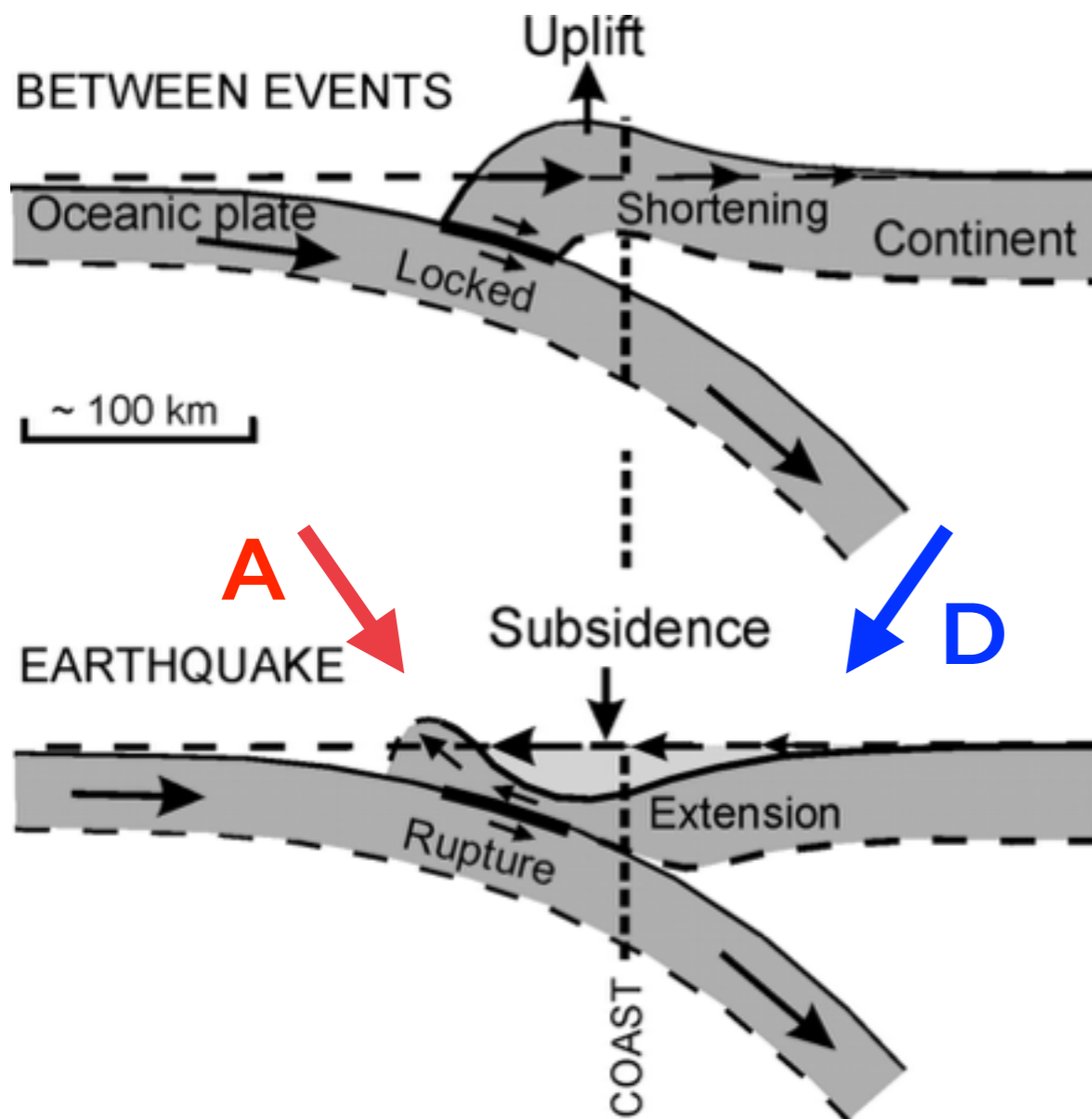
DESCENDING PASS



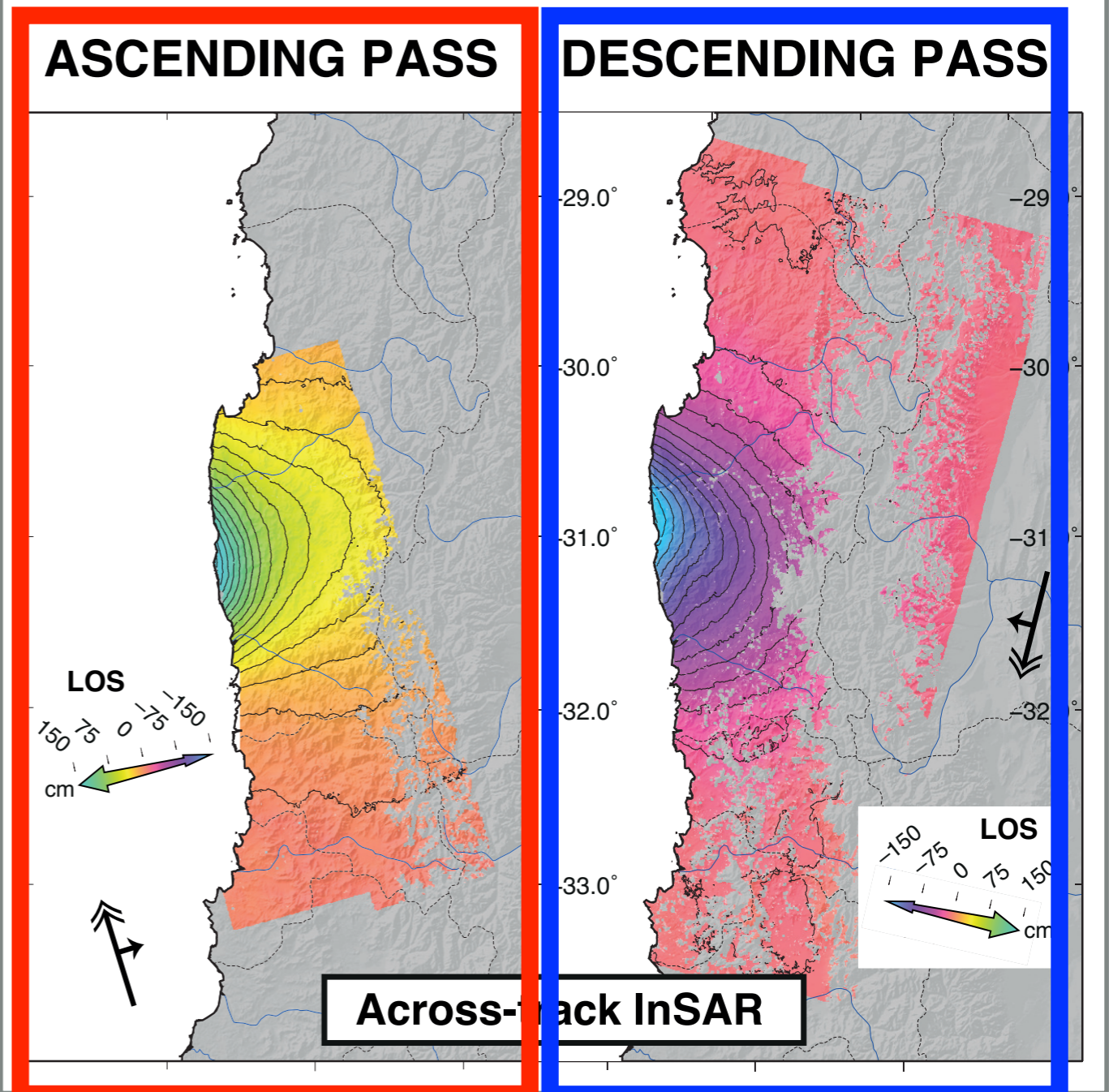
Séisme d'Illapel (Chili), Septembre 2015 (Mw8.3)

