

Mesure de déformation Mine/après Mine par interférométrie radar satellitaire

Daniel Raucoules, BRGM DRP/RAI

Mesure de déformation de surface par interférométrie SAR

mesure de la déformation de la surface du sol: contexte

Mouvements de natures différents :

- Mouvements gravitaires
- Séismes
- Subsidence urbaine et minière
- ...

→ fournir des informations basées sur la mesure de déplacement pouvant entrer dans le cadre de l'étude de risques.

Mesurer les déplacements de la surface du sol :

- localisation + délimitation du phénomène et/ou suivi temporel des déplacements.
- différentes échelles: plusieurs centaines de km (sismo-tectonique) à des phénomènes très localisés (affaissements, glissements, retrait gonflement, etc.)

Les objectifs peuvent différer ...

- meilleure compréhension des aléas ou anticiper leurs conséquences, notamment sur l'évolution future de phénomènes et leurs conséquences en termes de dommages.
- information utile pour la modélisation de phénomènes (ainsi dans le cas des séismes, la confrontation des modèles et des mesures de déformations de surface permet par exemple d'affiner les modèles de déplacement en profondeur)
- contraintes réglementaires imposant mise en place de moyens de suivi



séismes



Subs. minière



glissements



Principe de l'interférométrie radar différentielle

- SAR : système actif (il émet sa propre radiation) embarqué sur une plateforme se déplaçant (en particulier des satellites).
- Techniques Interférométriques radar: basées sur la combinaison de 2 images de phase . Permet soit d'extraire la topographie locale soit de détecter et quantifier la déformation du sol ayant eu lieu entre deux acquisitions d'images SAR.

- utilisation de la phase de l'image SAR

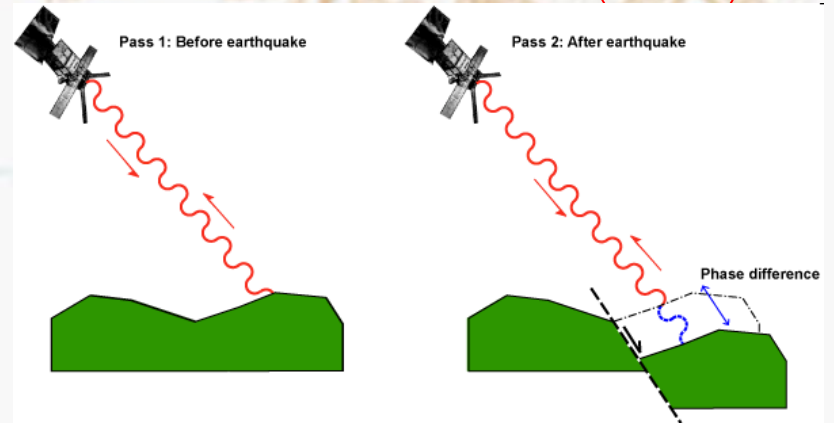
$$\varphi = \frac{4\pi}{\lambda} dist_t \quad [2\pi]$$

- différence de phase entre deux images (p.e av. et ap. une déformation) corégistrées (interférogramme)

$$\delta\varphi = \frac{4\pi}{\lambda} (dist_2 - dist_1) \quad [2\pi]$$

$$\delta\varphi = \underbrace{\phi_{topo} + \phi_{mvt} + \phi_{atmos}}_{\text{dotted box}} + \phi_{orbital} + \phi_{ellips} + \text{bruit} \quad [2\pi]$$

Chaîne de traitement utilisée: GAMMA



Interférométrie radar : limitations

- Décorrélation temporelle : cas d'acquisitions séparées dans le temps (multi-passes) :

Végétation / surfaces liquides / érosion .../Tout changement au sol

- Décorrélation géométrique

$$\text{cohérence} = \gamma = \frac{|\sum M_i \cdot E_i^*|}{\sqrt{\sum M_i^2 \cdot \sum E_i^2}} ; 0 \leq \gamma \leq 1$$

Cibles « vues » sous des angles trop différents

Ex: limite $B_{\perp} \sim 1000\text{m}$ (ERS)

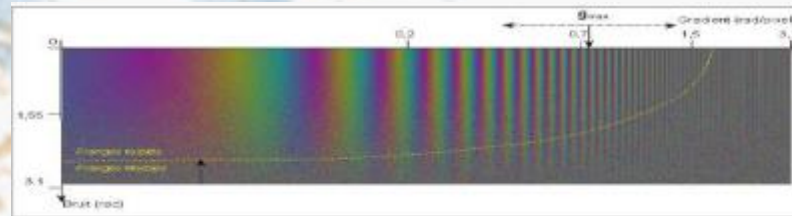
Remarque: $\gamma = \gamma_t \times \gamma_g \times \dots$

Dans la mesure du possible et en fonction du phénomène de déformation étudié: on choisira ΔT et B_{\perp} faibles

- Gradients de déformations

Idéalement: $\max = \pi \text{ rad/pixel}$
(ERS1/2 $\sim 1,5\text{cm} / 20\text{m}$)

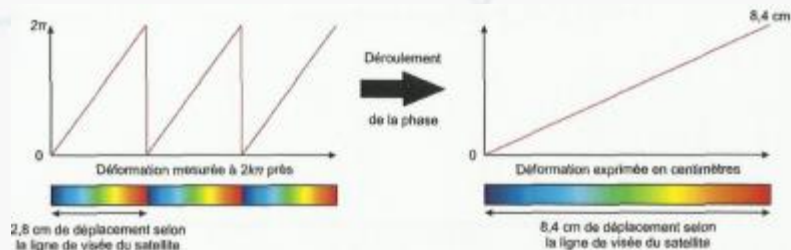
→ « limite supérieure » sur la mesure.



- Artefacts atmosphériques

En bande C (p.e ERS) typiquement le 1/3 de frange. Mais jusqu'à plusieurs franges et « aspect » similaire à de la déformation.

- Erreurs de déroulement



Techniques interférométriques radar:

- Interférométrie conventionnelle (calcul d'interférogrammes)
- « stacks » d'interférogrammes → mouvements cm/an à dm/an régulier
- Interférométrie sur points persistants (idéalement $\gamma_t \sim 1$) → mouvements mm/an à cm/an (nombre important d'image requis)
- Réflecteurs diffus (extension du PSI à des objets plus étendus dont γ_t varie)

Approche par réflecteurs persistants (PSI : PSINSAR, IPTA, Stable Points, ...)

But: tirer profit d'archives importantes de données SAR pour réduire les effets négatifs précédemment décrits (décorrélation temporelle et atmosphère)

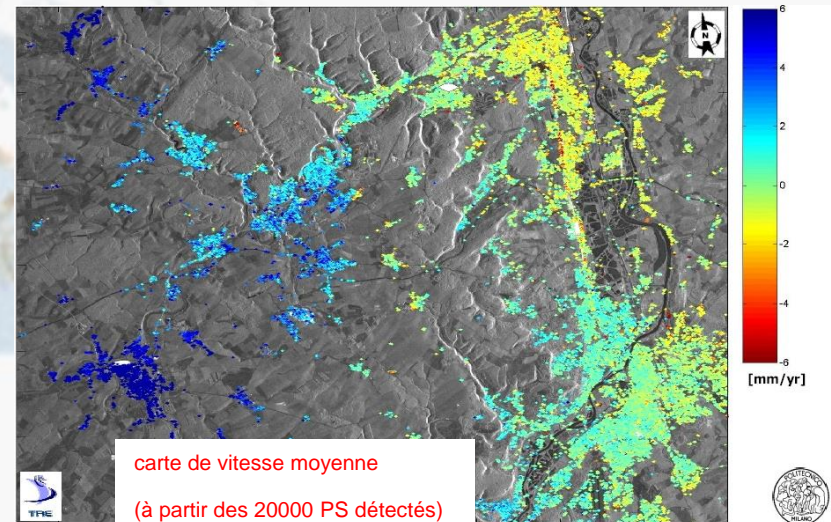
- identification (sur l'amplitude) de points rétrodiffuseurs forts (=PS) et stables dans le temps (μ/σ)

- utilisation de l'ensemble des images disponibles (pas de B_{\perp} limite), faible décorrélation temp.

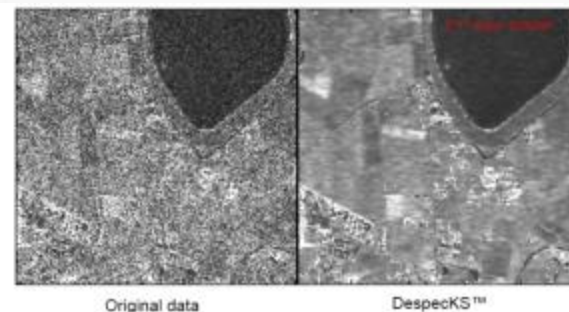
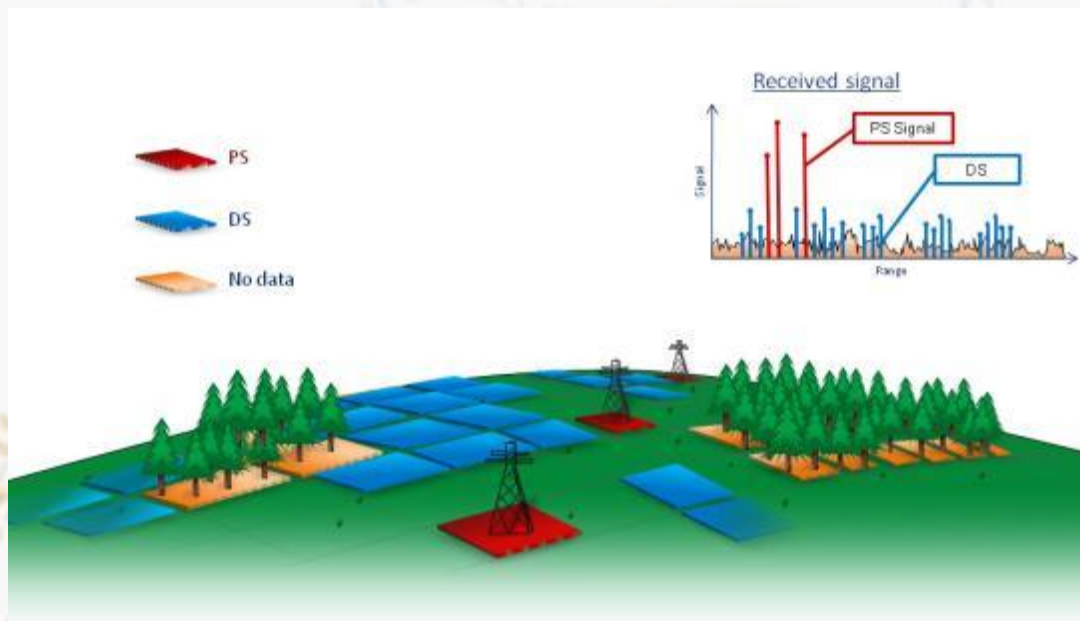
- estimation de la composante atmosphérique (et retrait) pour chaque date; (d, h) pour les

- PS
- Vitesse moyenne + séries temporelles
 - 30-50 images
 - précision 0,1 mm/an ?

