

L'utilisation de l'interférométrie radar par satellite pour mieux connaître la sismicité modérée de l'Europe

Pierre Briole

CNRS / ENS - Université PSL

Hendaye, 24 janvier 2018

Résumé

Depuis la mission ERS lancée en 1991, l'agence spatiale européenne ainsi que plusieurs autres agences spatiales entretiennent un programme d'observation de la Terre à partir d'instruments radar appelés "radars à ouverture synthétique". Les images de la Terre, acquises par ces radars, quelle que soit la couverture nuageuse, peuvent faire l'objet de traitements différentiels. Ces traitements différentiels permettent de ne conserver que les changements survenus dans les images entre les deux acquisitions. Ces changements peuvent être dus à des états différents de la troposphère ou de l'ionosphère aux deux époques, aux effets de la parallaxe entre les points de vue légèrement différents lors des deux acquisitions, ou à des déformations du sol. La longueur d'onde de ces radars qui varie d'environ 2 à 20 centimètres suivant les missions spatiales, permet, dans ce mode différentiel, de détecter des mouvements du sol jusqu'à des résolutions meilleures que le centimètre. Cette excellente résolution instrumentale permet de mesurer, puis d'interpréter, en association avec d'autres données géodésiques (GPS) et sismologiques, les mouvements du sol générés par les séismes, ainsi que ceux qui se produisent avant et après les séismes. Par rapport à celle d'autres régions, la sismicité de l'Europe est qualifiée de modérée, avec les "gros" séismes dans la gamme de magnitude 5.5-6.5. Du fait de la répartition de la population, et du fait de la qualité du bâti, ces séismes peuvent toutefois générer des dégâts importants et des victimes, y compris en France. Je montre ce que l'interférométrie radar nous a enseigné au cours des 25 dernières années sur cette sismicité modérée de l'Europe.

Contenu de l'exposé

- Introduction
- Le système radar à ouverture synthétique
- Différentes missions et bandes (L, C, X)
- Corrélation d'images d'amplitude et différence d'images de phase
- Sismicité modérée du sud de l'Europe
- Modèle de séisme
- Exemples d'interférogrammes

L'écho



Analyser le relief grâce à l'écho



Fonctionne aussi la nuit et dans la brume

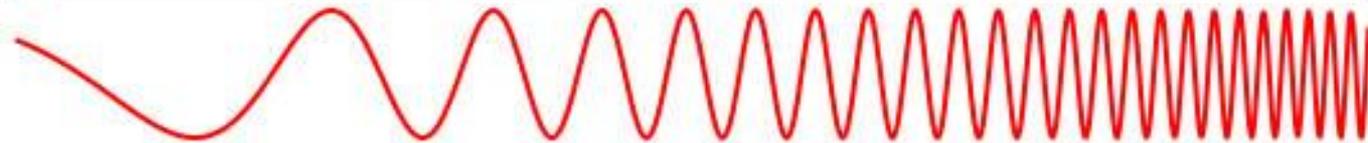
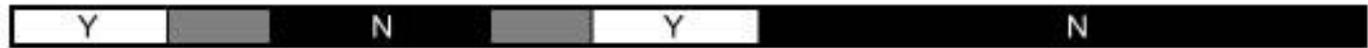


Si le relief change, l'écho change

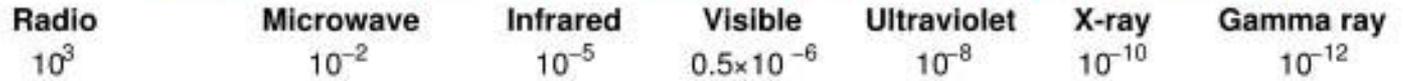


Le spectre électromagnétique

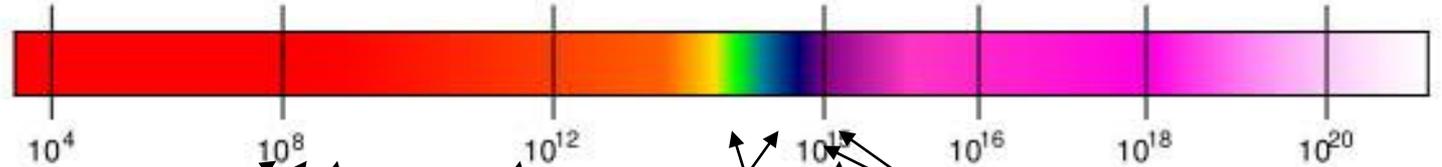
Penetrates Earth's Atmosphere?



Radiation Type
Wavelength (m)



Frequency (Hz)



Radar bande L

Radar bande C

Radar bande X

Infra-rouge

Visible

UV

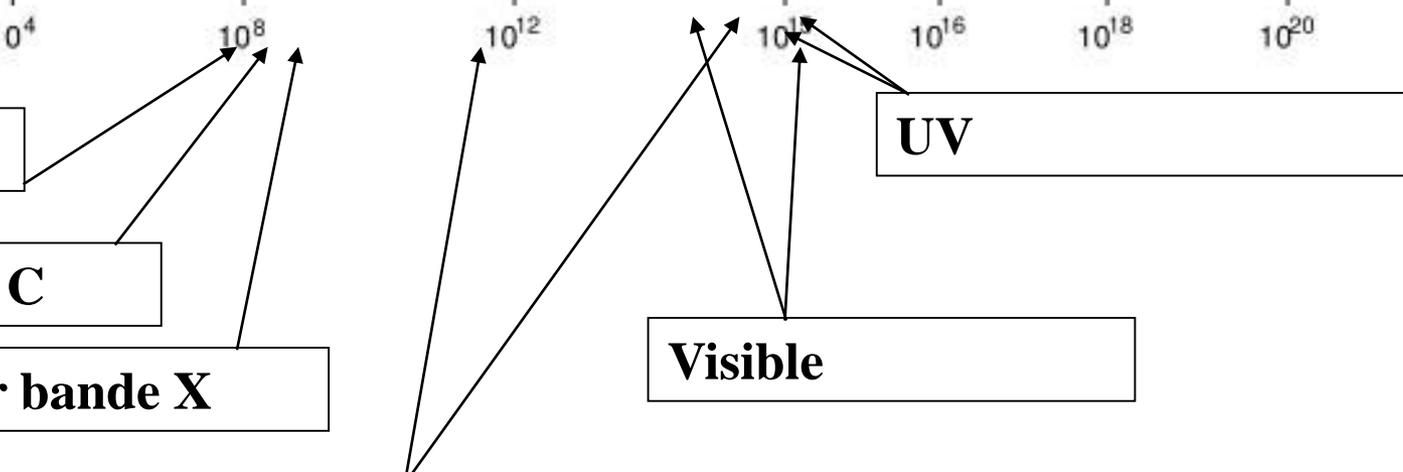


Image d'amplitude radar v/s image optique

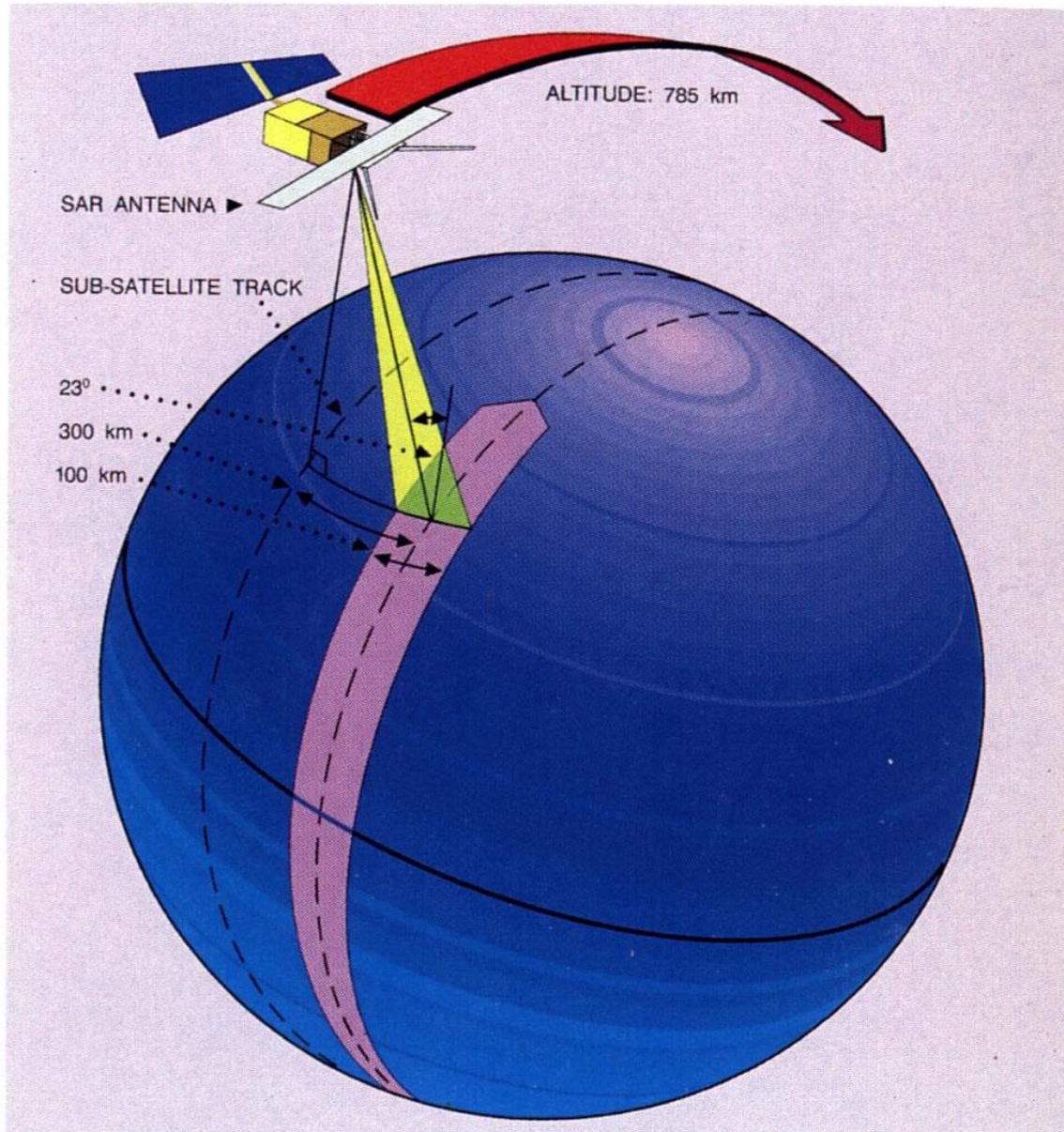


**SAR Multi Image
Reflectivity map (MIR)**

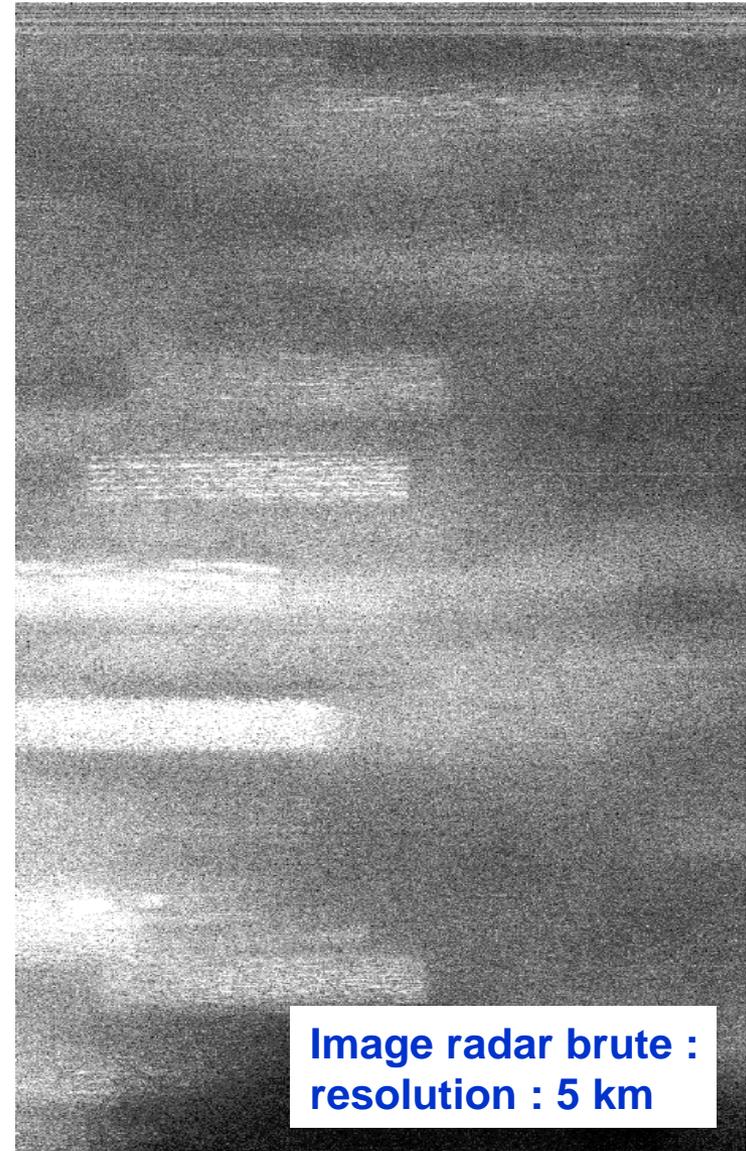
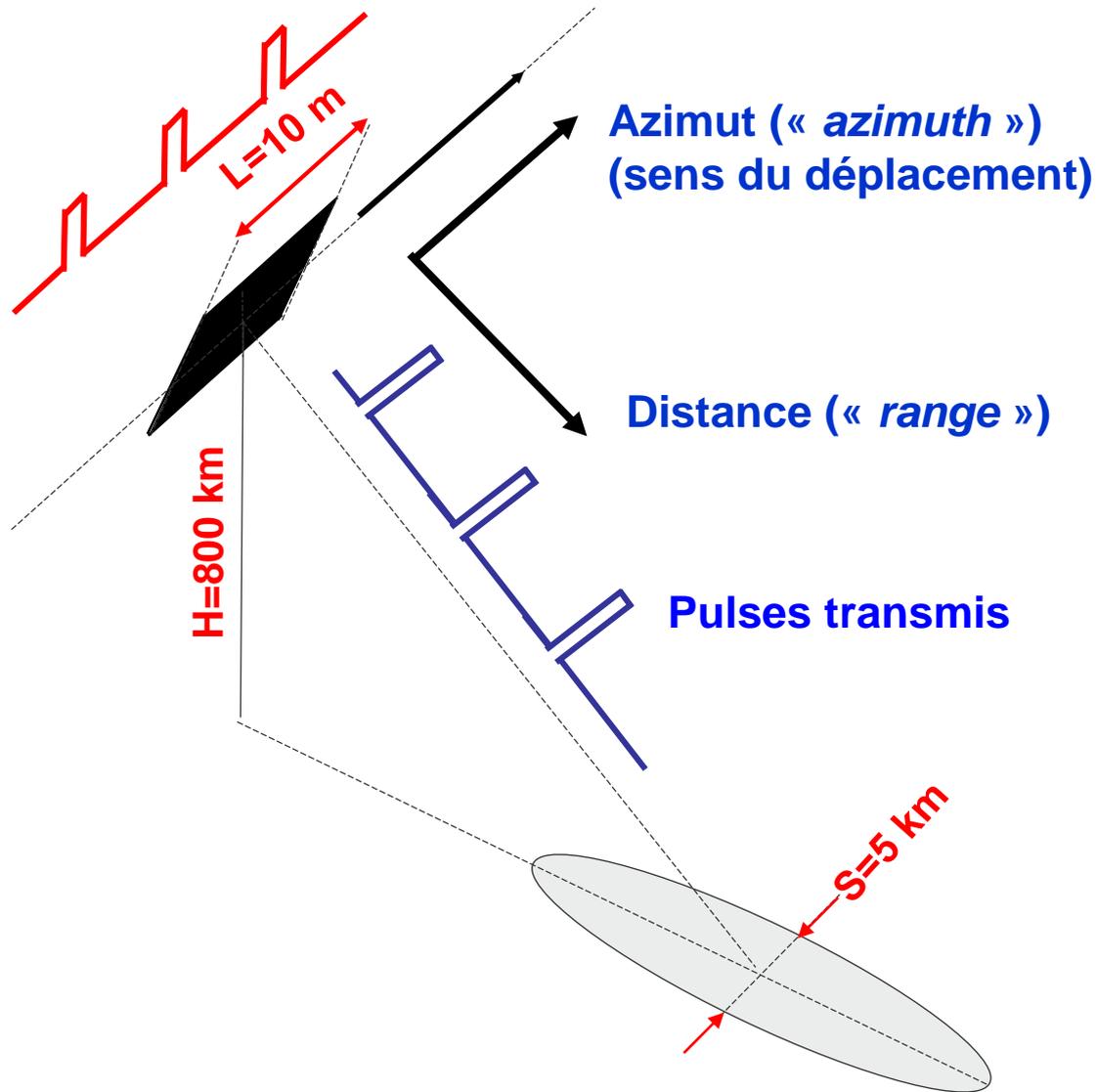