Grandin et al., 2016

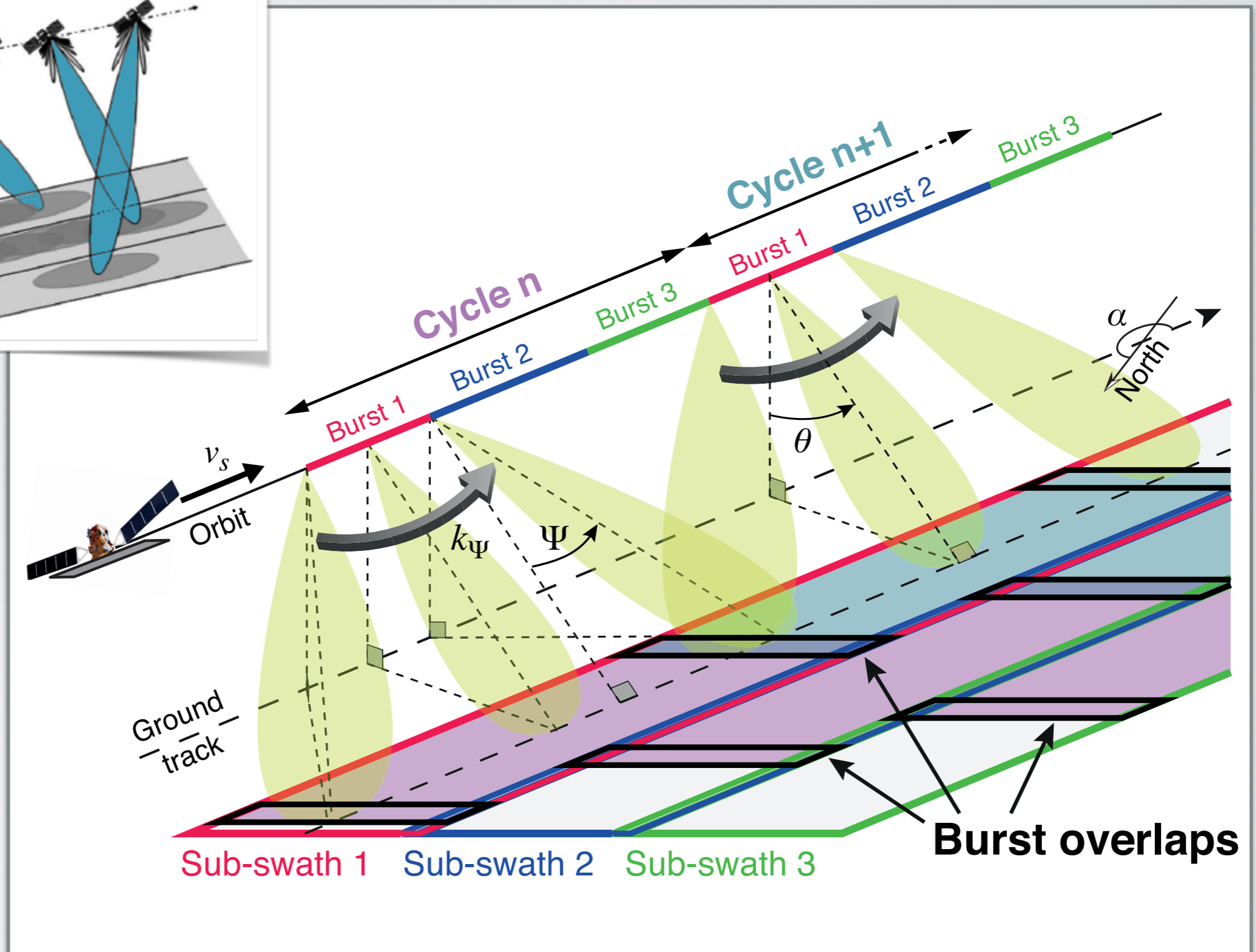
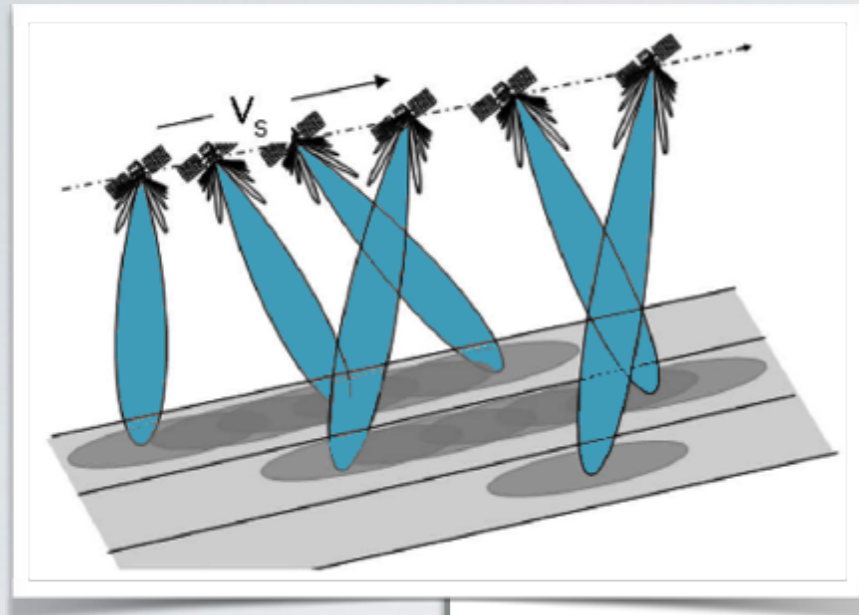
Rebond élastique



Interférogrammes wide-swath « standards »



TOPS: Terrain Observation by Progressive Scans



Diversité spectrale dans les zones de recouvrement de bursts

Interférogramme « avant »

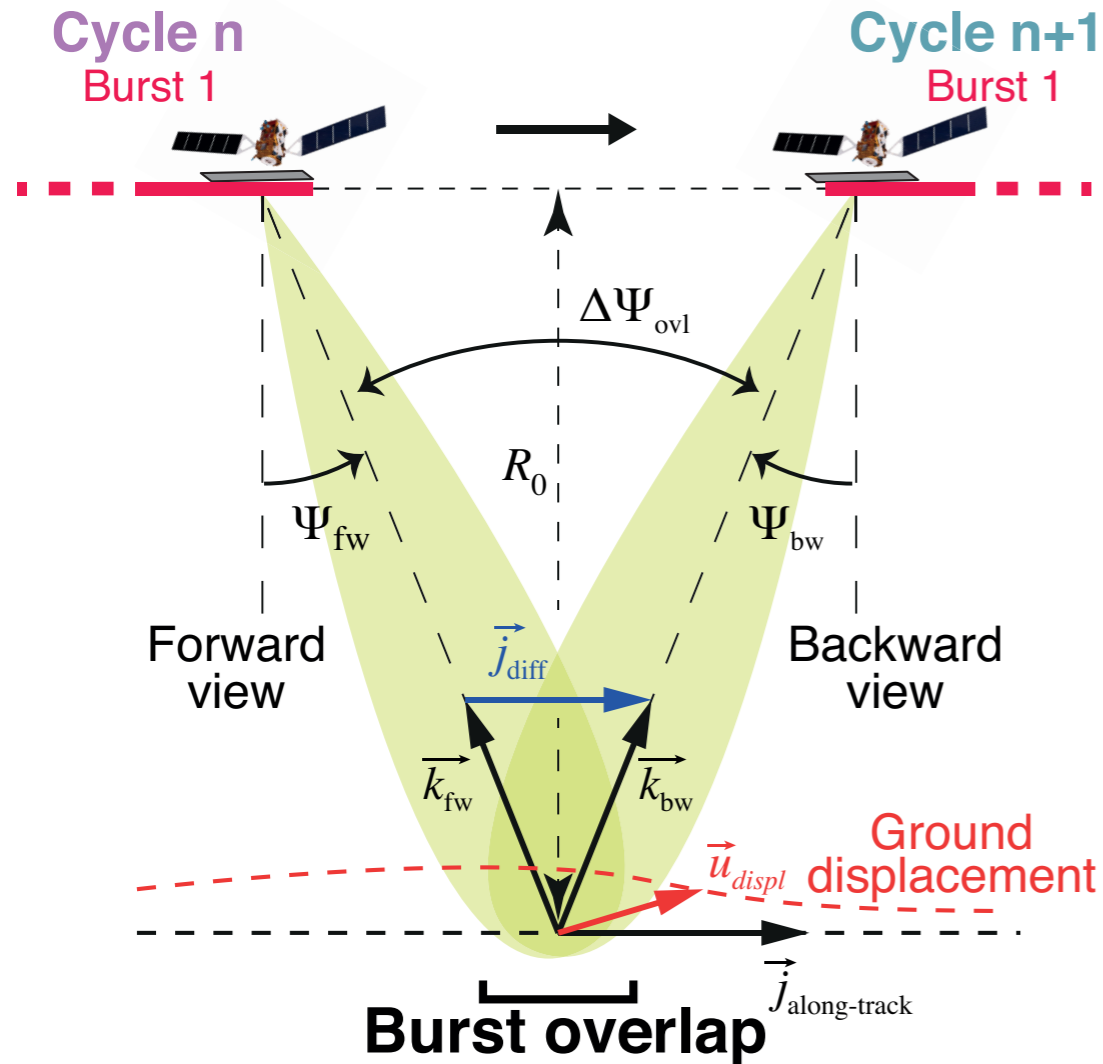
—

Interférogramme « arrière »

