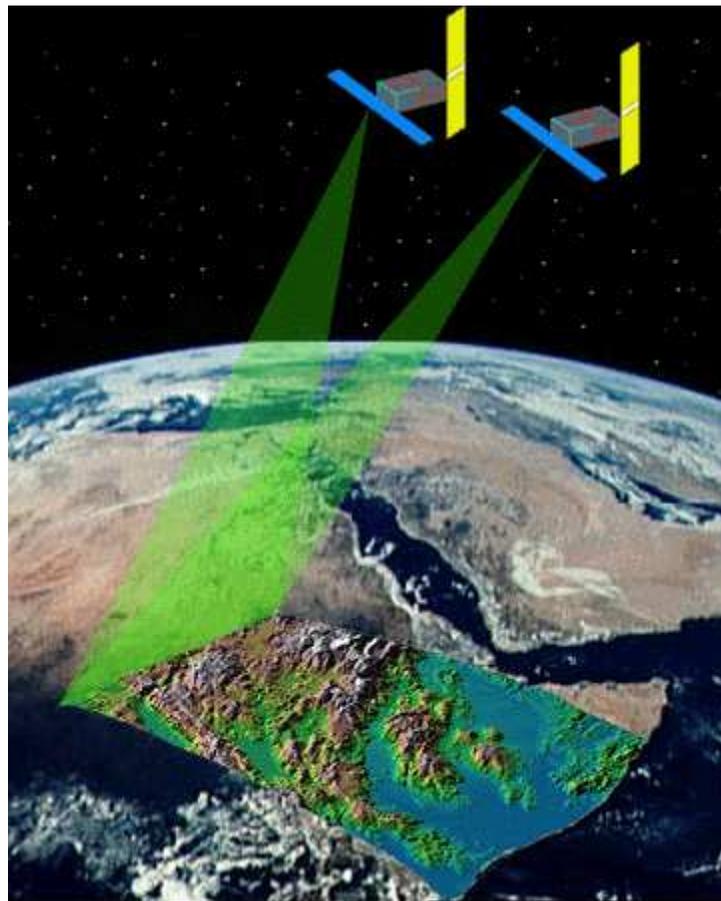


Interférométrie radar



Bénédicte FRUNEAU

▪ Interférométrie radar

Principe : dès 1974

1991 : lancement d'ERS-1 (bande C ; $\lambda=5,6$ cm)

- Extraire la topographie locale
- Détecter et quantifier la déformation du sol entre deux acquisitions d'images radar

▪ depuis 2000 : Techniques interférométriques « avancées », multi-images

Amélioration de la précision des mesures  déplacements ténus et lents

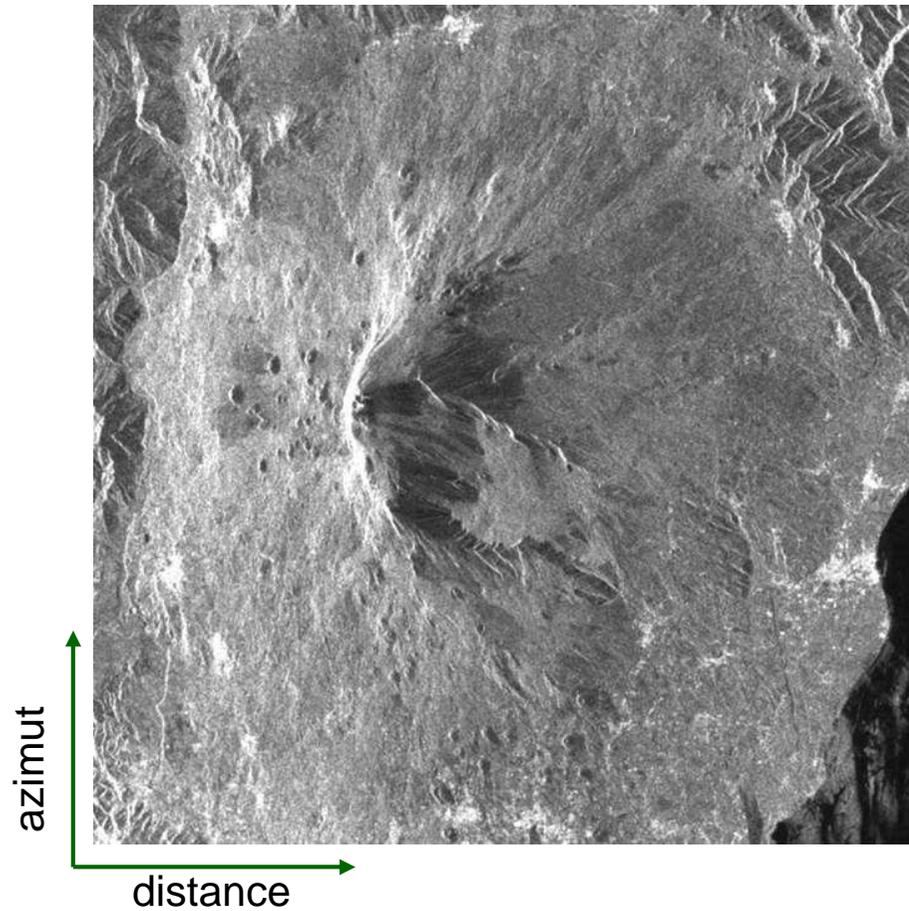
- Une cartographie **étendue, précise et dense** des déplacements.
- Avantage de la **téledétection** (pas d'instrumentation in-situ)
- Outil «**tout temps**»

Imagerie radar

Image RSO : image complexe

En chaque pixel, deux quantités mesurées

- Amplitude



Mont Etna

Imagerie radar

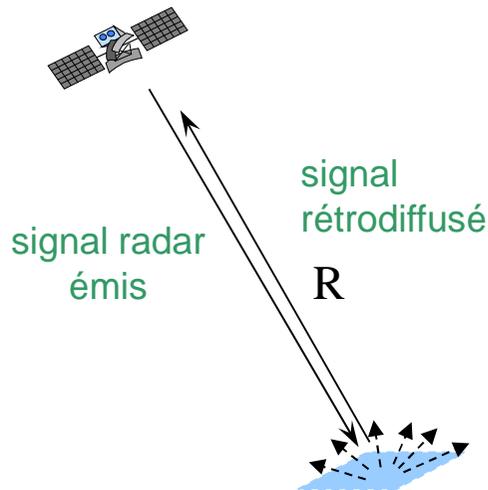
- **Phase** : somme de deux contributions

$$\phi = \phi_{\text{géom}} + \phi_{\text{propre}}$$

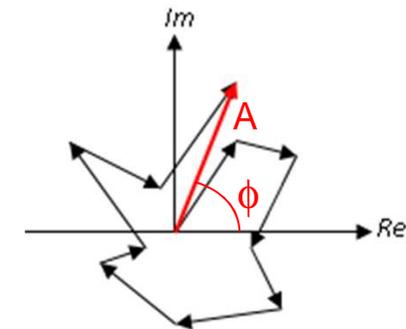
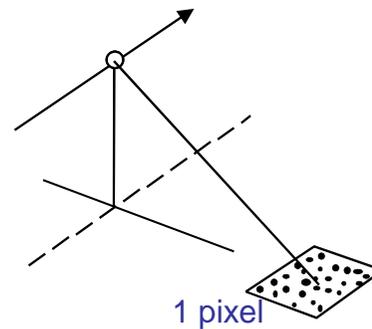
Trajet aller-retour du signal
(déterministe)