composante	Ecart temporel	Composante perpendiculaire de l'écart orbital B_{\perp}	distance entre deux points de l'image
ϕ_{topo}	décorrélé	proportionalité	corrélacion variable suivant le cas
ϕ_{def}	fortement corrélé (sauf cas particuliers)	décorrélé	corrélacion variable suivant le cas
ϕ_{atm}	décorrélé	décorrélé	fortement corrélé
ϕ_{orbit}	décorrélé	décorrélé	fortement corrélé
bruit	décorrélé	décorrélé	décorrélés

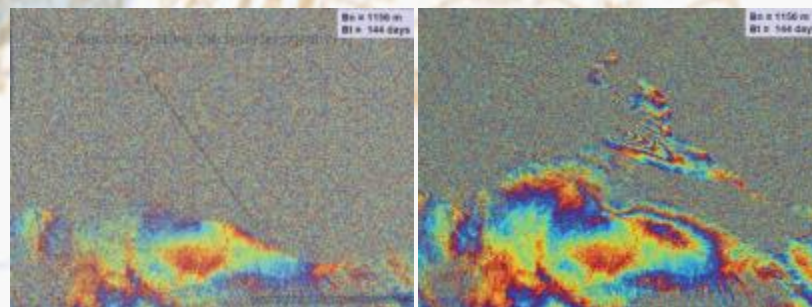


Techniques type « SQUEESAR™ » (réflecteurs diffus)

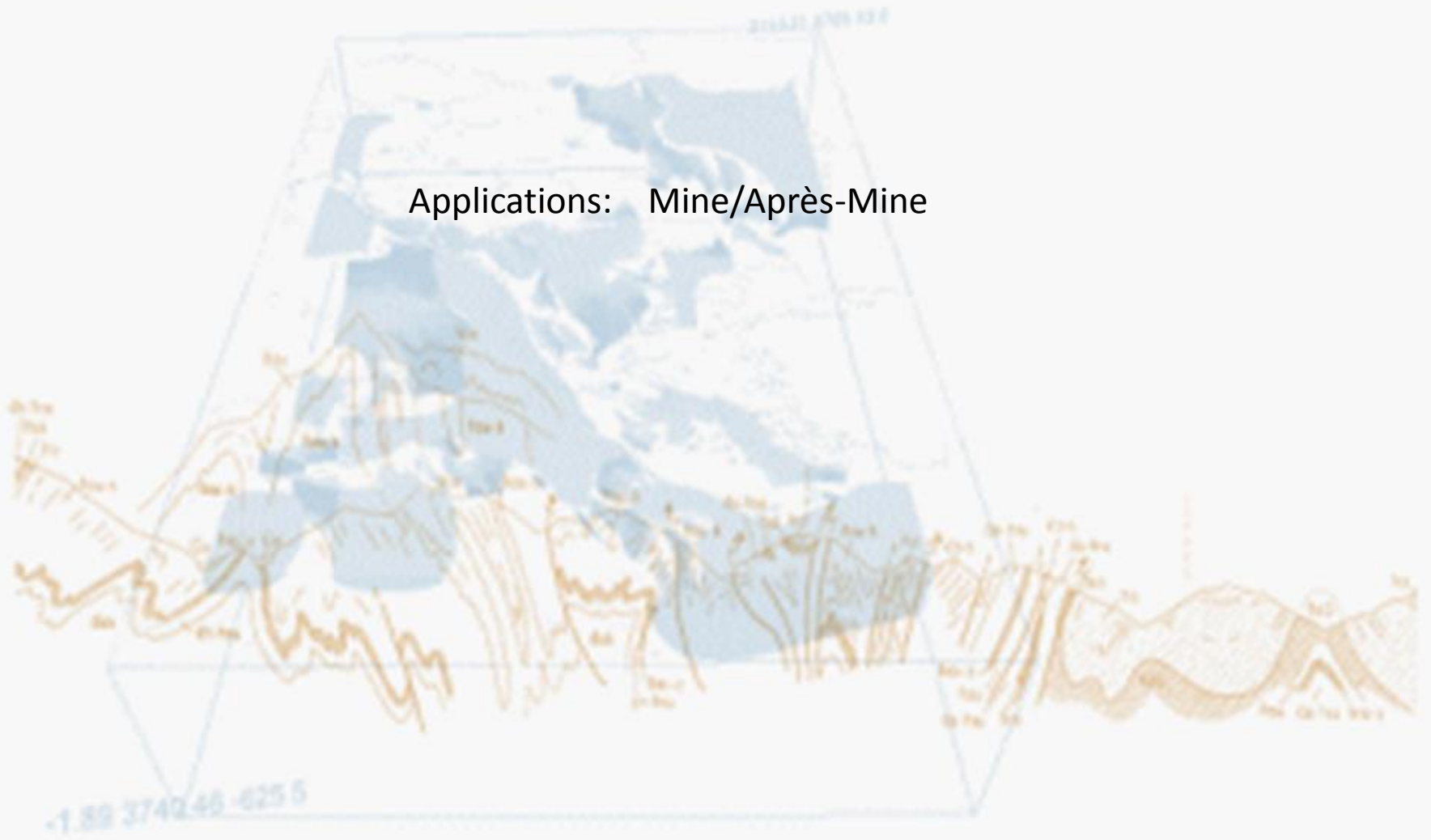


Notion de réflecteur diffus (d'après Ferretti et al., 2009):

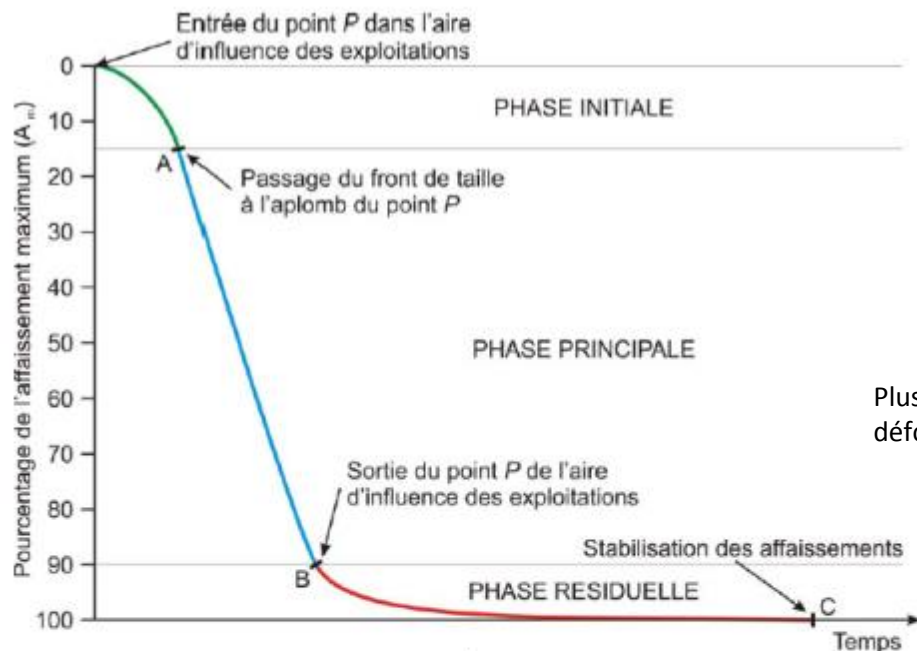
- Ensemble de pixels adjacents « homogènes » (typiquement jusqu'à environ 15000 m² pour ASAR)
- Délimitation basée sur l'amplitude (similitude des distributions temporelles)
- Complète un réseau de PS ou permet de reconstituer la SLC



Applications: Mine/Après-Mine



Déformation minière

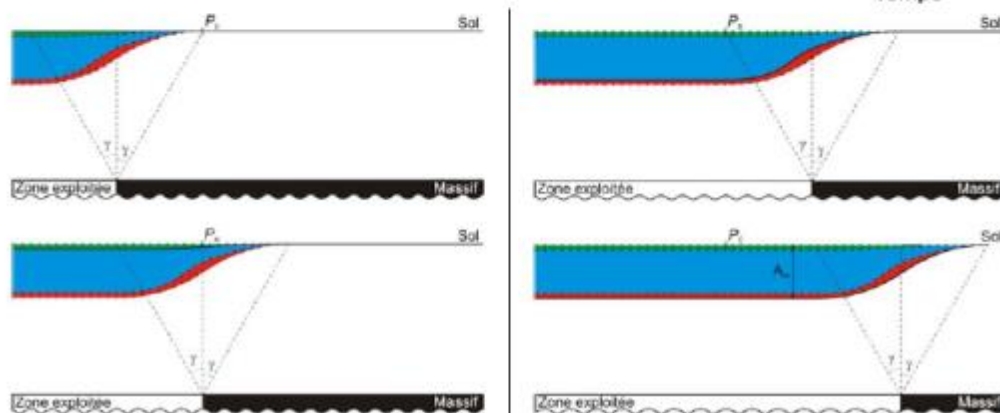


< 1 mois

Phase active

Plusieurs mois (jusqu'à 90% de la déformation totale)