=

Double différence

$$\Delta\Psi_{ovl}=1^\circ$$

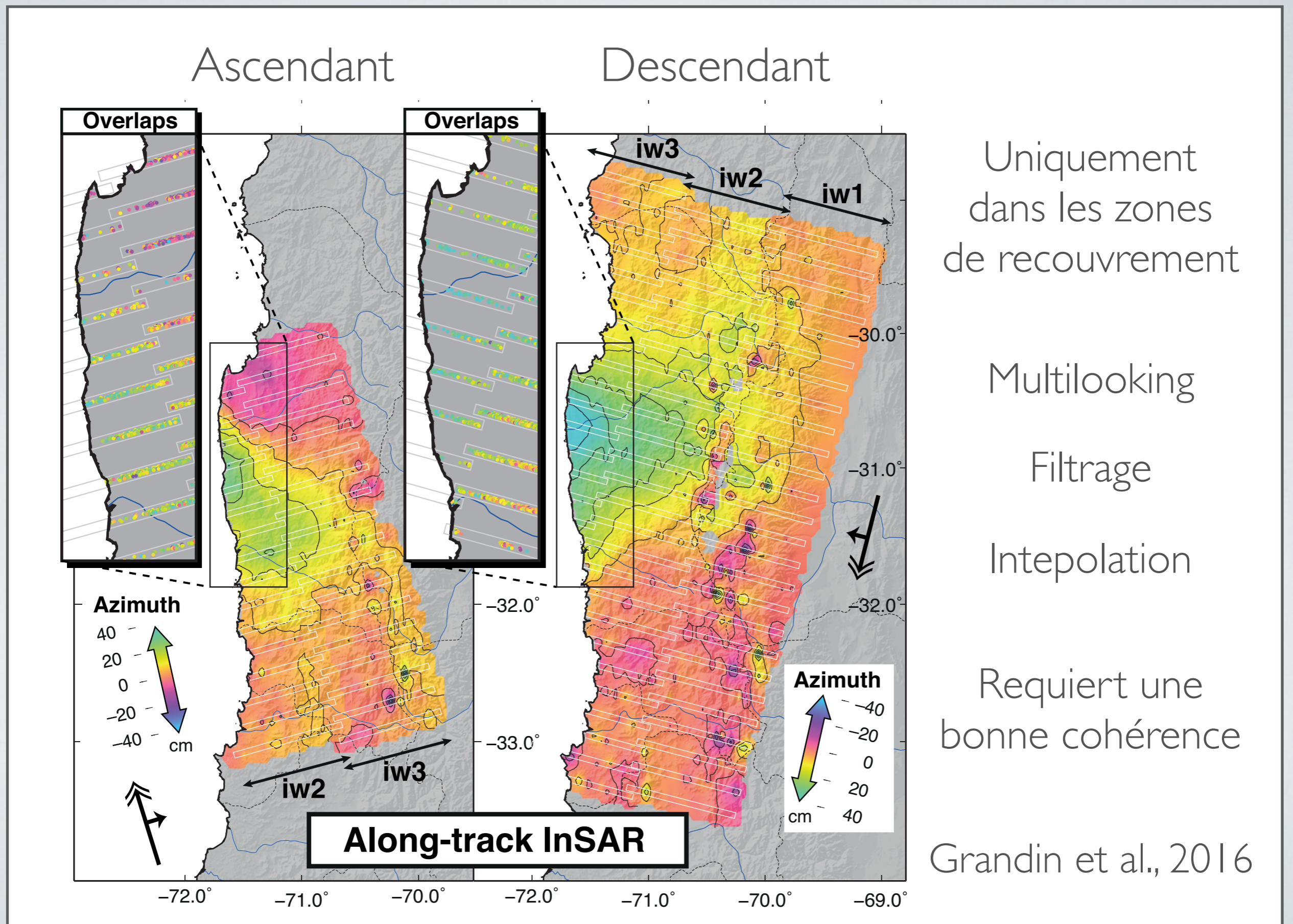


$$\begin{aligned} \Delta\Phi_{ovl} &= (\Delta\Phi_{fw} - \Delta\Phi_{bw}) = \frac{4\pi}{\lambda} \vec{u}_{displ} \cdot (\vec{k}_{fw} - \vec{k}_{bw}) \\ &= \frac{4\pi}{\lambda} \Delta x_{az} \cdot \|\vec{j}_{diff}\| \end{aligned}$$

with : $\vec{j}_{diff} = \vec{k}_{fw} - \vec{k}_{bw} \approx \Delta\Psi_{ovl} \cdot \vec{j}_{along-track}$

Utilisation de la phase
Annulation des
délais atmosphériques

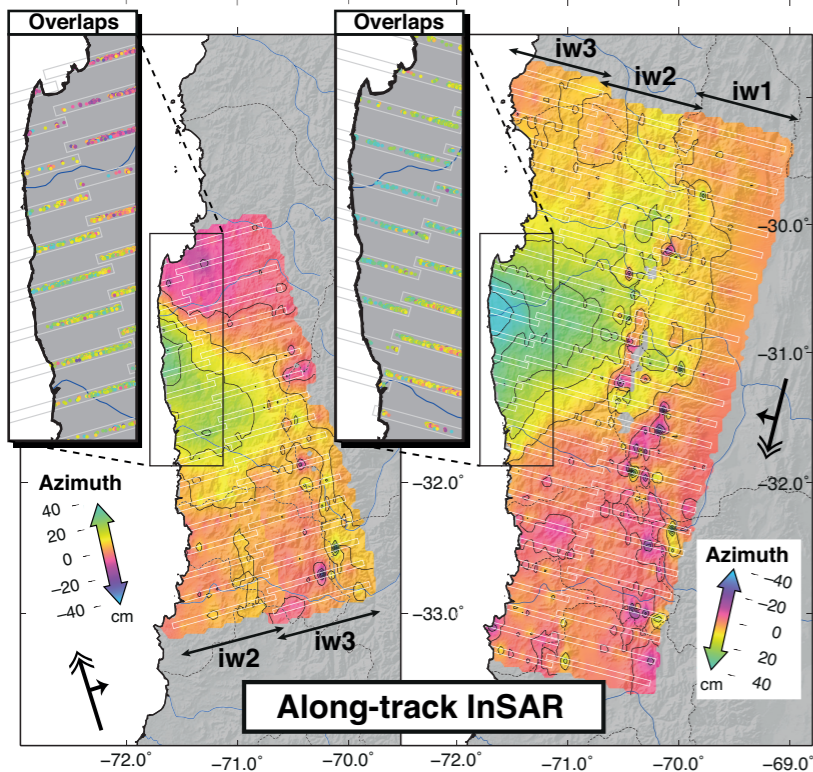
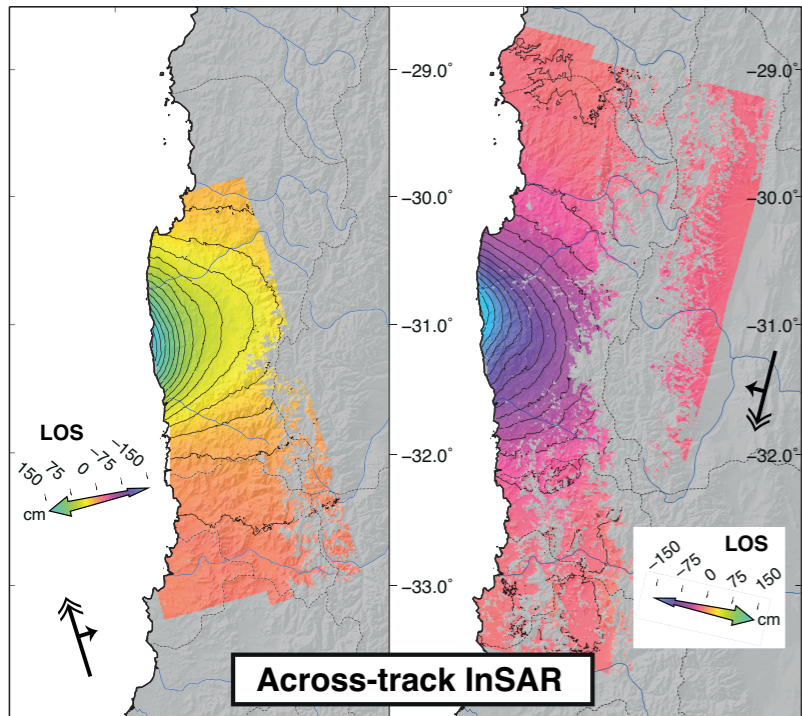
Diversité spectrale dans les zones de recouvrement de bursts



Champ de déplacement 3D

d_i

ASCENDING PASS DESCENDING PASS



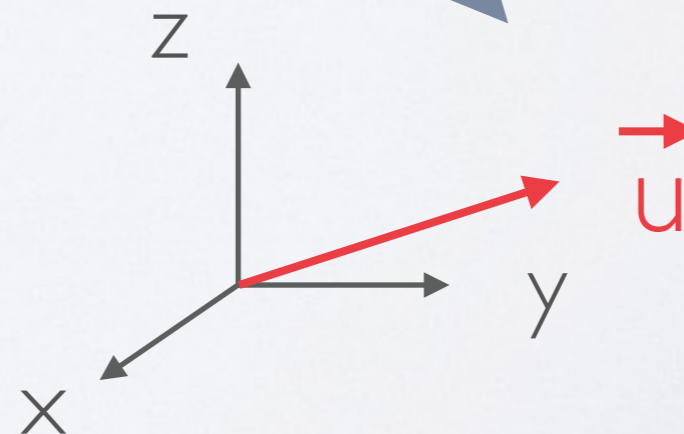
	Ascending	Descending
LOS	↗	↖
Azimuth	↘	↗