$$\phi_{\text{géom}} = 4\pi R / \lambda$$

R distance radar-pixel

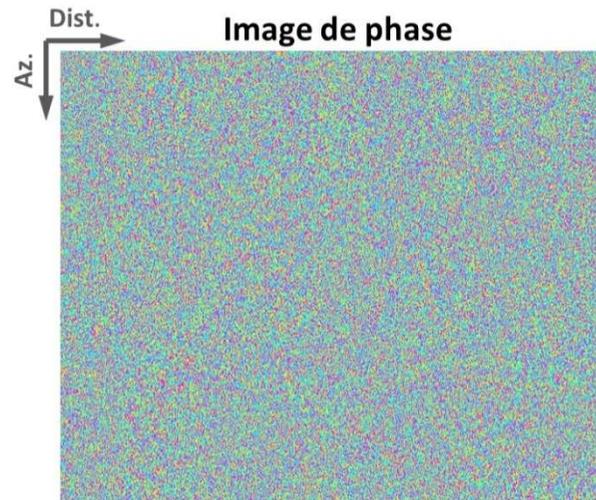


Signature de phase du pixel (contribution interne)
Phase de construction



Addition vectorielle de la réponse de chaque réflecteur

Imagerie radar



Utilisation de deux images : éliminer la contribution interne de chaque pixel, et garder la contribution géométrique

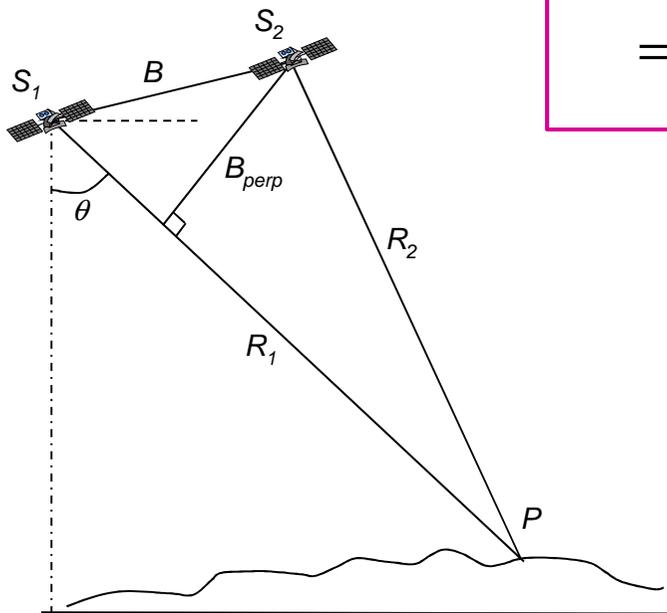
condition : la phase propre doit rester stable

⇒ Paramètre distance radar-objet accessible !!

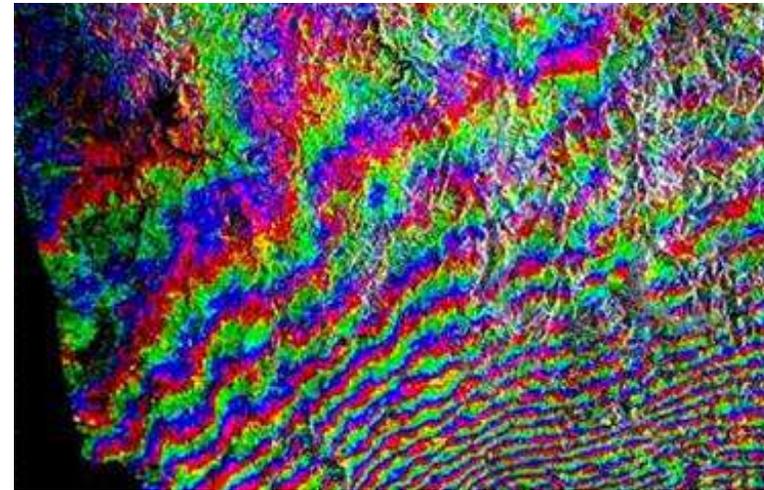
Interférométrie radar - InSAR

Utilisation de 2 images RSO acquises sur une même zone

Interférogramme : Différence de phase pixel à pixel des deux images



$$\Delta\phi = \phi_{\text{int}} = \phi_1 - \phi_2 = (\phi_{\text{propre},1} + \phi_{\text{géom},1}) - (\phi_{\text{propre},2} + \phi_{\text{géom},2})$$
$$= \frac{4\pi}{\lambda} (R_1 - R_2)$$



Interférométrie radar - InSAR

Différentes contributions

$$\phi_{\text{int}} = \phi_{\text{orb}} + \phi_{\text{topo}} + \phi_{\text{déplacement}} + \delta\phi_{\text{atmo}} + \delta\phi_{\text{bruit}}$$

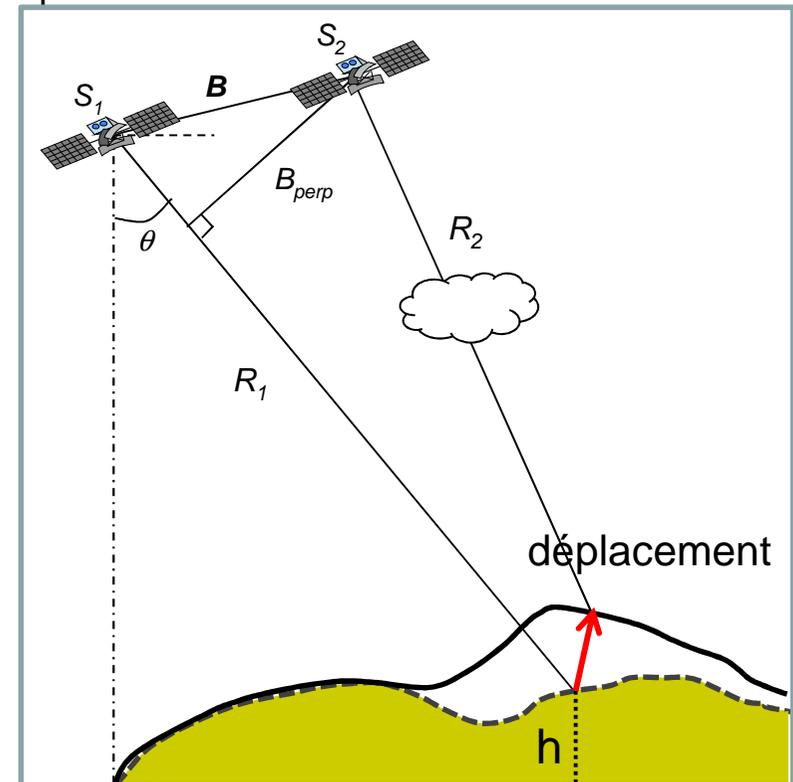
$$\phi_{\text{int}} = \frac{4\pi B_{\perp} r}{\lambda R \tan \theta} + \frac{4\pi B_{\perp} h}{\lambda R \sin \theta} + \frac{4\pi d_{LV}}{\lambda} + \delta\phi_{\text{atm}} + \delta\phi_{\text{bruit}} + 2k\pi$$