Optical image

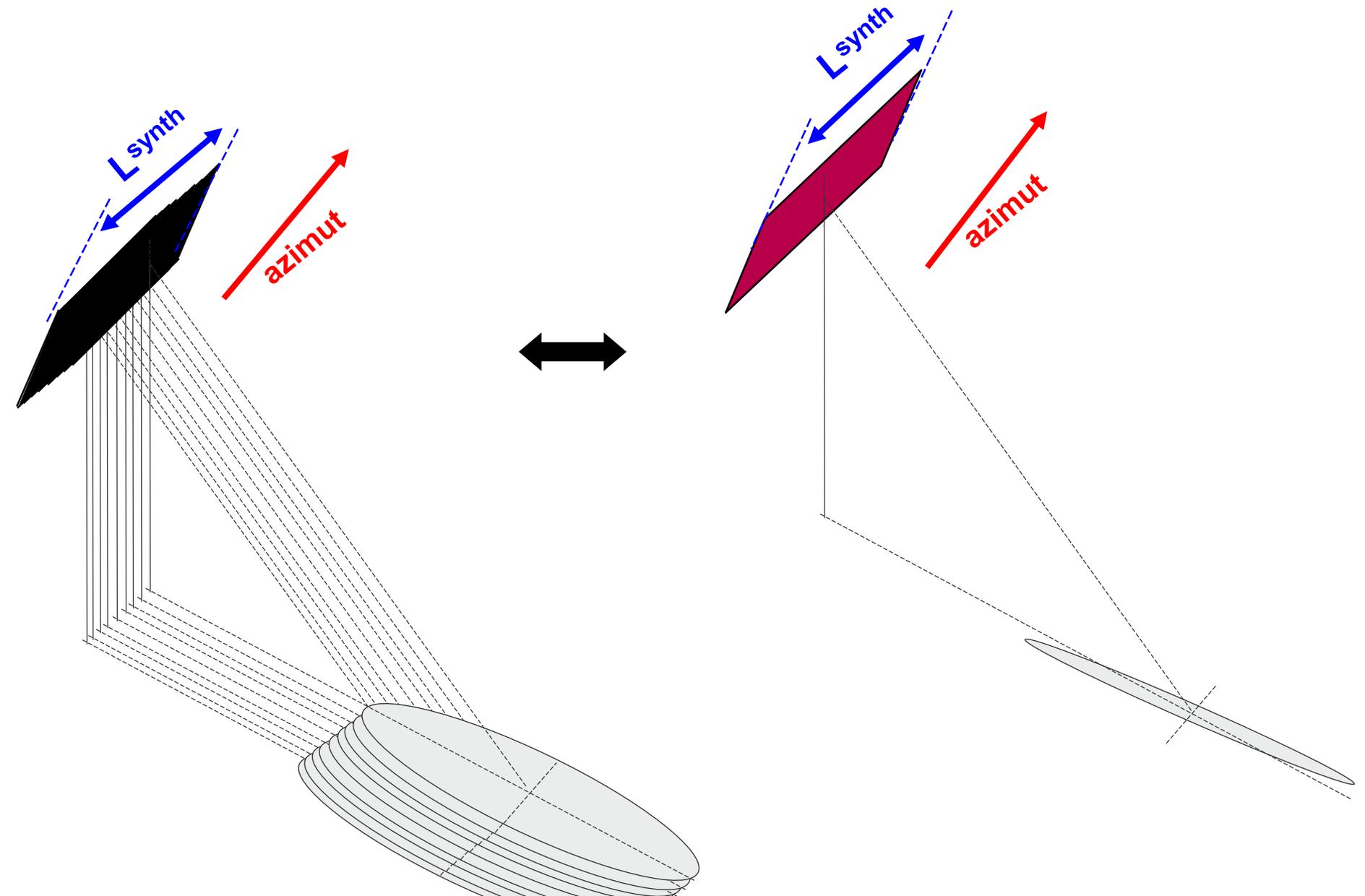
Principe du radar imageur



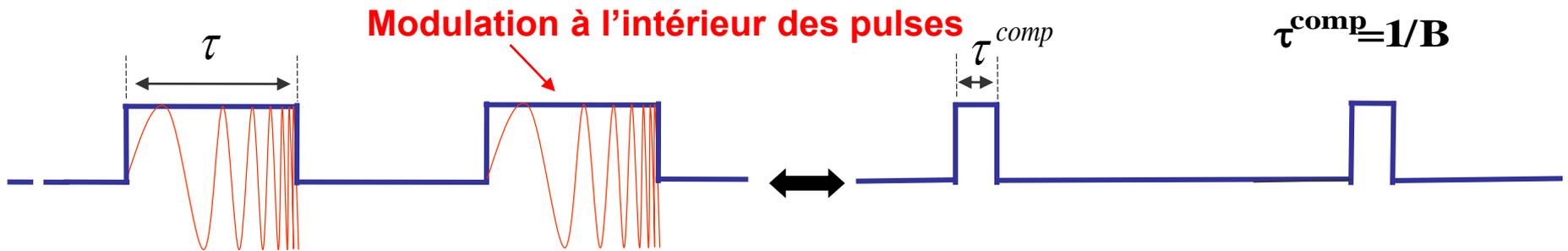
Principe d'un imageur radar



Amélioration de la résolution en azimut



Amélioration de la résolution en distance

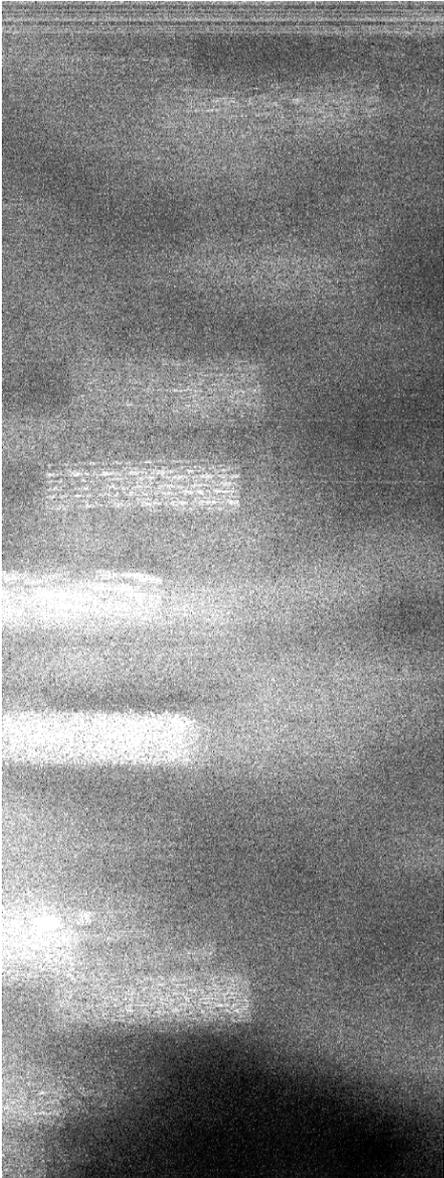


$$c\tau/2 \rightarrow c/2B$$

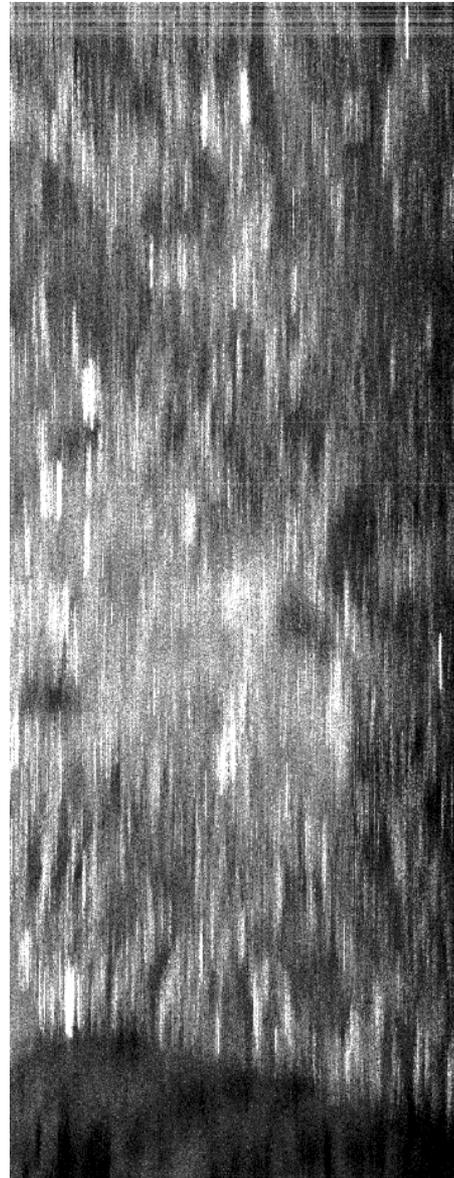
$$5\text{km} \rightarrow 10\text{m}$$

Image obtenue par un radar à synthèse d'ouverture

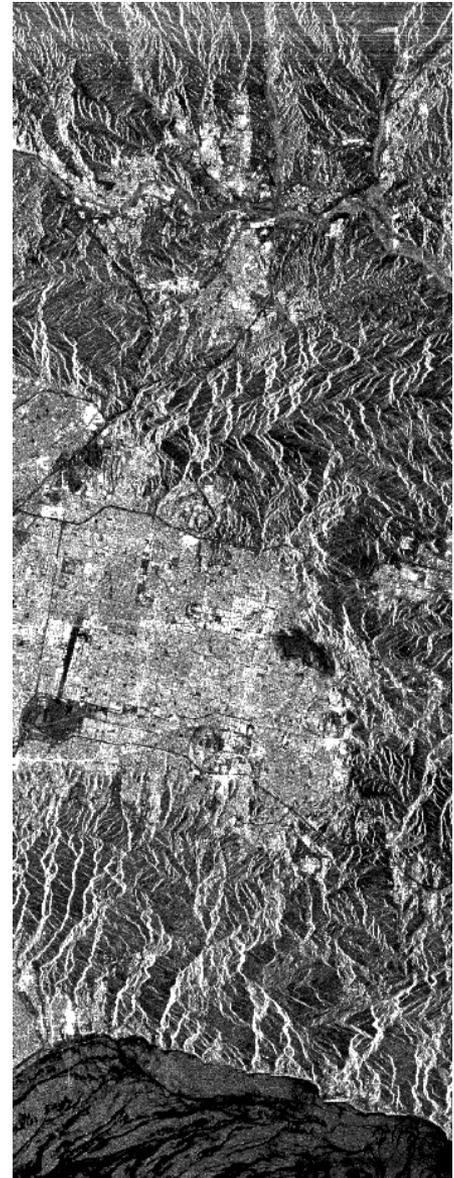
Azimuth ↑



Donnée brute

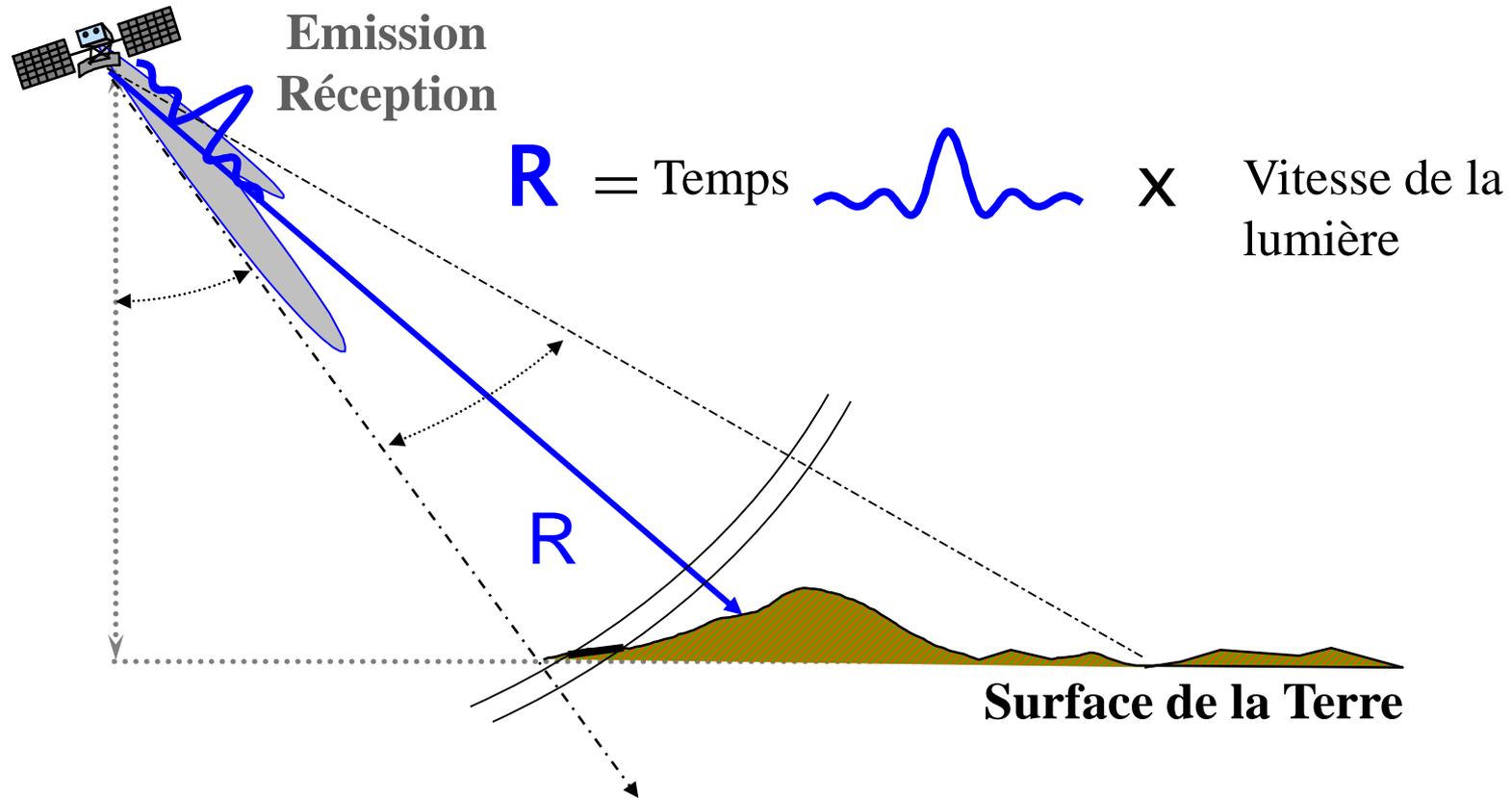


Compression en distance



+ compression en azimuth

Observation radar = amplitude & distance



Une image radar contient, pour chaque pixel, deux informations:

- l'**amplitude** du signal rétrodiffusé
- une mesure de la **distance** entre l'antenne du satellite et le sol

L'image est « classée » par pas de distance

Les données sont acquises en fonction du temps de retour du signal

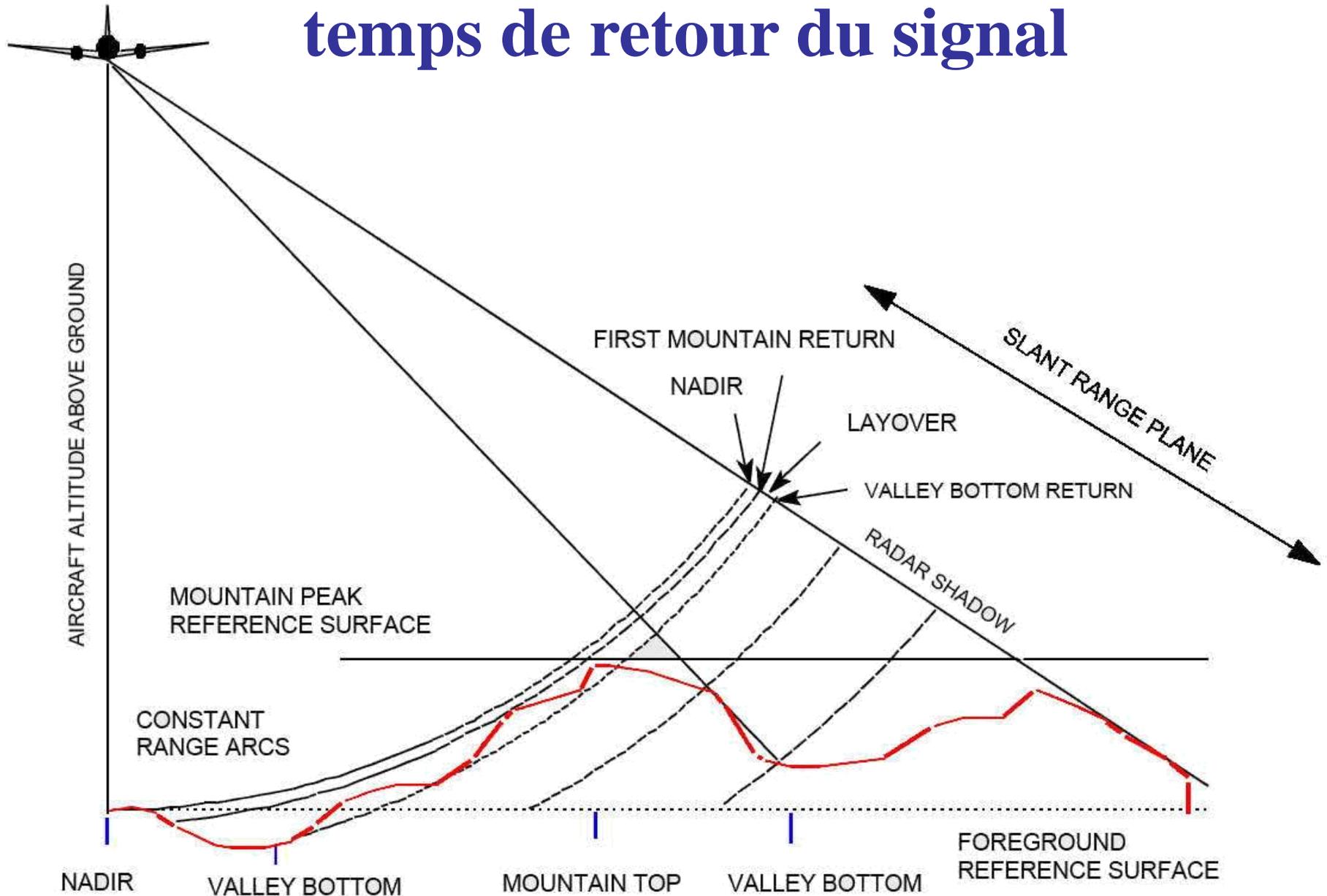
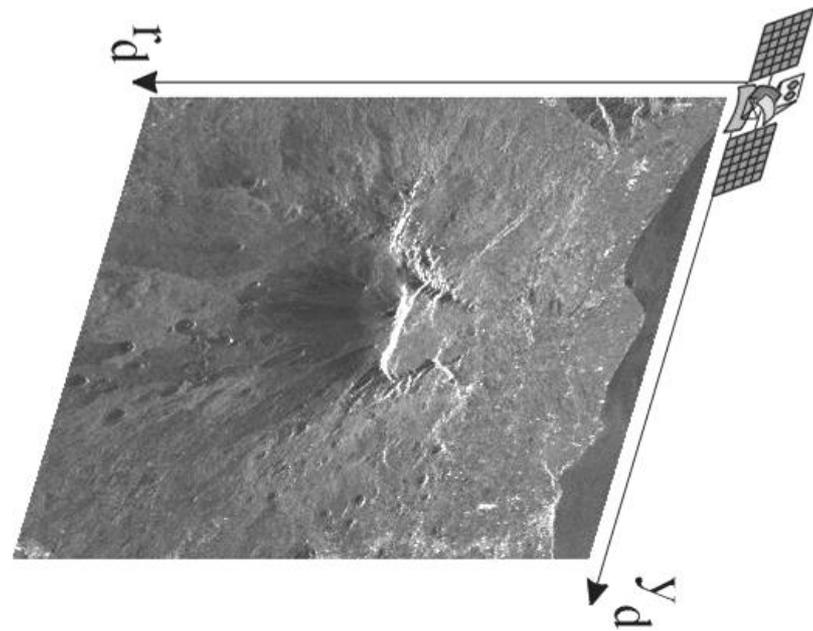
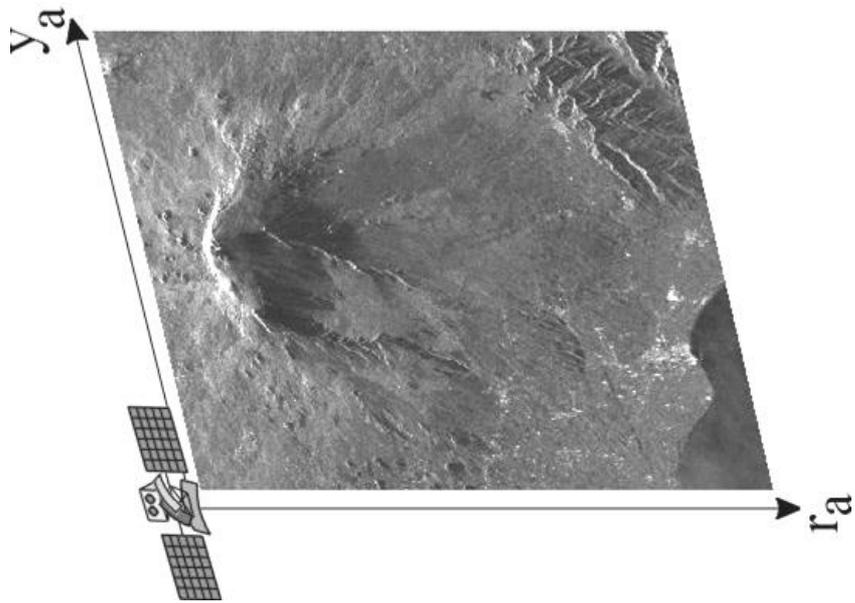
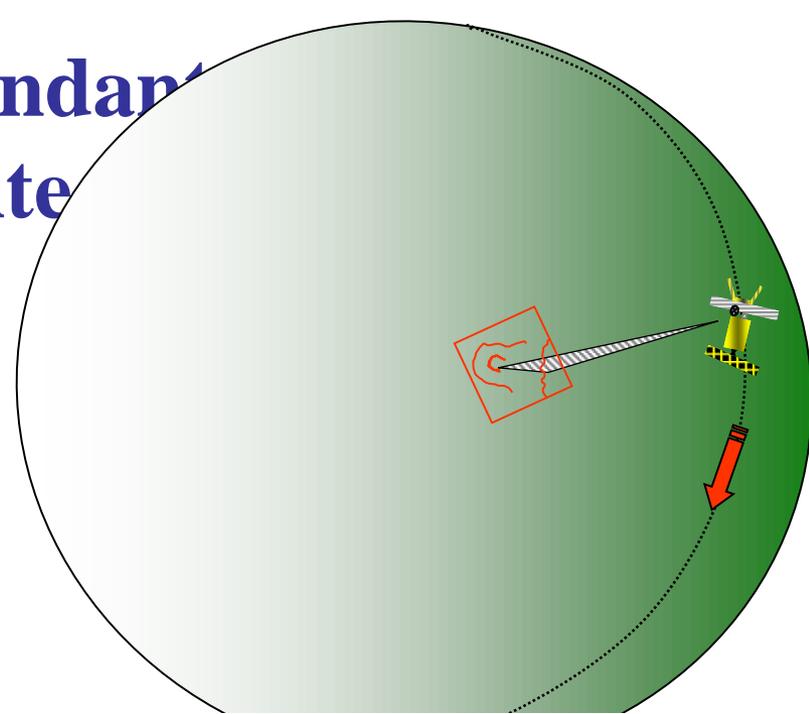
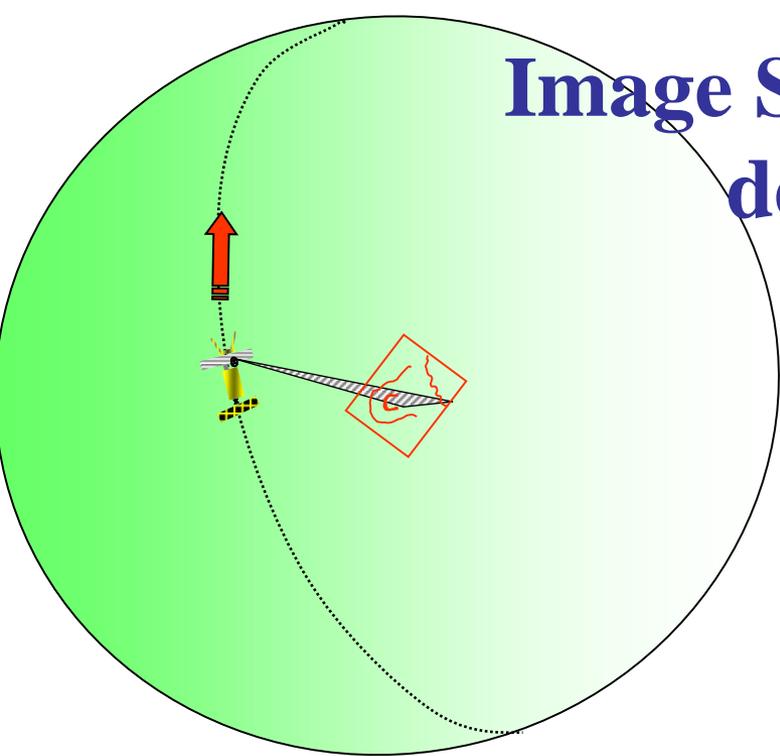


Image SAR ascendante descendante



Ortho- rectification des images radar

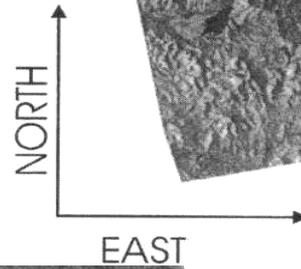
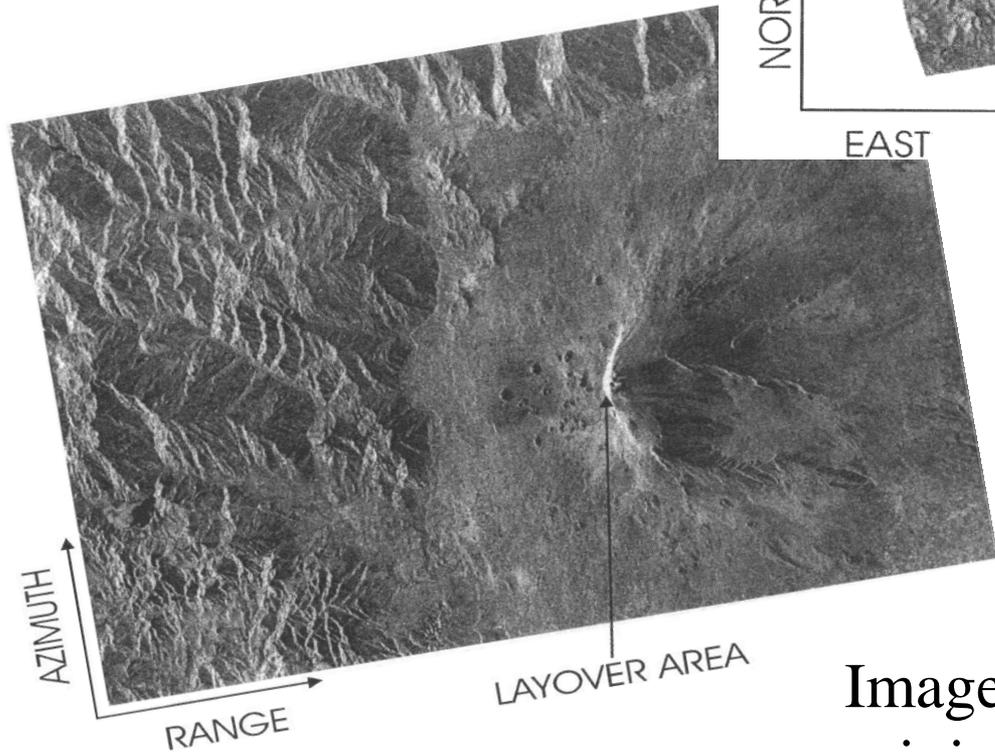


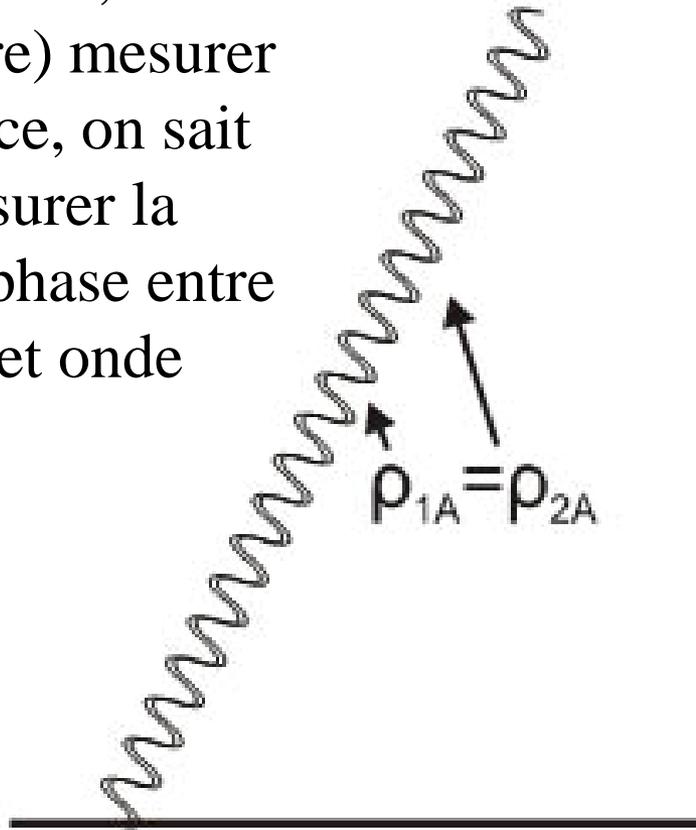
Image
originale

Image rectifiée
géométriquement

La rectification est
réalisée en utilisant un
modèle numérique de
terrain

La mesure de 'distance' n'est en réalité qu'une mesure de phase

Pour chaque pixel, on ne sait pas (encore) mesurer la vraie distance, on sait seulement mesurer la différence de phase entre onde incident et onde réfléchie



La longueur d'onde varie de ~ 2 à ~ 20 cm suivant les missions spatiales. En mode différentiel, il est possible de détecter des mouvements du sol de quelques mm

Satellites avec radar à ouverture synthétique

Depuis la mission ERS lancée en 1991, l'agence spatiale européenne ainsi que plusieurs autres agences spatiales entretiennent un programme d'observation de la Terre à partir d'instruments radar appelés "radars à ouverture synthétique".