\vec{n}_i

$$d_i = \vec{n}_i \cdot \vec{u}$$

4 équations

Moindre carrés

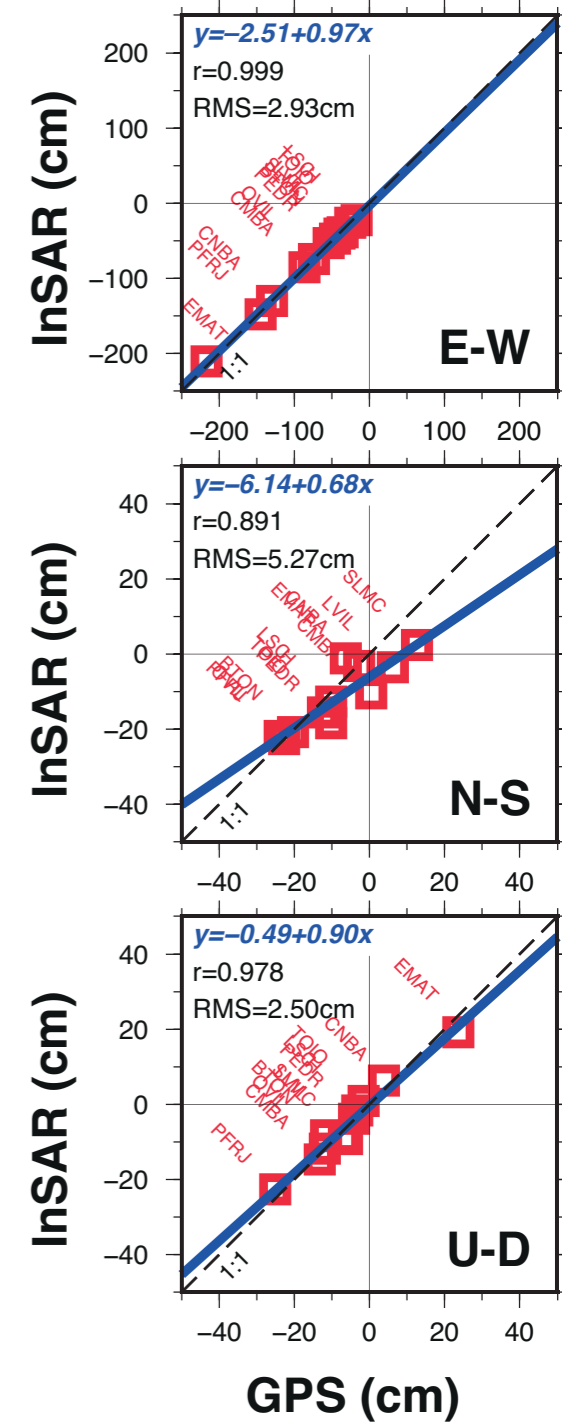
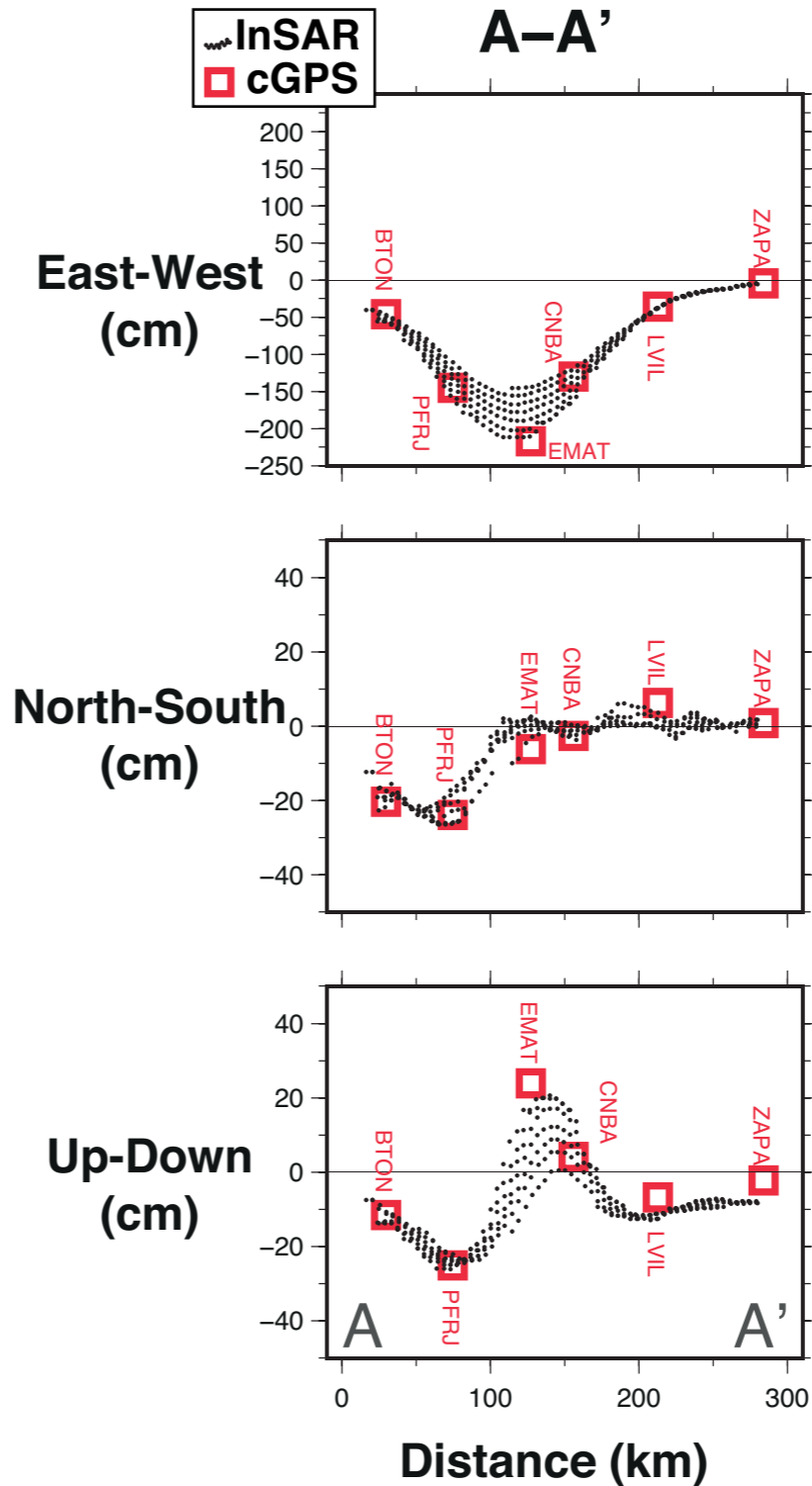
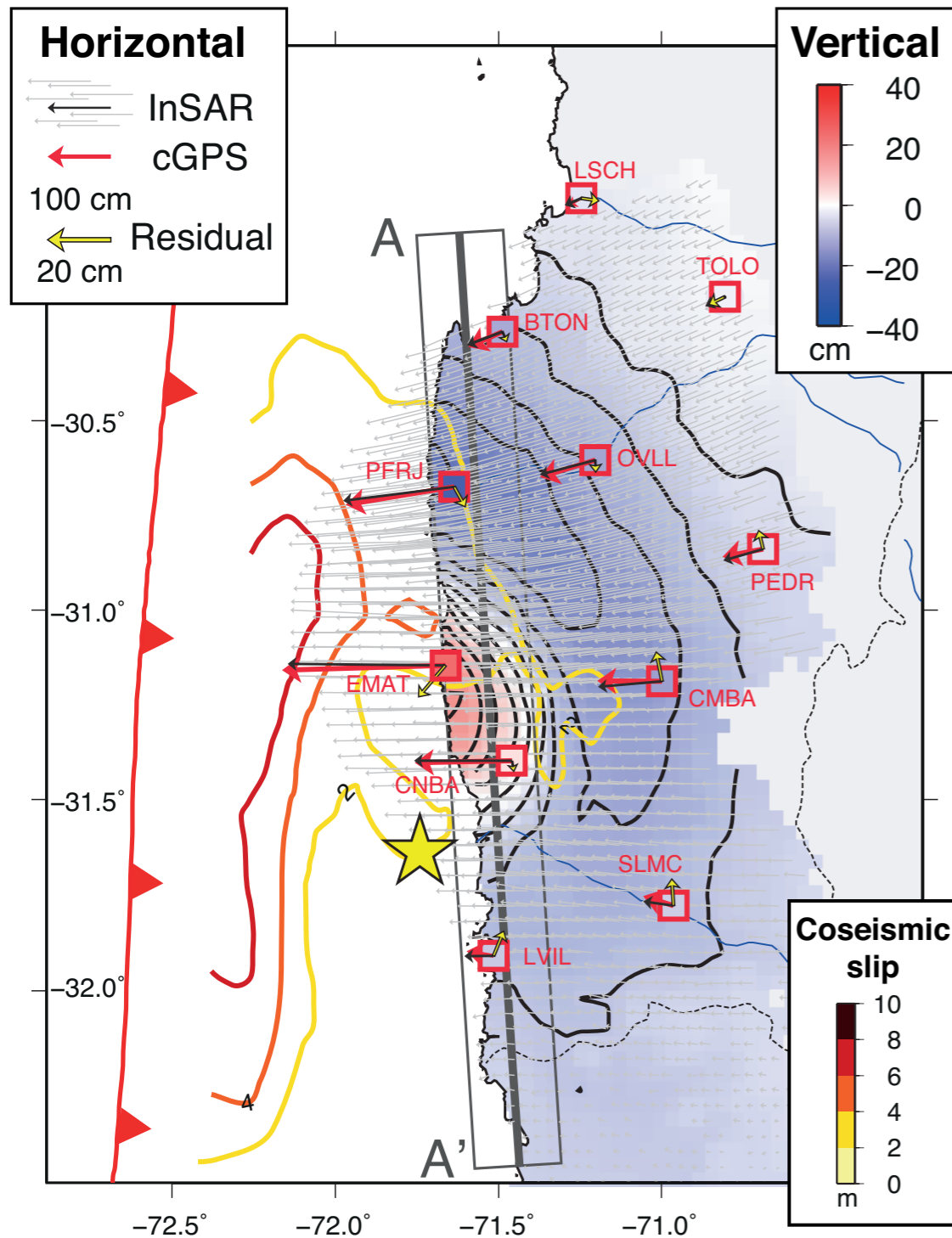