Plusieurs années

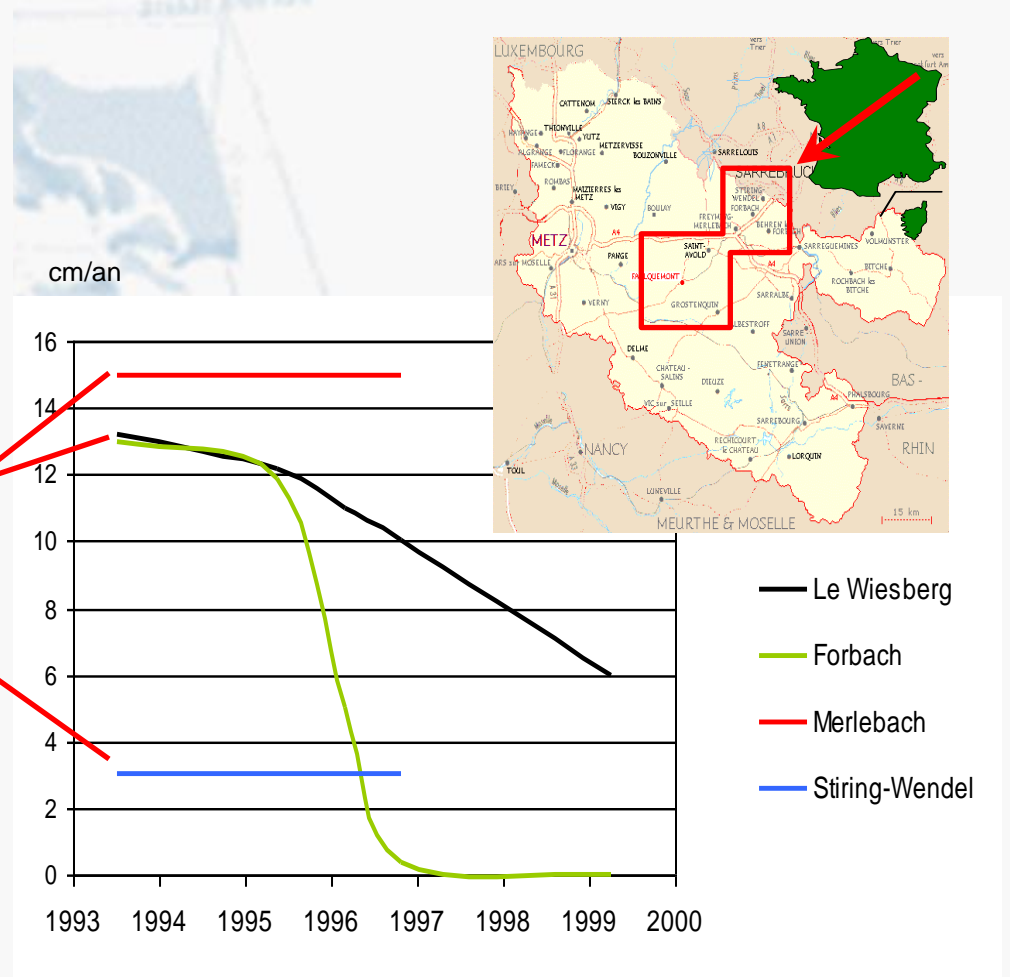
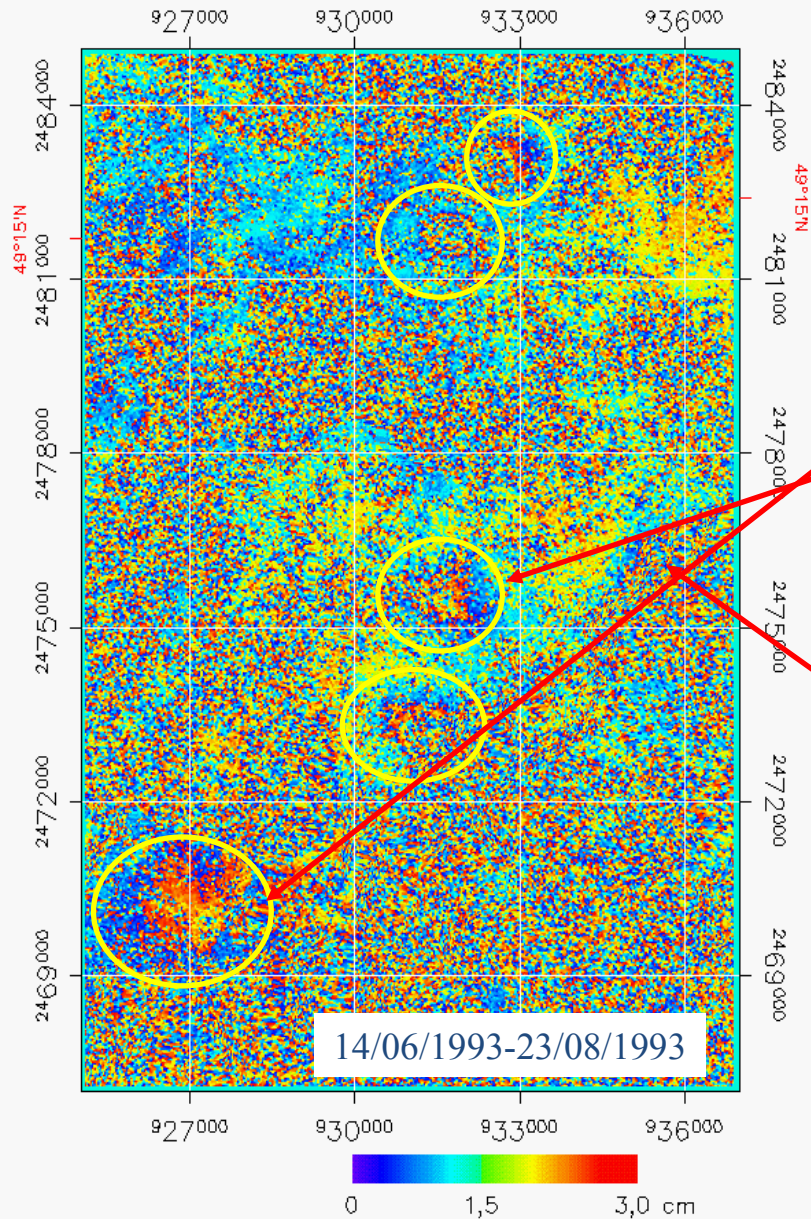


D'après Gueguen, 2007

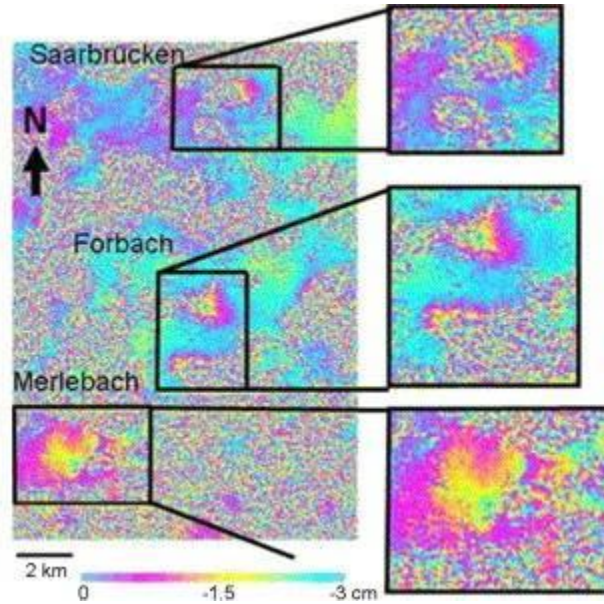
la durée et l'amplitude de l'affaissement résiduel minier vont varier en fonction de différents paramètres et plus particulièrement de la méthode d'exploitation employée (méthode de traitement des vides, épaisseur de la couche exploitée...) et la nature du recouvrement (profondeur, présence d'eau...).

→ l'ennoyage suite à l'arrêt des pompages peut entrainer une reprise de la subsidence (en particulier si exploitation par chambres et piliers) voire un soulèvement en surface

Subsidence à l'échelle régionale, bassin houiller, Lorraine

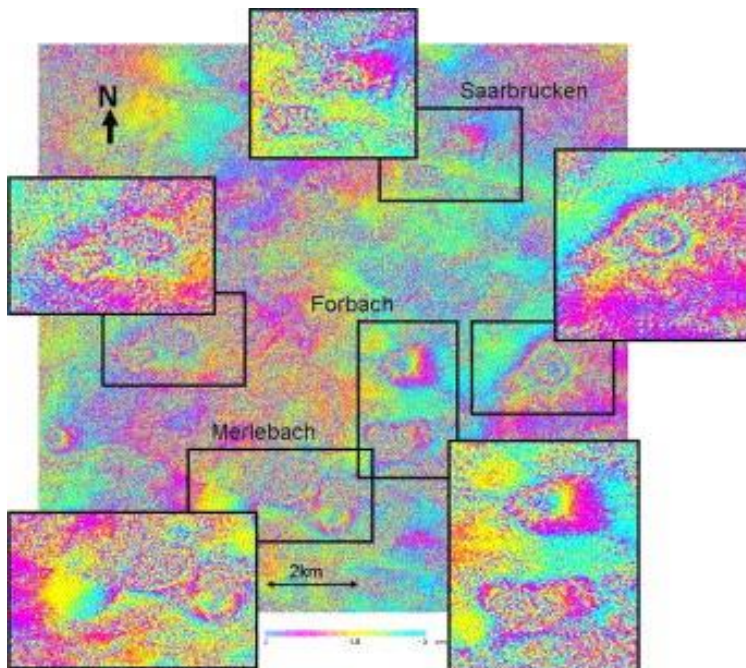


Bassin Houiller Lorrain: bande C vs Bande L



Bande C

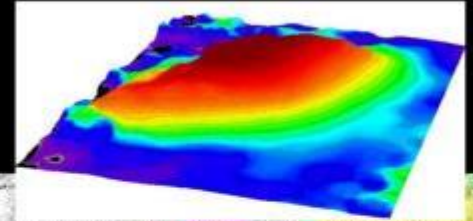
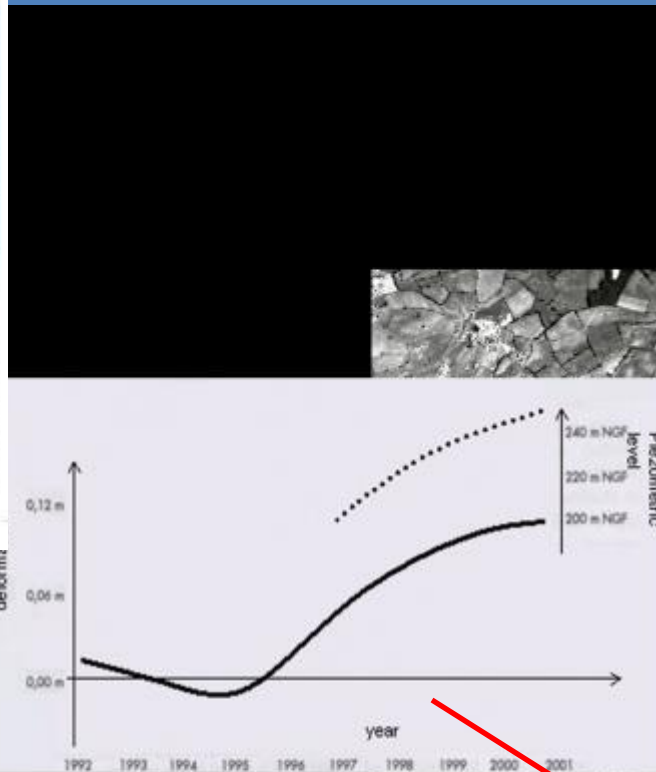
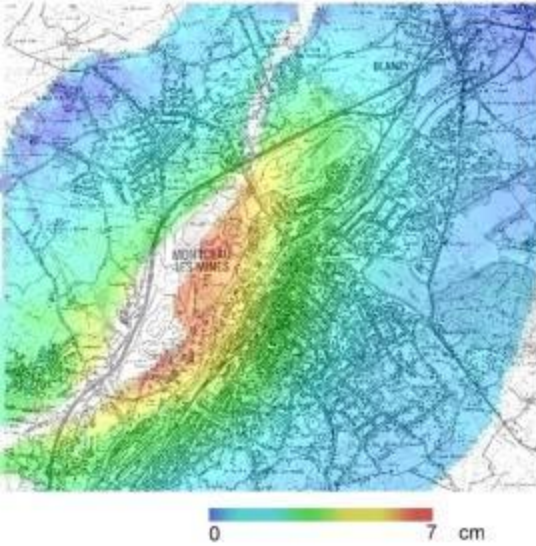
ERS-1 interferogram on the mining area of Lorraine and location of the site on a LandSat image. Acquisition dates: 14/06/1993 and 23/08/1993