- **ERS 1** 1992-2000 – bande C
- **ERS 2** 1995-2001 – bande C
- **ENVISAT** 2002-2011 – bande C
- **RADARSAT 1** 1995-? – bande C
- **RADARSAT 2** 2007-? – bande C
- **ALOS** 2006-2011 – bande L
- **TERRASAR X** 2007-? – bande X
- **COSMO** 2007-? – bande X
- **SENTINEL 1** (GMES, 2014) – bande C

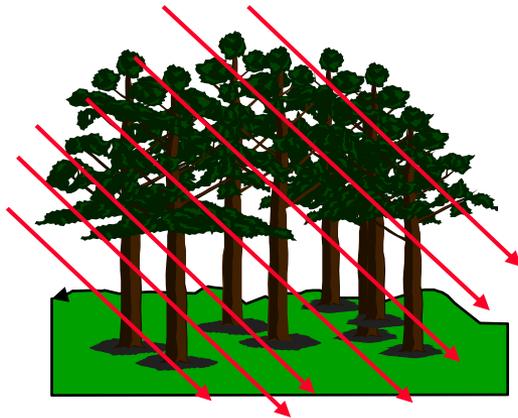


Temps de revisite: 12 - 35 jours suivant le satellite

Plus la fréquence est élevée moins l'onde traverse la canopée

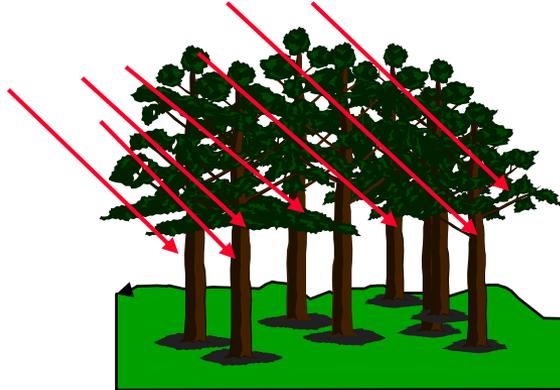
L band

$\lambda = 23 \text{ cm}$



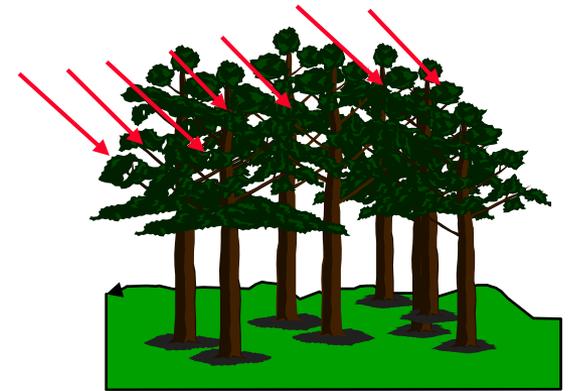
C band

$\lambda = 6 \text{ cm}$



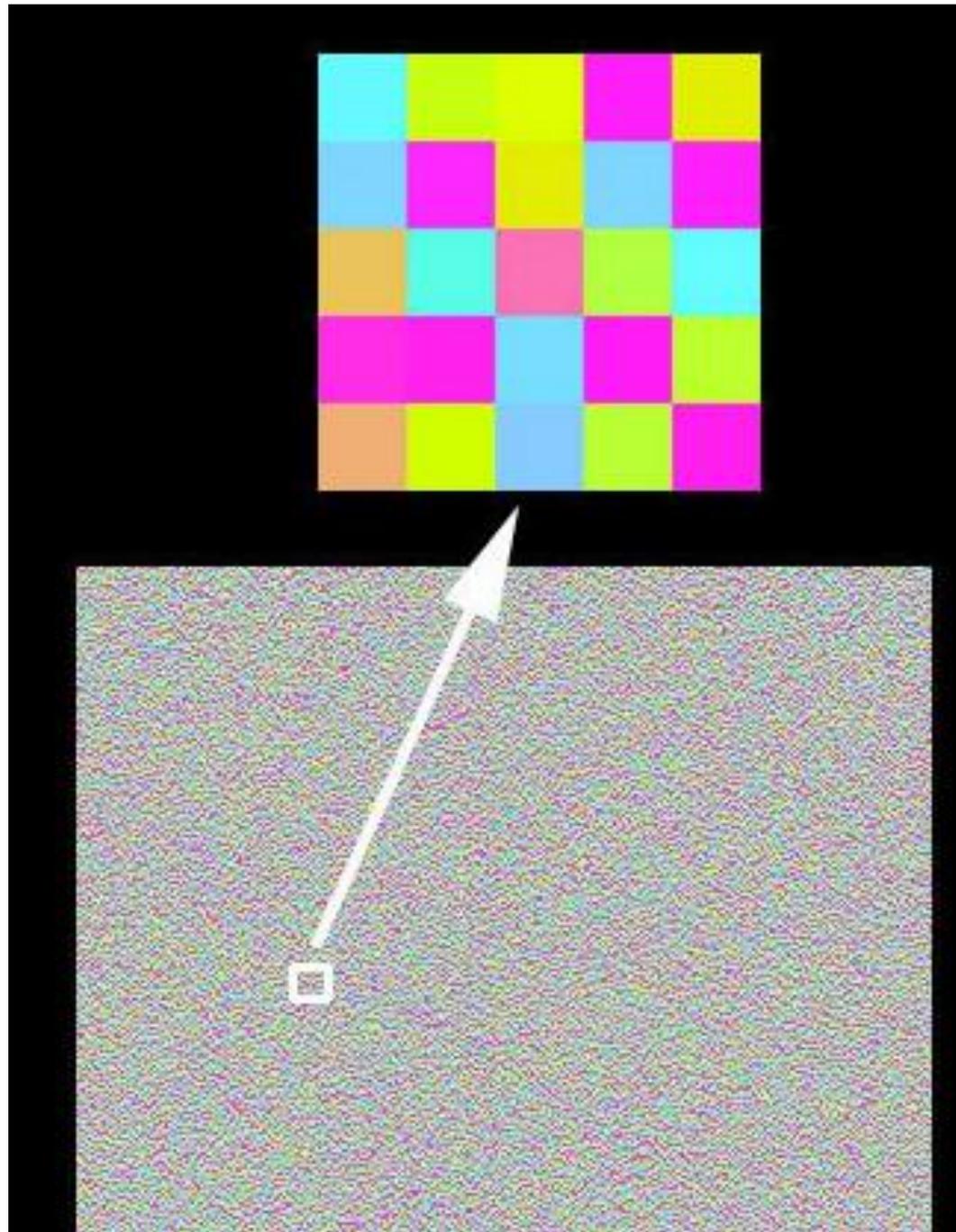
X band

$\lambda = 3 \text{ cm}$

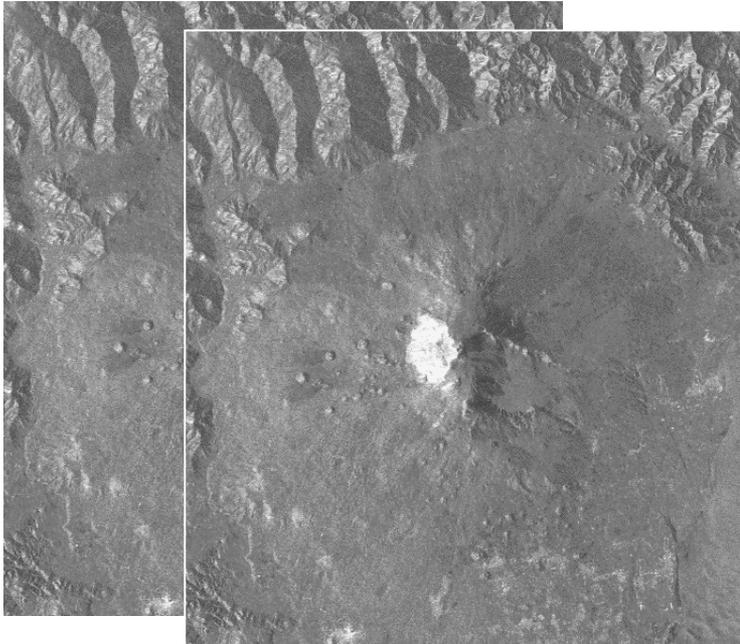


Exemple d'image de phase

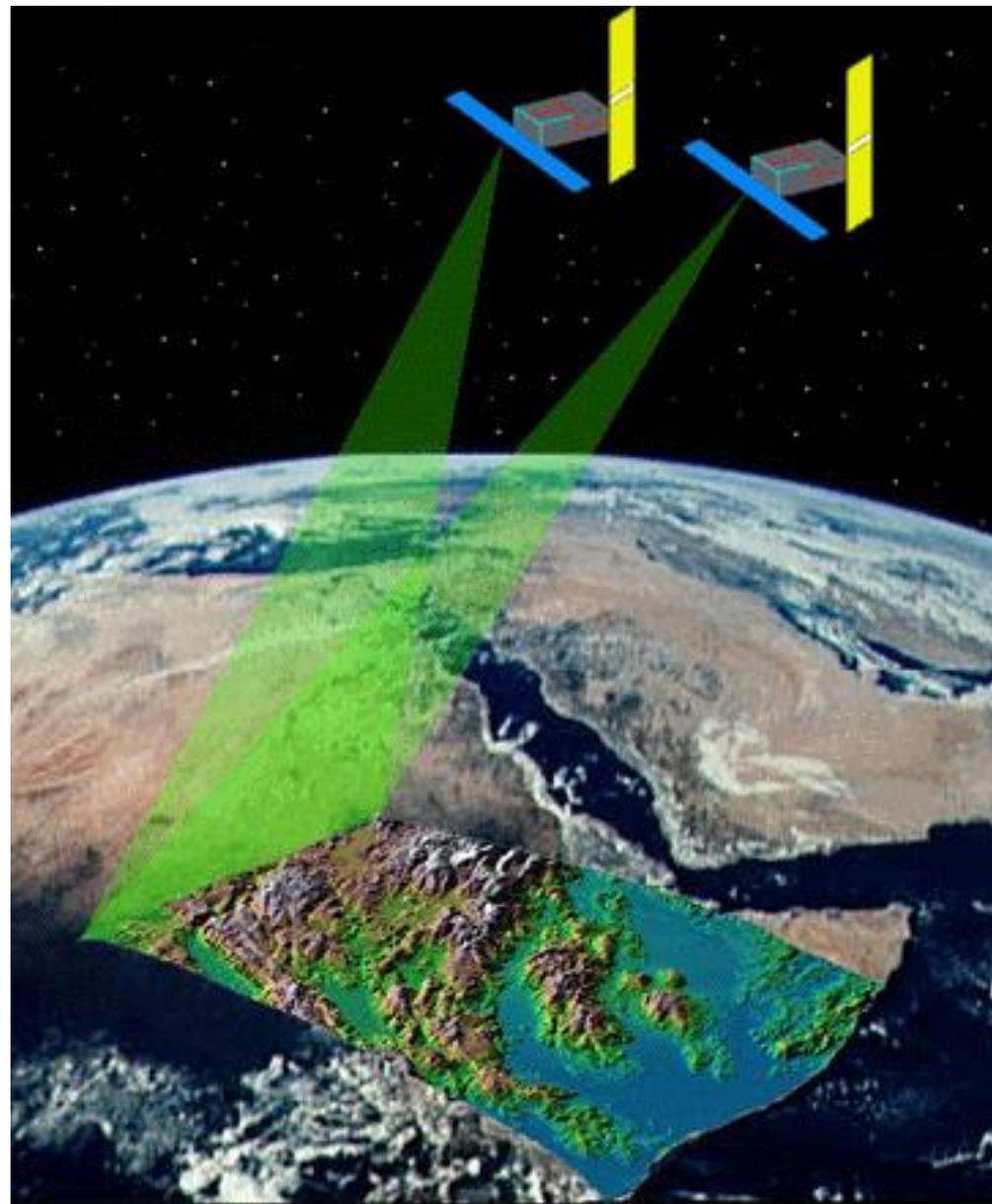
Vue par rapport à ses voisines, la phase d'une image radar individuelle apparaît comme un bruit aléatoire



Corrélation d'images radar

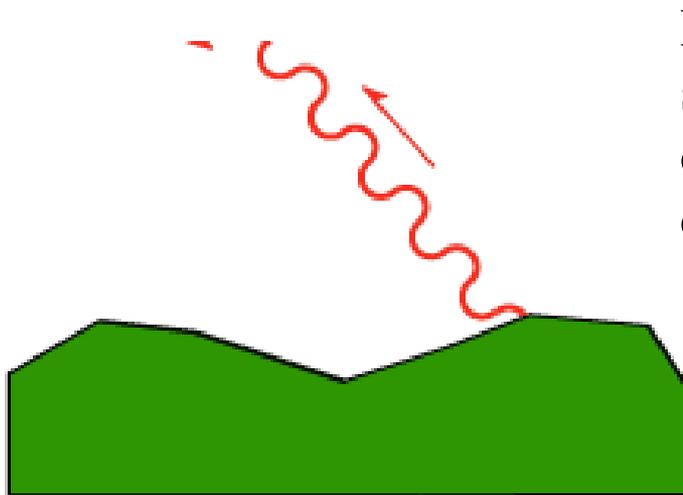


Principe: faire coïncider très précisément les images d'amplitude, puis soustraire les images de phase

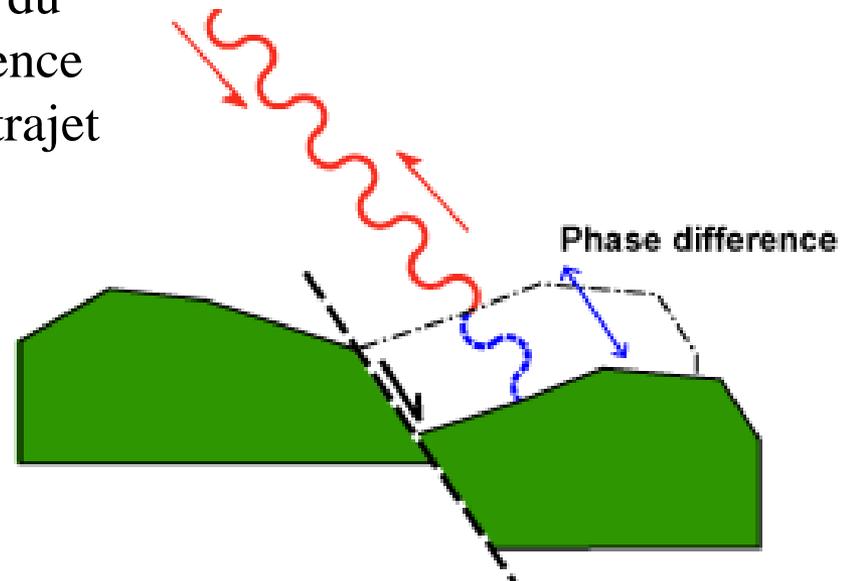


Corrélation d'acquisitions à deux époques différentes

Corrélation d'images SAR



Déformation du sol \Leftrightarrow différence de temps de trajet des ondes

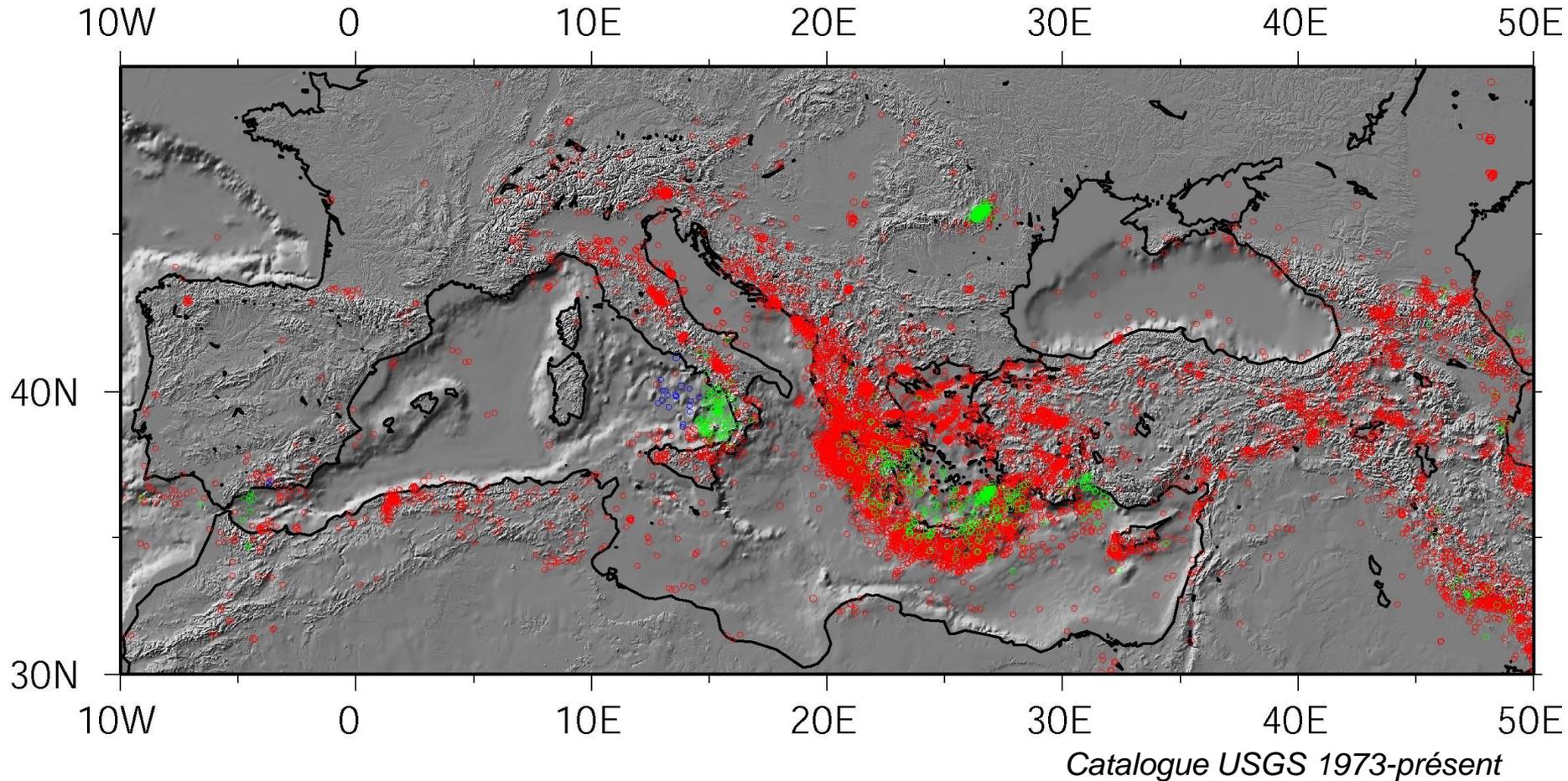


Origine des différences entre une image et une autre de la même zone

Les différences peuvent être dus à:

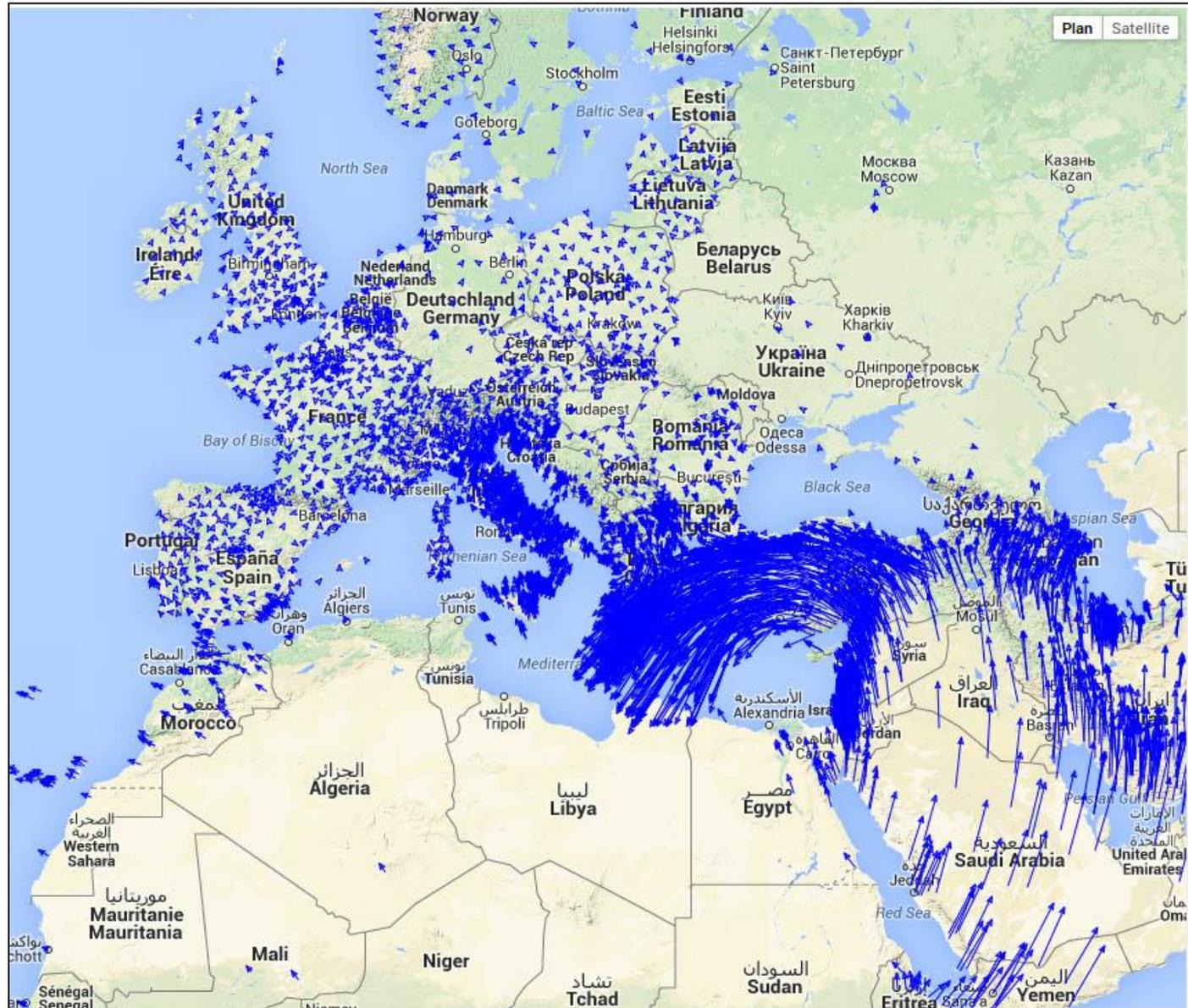
- des états différents de la troposphère ou de l'ionosphère aux deux époques
- aux effets de la parallaxe entre les points de vue légèrement différent lors des deux acquisitions
- à des déformations du sol

Sismicité de l'Europe



Par rapport à celle d'autres régions, la sismicité de l'Europe est qualifiée de modérée, avec les "gros" séismes dans la gamme de magnitude 5.5-6.5.

Géodynamique de la Méditerranée



Les séismes se produisent sur des failles! (et leur répétition fait grandir les failles)



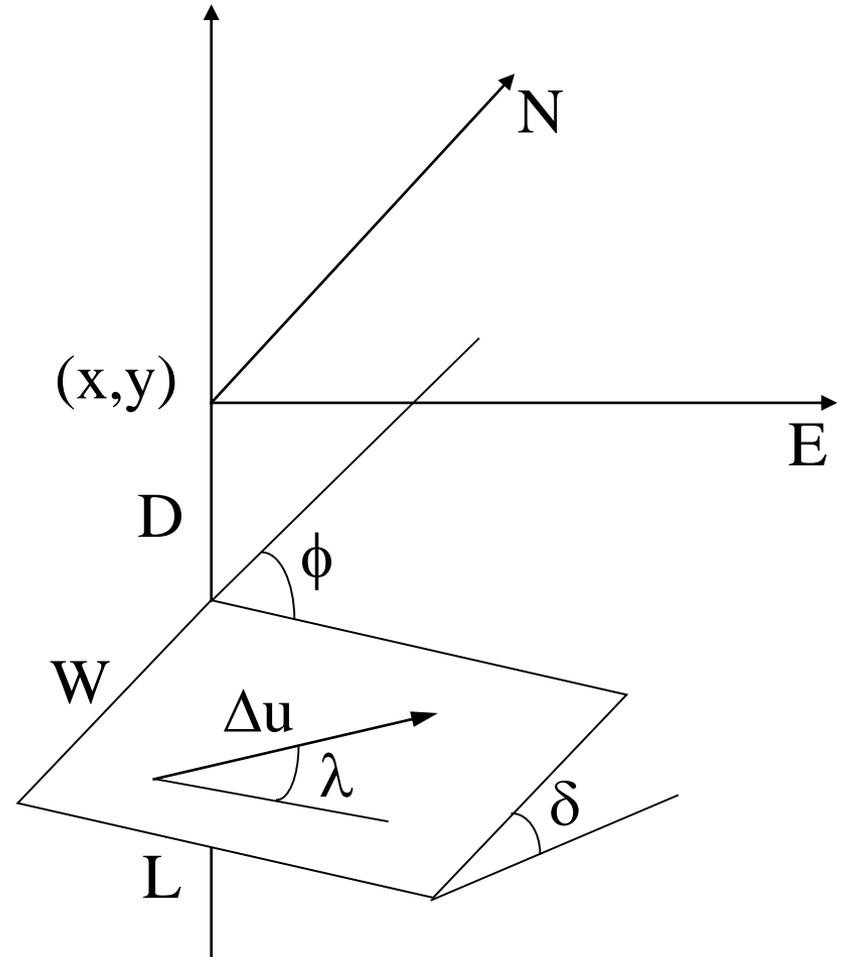
La faille d'Atalanti, Grèce

Modèle de séisme: dislocation d'un rectangle dans un demi espace élastique homogène

Neuf paramètres:

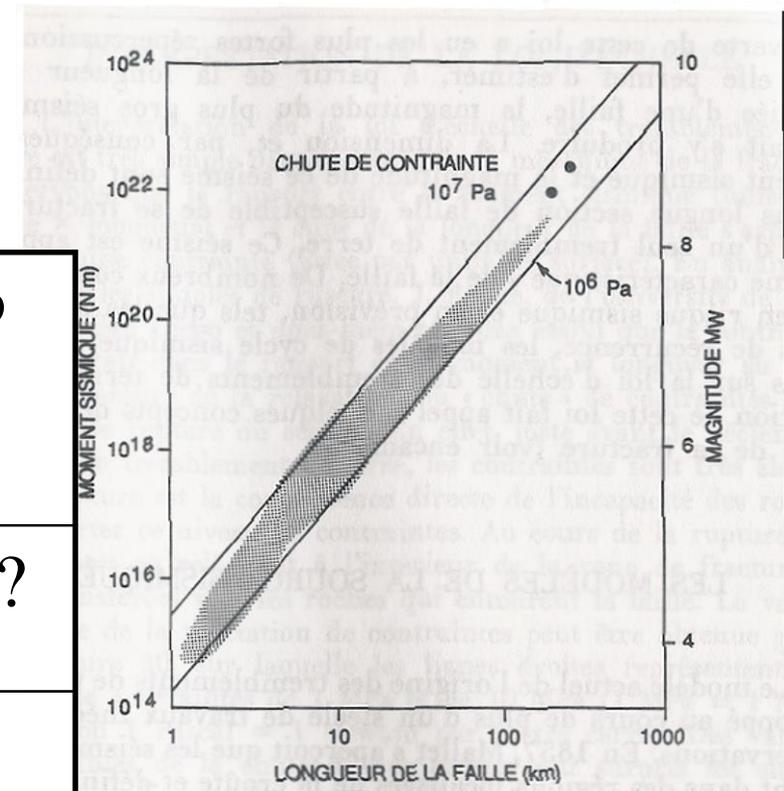
- 3 coordonnées du centre de l'arête supérieure de la faille
- 2 angles (azimut, pendage)
- Longueur et largeur
- Vecteur de glissement sur le plan de faille