$$\vec{u} = \begin{pmatrix} u_x \\ u_y \\ u_z \end{pmatrix}$$

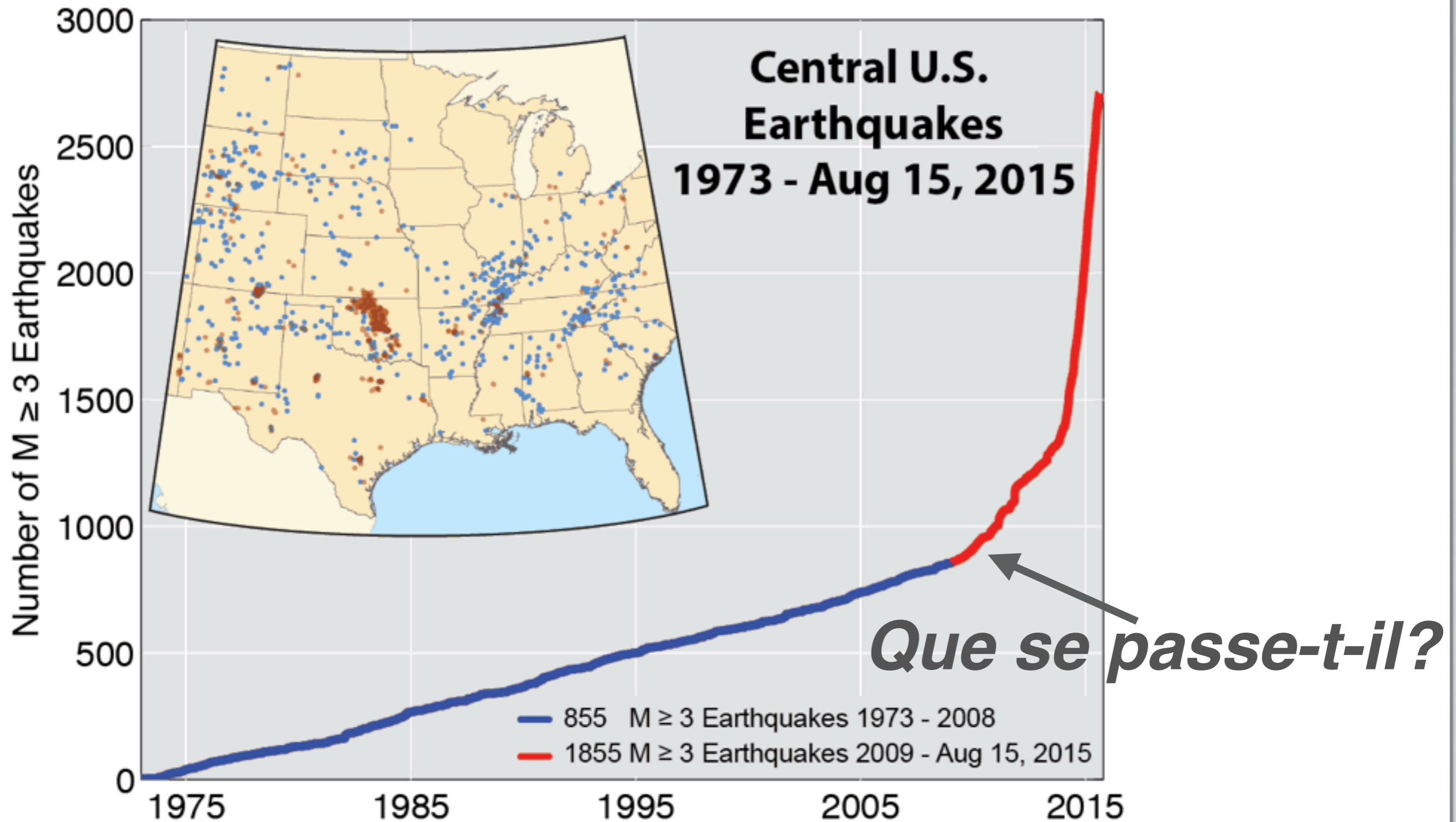
3 inconnues

Validation avec le GPS : précision < 10 cm !

Grandin et al., 2016

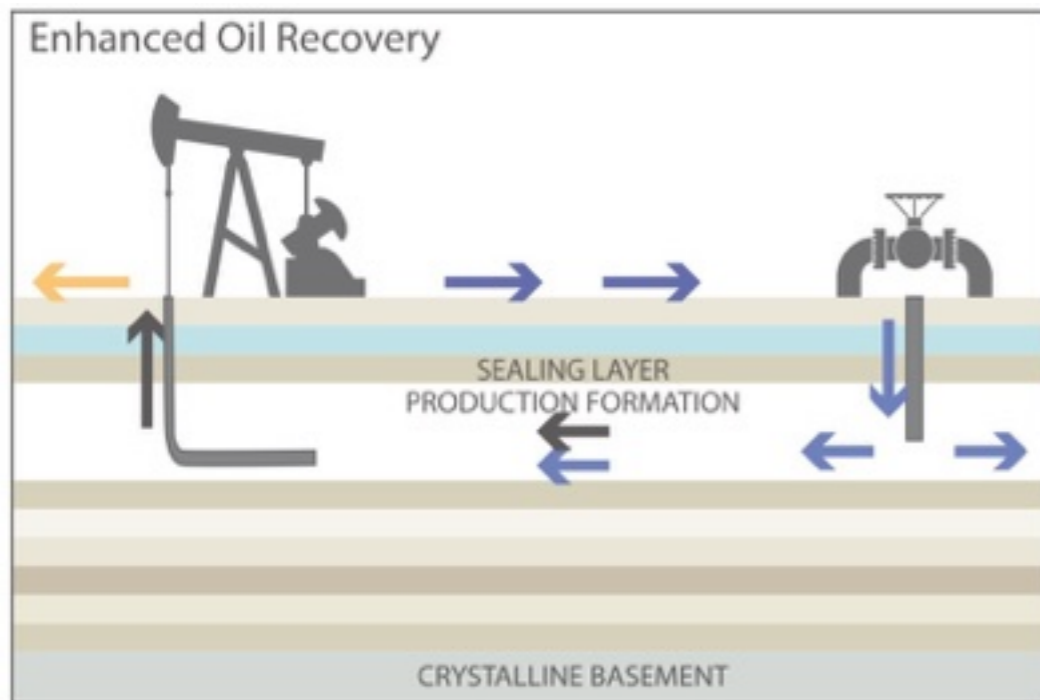
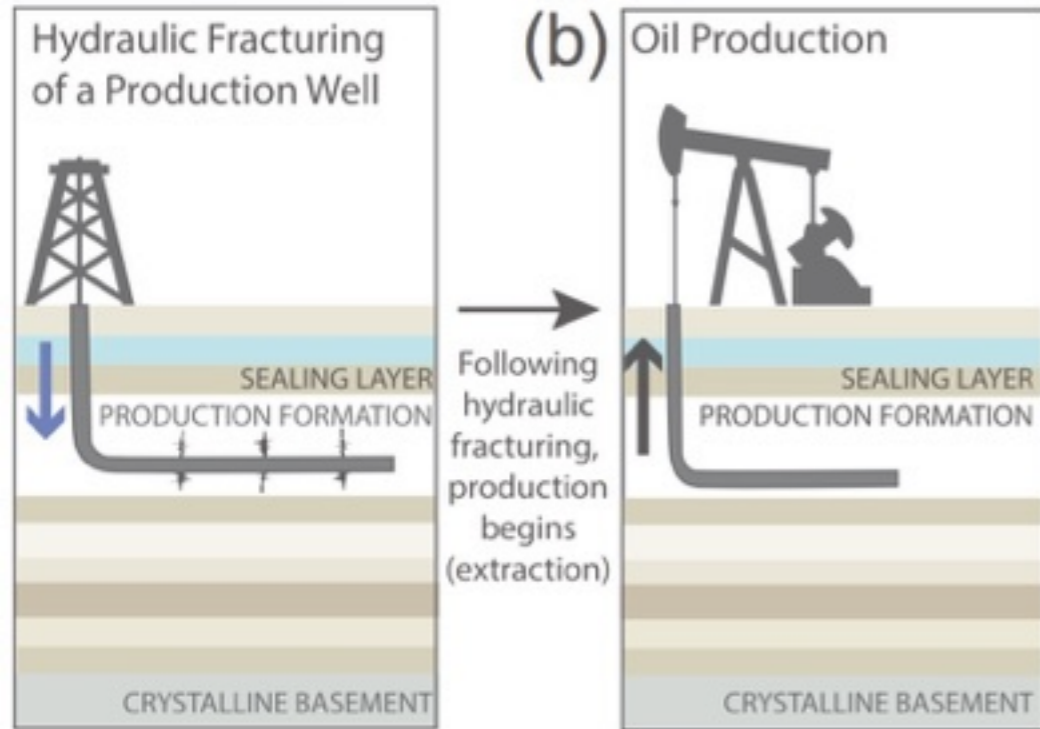


Séisme de l'Oklahoma, M5.7, Septembre 2016



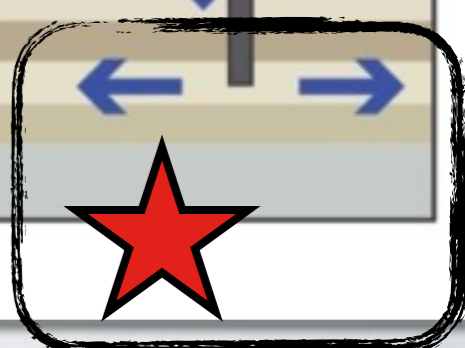
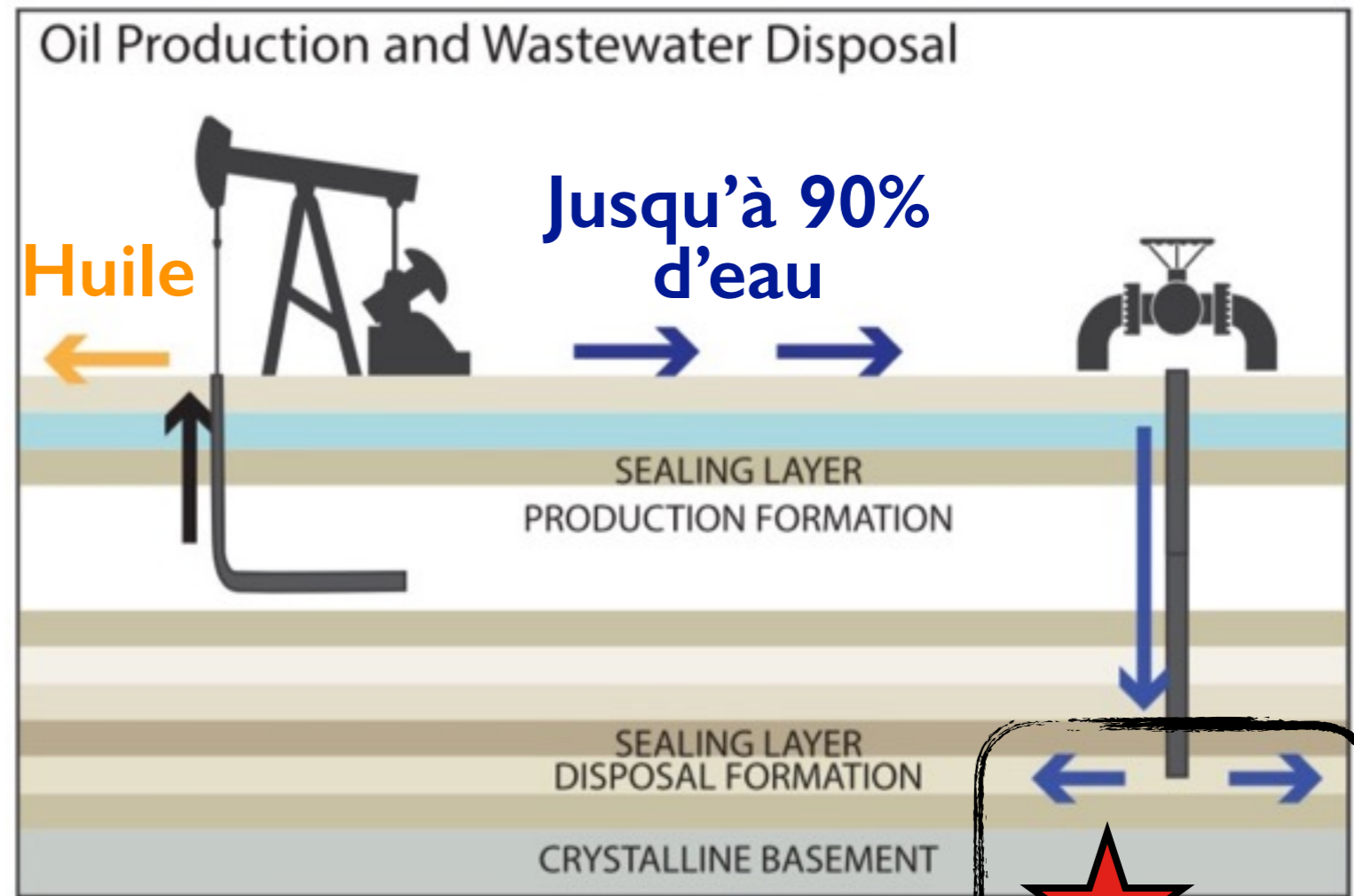
Rubinstein & Mahani, SRL 2016
see also Walsh & Zoback, 2015 and many others