Composante de terrain plat

Phase topographique

déplacement

atmosphère

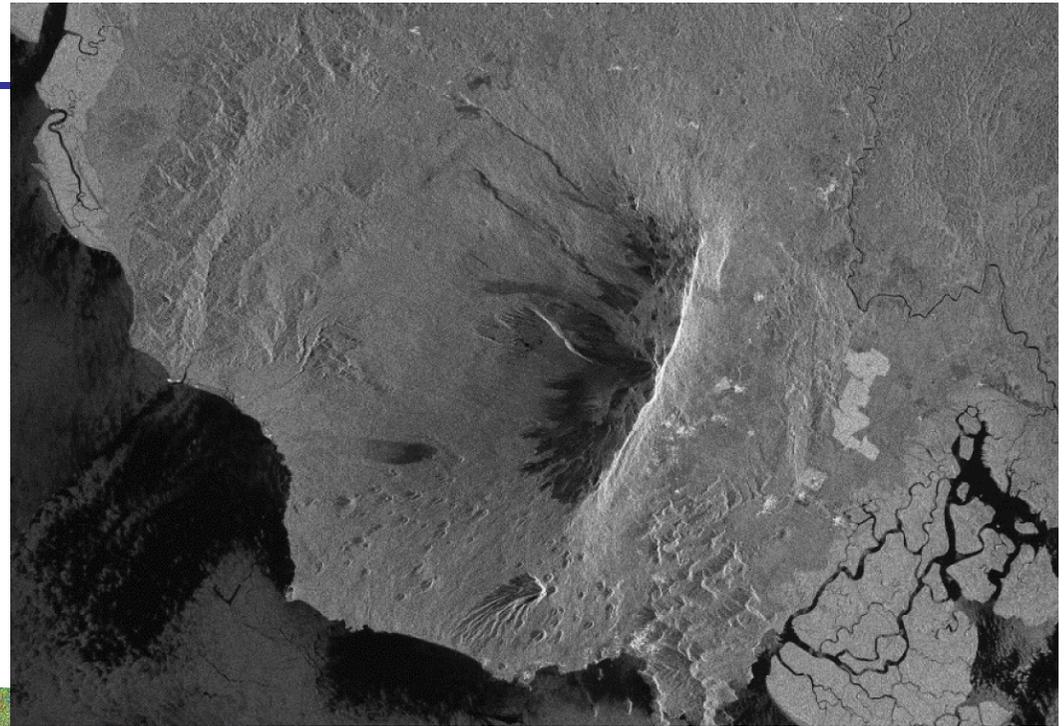
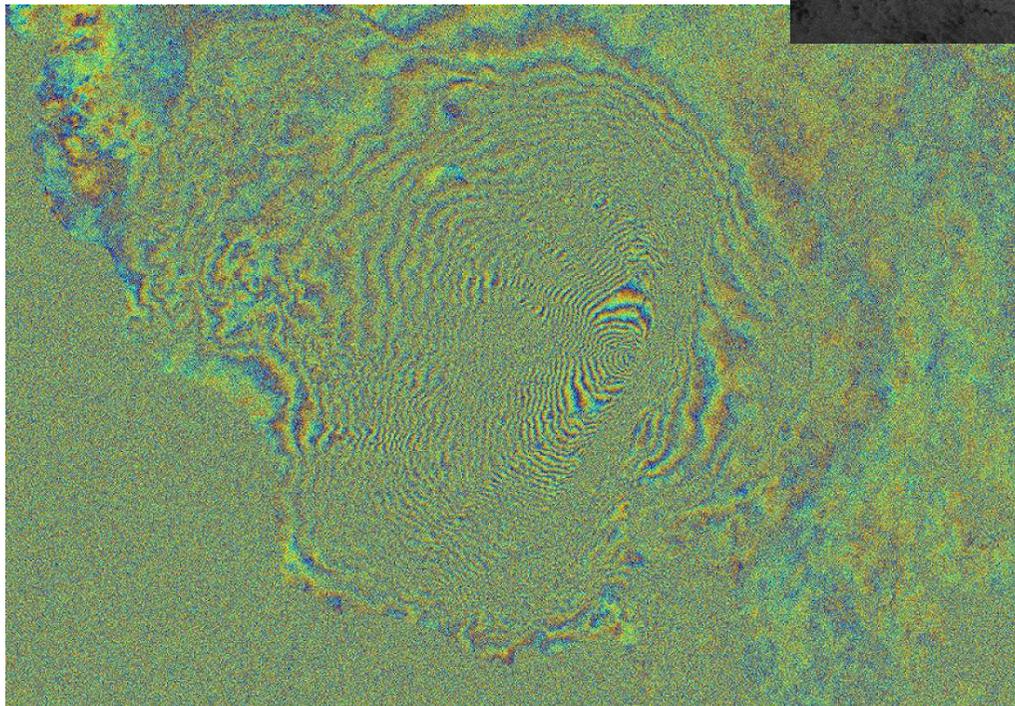


Interférométrie radar - InSAR

$$\phi_{\text{int}} = \cancel{\phi_{\text{orb}}} + \phi_{\text{topo}}$$

connaissance des orbites :
élimination de cette contribution

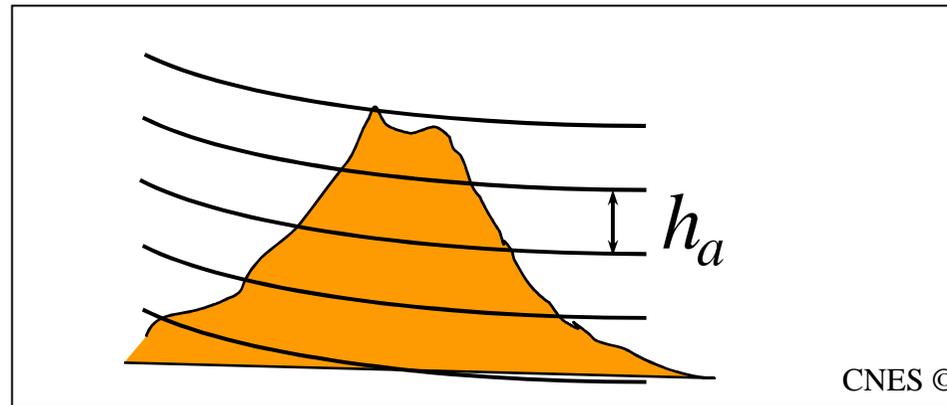
Interférogramme



une frange \Leftrightarrow altitude d'ambiguïté

$$h_a = \frac{\lambda R \sin \theta}{2B_{\text{perp}}}$$

Altitude d'ambiguïté



$$\Delta \varphi = 2\pi \quad \Rightarrow \quad \frac{4\pi B_{\perp} h}{\lambda \rho \sin \theta} = 2\pi \quad \Rightarrow \quad h = \frac{\lambda \rho \sin \theta}{2 B_{\perp}}$$

$$h_a = \frac{\lambda \rho \sin \theta}{2 B_{\perp}}$$

Interférométrie différentielle - DInSAR

Élimination de la topographie



détection des mouvements

$$\phi_{\text{int}} = \cancel{\phi_{\text{orb}}} + \cancel{\phi_{\text{topo}}} + \phi_{\text{déplacement}} + \delta\phi_{\text{atmo}} + \delta\phi_{\text{bruit}}$$