- Okada(1985) BSSA, 75, 1135
- Okada(1992) BSSA, 82, 1018



Lois d'échelles

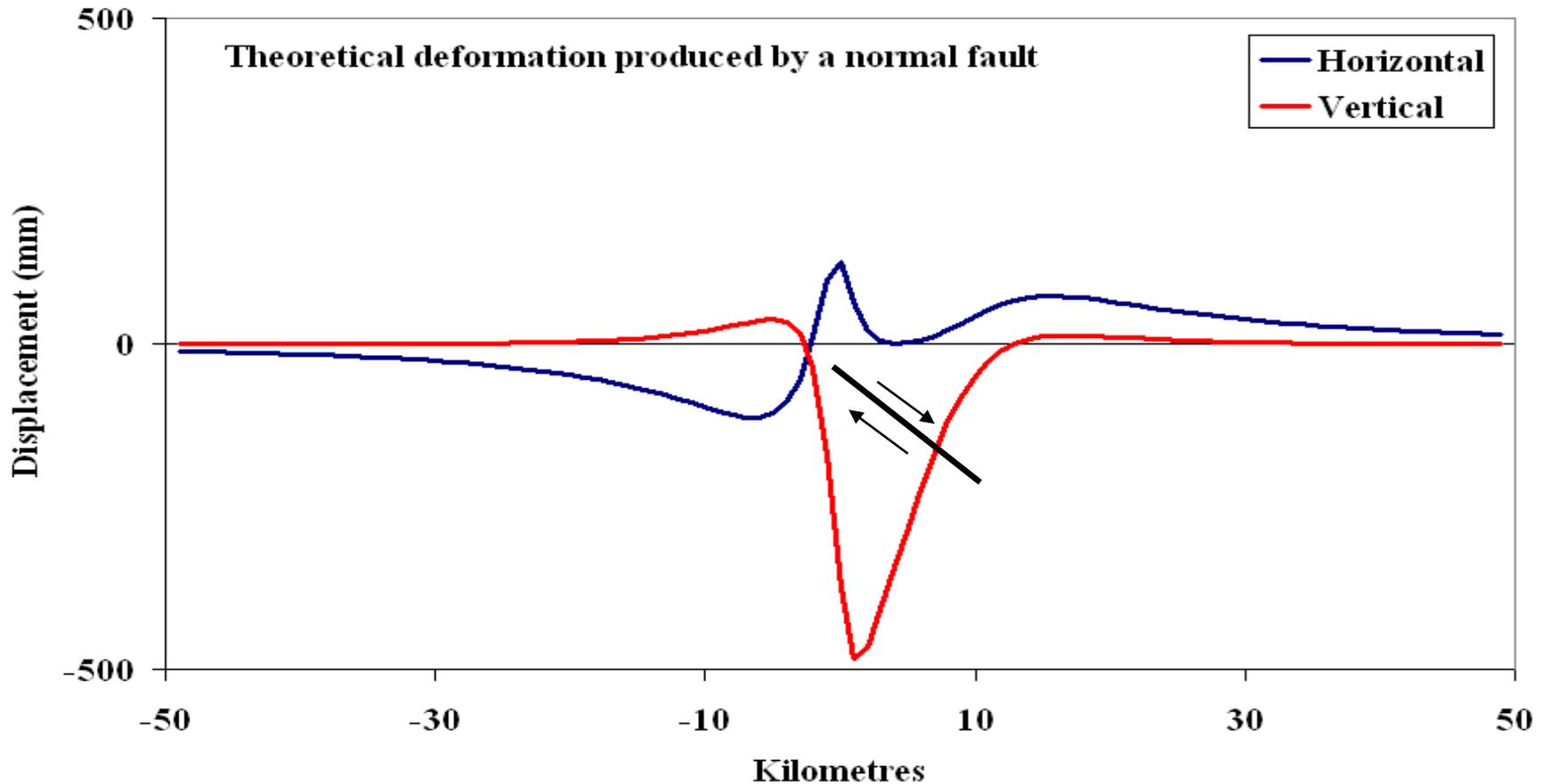
Magnitude (M_w)	Moment (Nm)	Length (km)	Durati on (s)	Slip (m)
10	10^{24}	1000?	300?	100?
9	$3 \cdot 10^{22}$	300	100	30
8	10^{21}	100	30	10
7	$3 \cdot 10^{19}$	30	10	3
6	10^{18}	10	3	1



Relation magnitude / moment

$$\log_{10} M_0(Nm) = 1.5M_w + 9.3$$

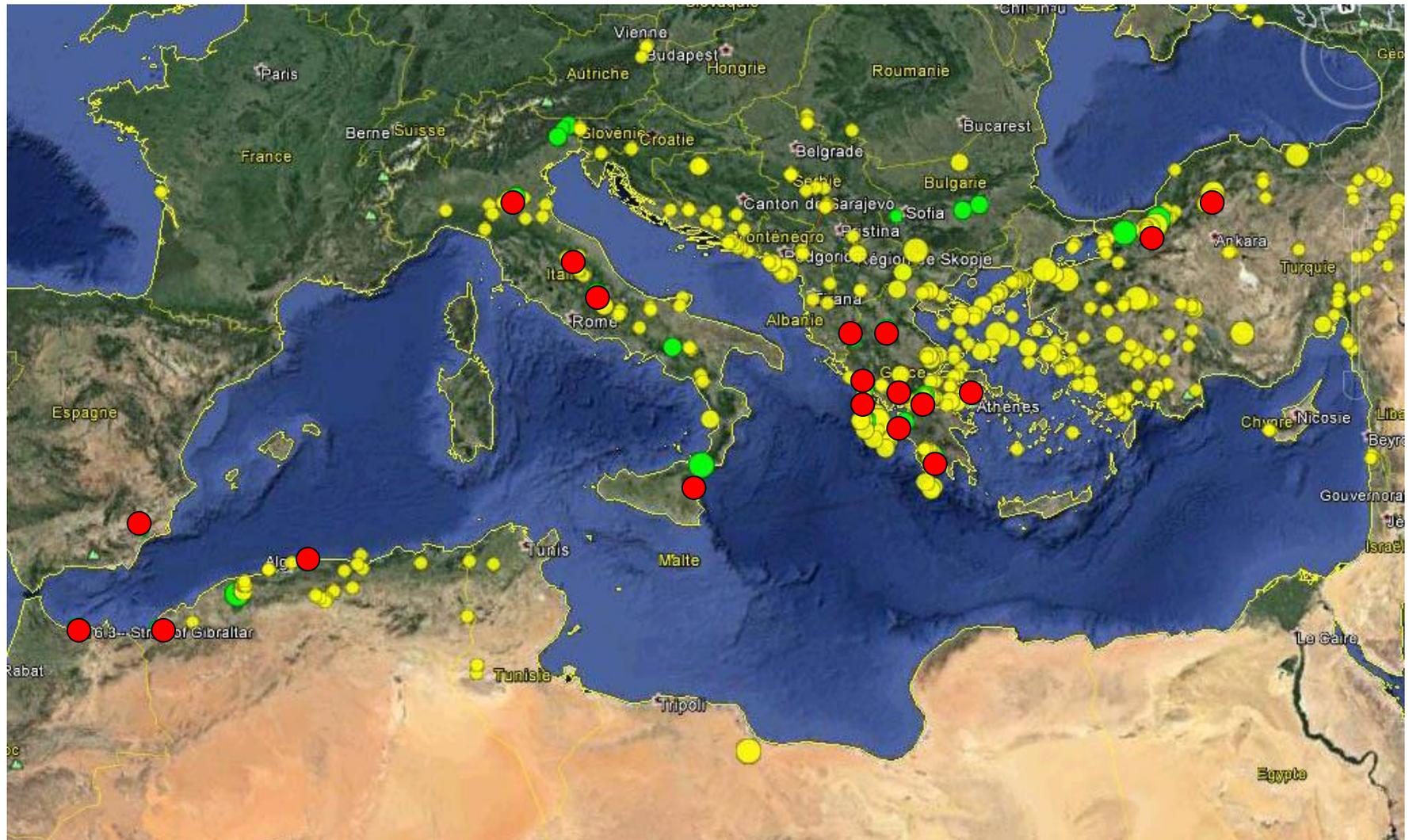
Simulation d'un séisme de M=6.2 (faille normale)



- Déplacements verticaux élevés près de la faille et de plus grande amplitude que les mouvements horizontaux
- Mouvements horizontaux dominant à plus grande distance et détectables à plusieurs dizaines de km (si résolution instrumentale millimétrique)

Magnitudes > 5 entre 1900 et 2014

En rouge, les séismes étudiés par InSAR



Exemples de séismes étudiés avec l'aide de l'interférométrie radar

Colfiorito, 1999, M=6
L'Aquila, 2009, M=6.3
Sequence de Norcia 2016-2017

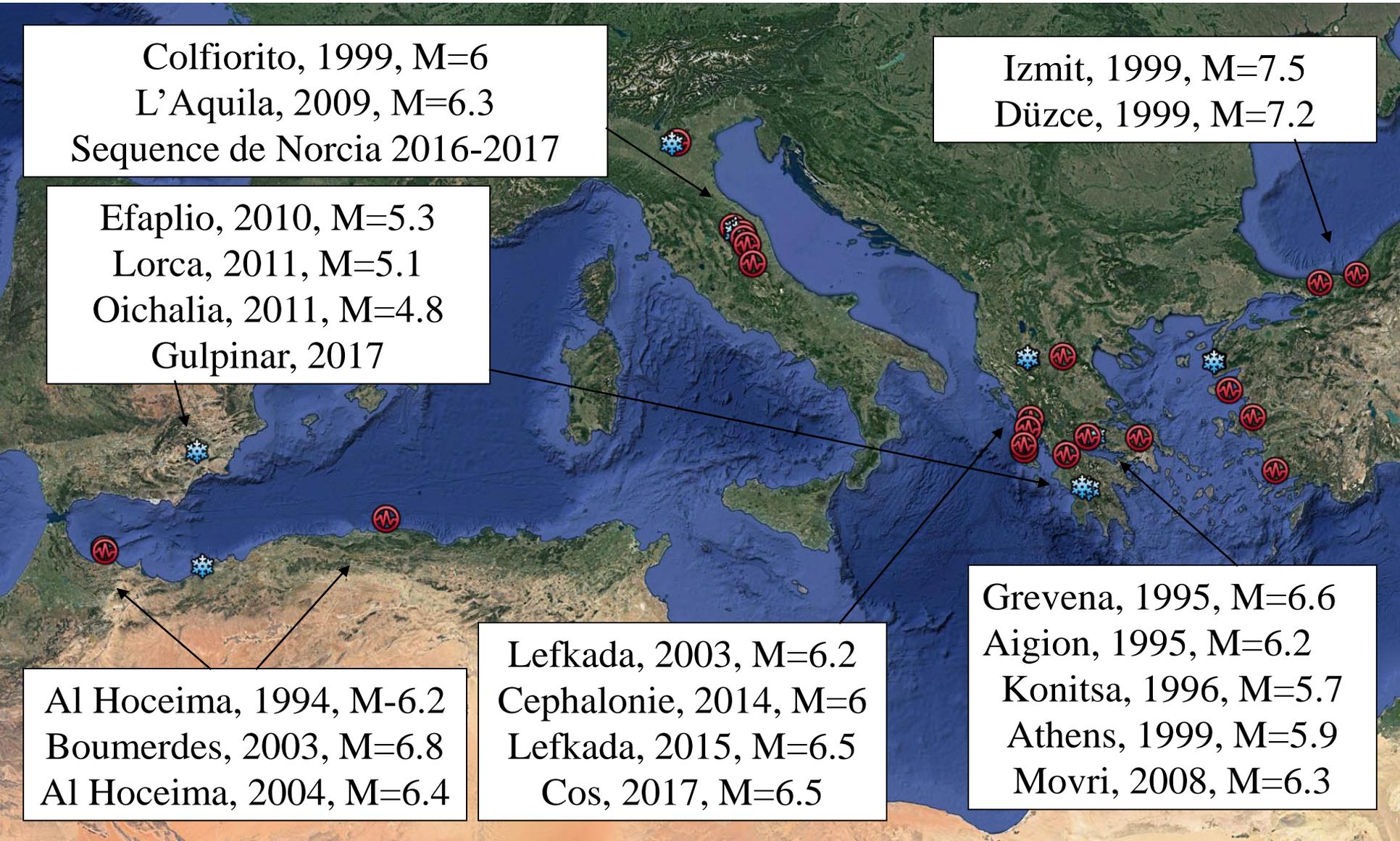
Izmit, 1999, M=7.5
Düzce, 1999, M=7.2

Efaplio, 2010, M=5.3
Lorca, 2011, M=5.1
Oichalia, 2011, M=4.8
Gulpinar, 2017

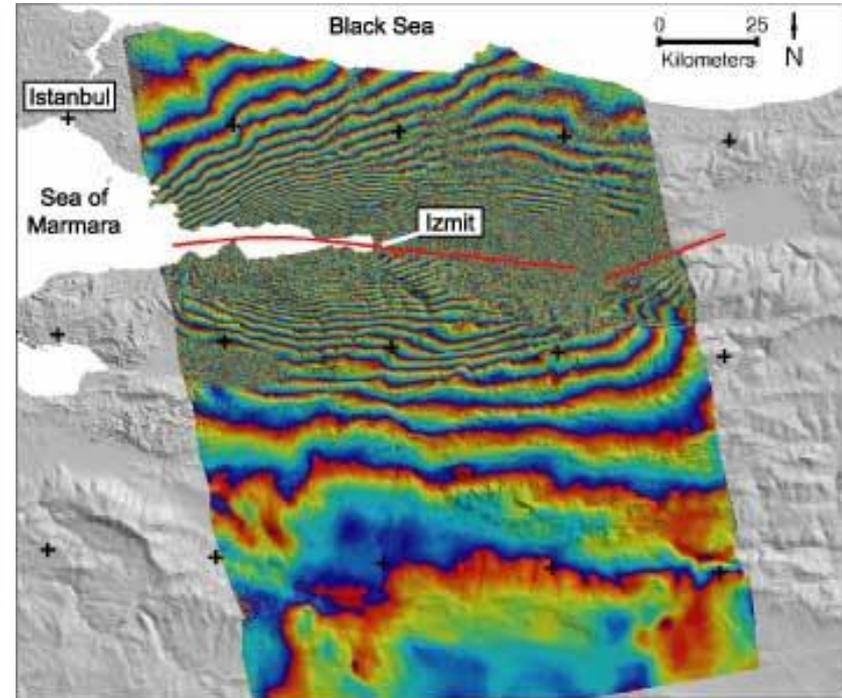
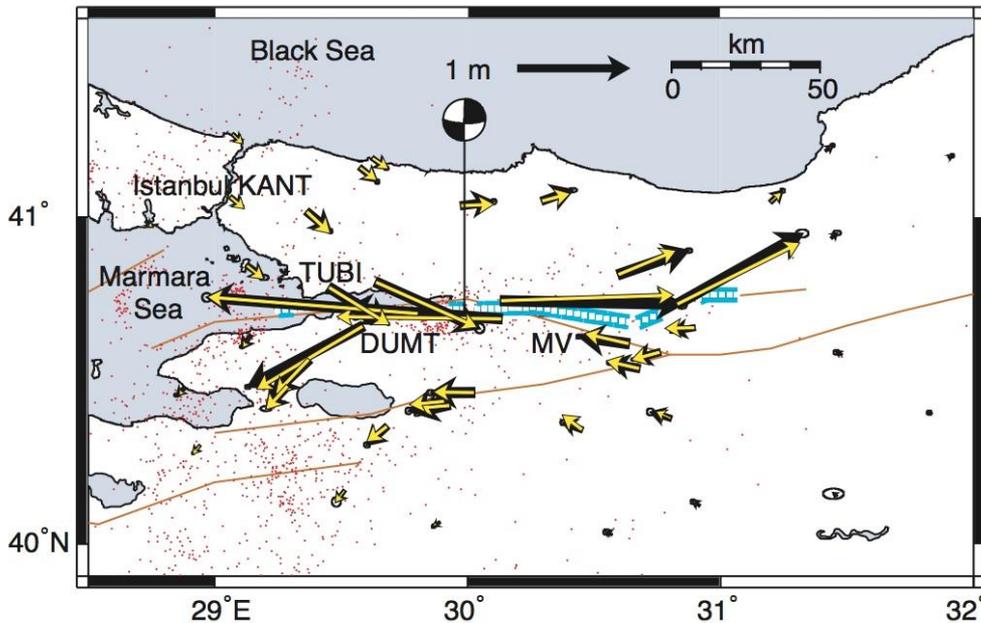
Al Hoceima, 1994, M=6.2
Boumerdes, 2003, M=6.8
Al Hoceima, 2004, M=6.4

Lefkada, 2003, M=6.2
Cephalonie, 2014, M=6
Lefkada, 2015, M=6.5
Cos, 2017, M=6.5

Grevena, 1995, M=6.6
Aigion, 1995, M=6.2
Konitsa, 1996, M=5.7
Athens, 1999, M=5.9
Movri, 2008, M=6.3



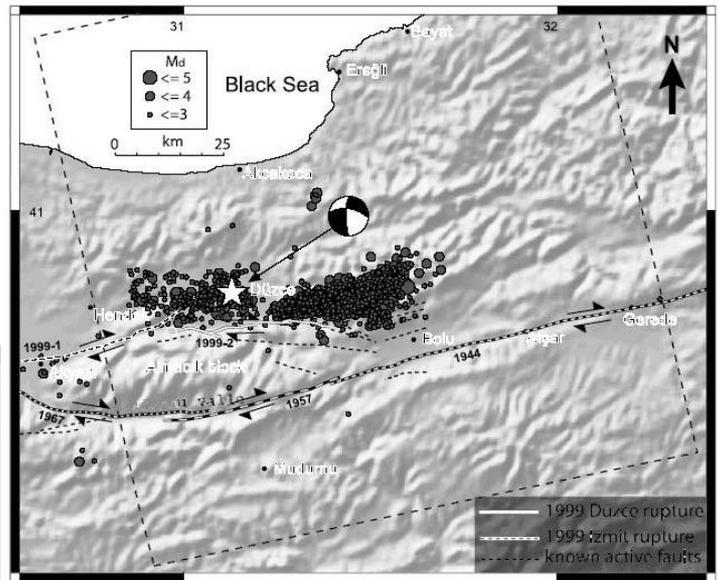
Izmit, $M_w=7.5$, 17/8/1999



Reilinger *et al.*, 2001

- Les déplacements co-sismiques peuvent être observés par:
 - le GPS
 - L'interférométrie SAR
- Amplitude des mouvements observés:
 - Jusqu'à 5.7 m près de la faille
 - Décroissance vers le nord et le sud en s'éloignant de la faille (orientée est-ouest)

Düzce, Mw=7.2, 12/11/1999



Cakir *et al.*, 2003

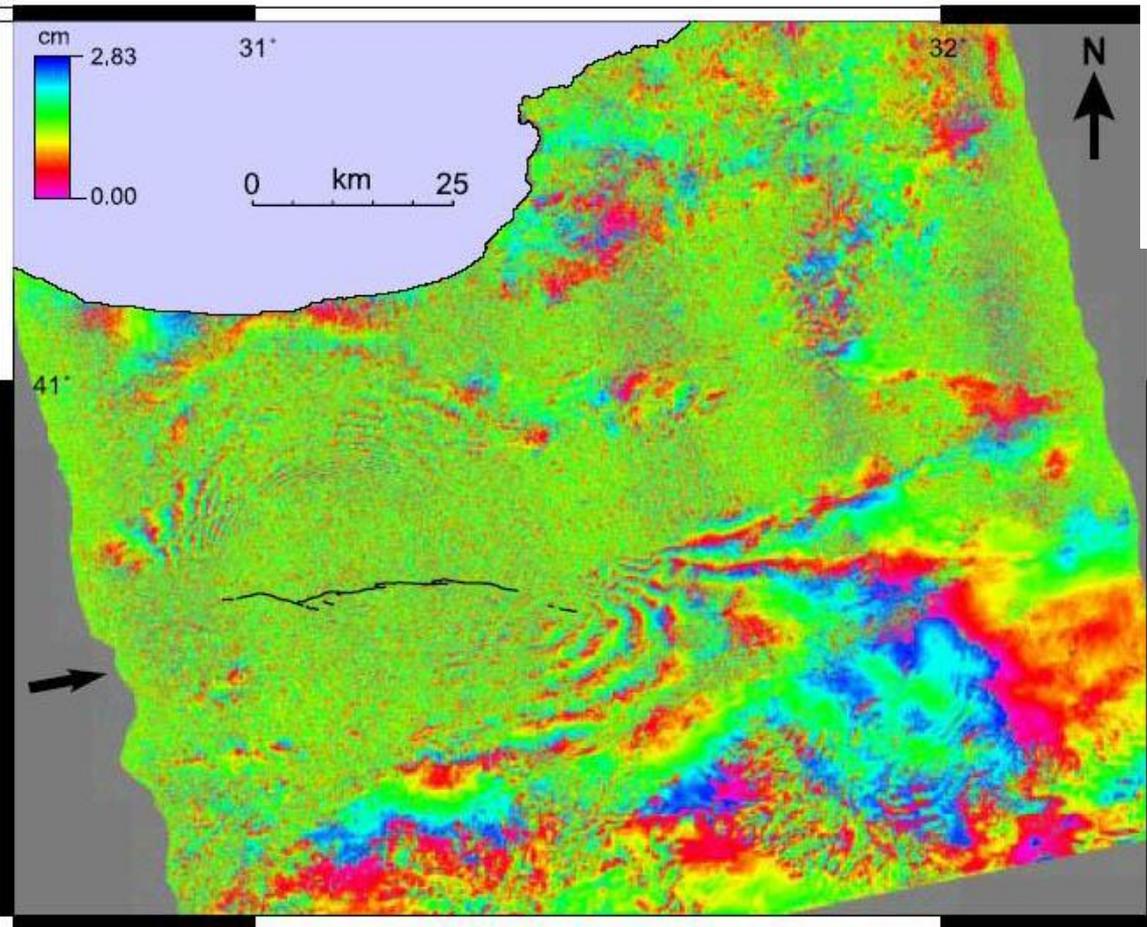
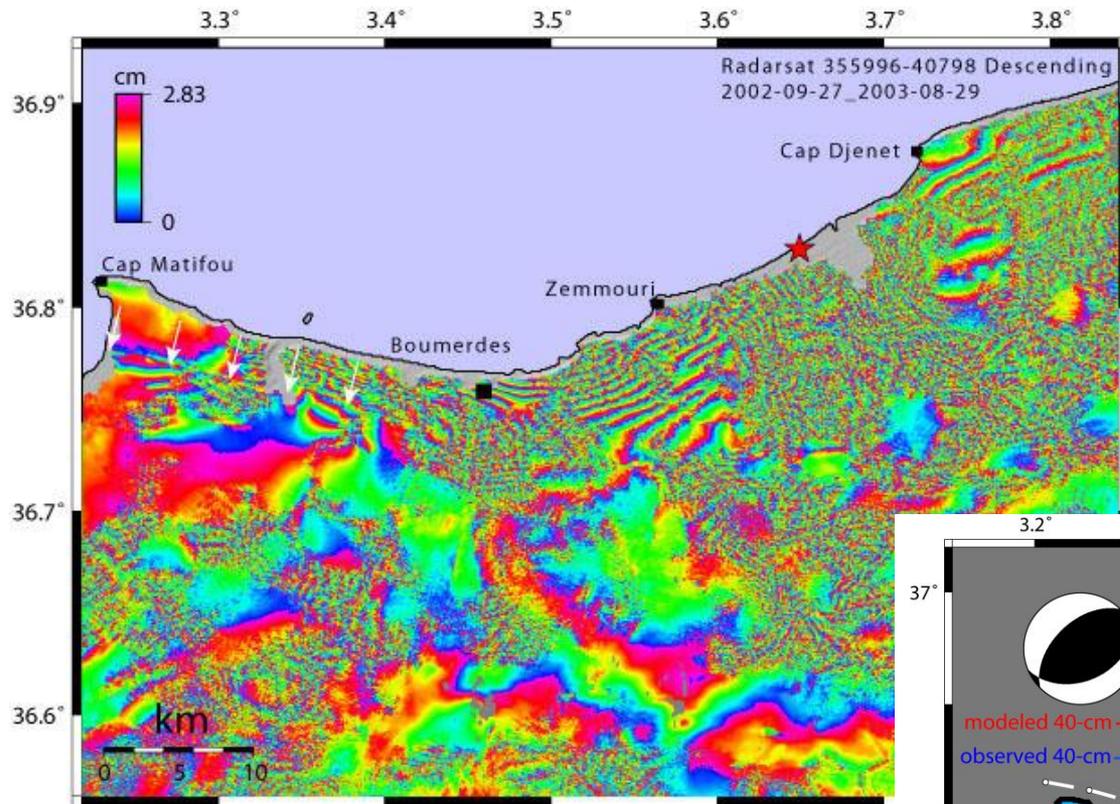
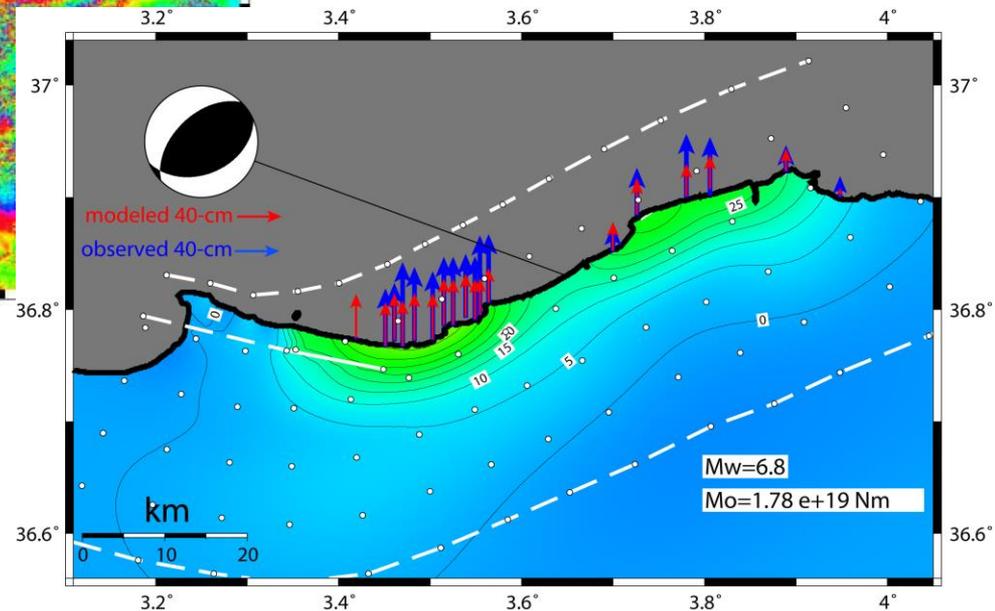
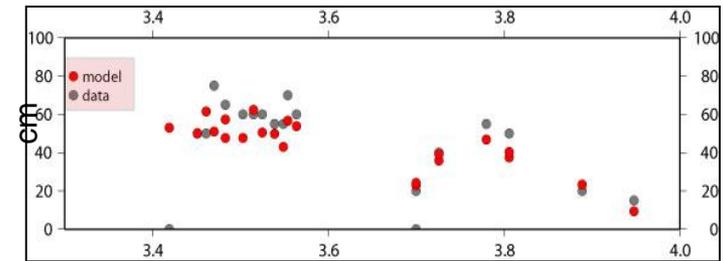


Figure 3. Coseismic interferogram of the 12 November 1999 Düzce earthquake. Each fringe represents 2.83 cm of range change along the radar line of sight. Surface rupture is shown with black lines. The radar-look direction is indicated by a black arrow.