Une sismicité induite par l'activité pétrolière

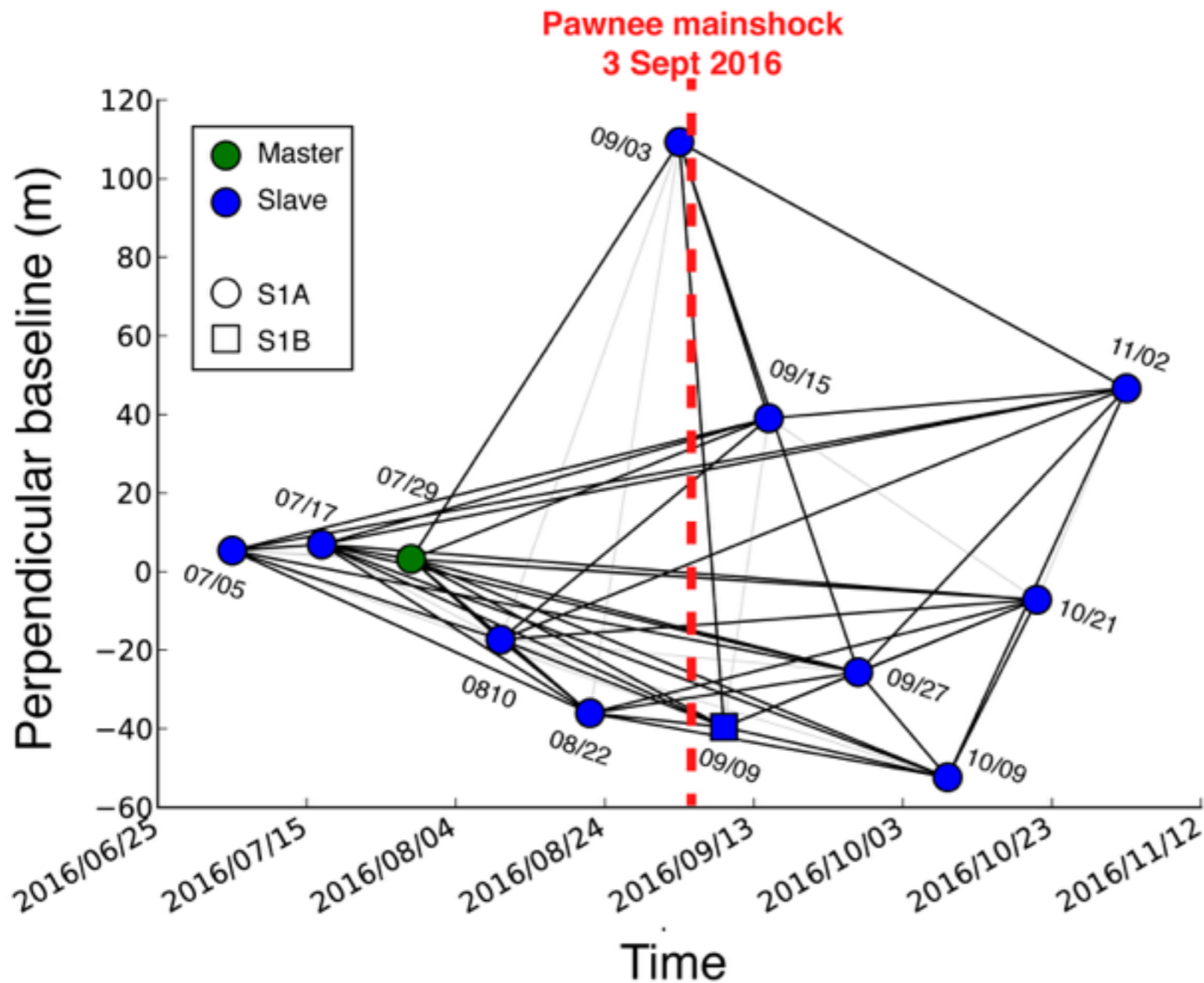


En Oklahoma, la production consiste en 90% **d'eau** – 10% **d'huile**

- > Saumure contenant des polluants (As...)
- > Ré-injectée dans des roches poreuses à la base de la pile sédimentaire, juste au dessus du socle cristallin



Traitement InSAR multi-temporel



55 interférogrammes
calculés

—

11 rejetés
(atmosphère)

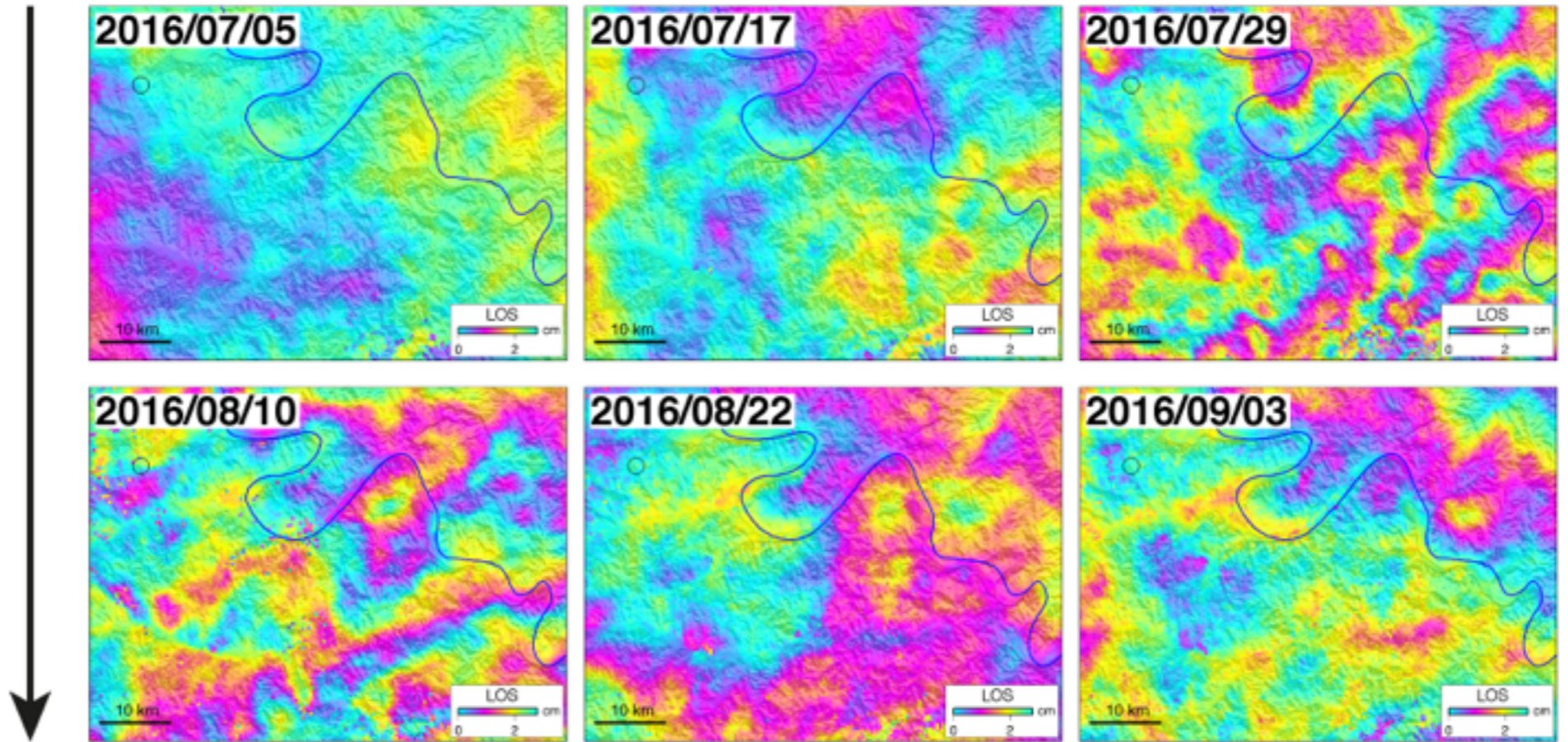
=

44 interférogrammes
conservés

Soft: NSBAS (ISerre/IPGP)