Connaissance a priori de la topographie

Interférogramme différentiel

$$\Delta\phi_{\text{int}} = \phi_{\text{déplacement}} + \phi_{\text{atmo}} + \phi_{\text{res,orb}} + \phi_{\text{res,topo}} + \phi_{\text{bruit}}$$

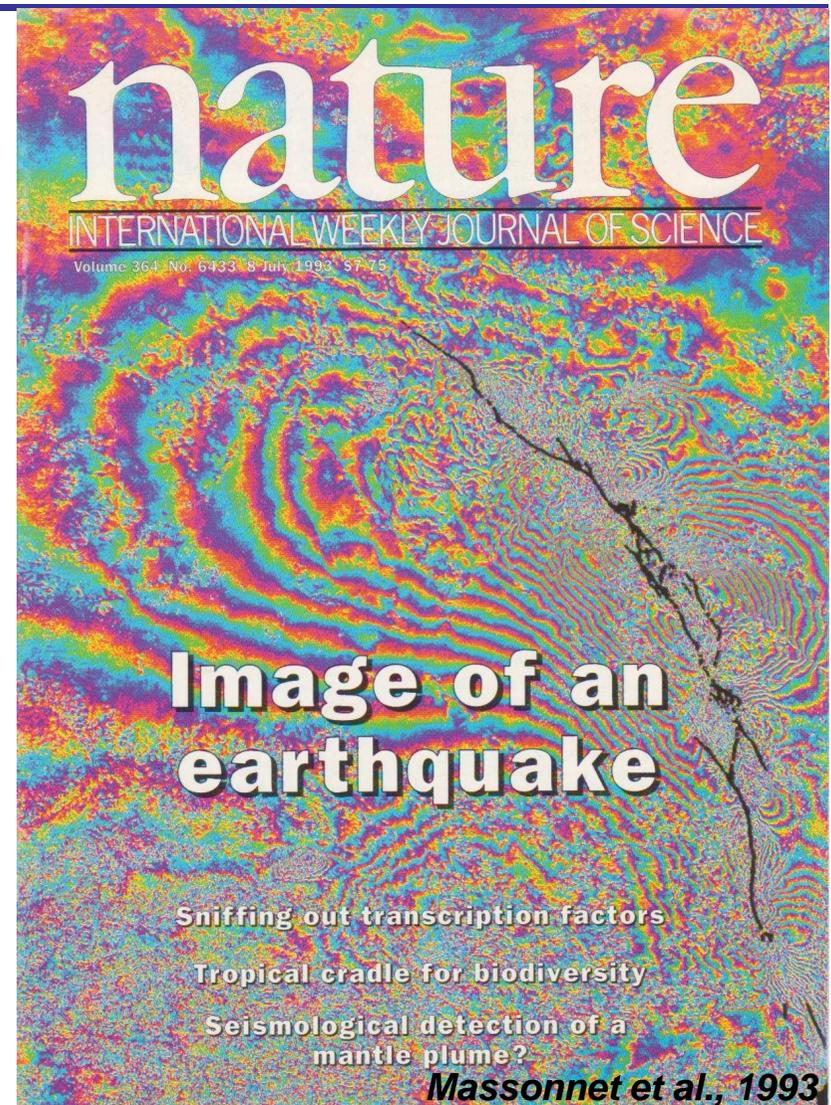
Interférométrie différentielle - DInSAR

Interférogramme différentiel
Carte d'iso-déplacements

Une frange :

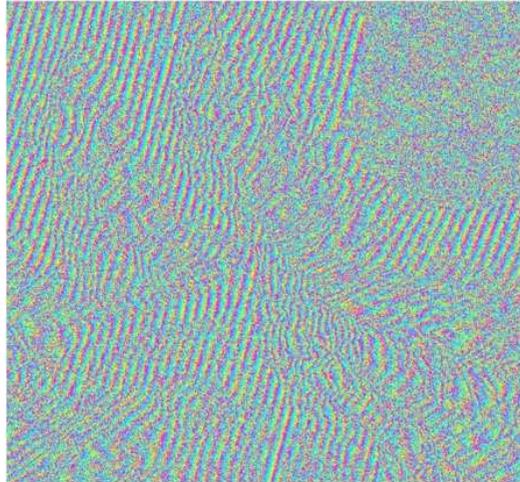
déplacement de $\lambda/2$ le long de la ligne de
visée du radar

2,8 cm avec les données ERS et Envisat

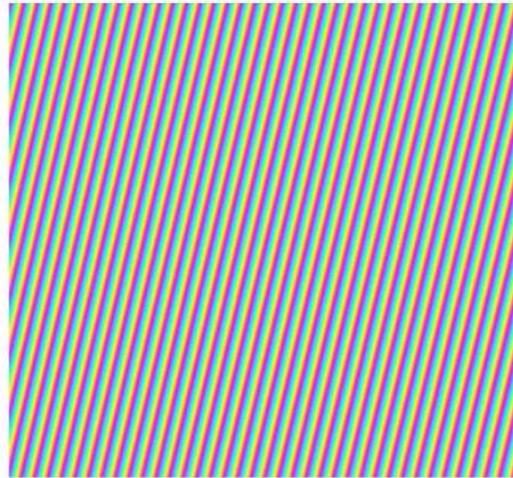


Représentation **dense** du champ de déformation
entre deux dates d'acquisition radar