Boumerdes, $M_w=6.8$, 21/05/2003



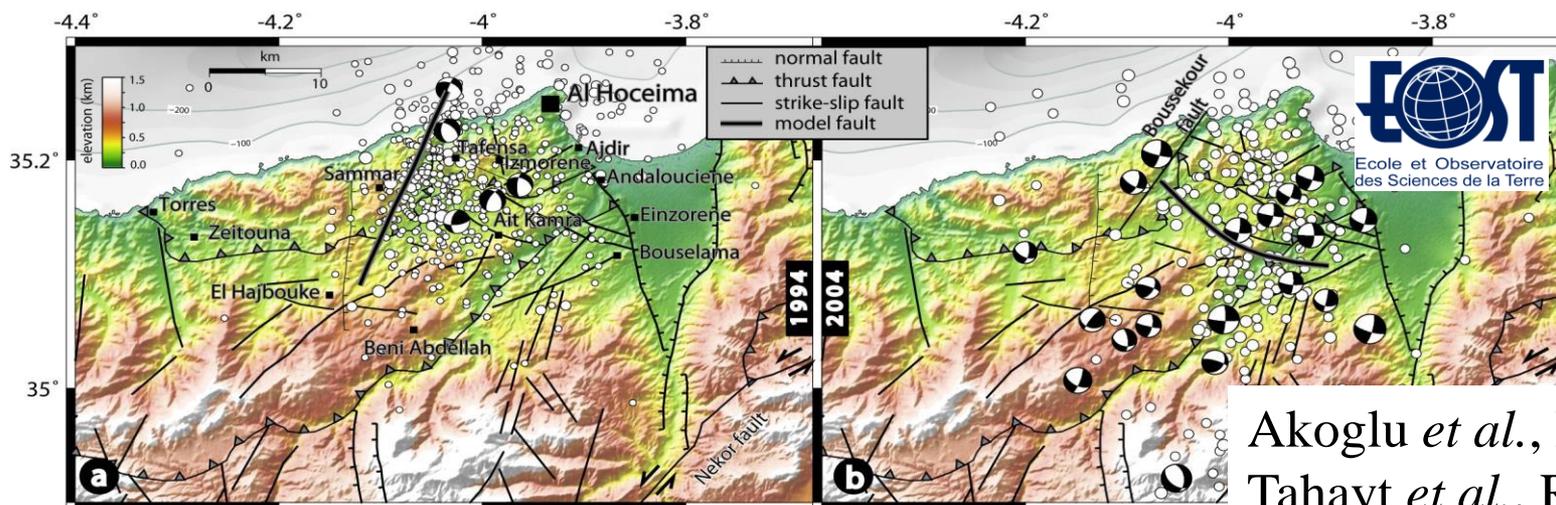
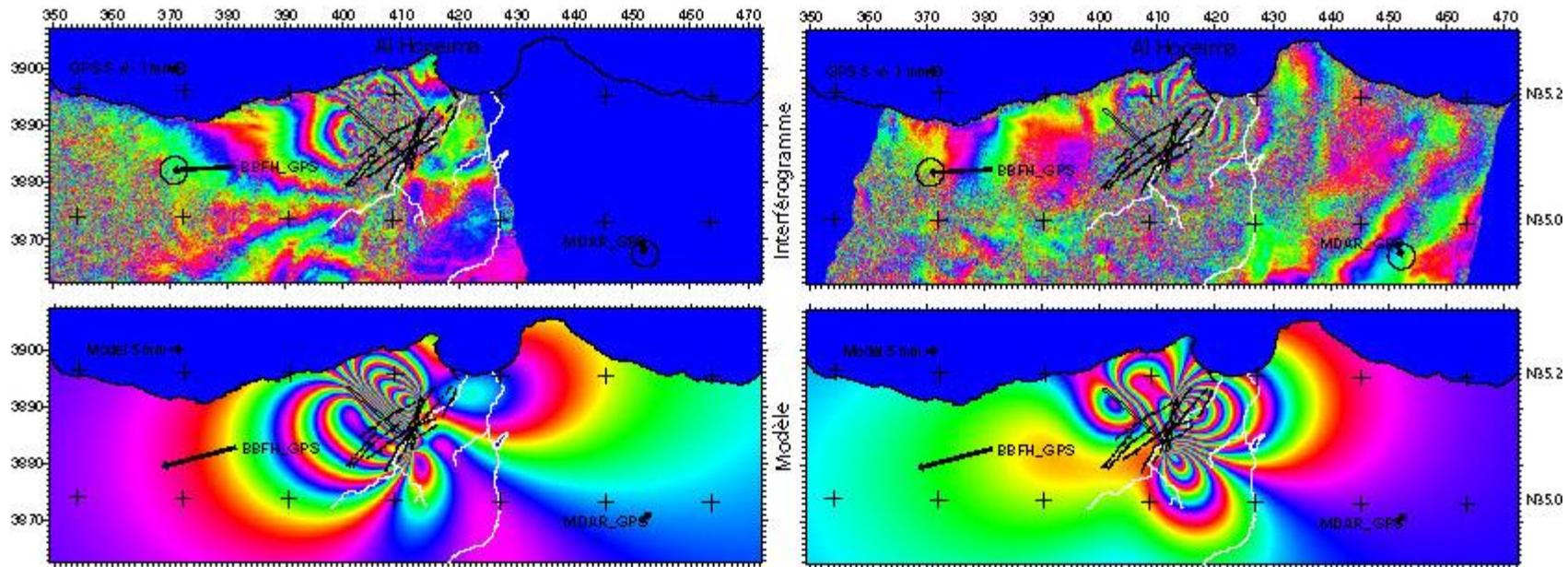
Coastal uplift



Meghraoui *et al.*, 2007

Belabbes *et al.*, 2009

Al Hoceima, $M_w=6.4$, 24/2/2004

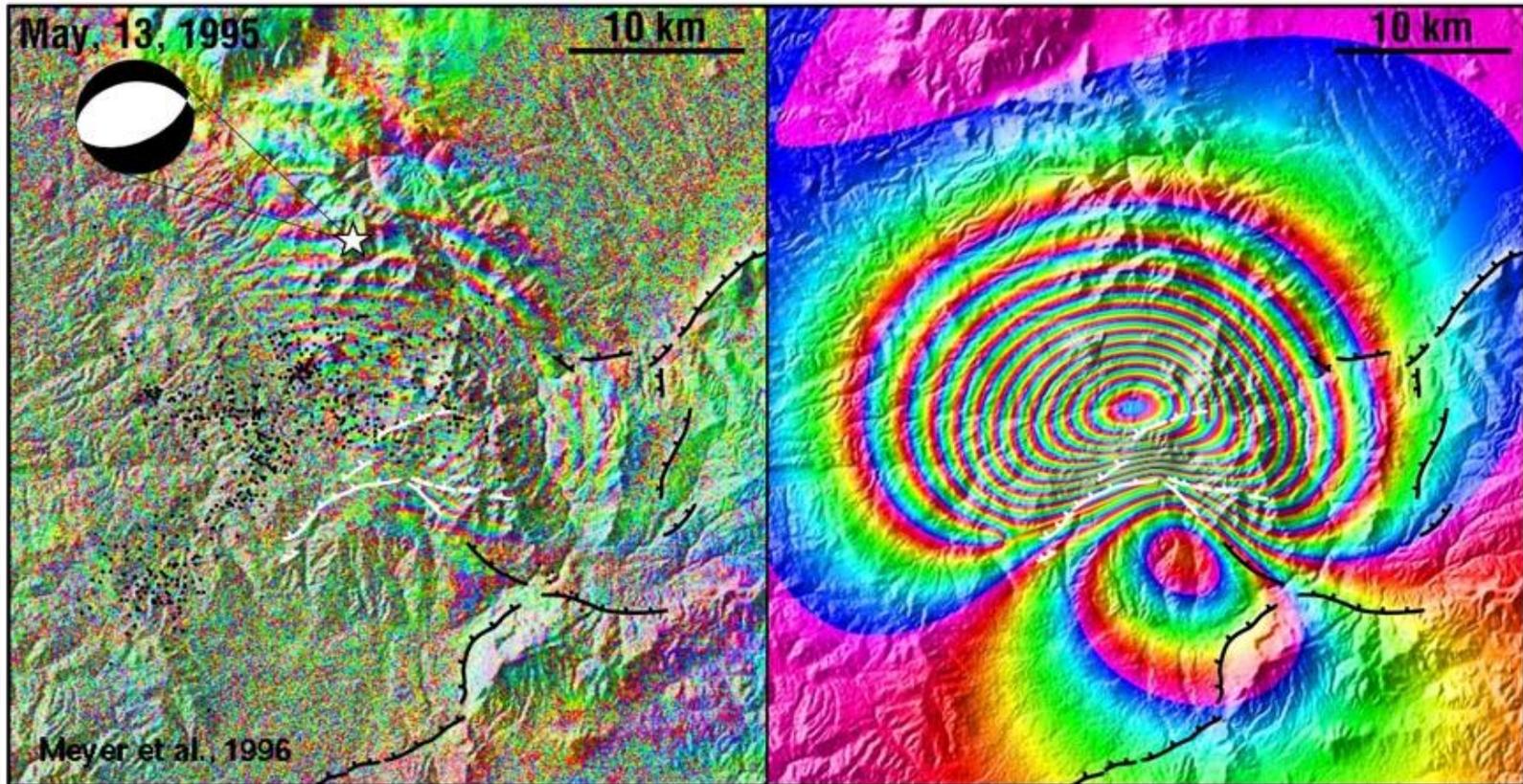


Akoglu *et al.*, EPSL, 2006,
Tahayt *et al.*, RSE, 2008

Grevena earthquake, $M_s=6.6$, May 13, 1995

OBSERVED

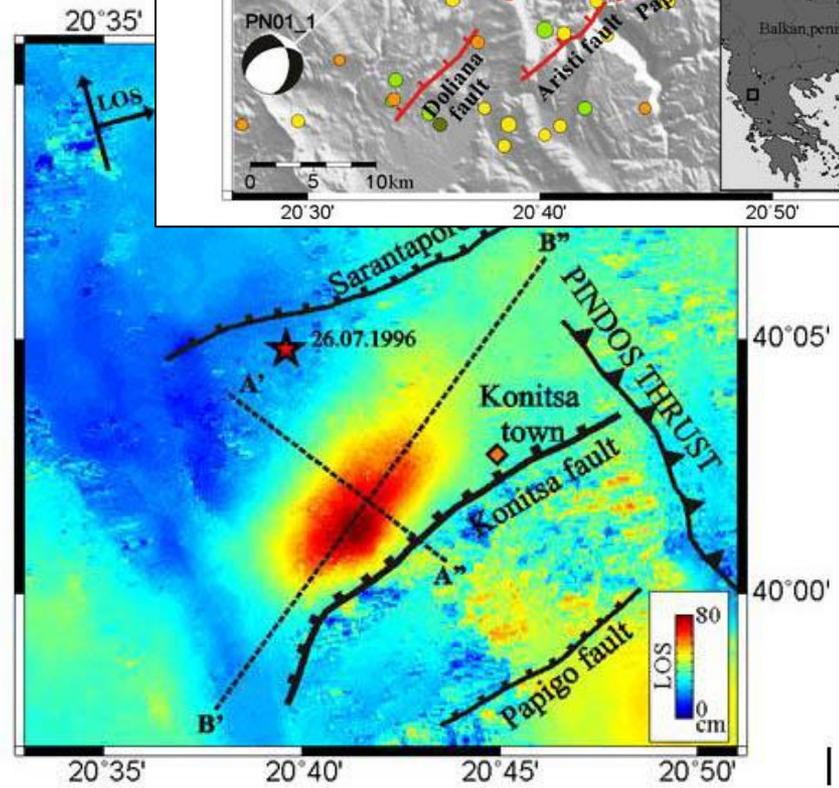
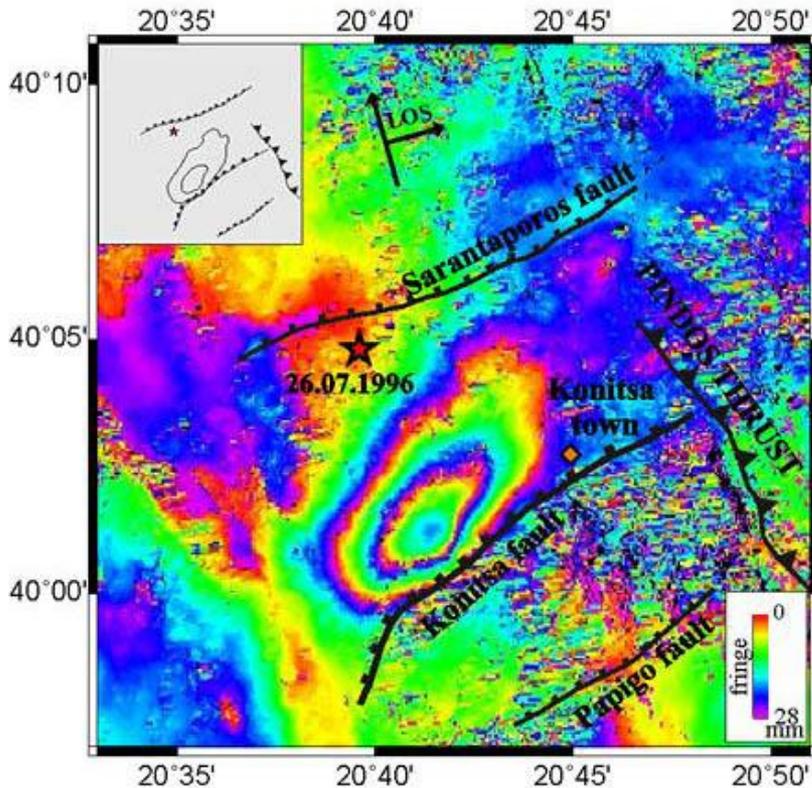
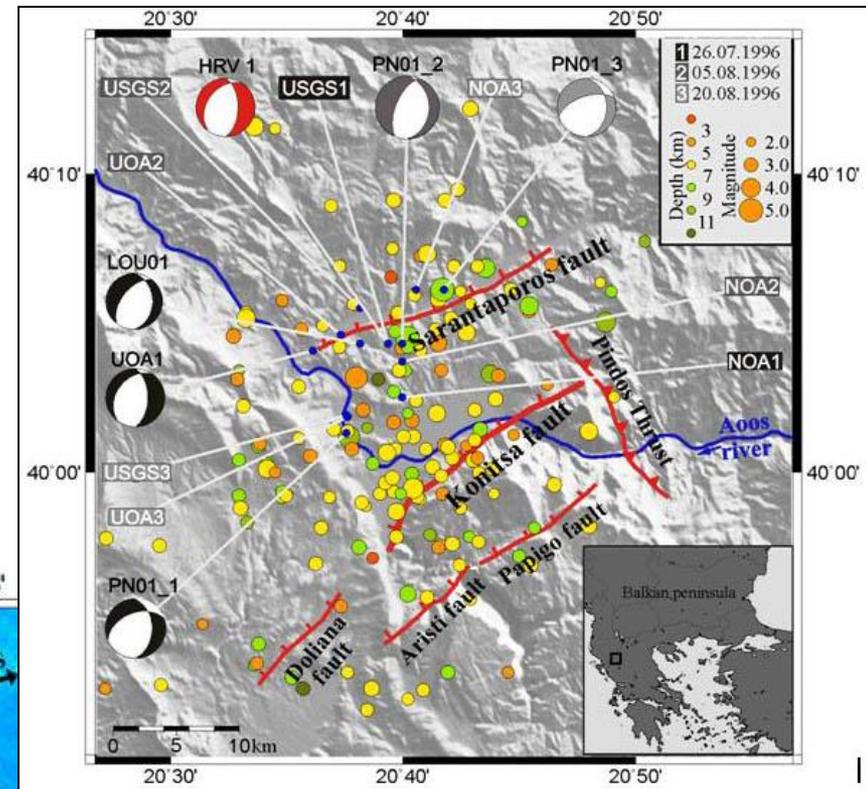
MODEL



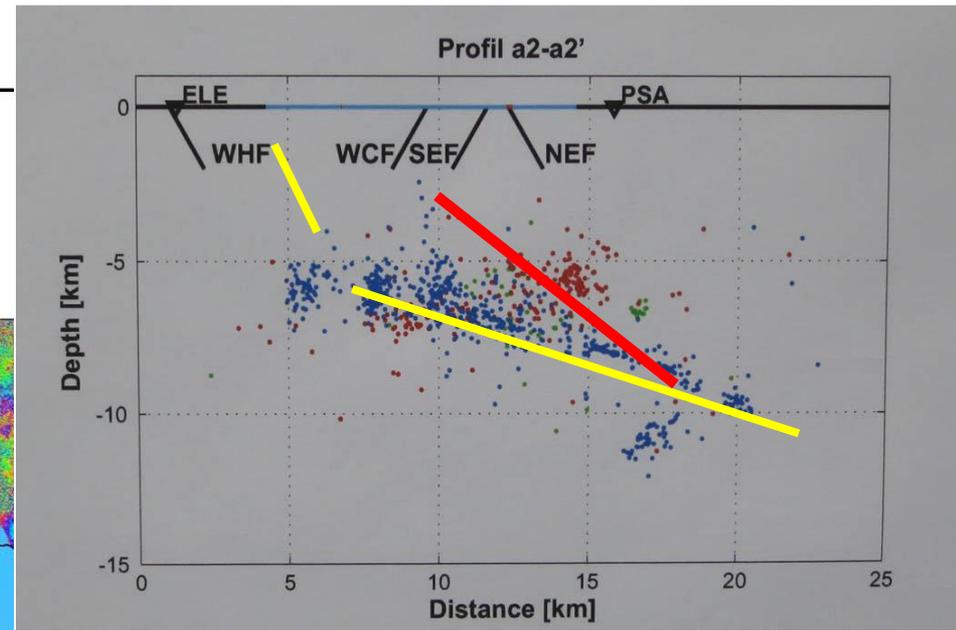
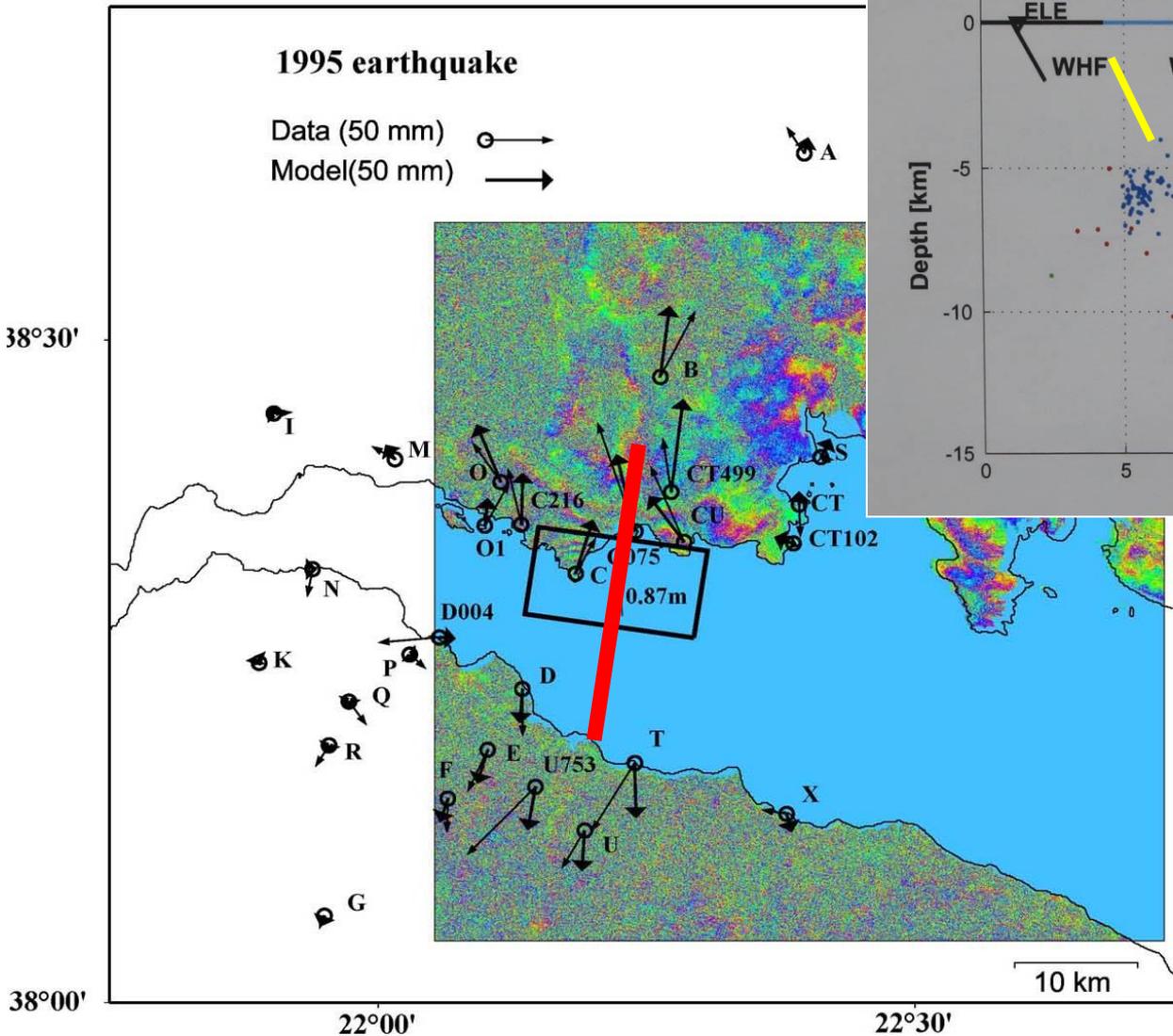
Interferogramme et modèle – séisme de Grevena (Meyer *et al.*, 1996)

Konitsa, $M_w=5.3, 5.7,$ 26/7, 6/8/1996

Ilieva, 2011



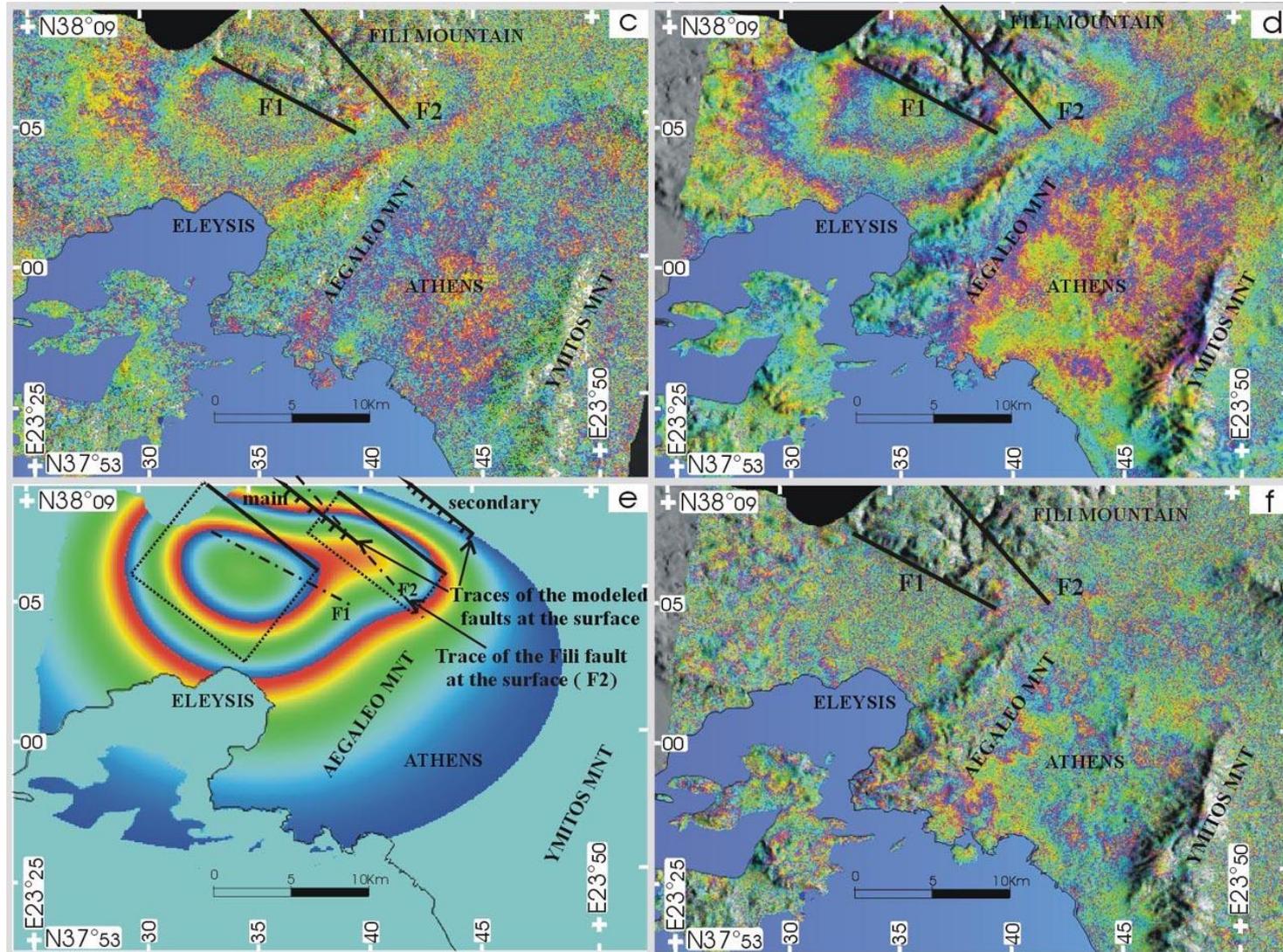
$M_s = 6.2$ June 15, 1995, Aigion earthquake