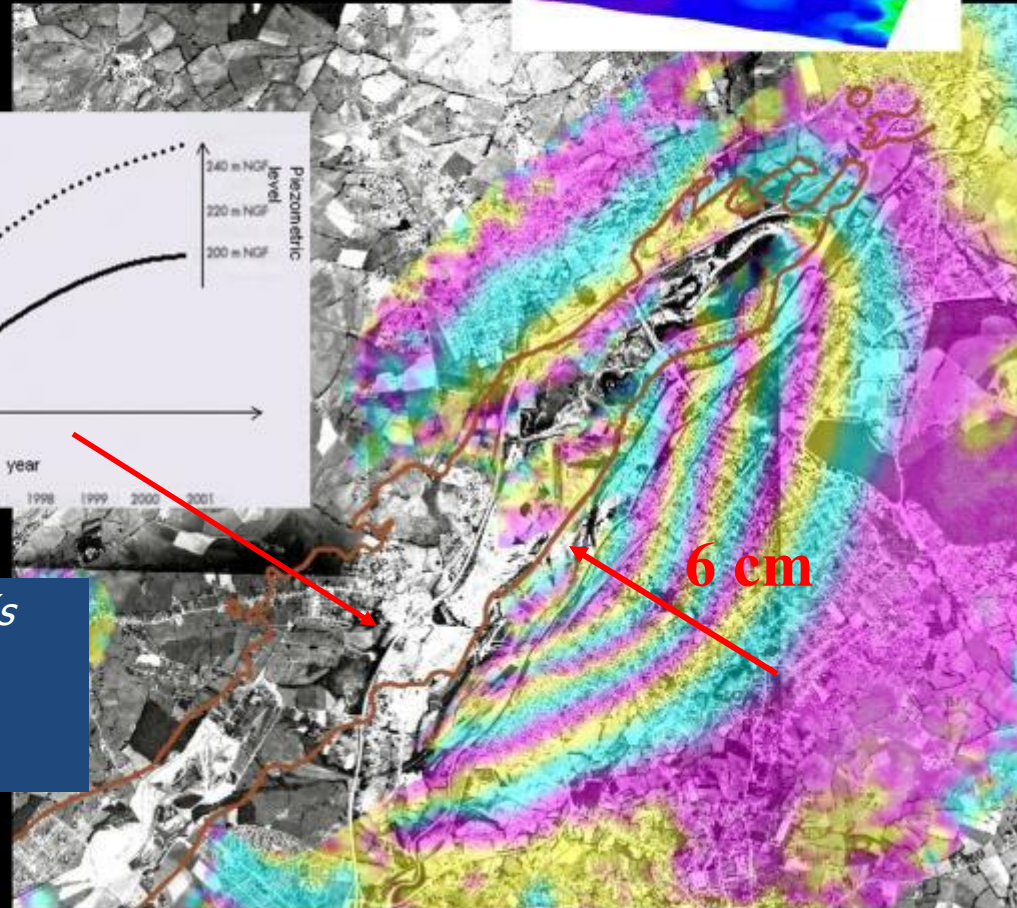
Bande L

JERS-1 interferogram on the mining area of Lorraine. Acquisition dates 24/03/1993 and 11/03/1994

Soulèvement sur d'anciens sites houillers (Montceau-les Mines)

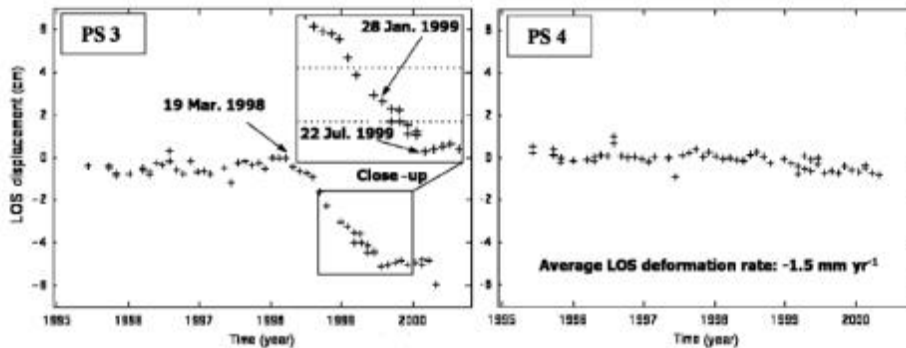
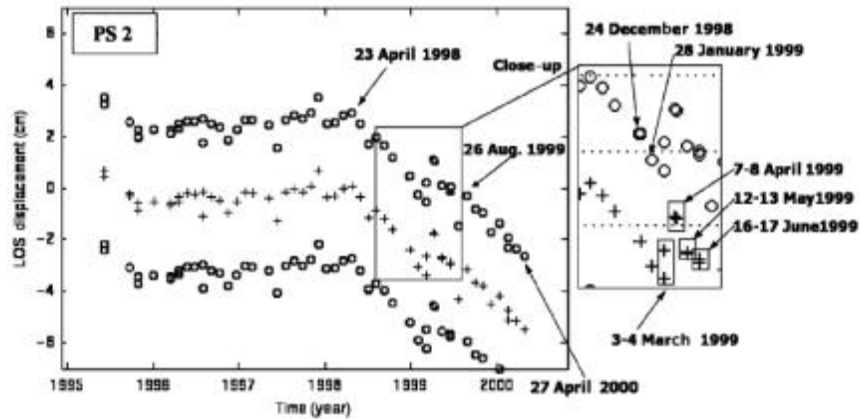
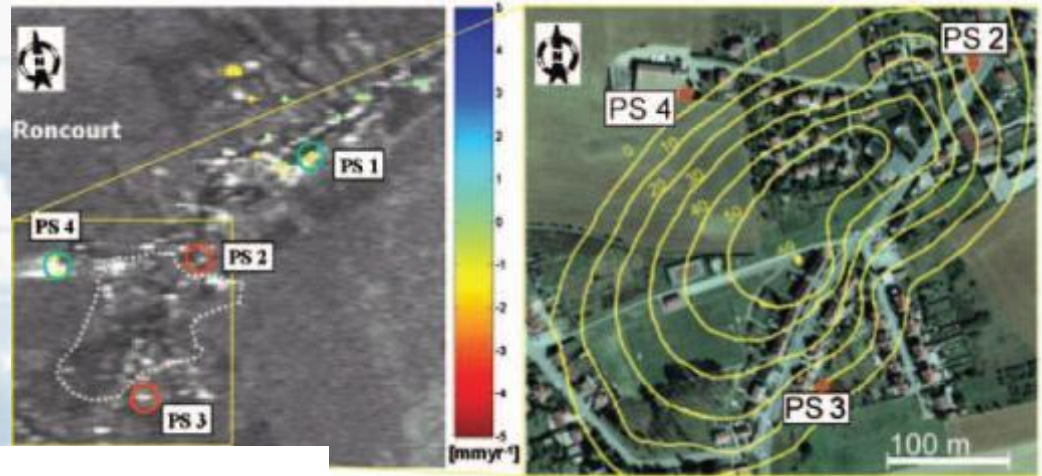


Remontée du niveau piézométrique dans des cavités minières abandonnées
=> +2 à +14 cm entre 12/1995 et 12/1998 (nivellement).



Roncourt (Après mine / fer) – PSI (collaboration TRE), données ERS

Maximum de déformation inaccessible → suivi de points en bordure de cuvette d'affaissement



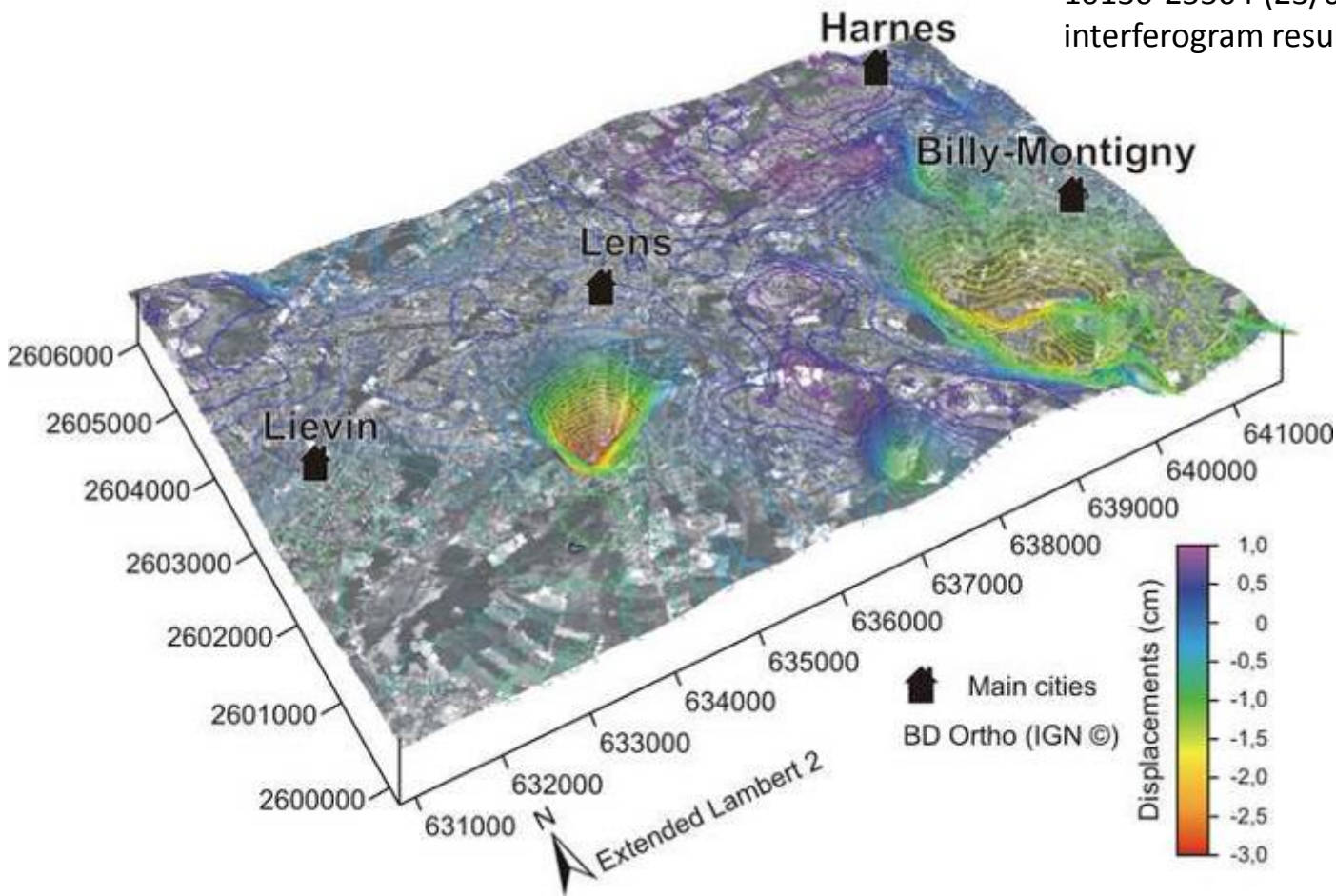
Début de la subsidence d'après les mesures PSI : avril 1998

« au sol » :

- premiers désordres constatés : juillet 1998
- mise en place réseau de nivellement : janvier 1999