Interférométrie différentielle - DInSAR



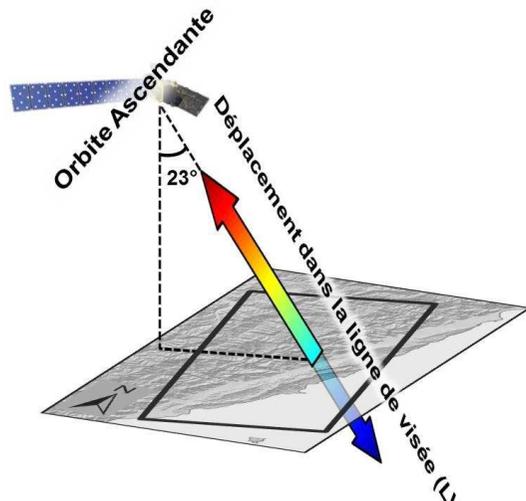
Interférogramme



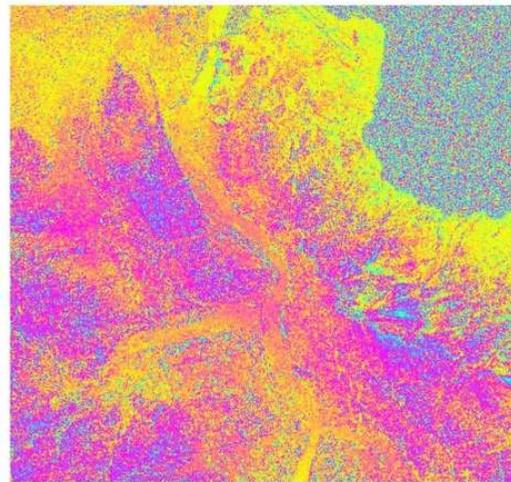
Franges orbitales



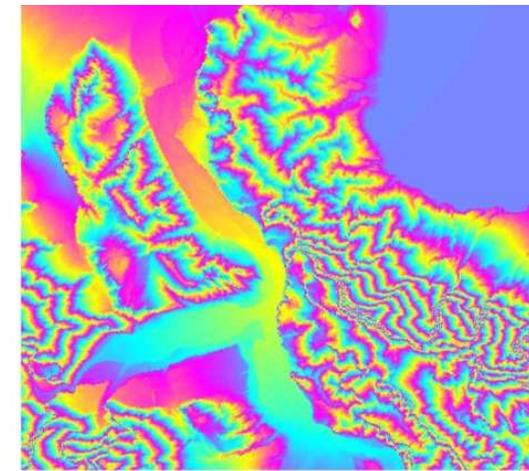
**Interférogramme corrigé
des franges orbitales**



Une frange = déplacement de $\lambda/2$ vers le satellite



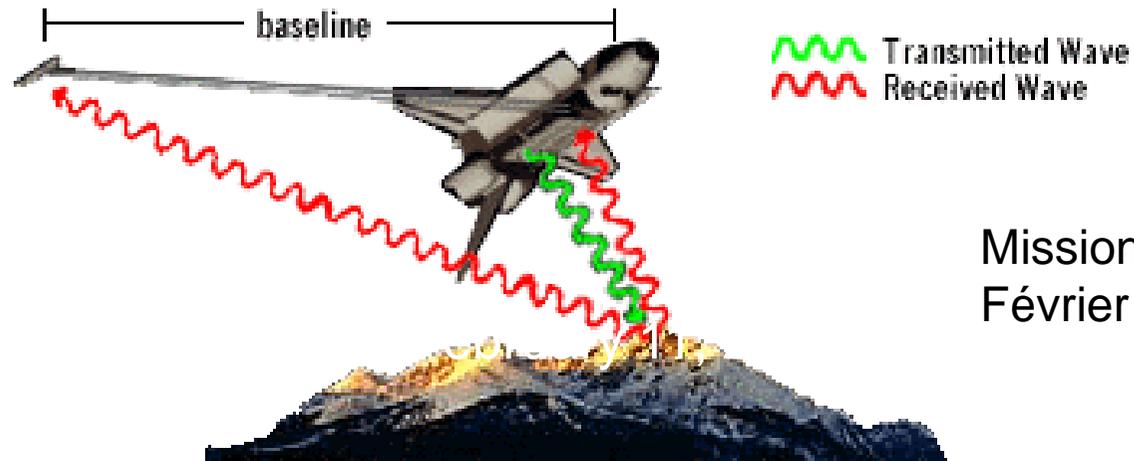
**Interférogramme
différentiel**



Franges de topographie

Mission SRTM

Shuttle Radar Topography Mission



Mission de 11 jours
Février 2000

- 2 antennes séparées par un mât de 60 m (baseline fixe)
- Interférométrie en bande C et X
- Données topographiques sur plus de 80% des terres émergées

SRTM 3 : résolution de trois secondes d'arc (93 m à l'Équateur)

SRTM 1 : résolution d'une seconde d'arc (31 m à l'équateur)

Mission TanDEM-X



Deux satellites jumeaux en formation étroite avec une distance contrôlée entre 250 et 500 m

WorldDEM

- maille de 12m sur 12,
- précision relative de 2 m
- précision absolue de 4 m.