Traitement
en série
temporelle

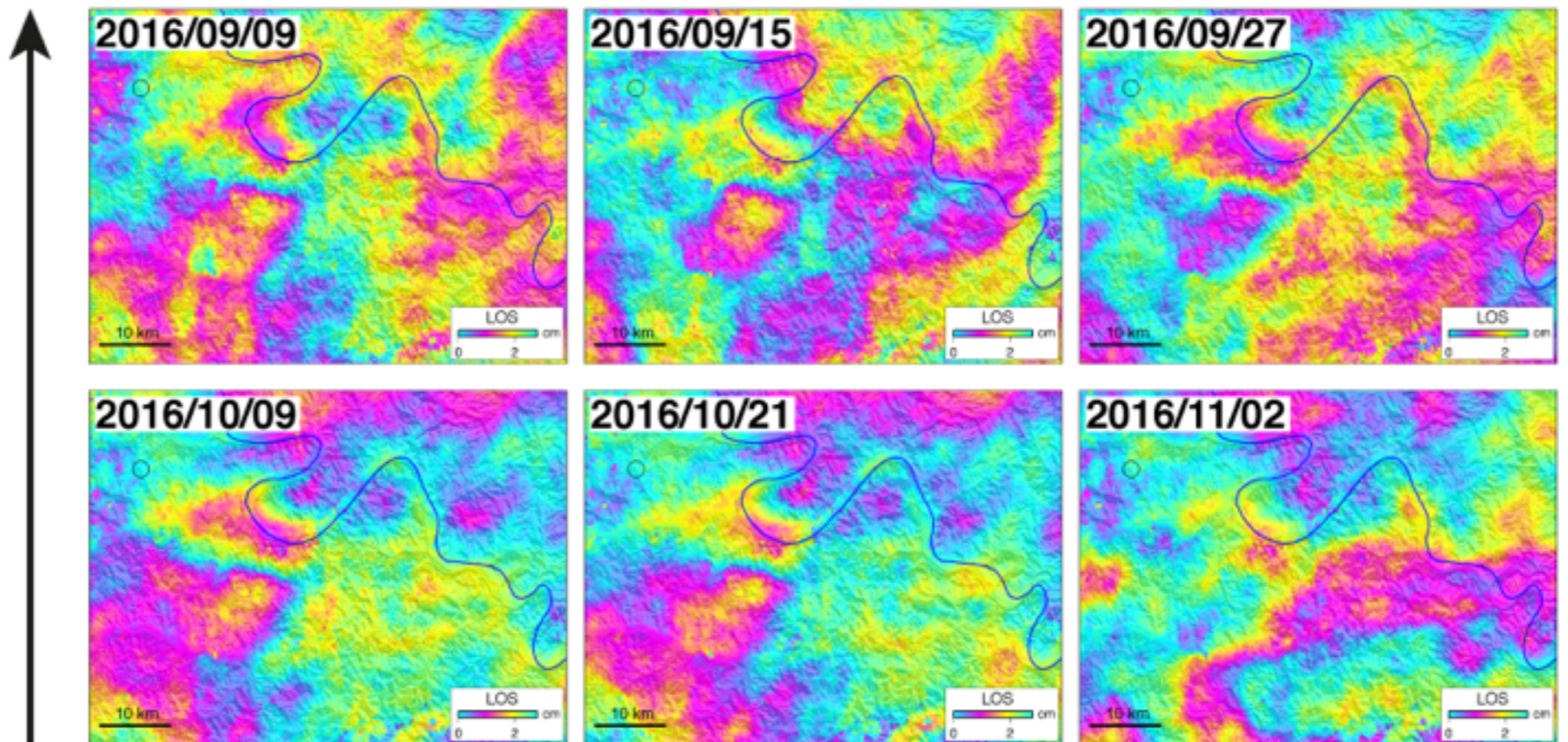
Before mainshock



Choc
principal

Mainshock

After mainshock



Extraction du signal cosismique « caché » sous l'atmosphère

Modèle:

$$A + \mathcal{H}(t_{EQ}) * B$$

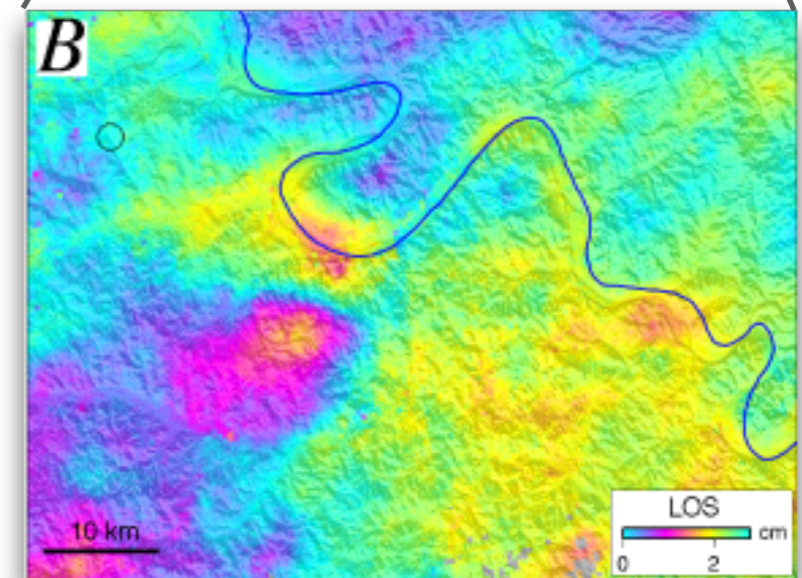
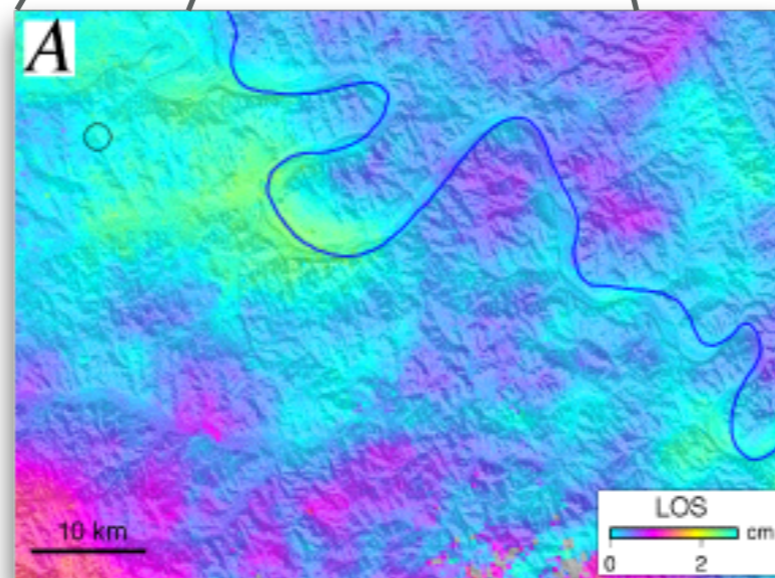
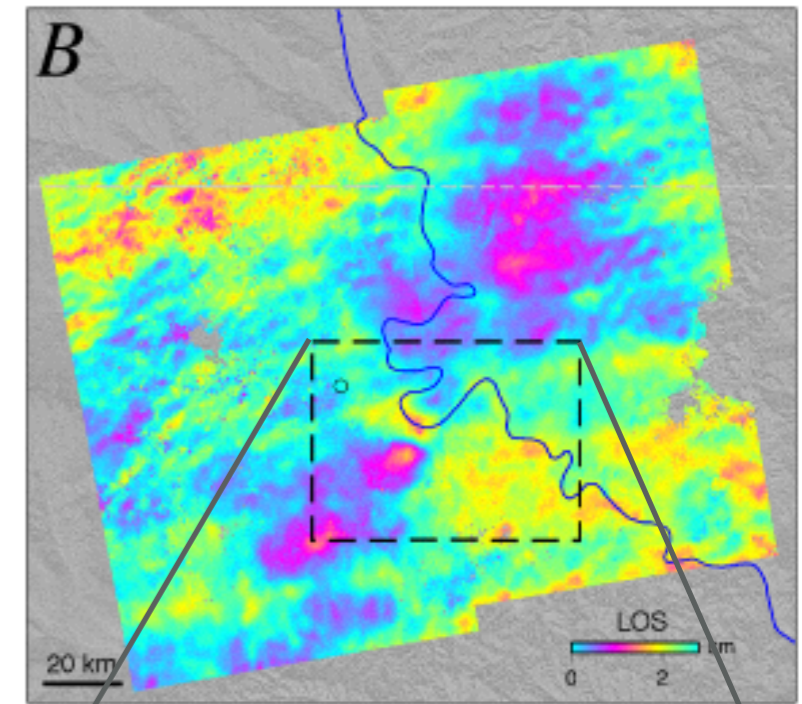
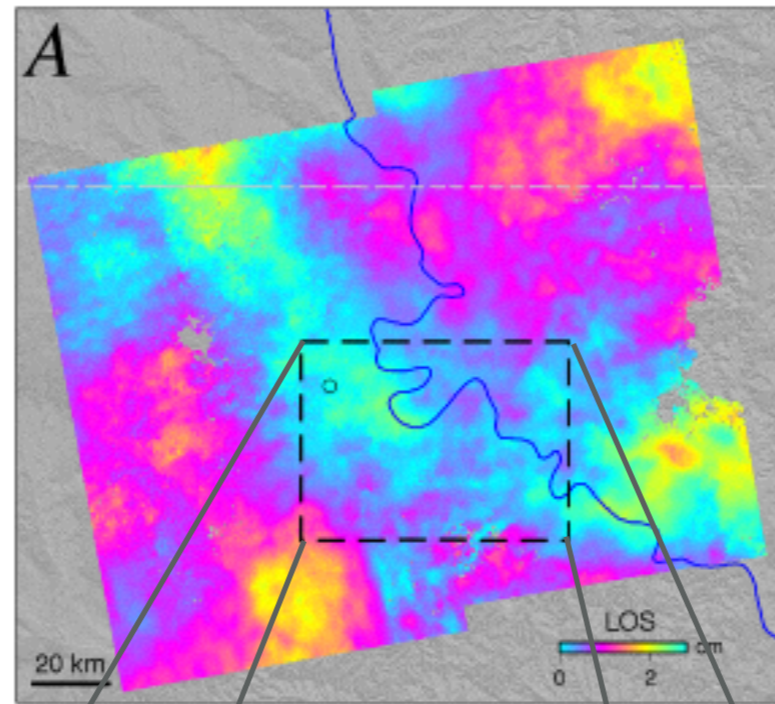
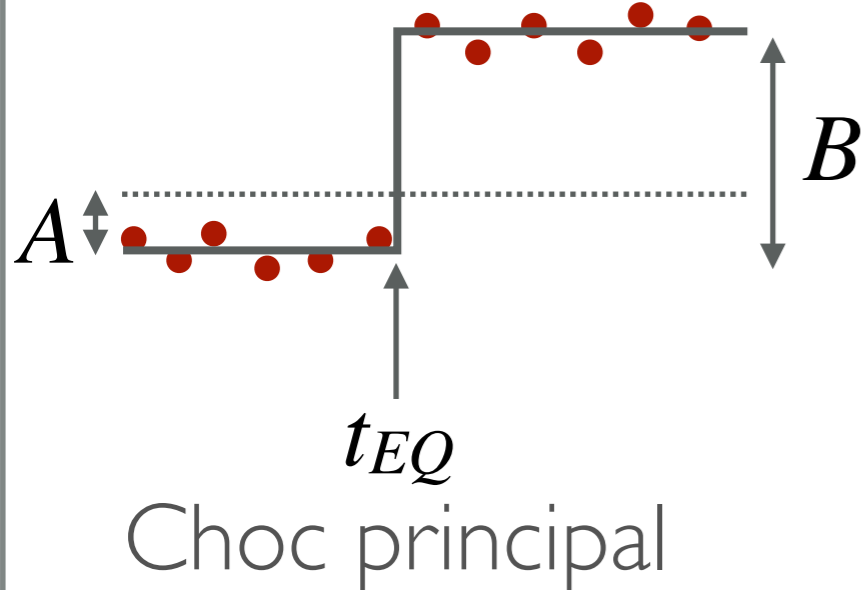
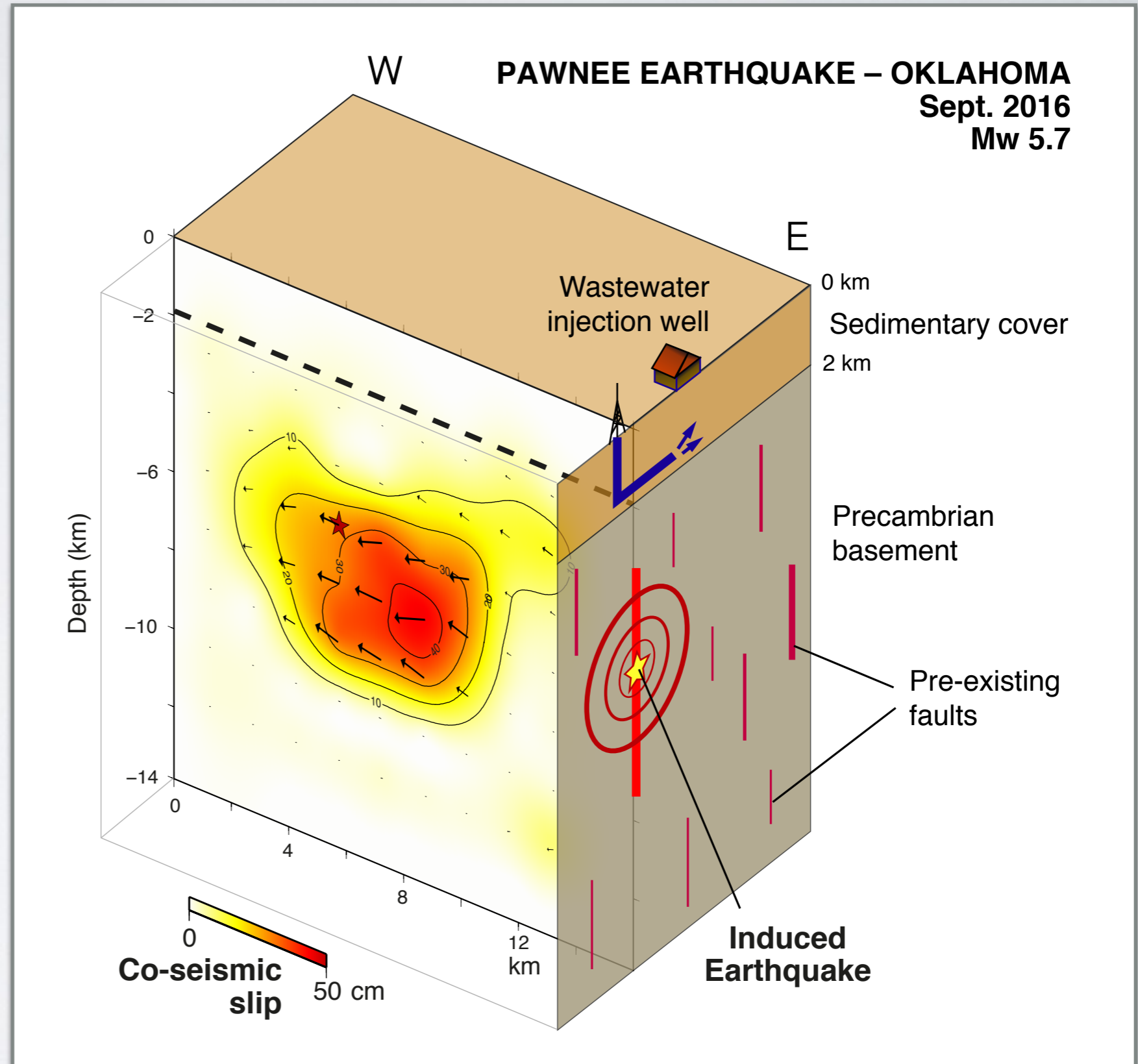
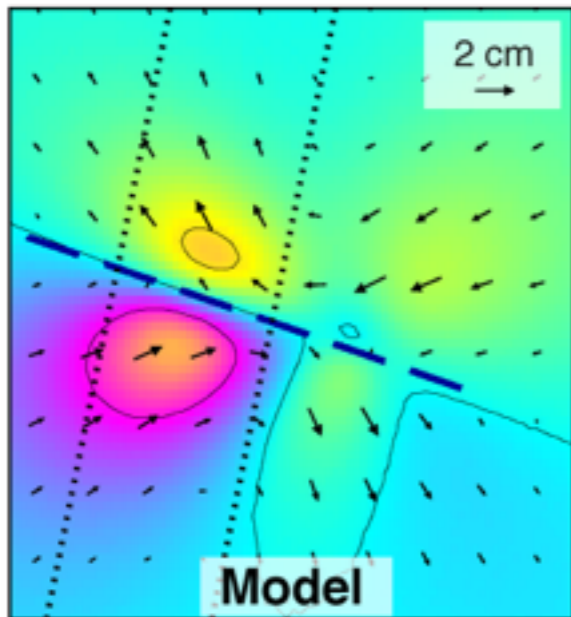
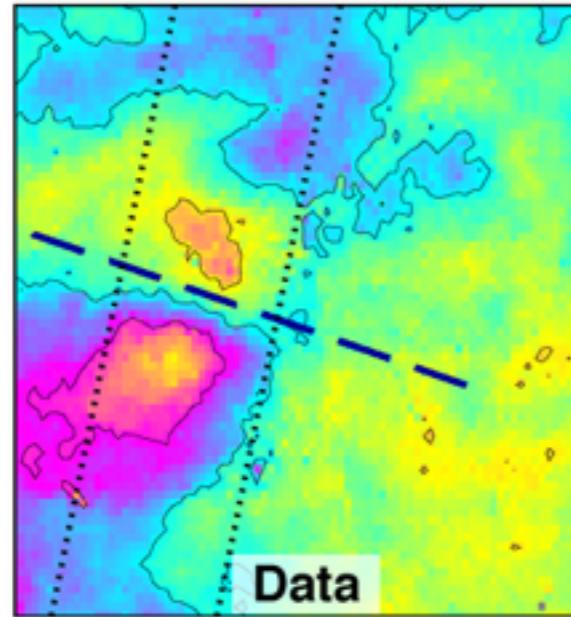


Image de ref (atmo)

Séisme (-1/+5jours)

Un séisme « profond »

induit par une perturbation « superficielle »



Le mot de la fin

Le satellite Sentinel-1 délivre depuis 3 ans des images d'une qualité sans précédent.

Les acquisitions systématiques permettent de construire une archive dense, en peu de temps, y compris dans les régions peu étudiées jusqu'à présent.

De nombreuses découvertes en perspective dans les années à venir !