Bassin houiller du Nord-Pas de Calais

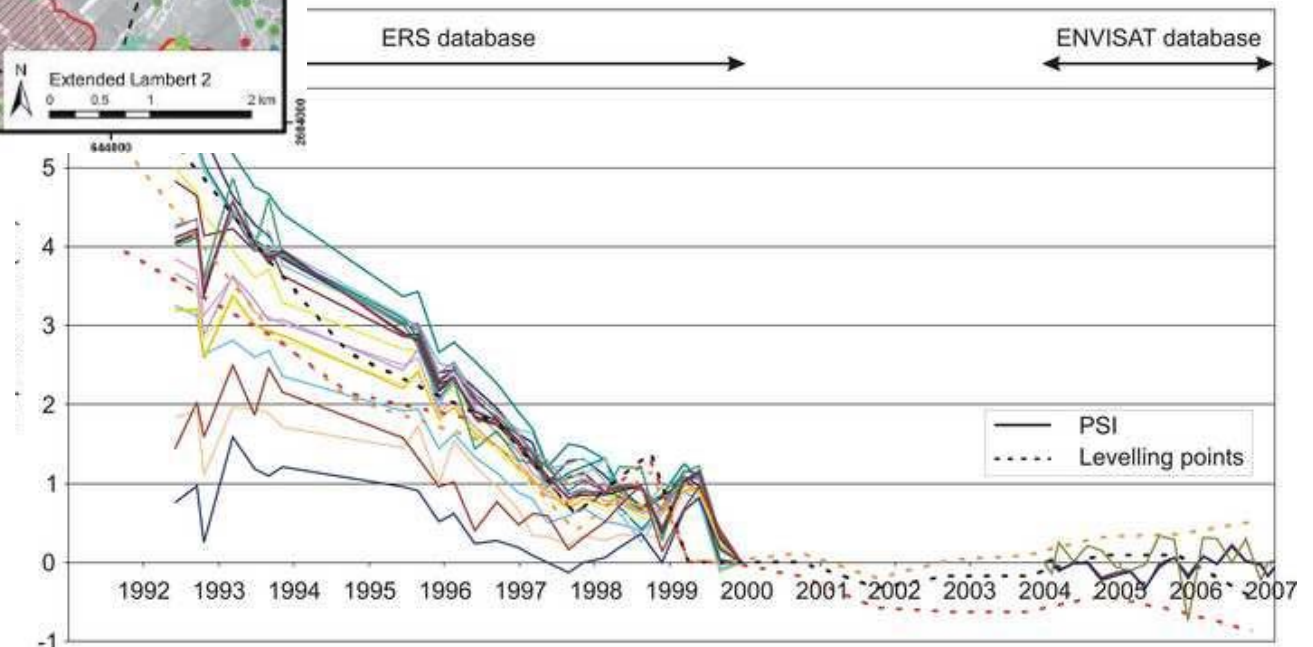
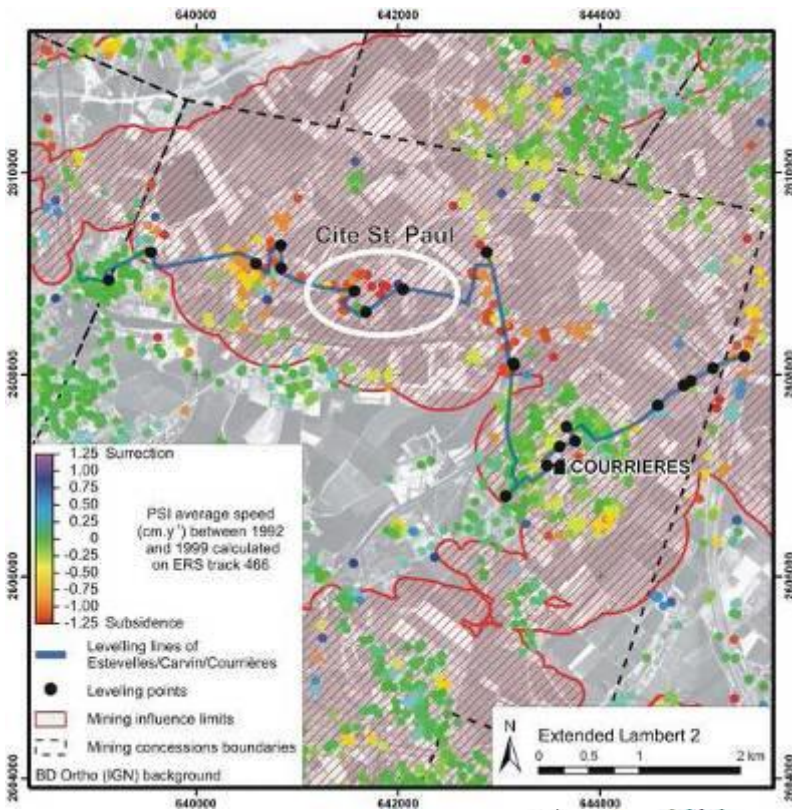
3D view of deformations according to the 10130-25504 (23/06/1993 - 31/05/1996) interferogram results.



(d'après Gueguen et al., 2009)

Nord-Pas de Calais

Comparison between PS displacements and levelling monitoring in the Cité St. Paul 504 area for PS closer than 150m of the levelling point. a.: Localisation of the Cité St. Paul area 505 and considered data (red square). b.: Comparison of PS and levelling results where dashed 506 lines represent the levelling points and continuous lines, the PS.



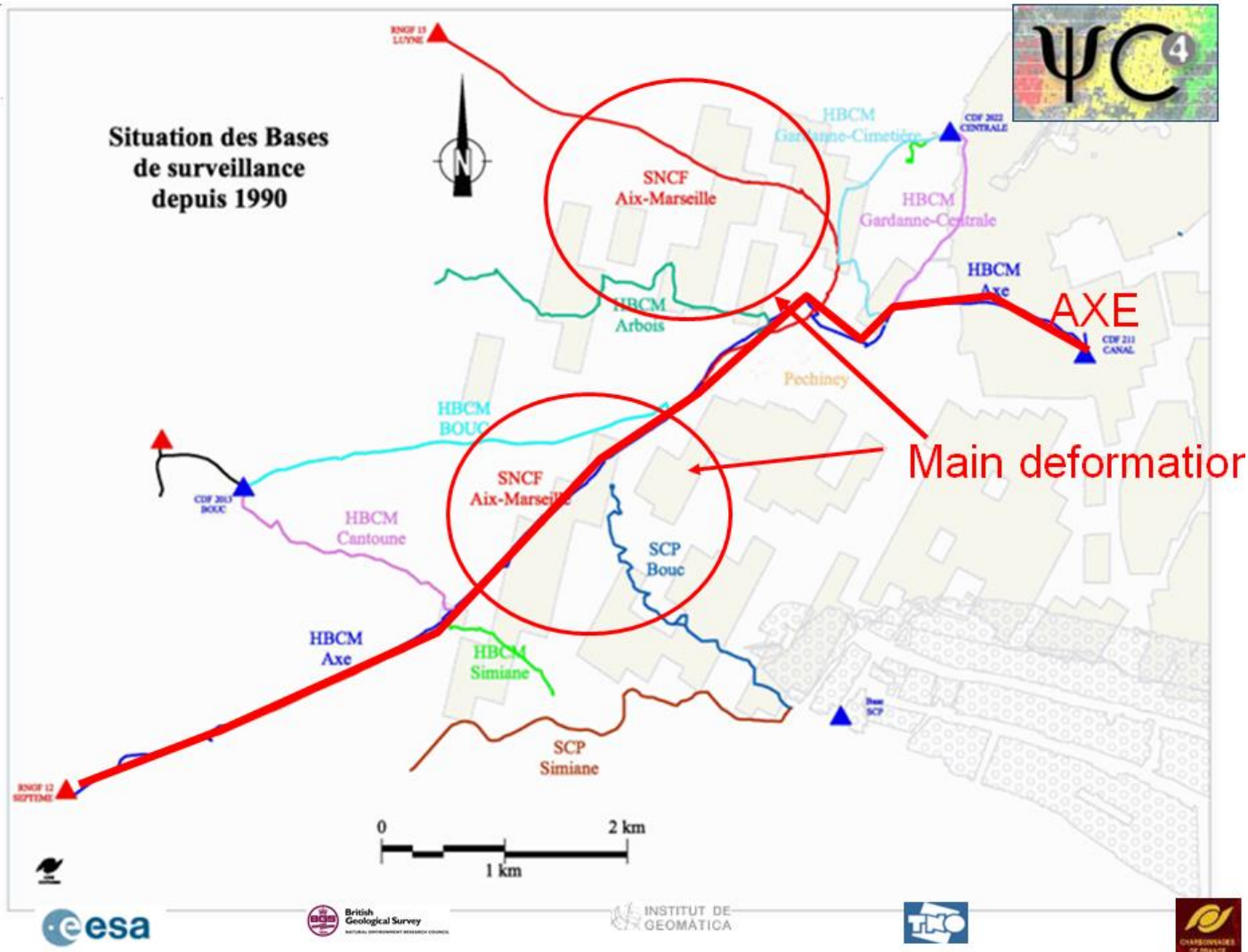
(d'après Gueguen et al., 2009)



Gardanne: projet PSIC-4

PSIC-4 project:

- funded by ESA after recommendations of Fringe 2003
- objective: assessing relative and absolute performances of PSI products for land deformation monitoring
- « blind » test: with the same ERS/ASAR data set (more than 100 images), 8 teams provided deformation assessments on a given test site affected by ground subsidence
- validation by an independent group of the results provided in anonymous form
 - « validation » respect to ground data (levelling)
 - « intercomparison »: relative performances of the different teams