Application : Mesure des déformation

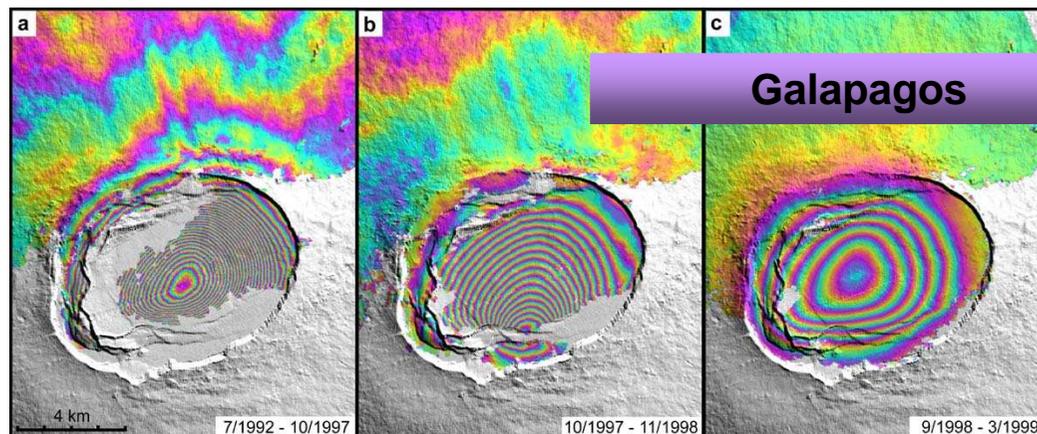
- Déformations d'édifices volcaniques

Mont Etna

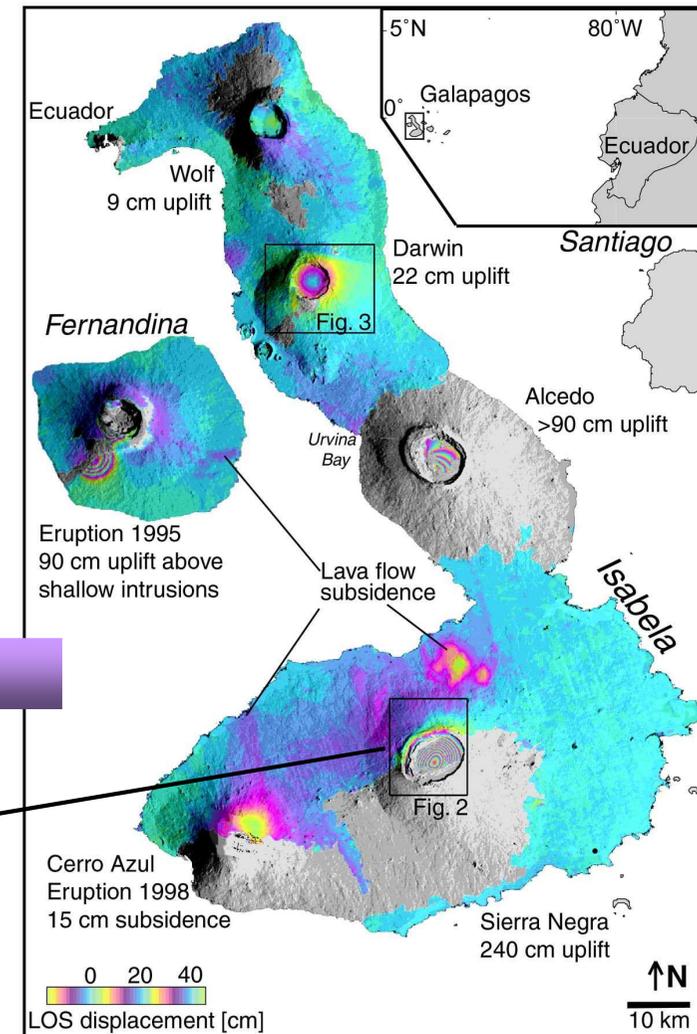


Massonnet et al., 1995

~11 cm de déflation en 385 jours

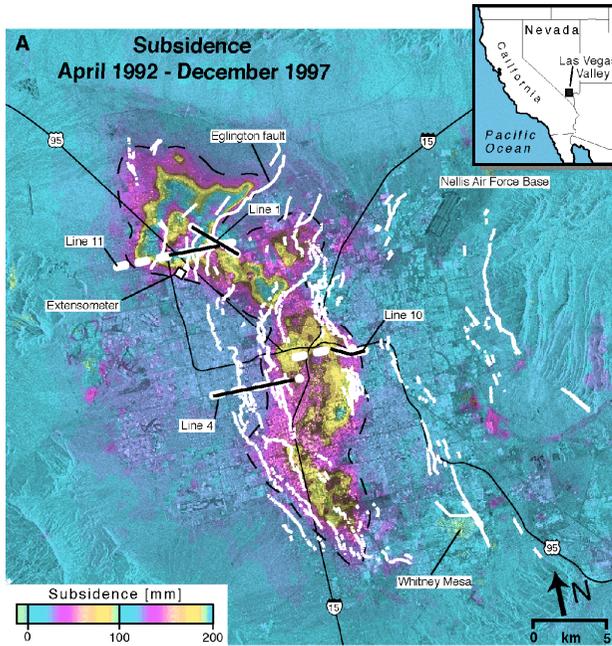


Galapagos

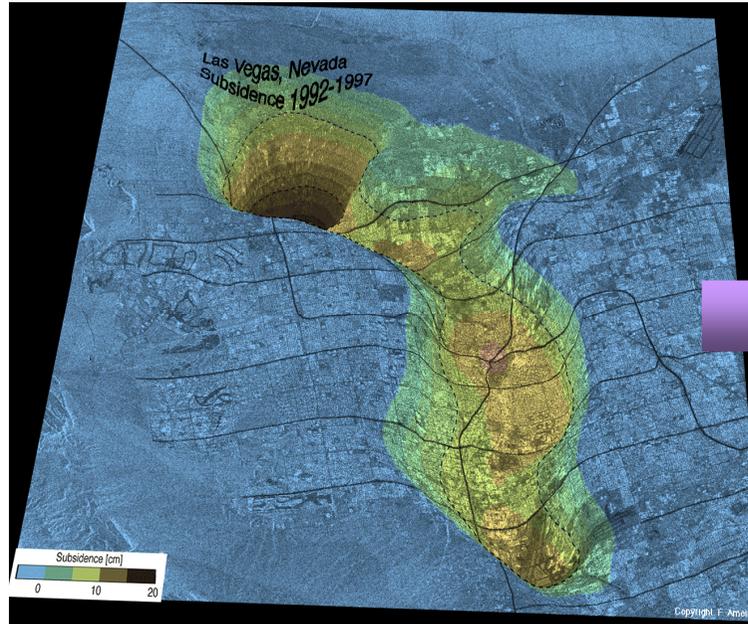


Amelung, Jonsson et al., 2000, Nature

■ Subsidences

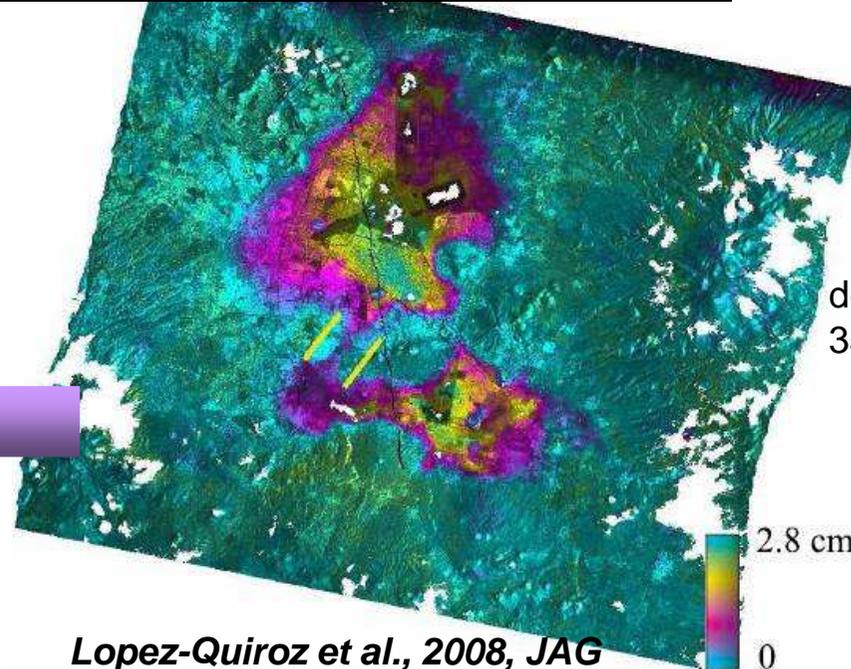


Amelung et al., 1999, Geology



Las Vegas

19 cm de subsidence en ~6 ans



Ville de Mexico

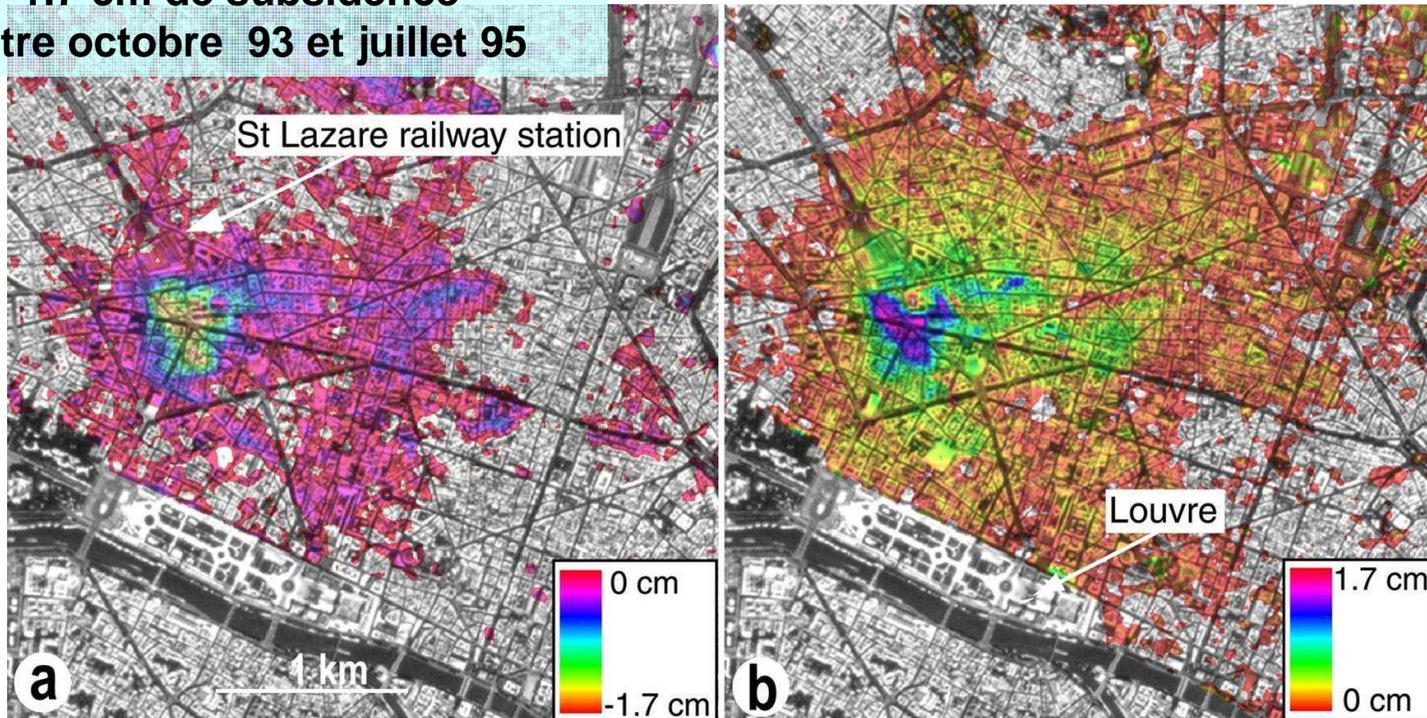