Limite supérieure de
la rupture à ~3km de
profondeur

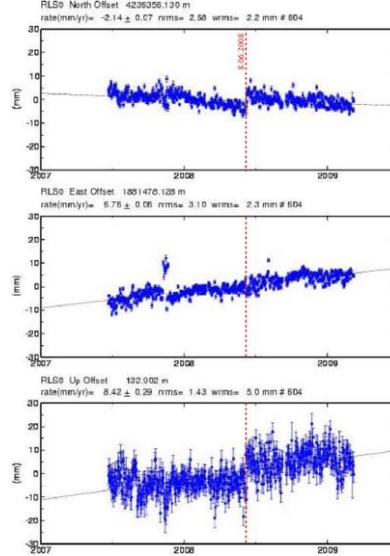


Athens, $M_w=5.9$, 7/9/1999

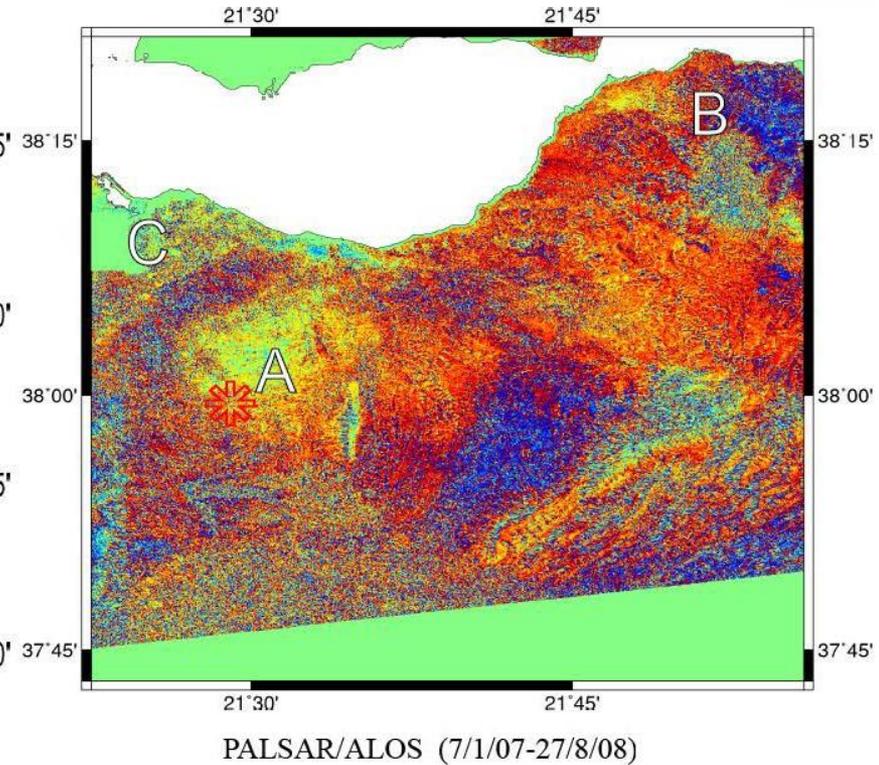
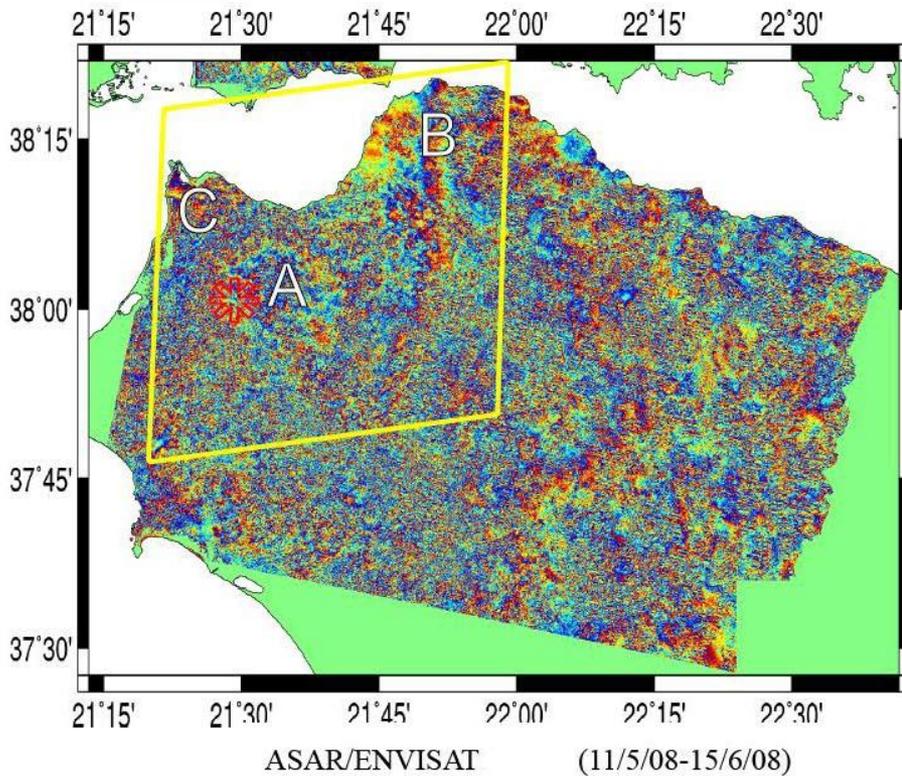
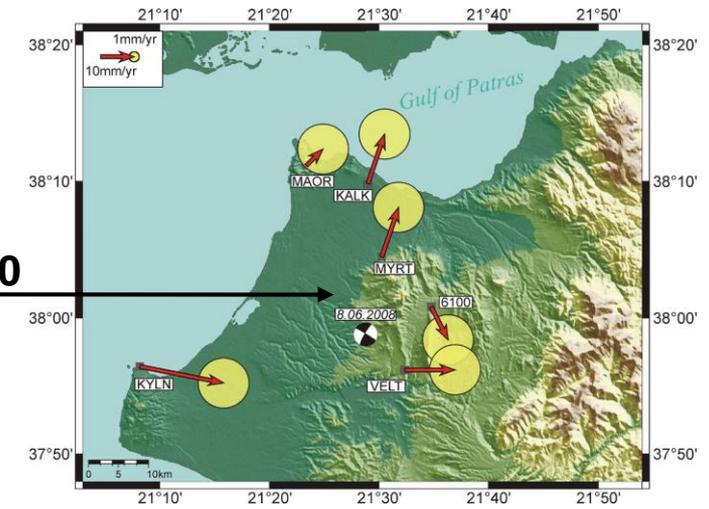


$M_w=6.3$, Movri earthquake

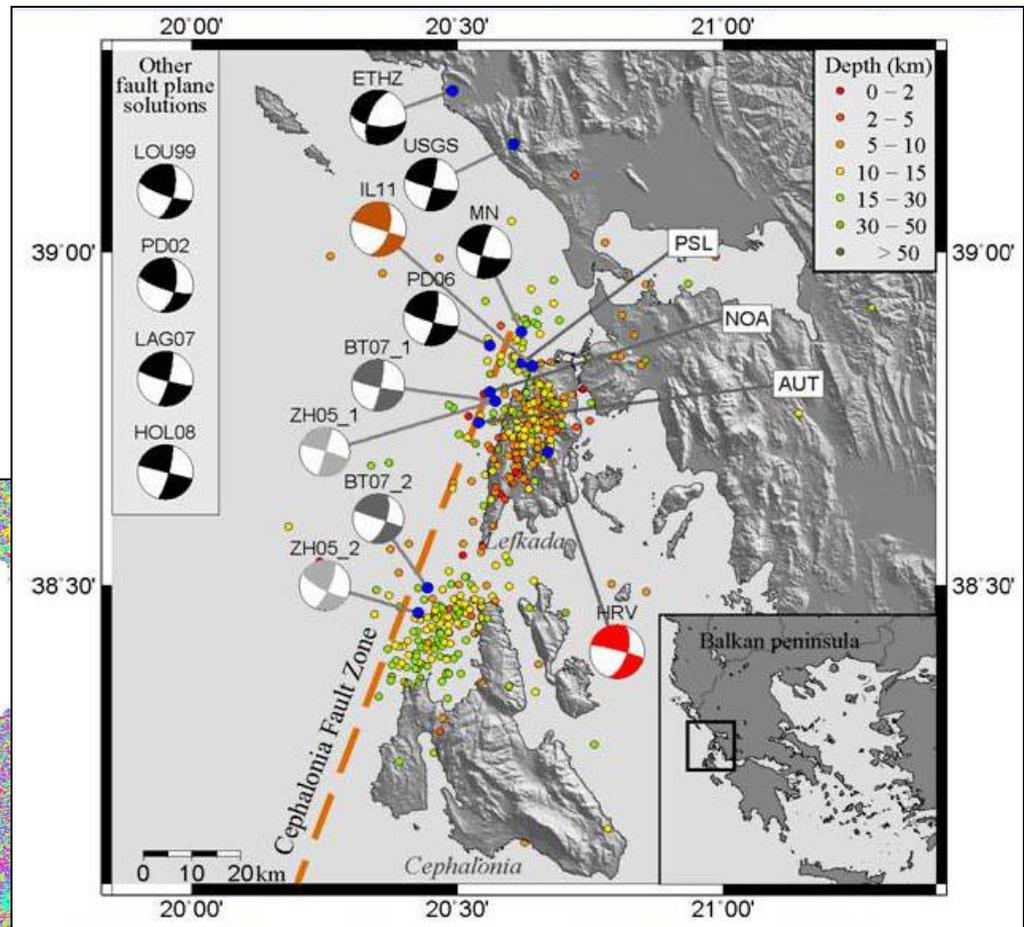
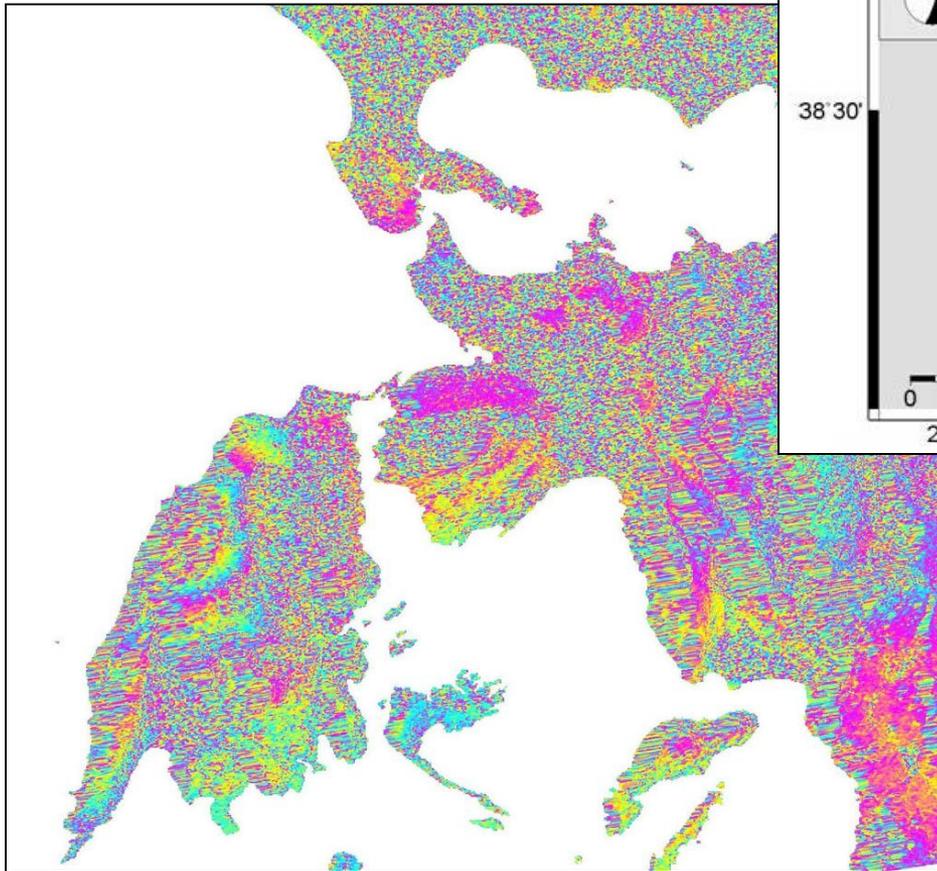
Petits déplacements
($<2\text{cm}$)



RLS0

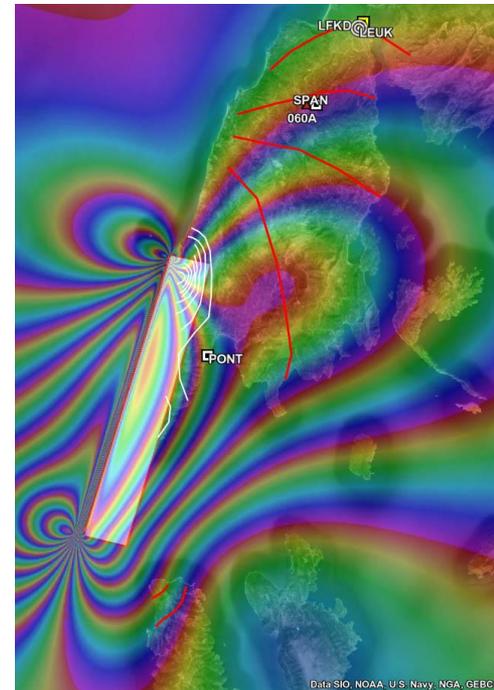
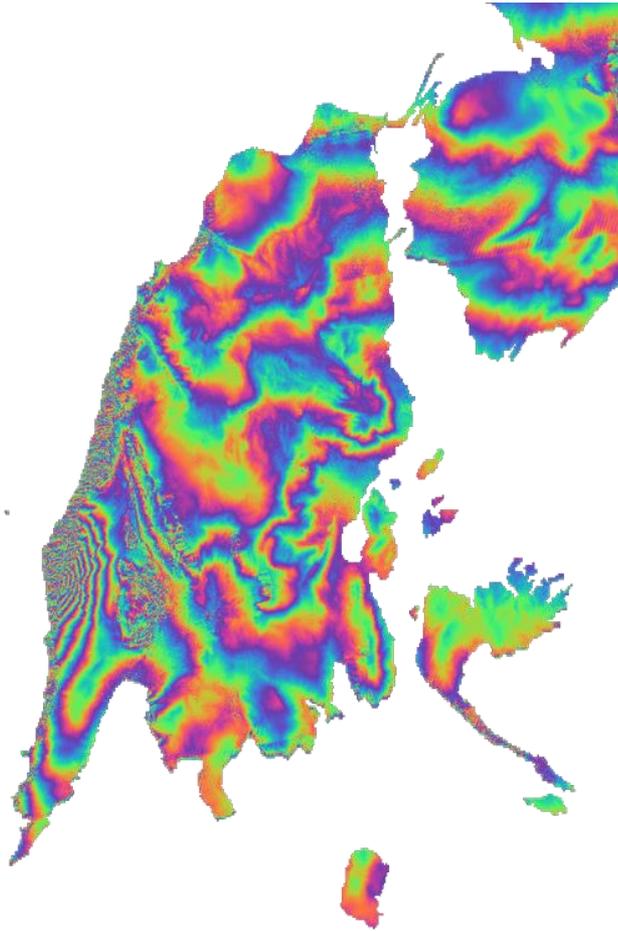


Lefkada, Mw=6.2, 14/8/2003



Ilieva, 2011

Lefkada earthquake, $M_s=6.6$, November 17, 2015

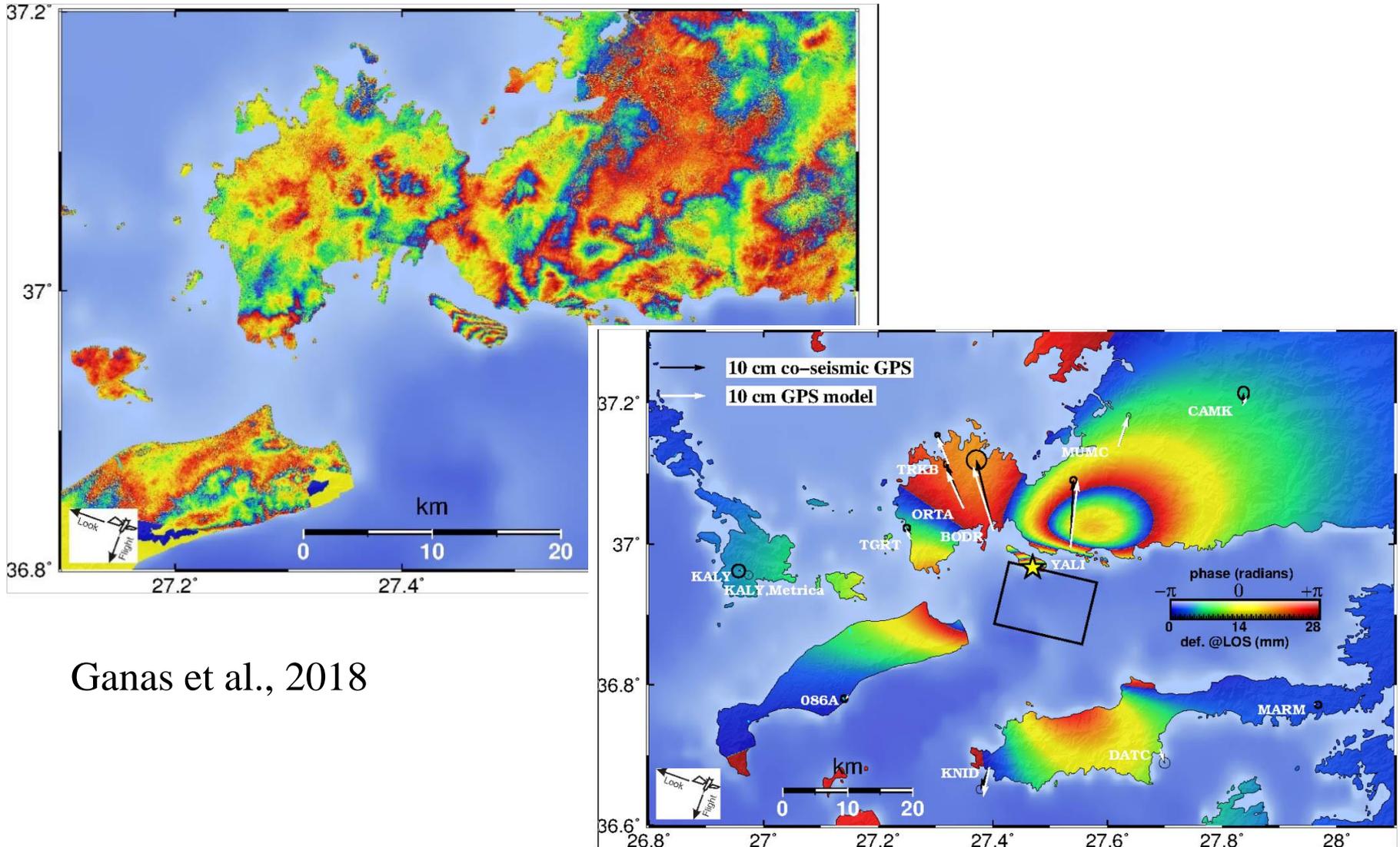


Interferogramme Sentinel

Nov 5 – Nov 17, 2015

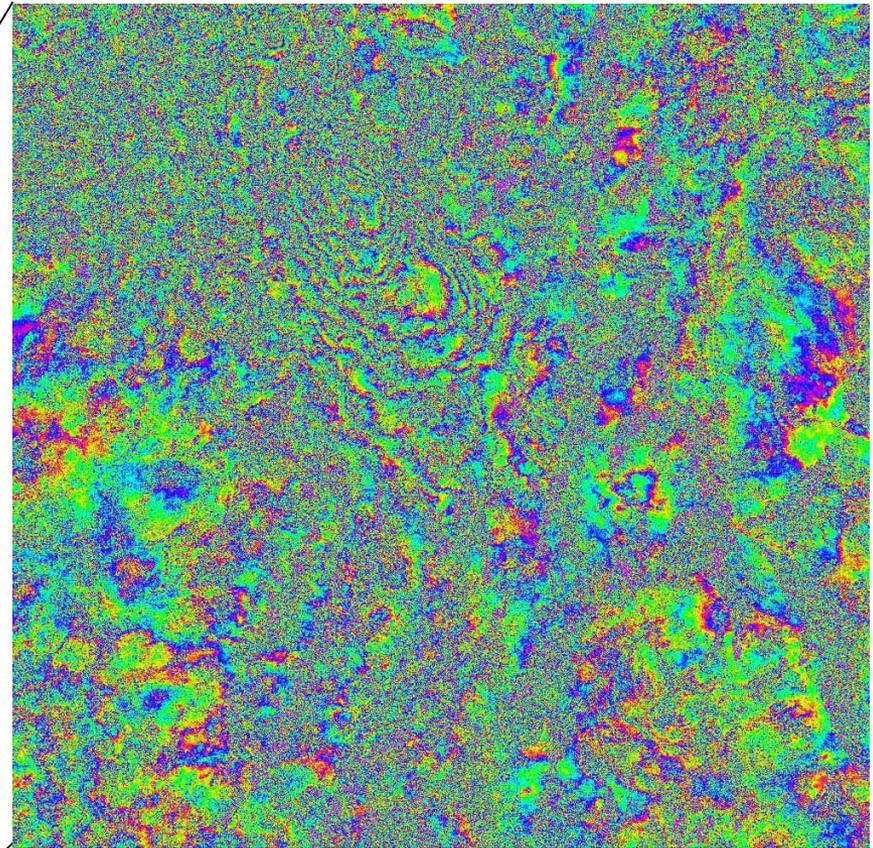
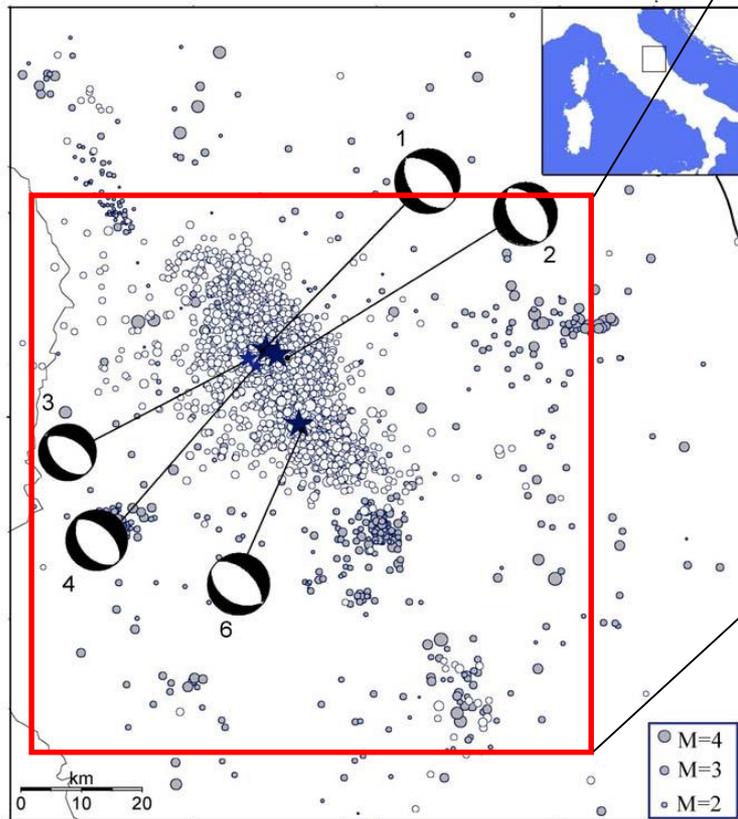
Séismes de 2003, 2014 et 2015