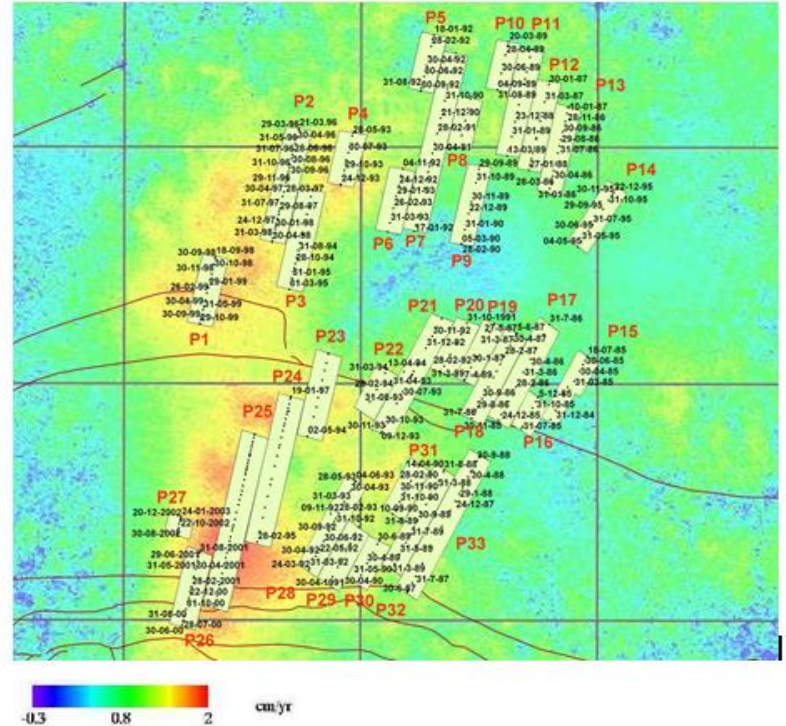
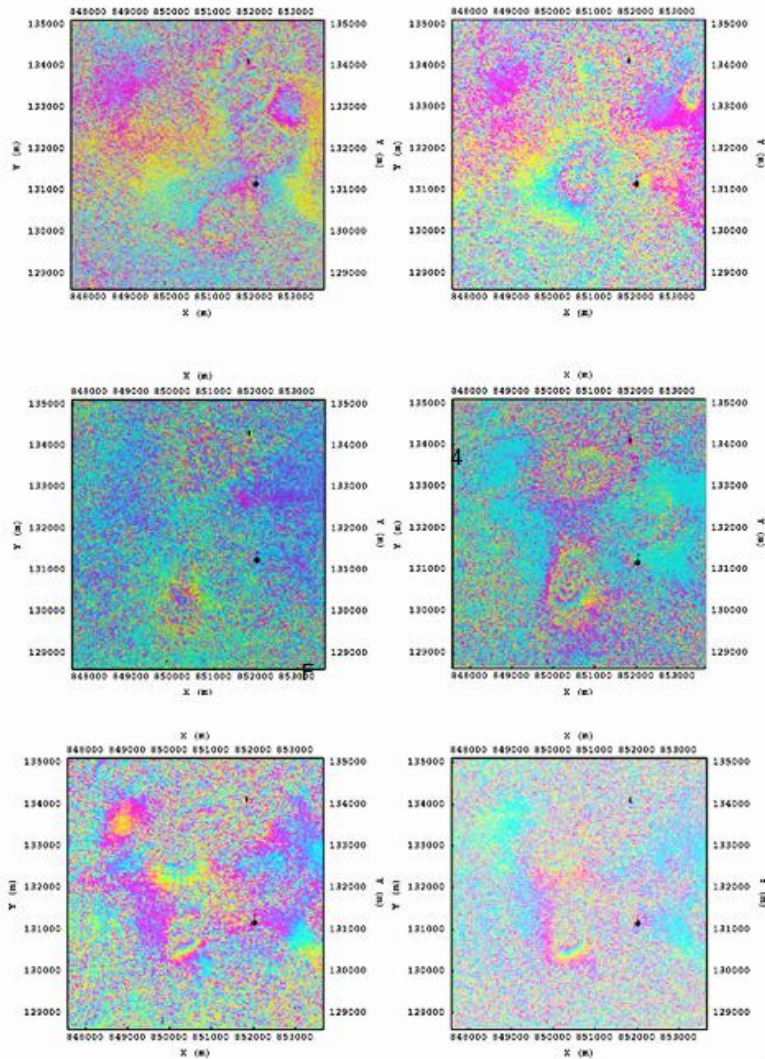


Figure 4.5.1 Mining panels, with dates, overlaid on the DiffSar data. Red lines are geological faults.

Figure 3 - Selected interferograms over the Gardanne test site. These six interferograms represent the less noisy interferograms among the set of computed interferograms. 1) 10/06/92 – 17/03/93 (4719 – 8727), 2) 06/10/95 – 26/10/96 (22097 – 7935), 3) 05/11/97 – 15/03/97 (13446 – 9939), 4) 24/01/98 – 25/12/98 (14448 – 18957), 5) 05/12/98 – 16/10/99 (18957 – 23446), 6) 05/12/98 – 28/01/00 (18957 – 44642). One colour cycle (blue to red) correspond to 2.8 cm of deformation in the Line of Sight direction.

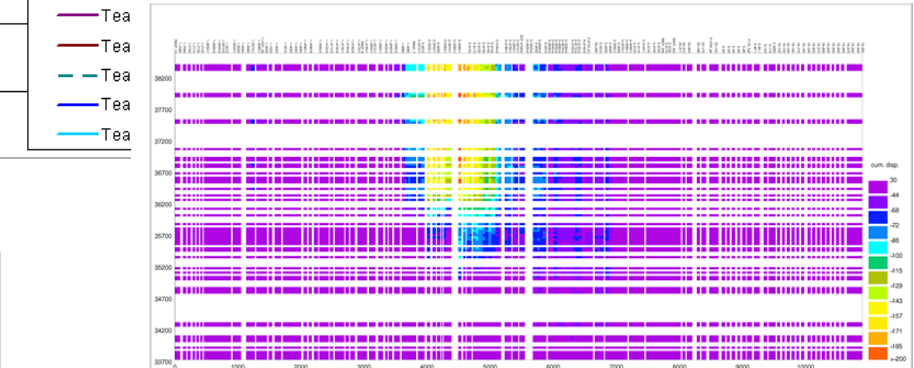
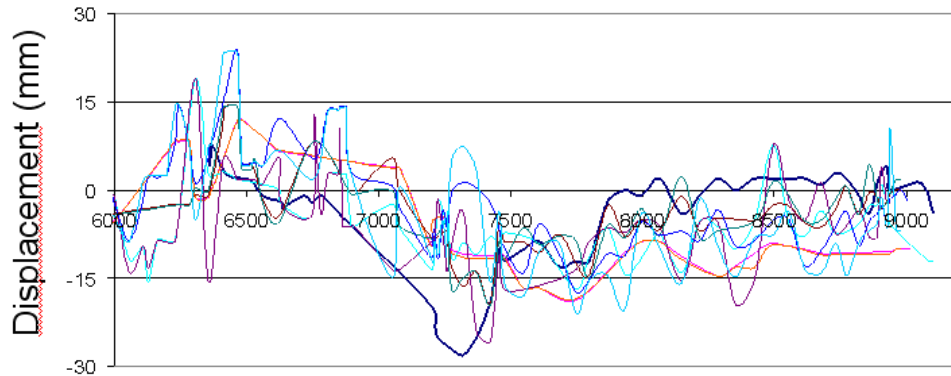
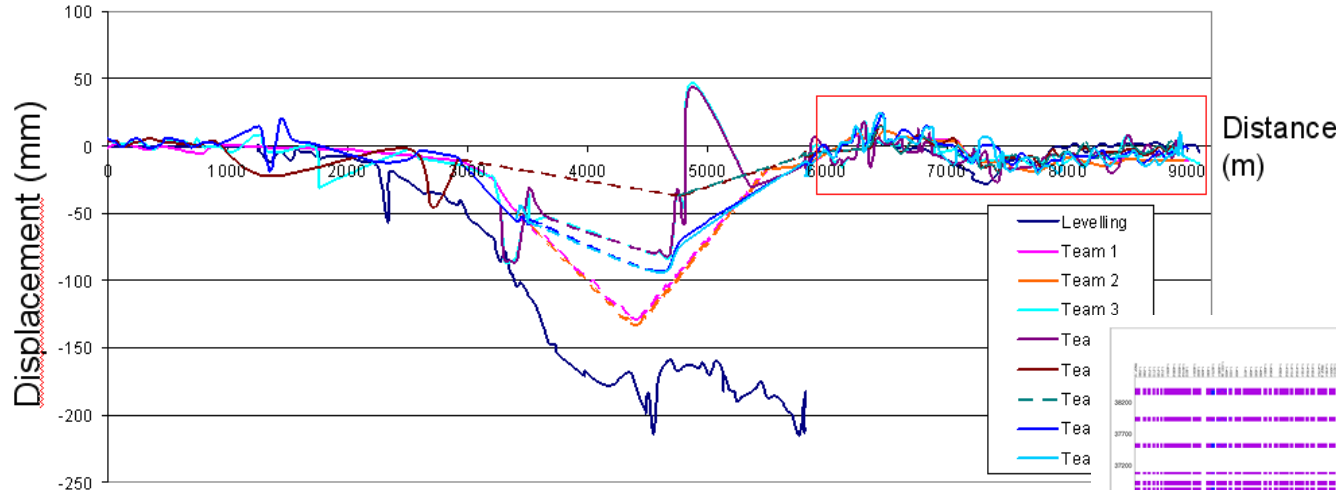


Figure 4.3.9 – Spatio-temporal profile of the PS-InSAR observations of processing chain 8, interpolated along levelling section AXE (cumulative displacement in mm; horizontal lower axis: distance in m, horizontal upper axis: codes of levelling points; vertical axis: Julian days (33800 = 15 July, 1992))

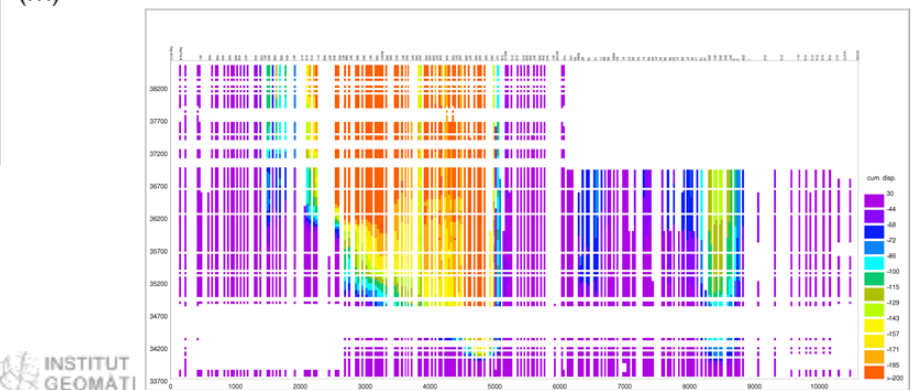


Figure 4.3.10 – Spatio-temporal profile of the levelling data along levelling section SNCF (cumulative displacement in mm; horizontal lower axis: distance in m, horizontal upper axis: codes of levelling points; vertical axis: Julian days (33800 = 15 July, 1992))