déformation moyenne sur 35 jours

32 cm/an

Lopez-Quiroz et al., 2008, JAG

Carte des déplacements verticaux mesurés par interférométrie différentielle

1.7 cm de subsidence
entre octobre 93 et juillet 95



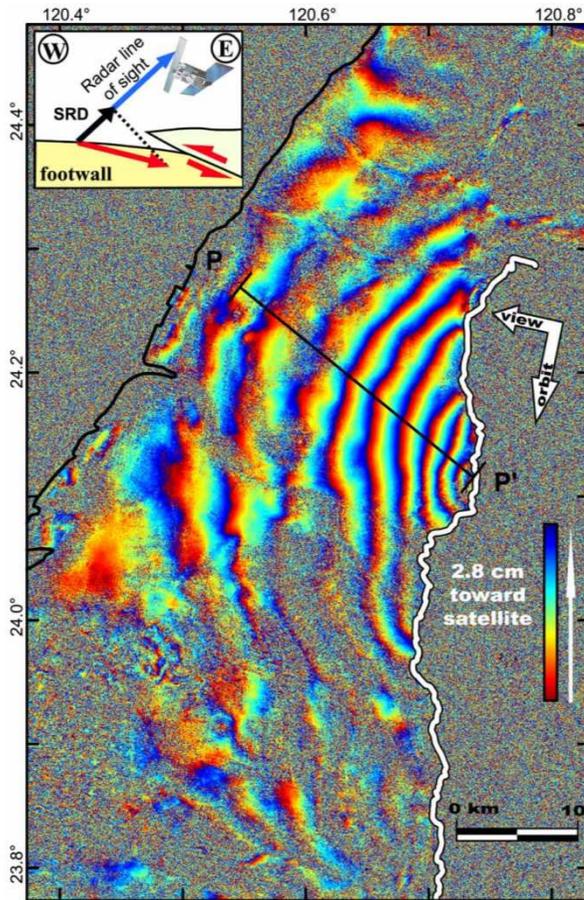
Subsidence

Remontée

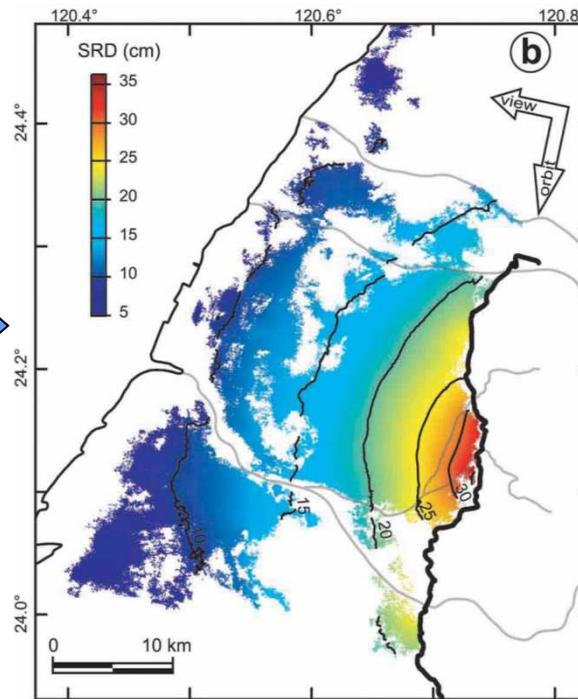
Déplacements verticaux liés aux pompages
Construction de la gare Haussmann St-Lazare (RER Eole)

Interférométrie - Limitations

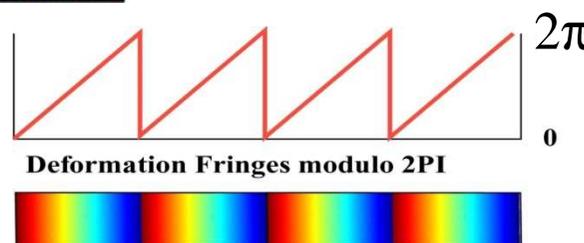
- **Mesure ambiguë** → **déroutement nécessaire (opération non triviale !)**