Cos, M=6.5, 20/7/2017



Ganas et al., 2018

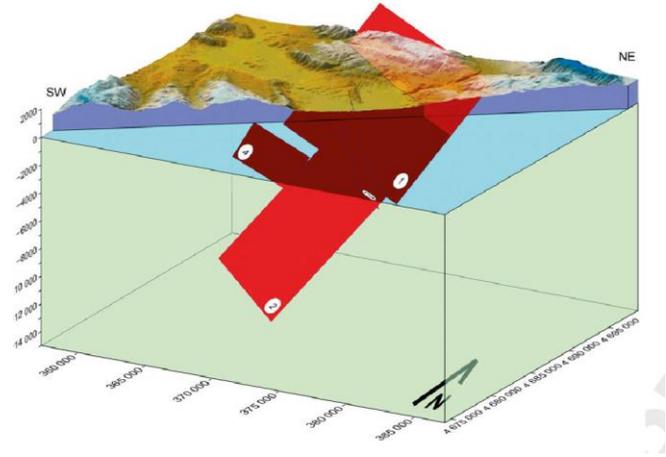
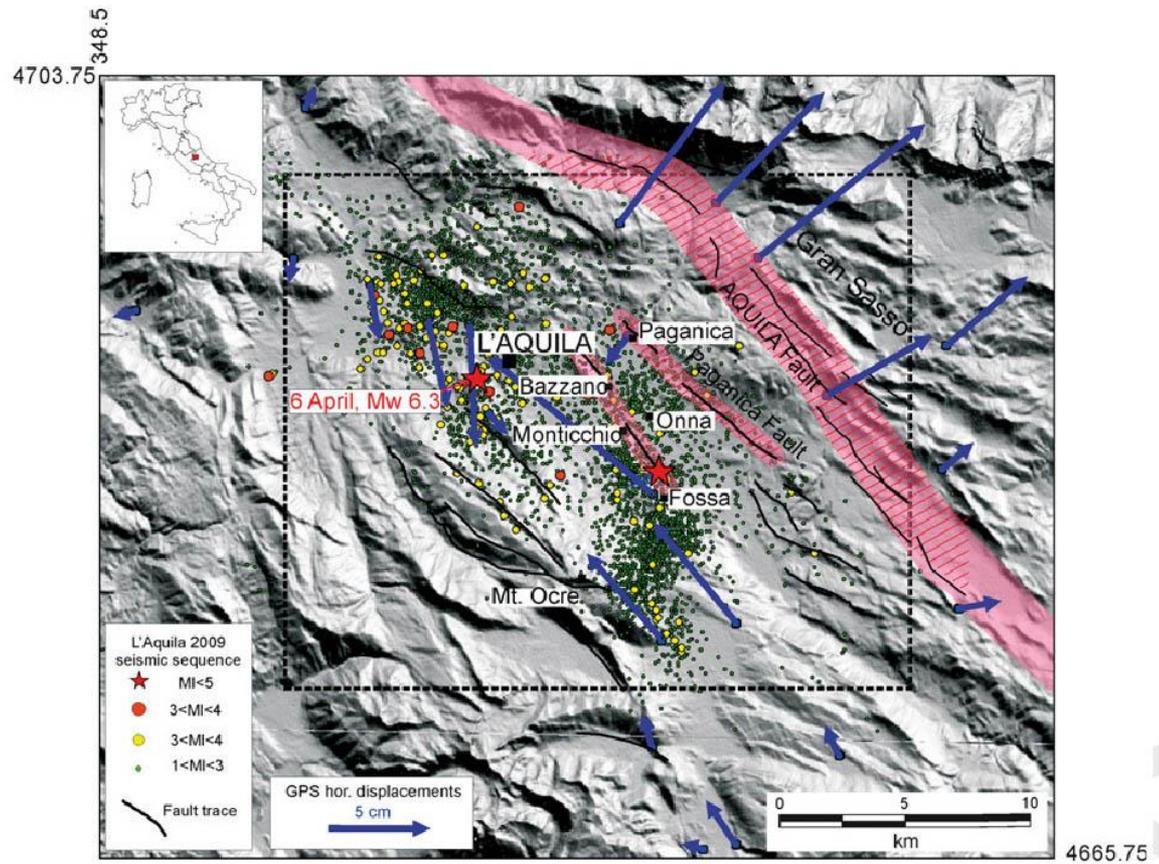
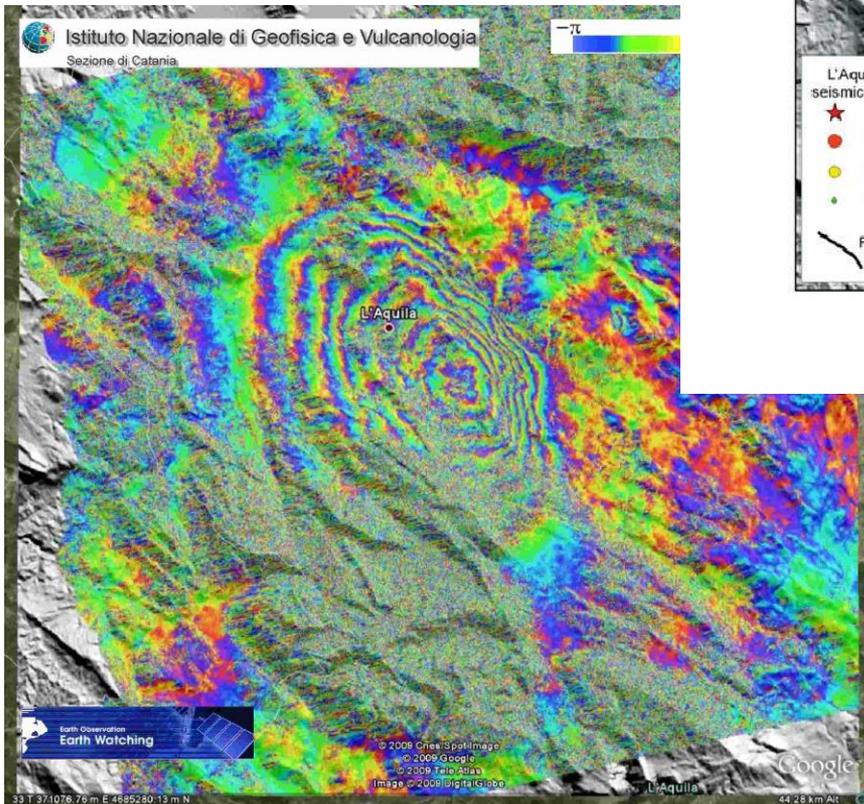
Colfiorito, Mw=5.7, 6.0, 26/9/1997



- Faible cohérence
- Peu de données GPS
- L'interférogramme montre que la faille est superficielle

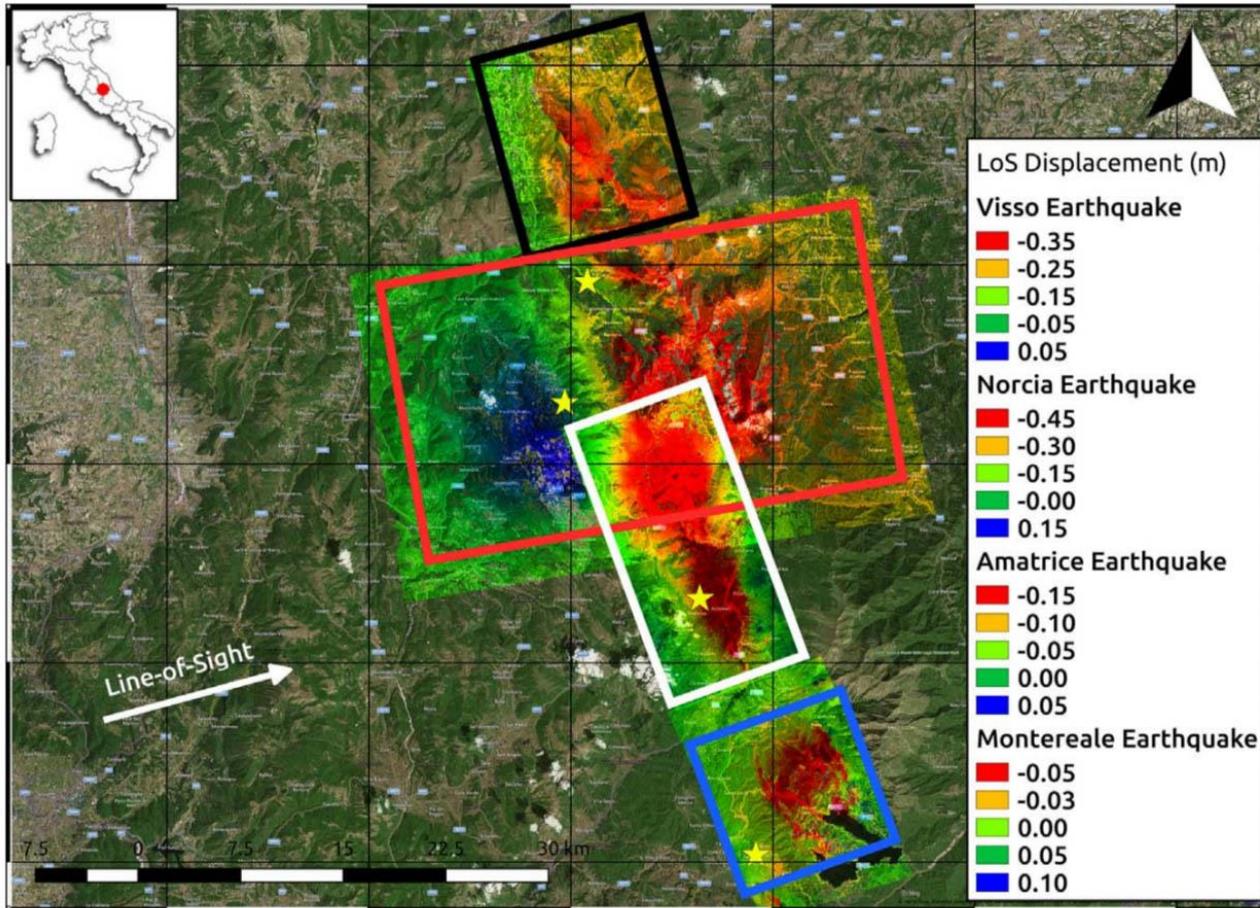
Stramondo *et al.*, 1999

L'Aquila, Mw=6.3, 6/4/2009



394.2

Séquence de Norcia 2016-2017



Visso, M=6.0,
26/10/2016

Norcia, M=6.6,
30/10/2016

Amatrice,
M=6.2,
24/8/2016

Montoreale,
M=5.7,
18/1/2017

Amatrice, M=6.2, 24/8/2016

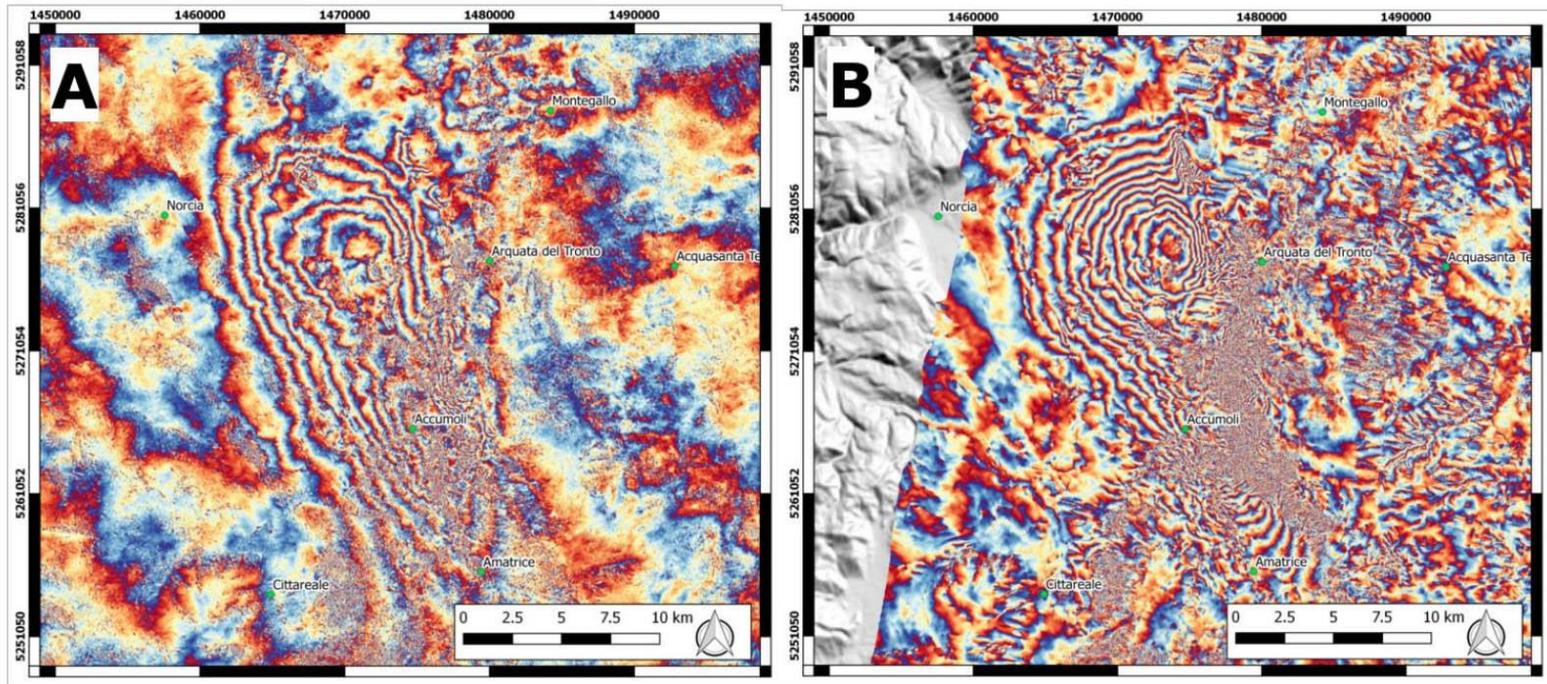
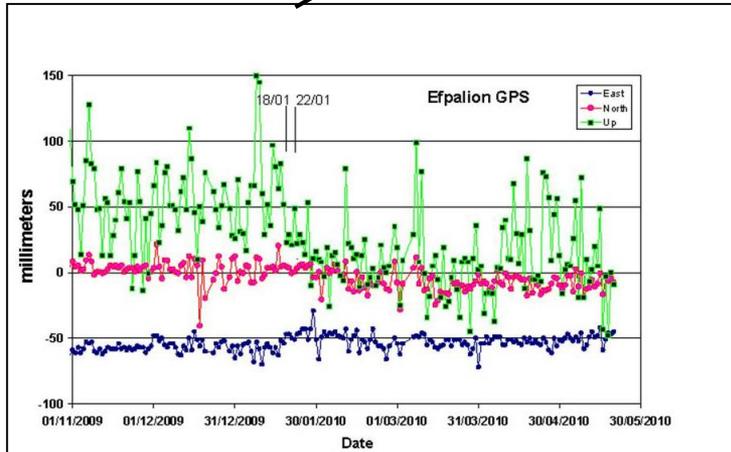
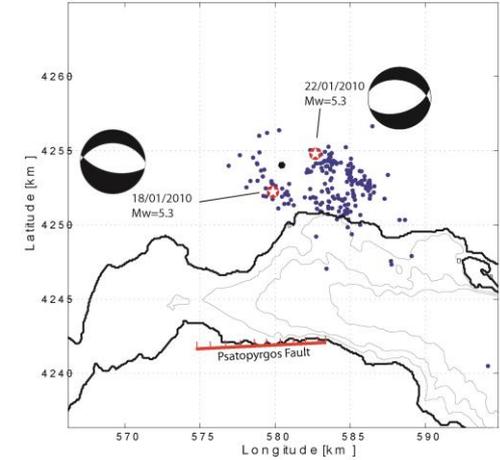


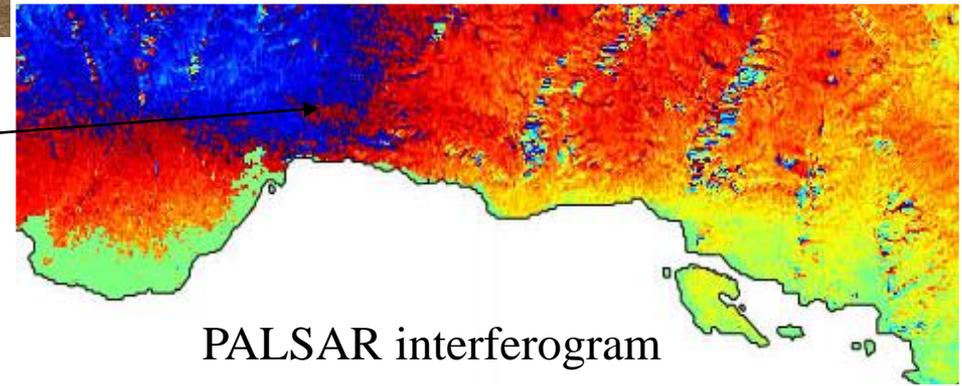
Figure 1. Examples of InSAR wrapped maps from: A) S1 ascending pair (Id-4 in Table 1); B) CSK interferograms.

Efpalio, $M_w=5.3$, 18/1, 22/1/2010

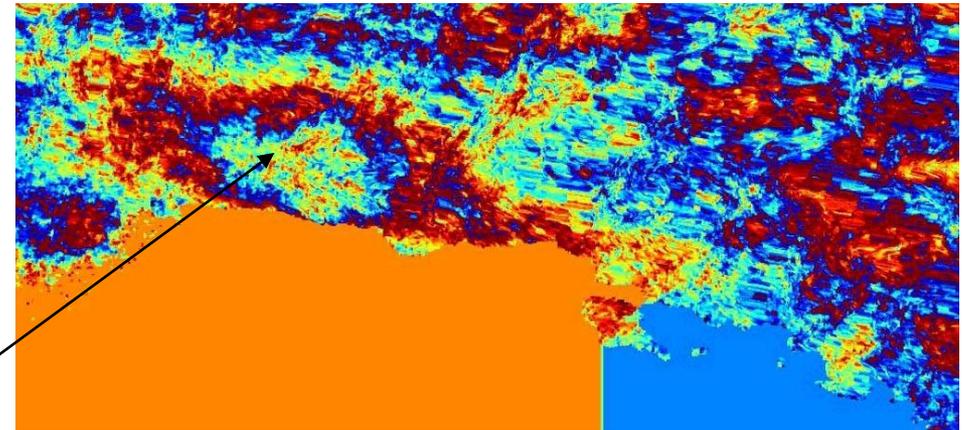


GPS: Vertical: ~ -3 cm, East: ~ 1 cm,
North: ~ 0 cm

2 main shock: $M_s=5.3$ (18/1/2010)
and $M_s=5.3$ (22/1/2010)

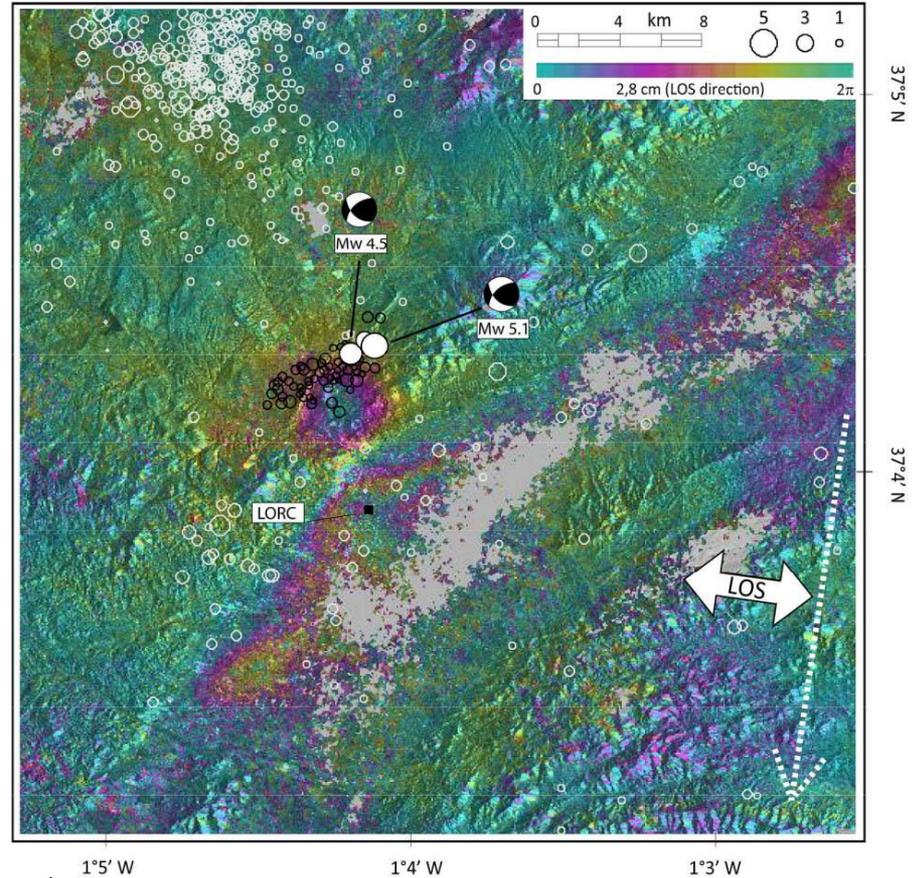
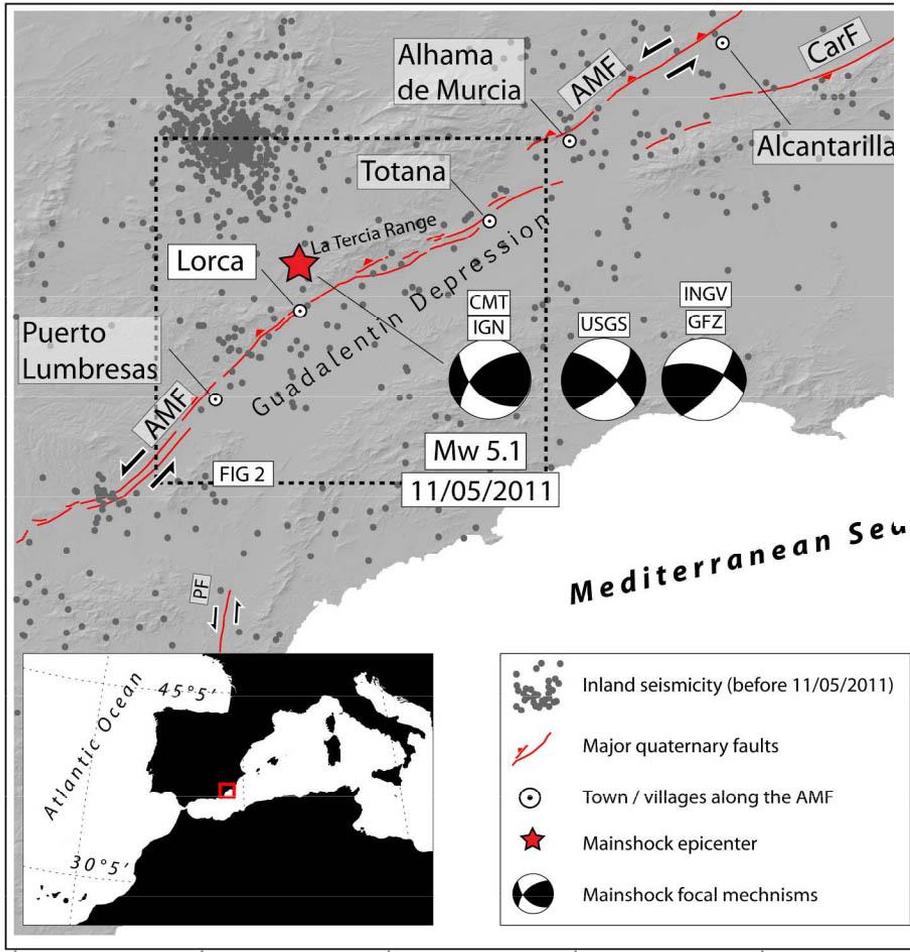