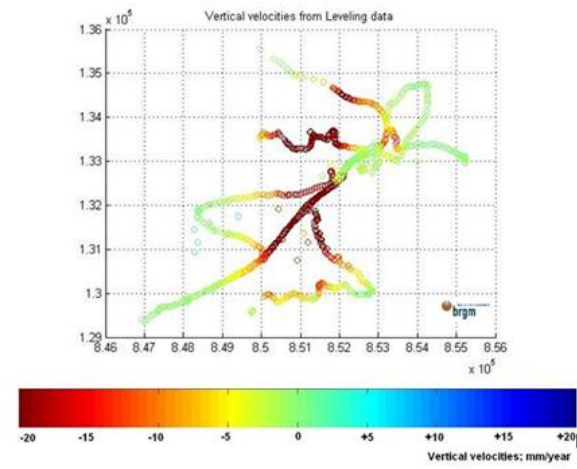
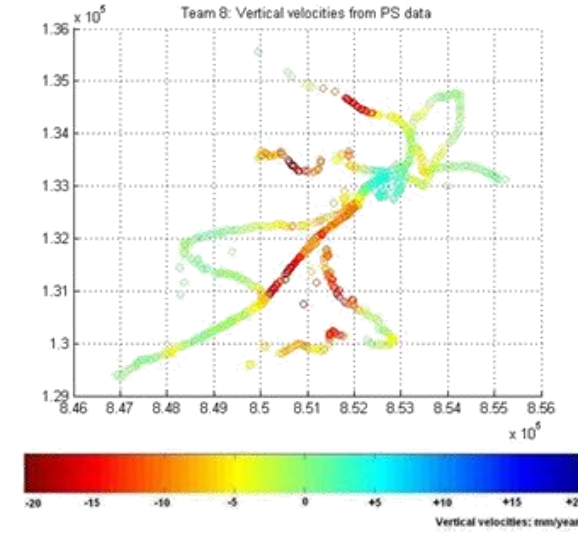
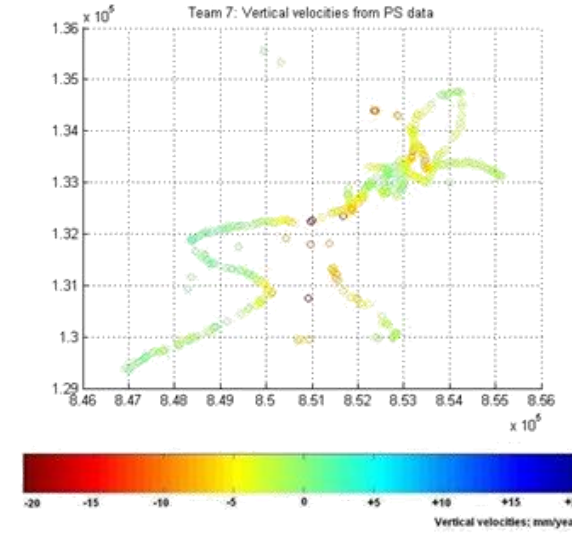
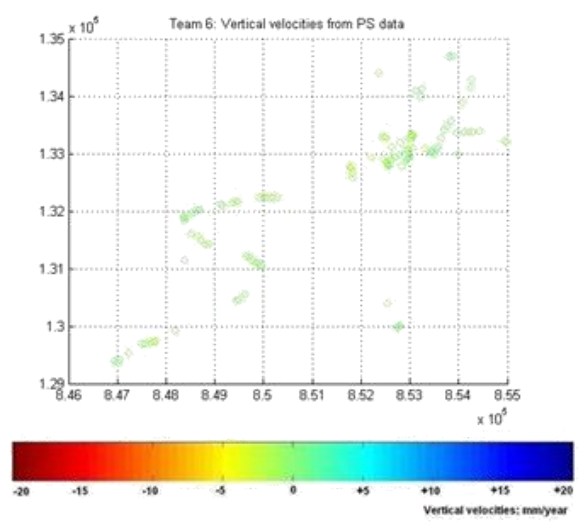
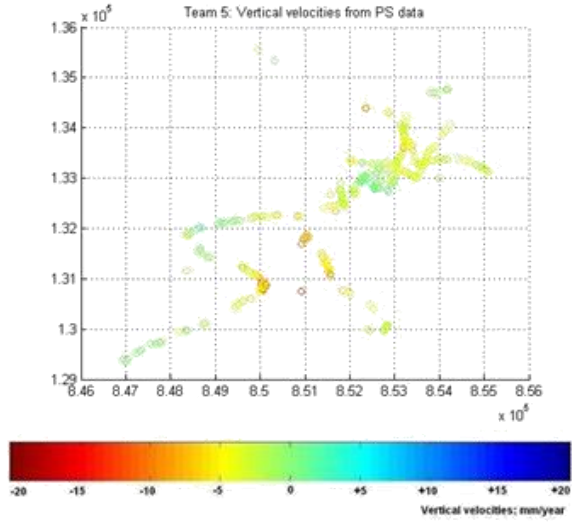


Figure 4.4.1: Vertical velocities from levelling data resampled at SAR acquisition dates

Exploitation de sel: site de Vauvert (données ERS)

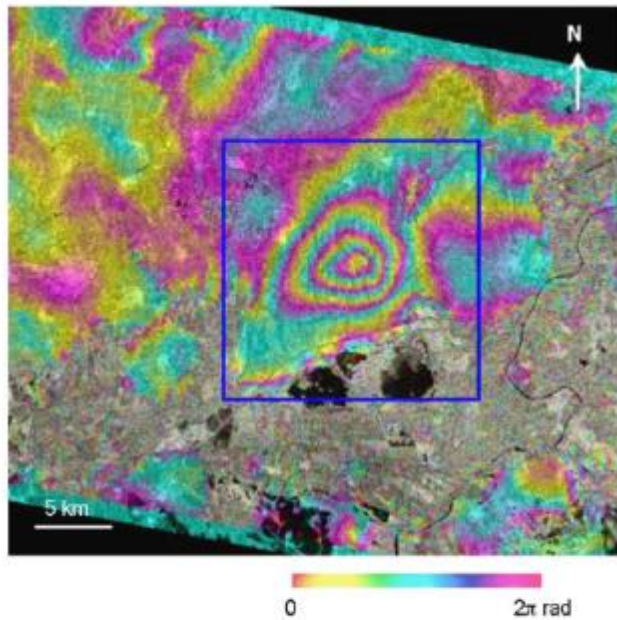


Fig. 9. Interferogram 18/03/1997–23/03/1999 (from Fig. 8D) strongly filtered (window size: 128 pixels, α filtering coefficient: 1.5). The phase has been multiplied by a factor 2 (1 fringe corresponds to 1.5 cm of vertical deformation) in order to enhance the readability of the information. The blue frame corresponds to the DEM limit. Considering a residual disturbance of about 1 cm in a single interferogram (Williams et al., 1998), this figure shows that no significant deformation occurs outside this area.

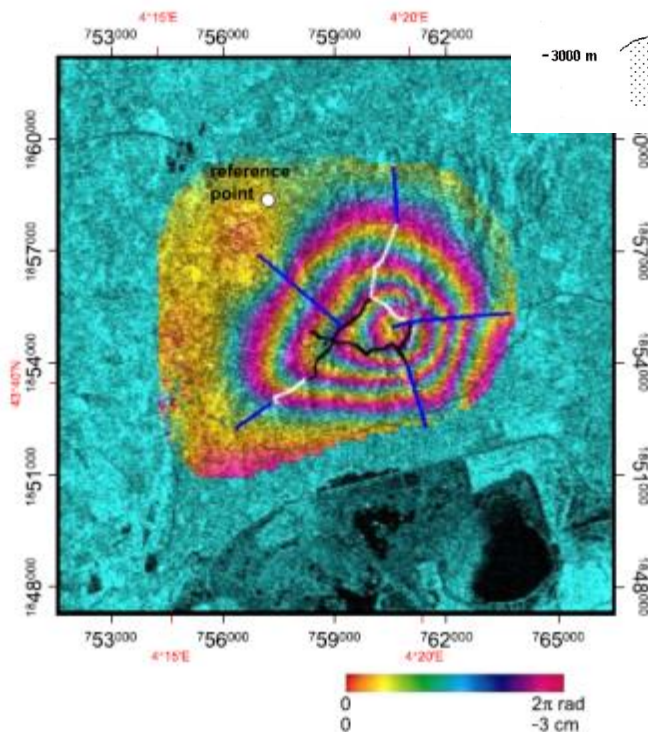
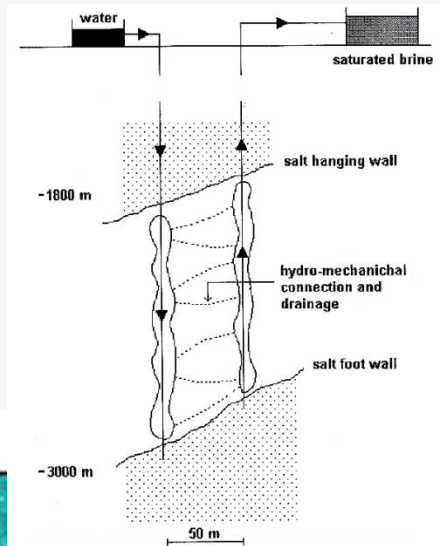
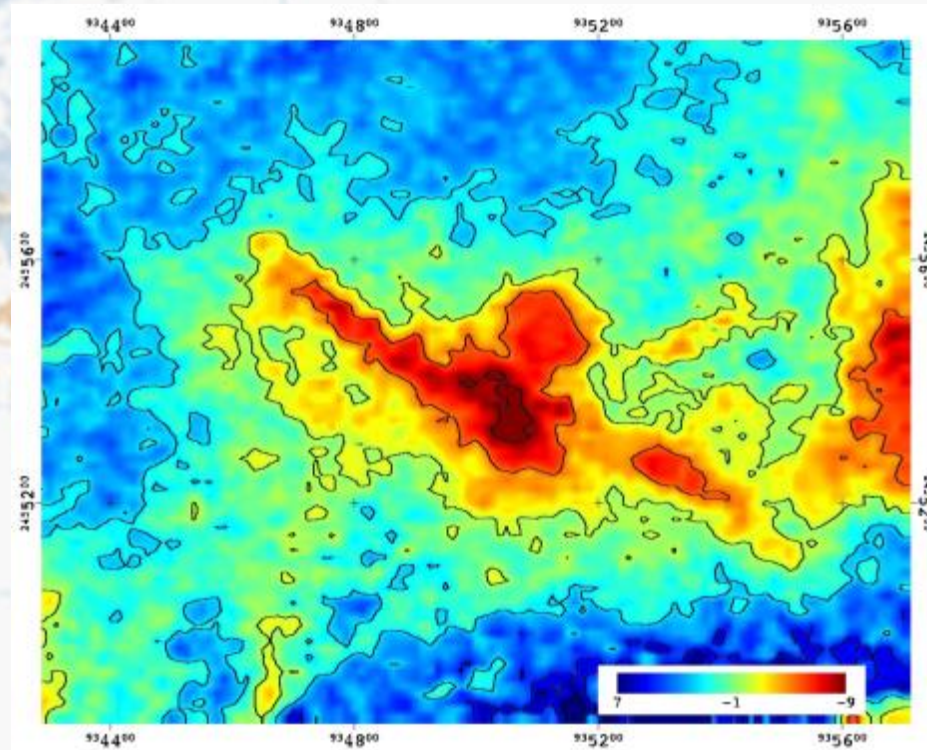
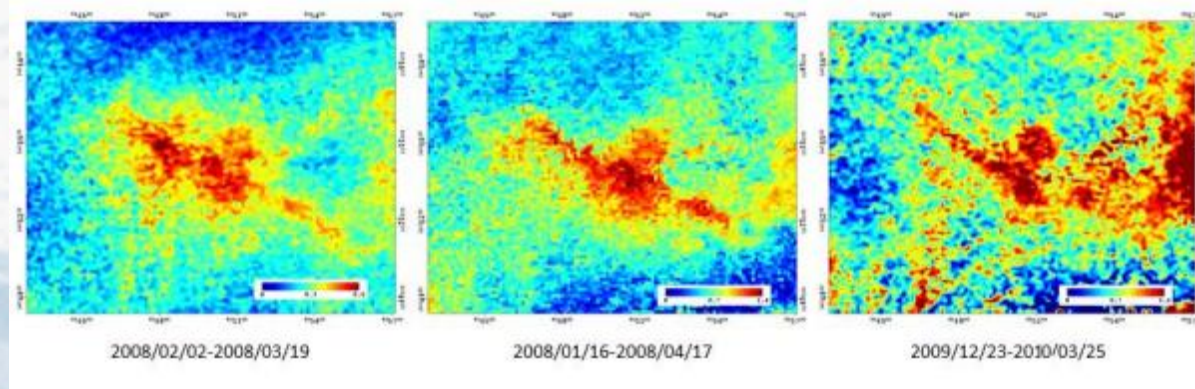
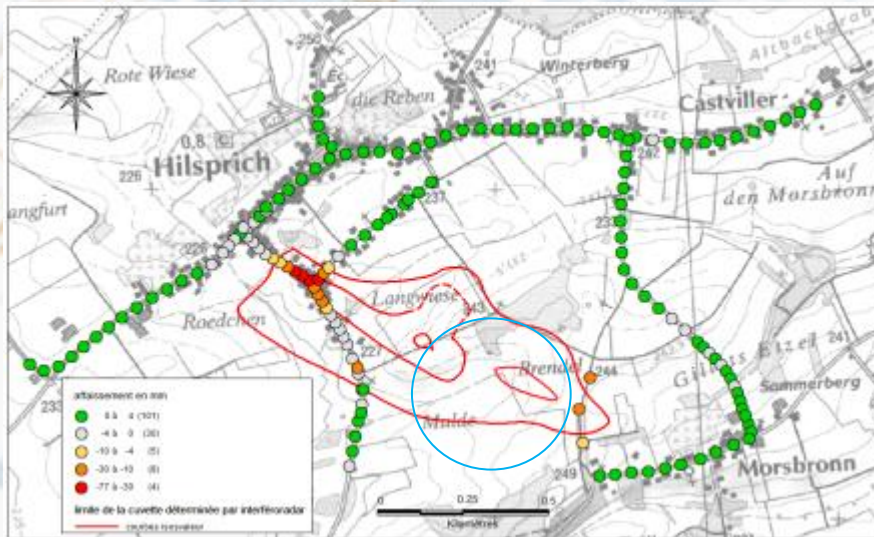
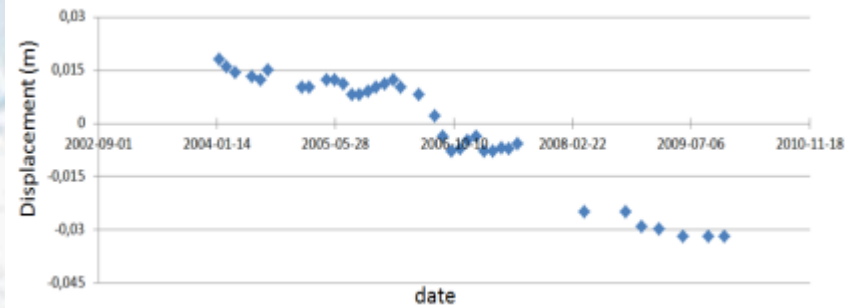
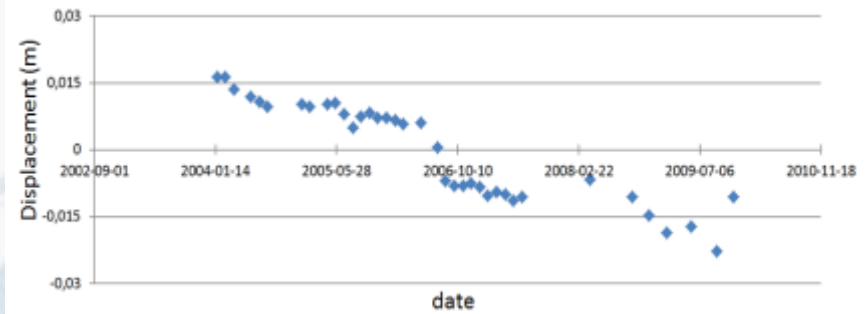
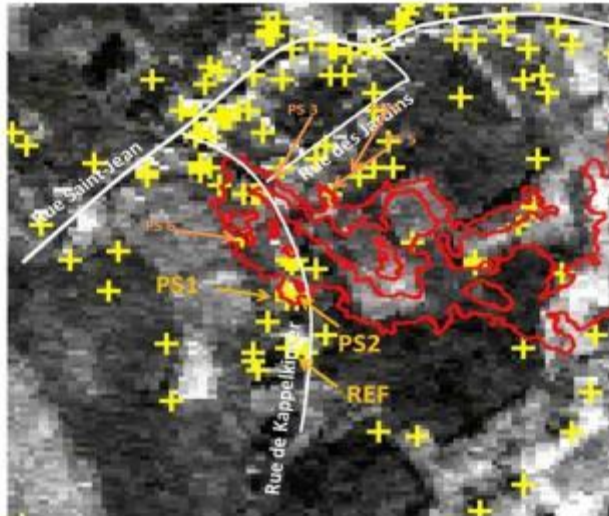