PALSAR interferogram



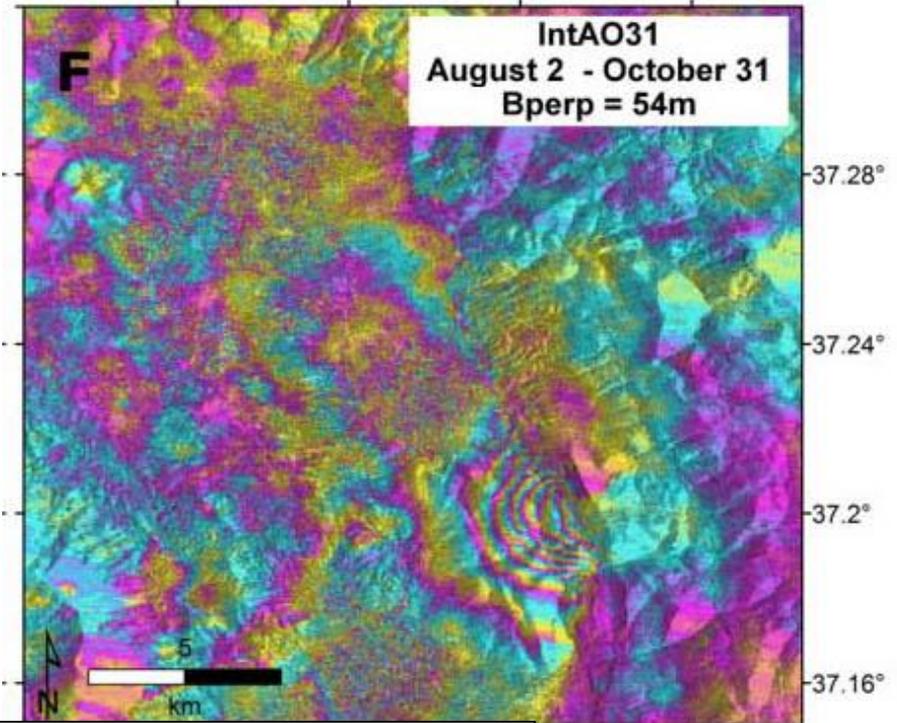
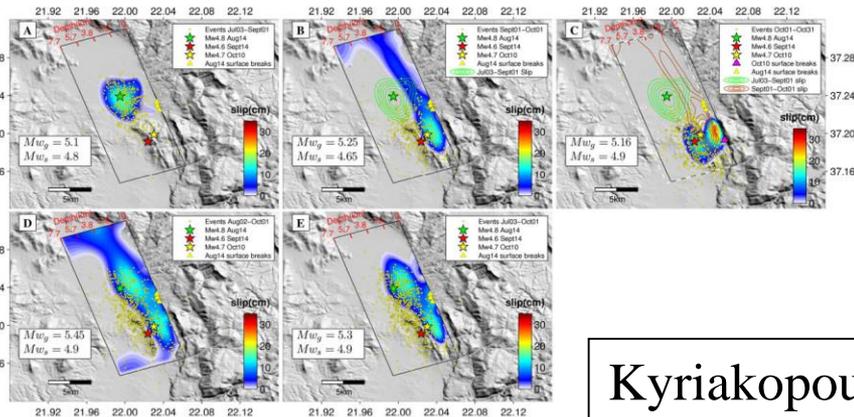
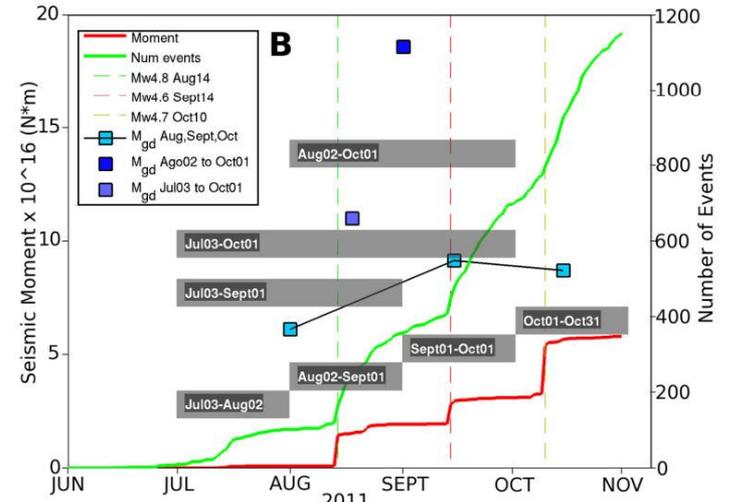
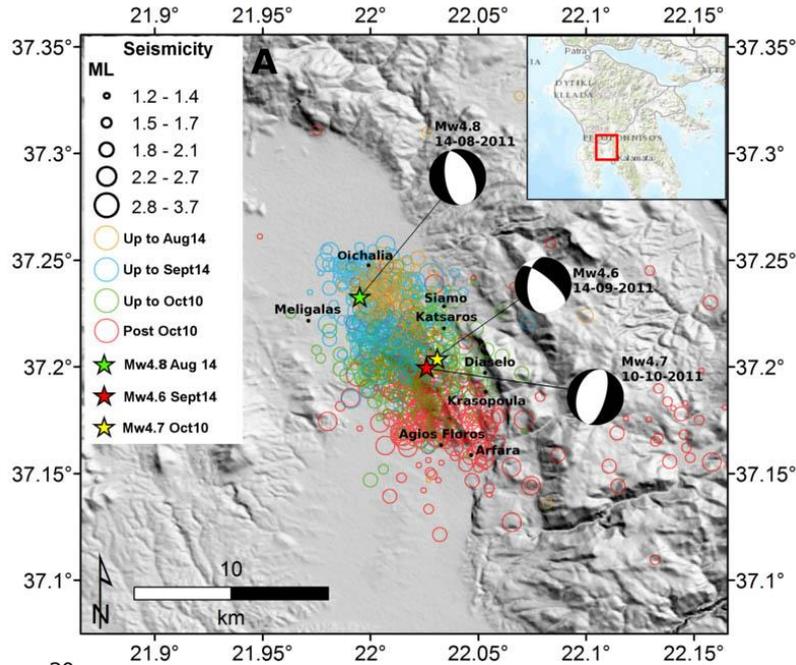
Stacked ASAR interferogram

Lorca, Mw=5.1, 11/05/2011



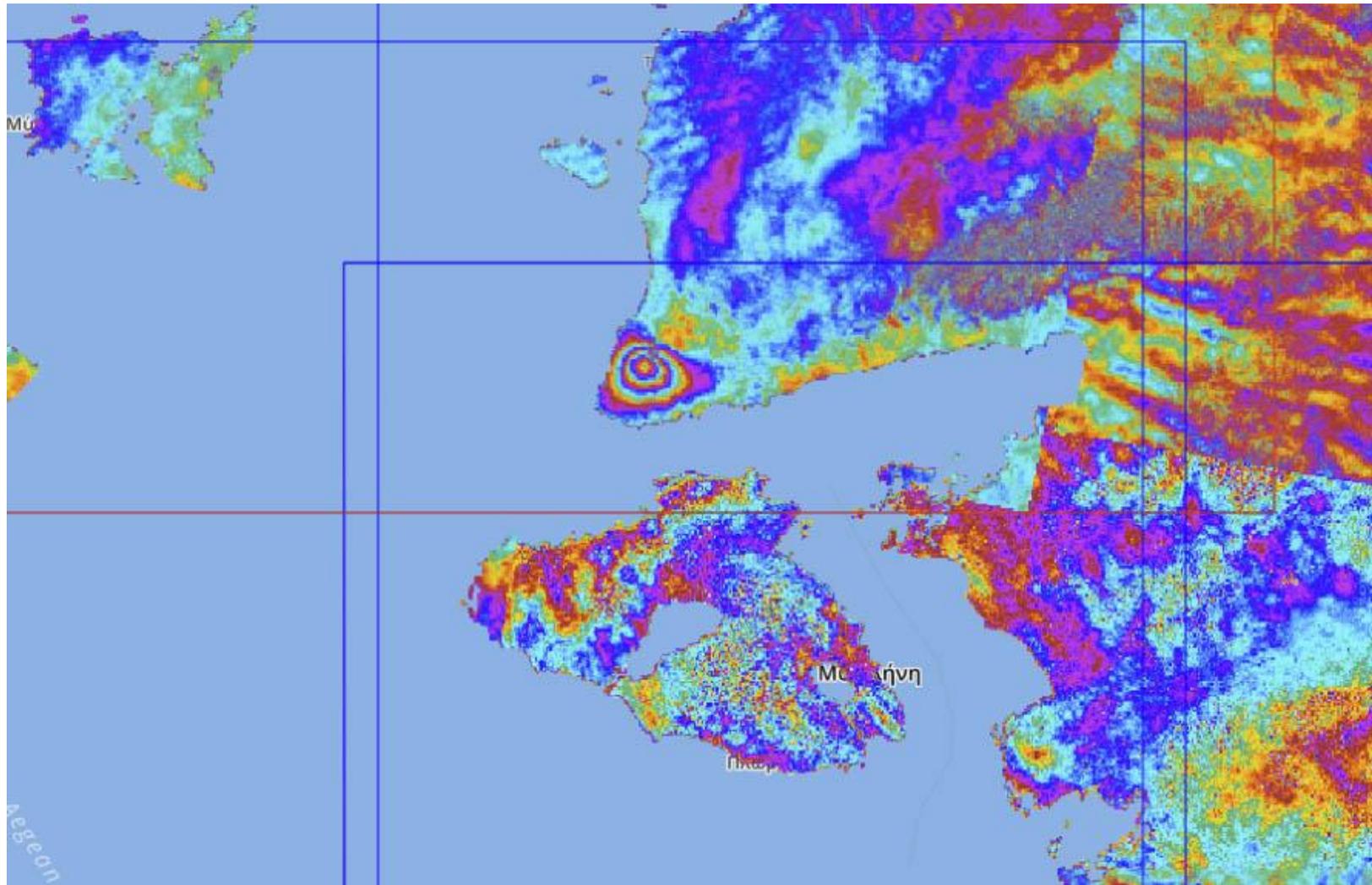
DeMichele *et al.*, 2013

Oichalia, $M_w=4.8, 4.6, 4.7,$ 14/8, 14/9, 10/10/2011

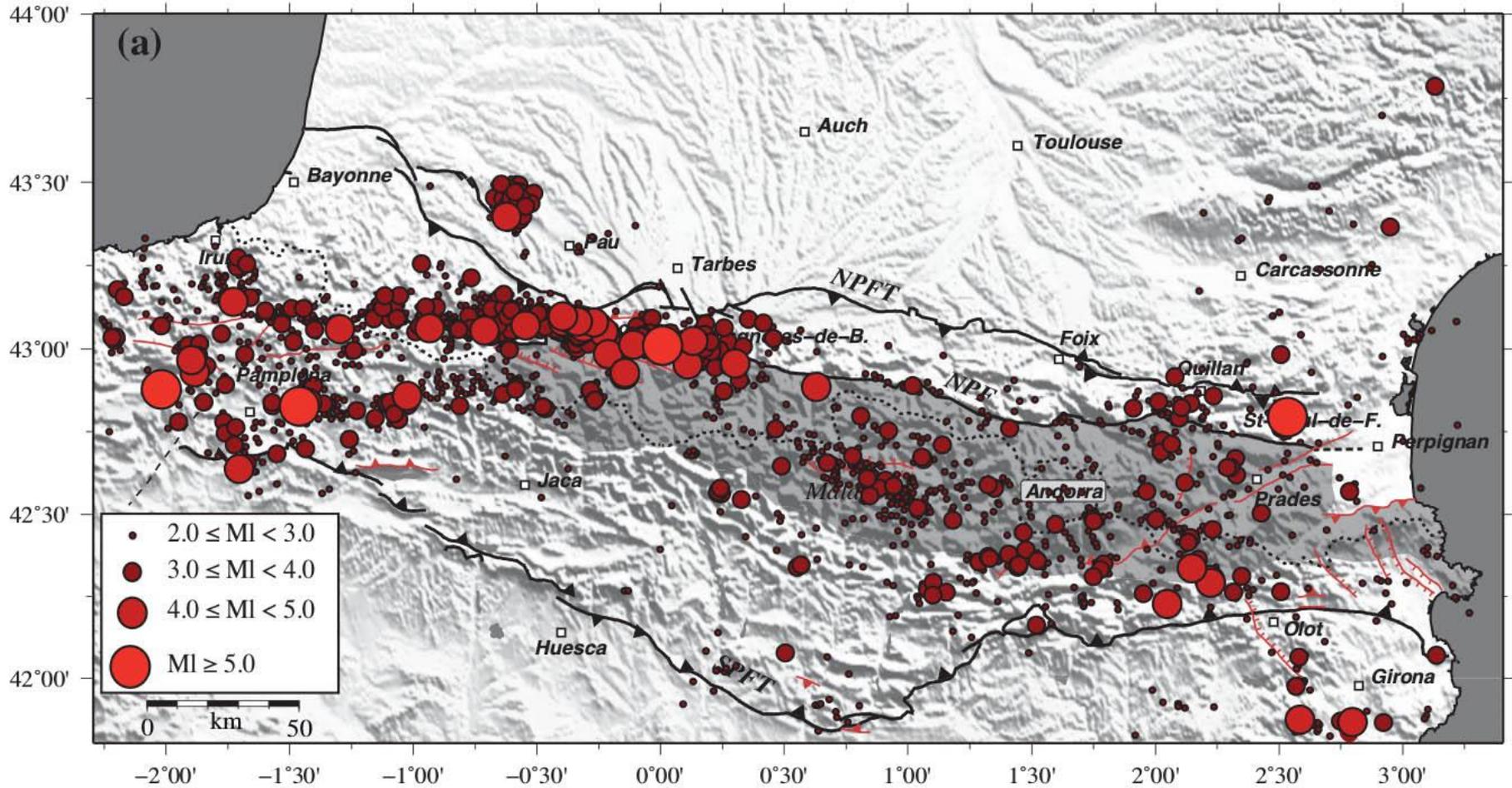


Kyriakopoulos *et al.*, 2013

Gulpinar, 6-13/2/2017



Et les Pyrénées?



Rigo et al 2015

Mouvements horizontaux et verticaux mesurés par GPS

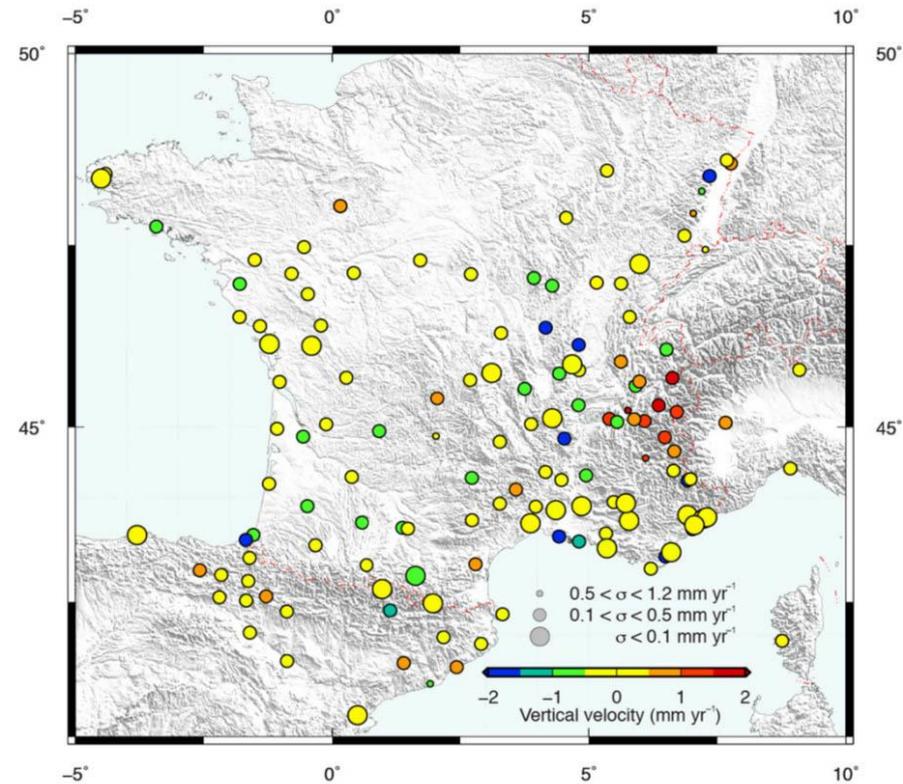
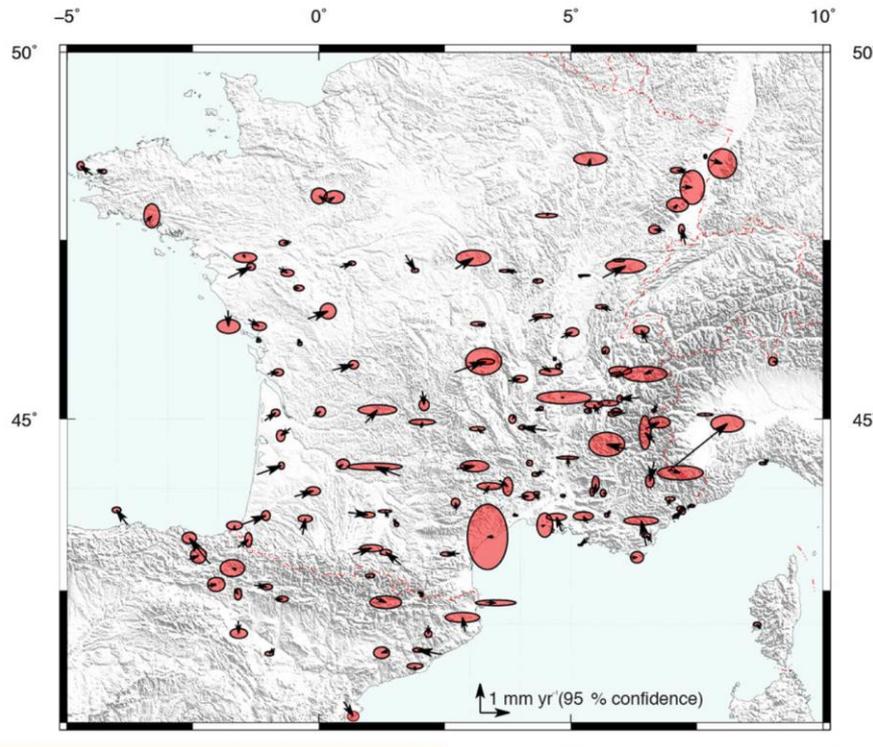


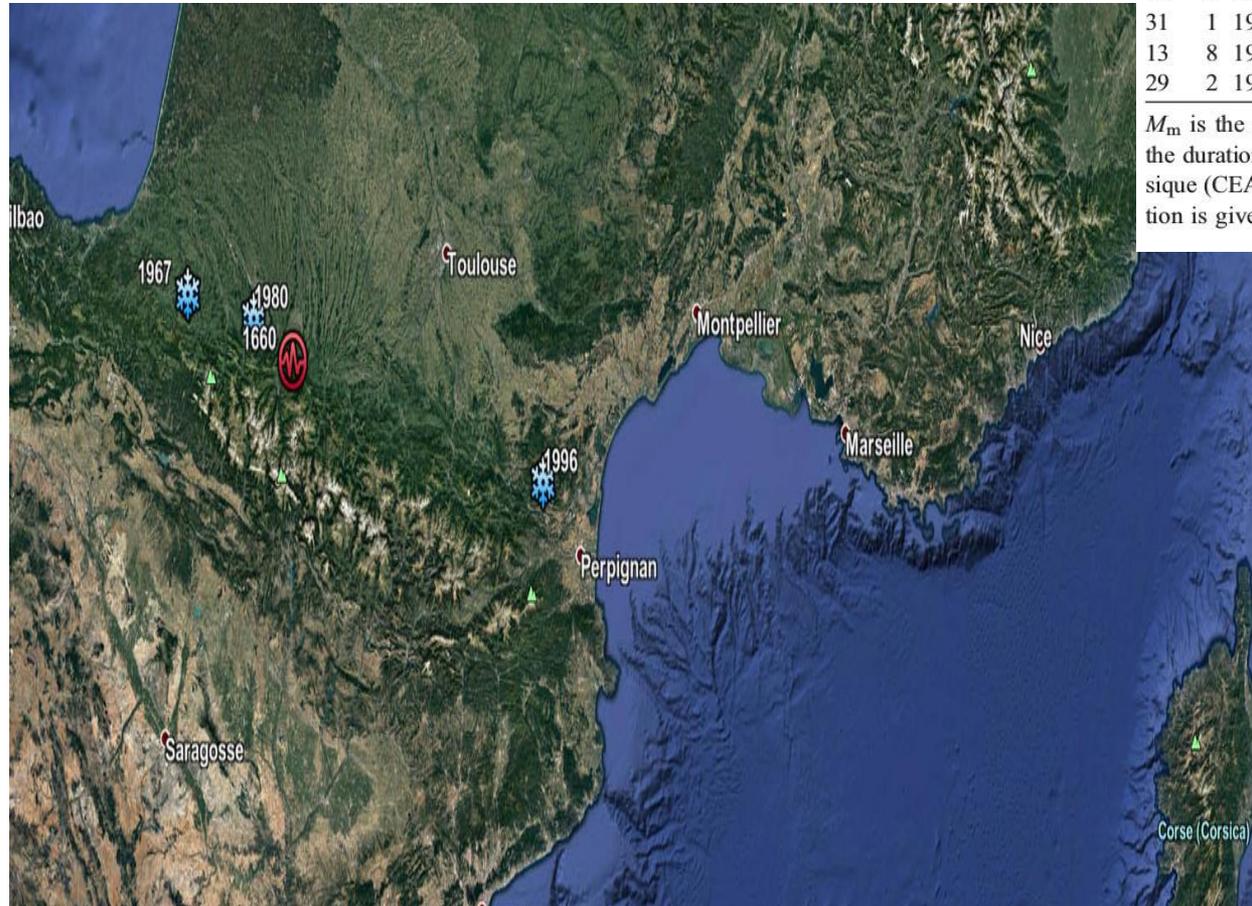
Figure 9. Vertical velocities for stations with time series longer than 5 years in the IGS08 reference frame (see Table 3 for the site list).

Séismes historiques

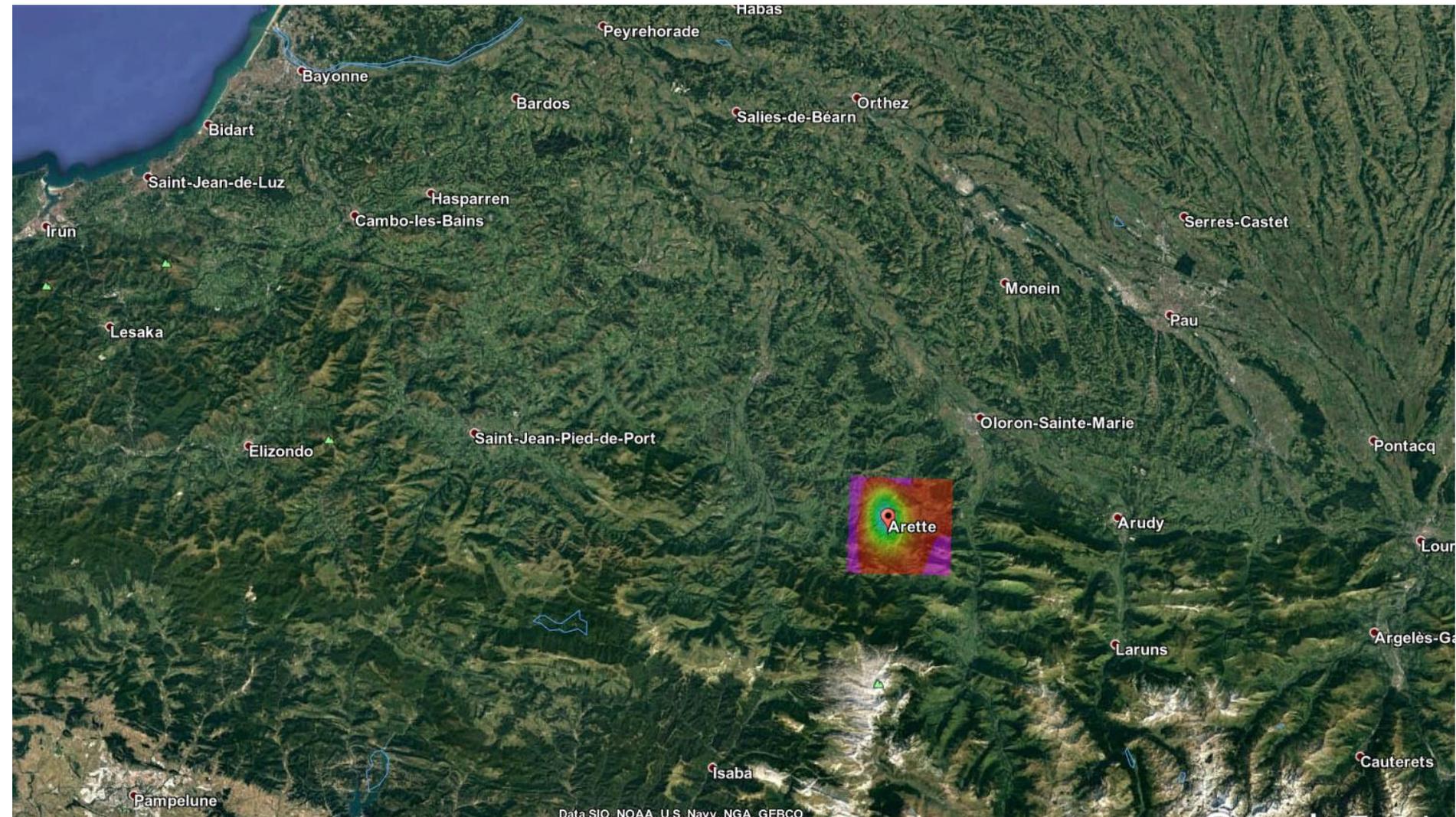
List of historical earthquakes from the BRGM Catalogue (Lambert and Levret, 1996)

DD	M	Year	Lon (°E)	Lat (°N)	Area	I0	M_m	M_d
21	6	1660	0.07	42.97	Central Pyrénées	VIII–IX	–	
24	5	1750	–0.03	43.07	Central Pyrénées	VIII	–	
22	5	1814	–0.4	43.13	Western Pyrénées	VII	–	
17	11	1850	–0.17	43.1	Central Pyrénées	VII	–	
20	7	1854	–0.05	43.03	Central Pyrénées	VII–VIII	5.6	
26	11	1873	0.15	43.03	Central Pyrénées	VII	–	
6	5	1902	–0.67	43.1	Western Pyrénées	VII	–	
13	7	1904	0.12	43.07	Central Pyrénées	VII	–	
24	7	1911	–0.23	43.18	Western Pyrénées	VII	–	
22	2	1924	–0.28	43.05	Western Pyrénées	VII	–	
31	1	1950	0.17	42.97	Central Pyrénées	VII	5.0	
13	8	1967	–0.78	43.08	Western Pyrénées	VIII	5.2	5.3
29	2	1980	–0.33	43.07	Western Pyrénées	VII–VIII	5.3	5.0

M_m is the macroseismic magnitude from Levret et al. (1996). M_d is the duration magnitude from Laboratoire de Détection et de Géophysique (CEA/DASE/LDG). The latitude and longitude epicentral location is given with 10 to 20 km error range.



Simulation de la déformation que pourrait produire un séisme comme celui d'Arette



Liens et lectures

- http://www.esa.int/About_Us/ESA_Publications/Training_and_Technical_Manuals
- http://www.unavco.org/edu_outreach/short-courses/2011/insar/insar.html
- http://www.esa.int/esaMI/ESA_Publications/SEM867MJC0F_0.html
- <http://rst.gsfc.nasa.gov/>
- http://www.esa.int/SPECIALS/Eduspace_FR/
- <http://treuropa.com>
- <https://earth.esa.int/web/guest/pi-community>
- <http://crlab.eu>
- <https://www.emsc-csem.org/>