Fig. 10. Stack of interferograms 09/01/1993–04/09/1995; 17/04/1995–18/03/1997 and 18/03/1997–23/03/1999 showing the total deformation between 1993 and 1999. Leveling networks discussed in Section 6 are represented by black lines for the monitoring network and in white lines for the stability network. Improvements to the network proposed by the interferometric study appear as blue lines. The selected reference point is considered to be not affected by subsidence.

Utilisation d'interférométrie SAR à partir de données ALOS (bande L) pour déterminer l'extension/géométrie. Subsidence sur le site de Hilsprich



PSI à partir de données Envisat/ASAR

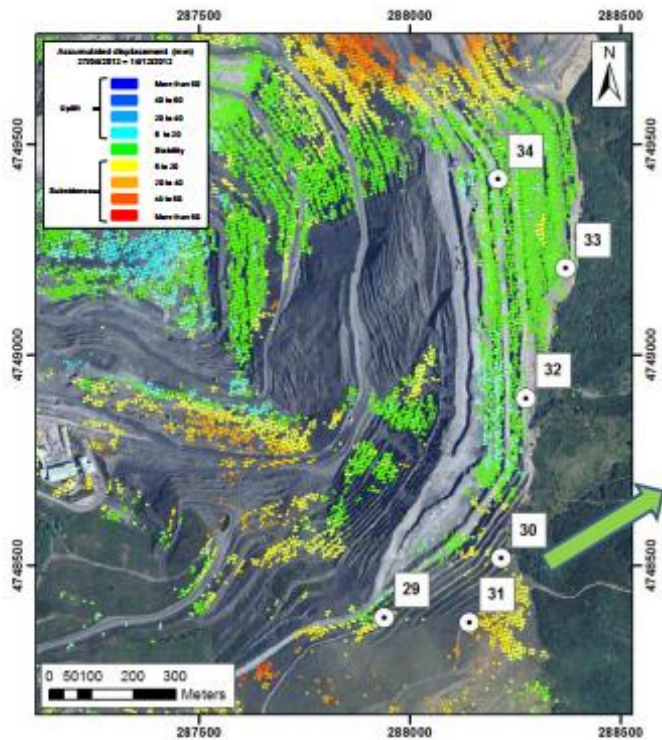


→ Optimisation du positionnement de mesures géophysiques

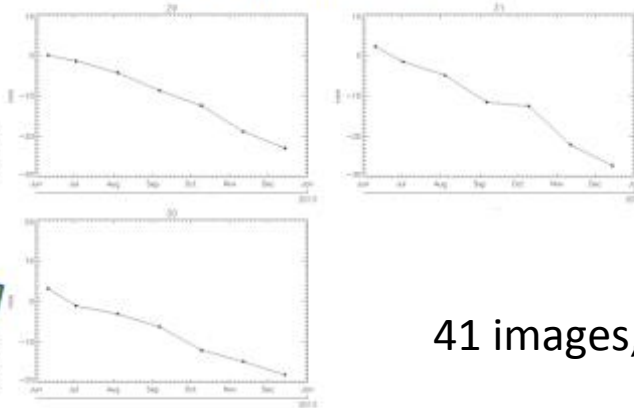
→ Optimisation du réseau de nivellement

Exemple d'application sur une mine à ciel ouvert (Leon, Espagne).

Source : Mora et al., 2013 (Altamira)



Deformation time series



41 images, TSX 3 m 2008-2012

Figure 5 Ground displacement time series (mm) for artificial reflectors installed in the slope area

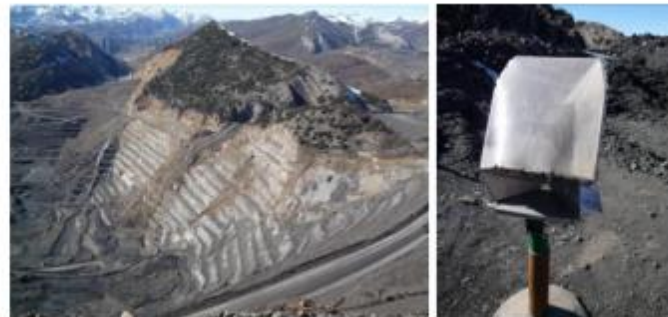


Figure 3 Natural (left) and Artificial Reflectors (right) installed in the mine slope

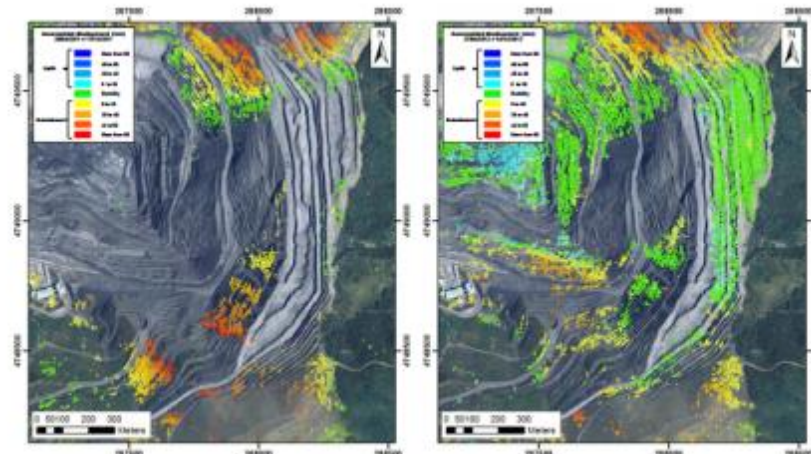


Figure 4 Slope ground displacement map for two different years, 2011 (left) and 2012 (right)

Intérêt des techniques d'interférométrie radar satellitaire

- possibilité d'effectuer des études a posteriori fournissant un historique de la déformation. La rétro-analyse des images d'archives (interférométrie radar: l'archive de données des satellites ERS permet de remonter à 1992) est une information unique sur la déformation passée.
- des précisions des mesures variables et dépendant des techniques utilisées (interférométrie conventionnelle, interférométrie avec traitement multi-temporel de jeux de données importants, corrélation d'images) et des capteurs utilisés (résolution, longueur d'onde). Néanmoins, suivant le contexte, elle peuvent être équivalentes aux précisions de mesures au sol.
- la couverture spatiale (quasi-globale) des capteurs satellitaires permet d'étudier la plupart des zones affectées par un risque associé à de la déformation de surface.
- les répétitivités des outils (pe. pour le radar, de quelques jours pour COSMO-SKYMED à 35 jours pour ERS et EnviSAT) s'adaptent à de nombreux phénomènes.
- ne nécessitent (sauf cas spécifiques utilisant des dispositifs au sol tels que des cornets réflecteurs ou transpondeurs) pas une intervention au sol.
- suivant la technique utilisée, le résultat se présente souvent sous forme d'image (par opposition aux mesures au sol ponctuelles).

Mais de nombreuses limitations quant à leur utilisation (cf. interférométrie radar : limitations).