Pathier et al., 2003



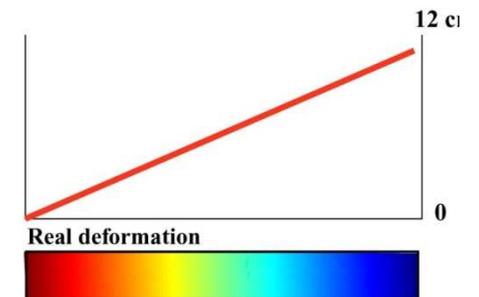
Carte de déplacements
co-sismiques
ChiChi earthquake



Déroutement



de phase



Interférométrie différentielle - Limitations

- **Mesure relative**
- **Accès à une seule composante du déplacement : projection du déplacement sur la ligne de visée**

$$d_{LV} = \vec{d} \cdot \vec{s}$$

Vecteur déplacement

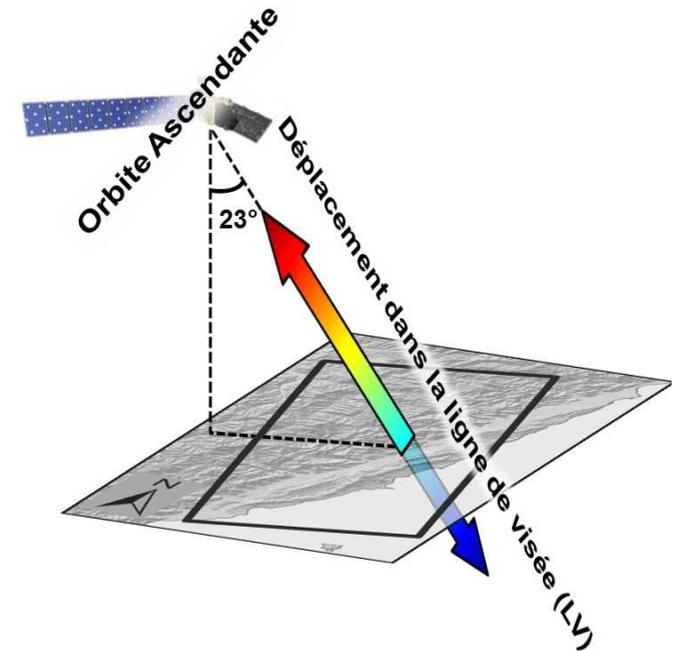
Vecteur sensibilité : vecteur unitaire pointant du sol vers le radar

ERS : orbite quasi polaire et faible angle d'incidence $\sim 23^\circ$

$$\vec{s} = \begin{bmatrix} s_{est} \\ s_{nord} \\ s_{zenith} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -0.38 \\ 0.08 \\ -0.92 \end{bmatrix}$$

le système est très sensible aux mouvements verticaux.

la sensibilité à tout déplacement N-S est extrêmement faible.



Limitations

cohérence

$$\gamma = \frac{\left| \sum_n z_1 z_2^* \right|}{\sqrt{\sum_n |z_1|^2 \sum_n |z_2|^2}}$$

mesure de la stabilité de la phase
entre les deux images radar

$$0 \leq \gamma \leq 1$$

▪ Perte de cohérence

➤ **géométrique** (résulte de variations dans la géométrie de prise de vue)

Le satellite ne passe pas au même endroit et ne voit pas le sol suivant le même angle de pointage

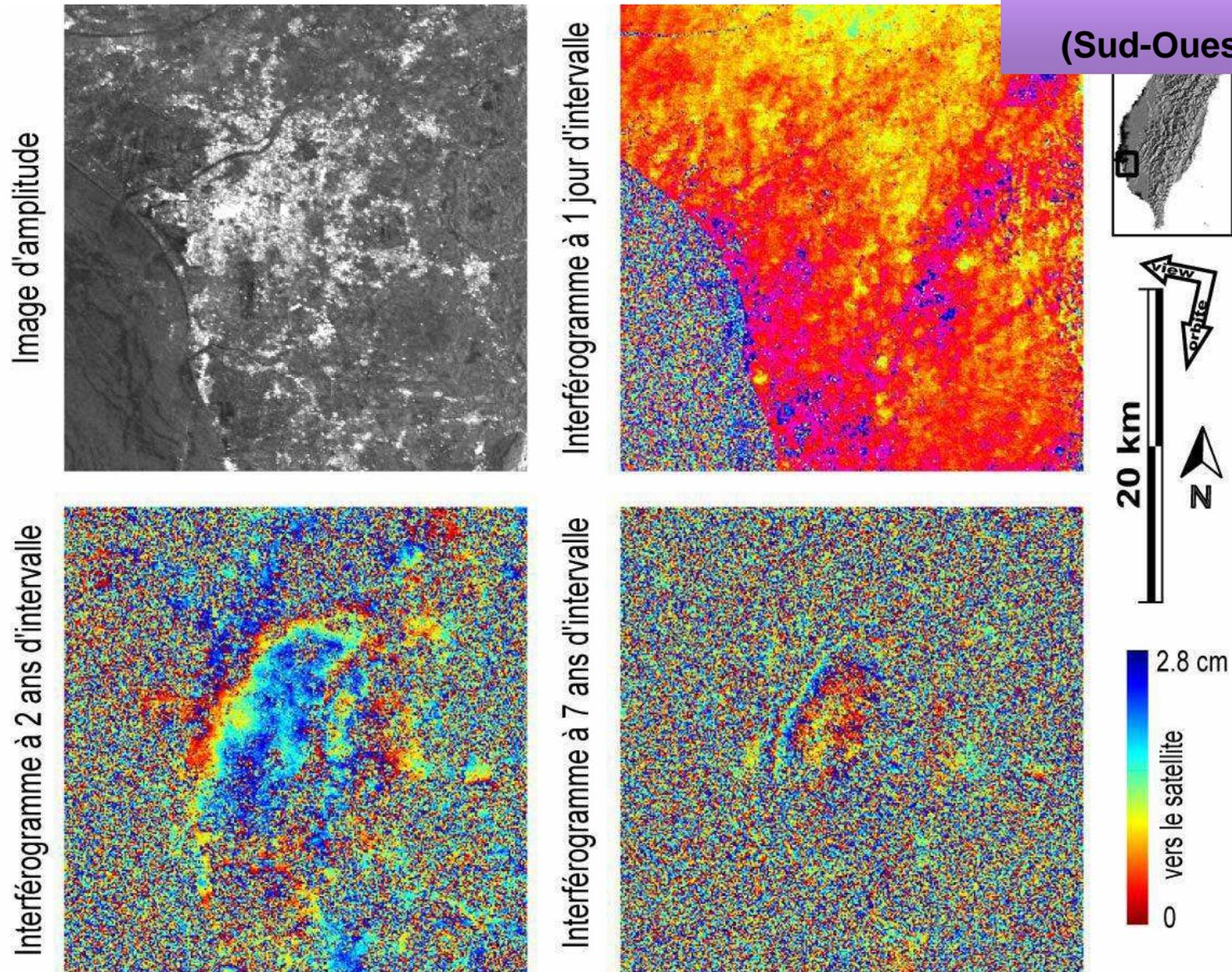
nécessité de prises de vue suffisamment proches
ligne de base $B_{\text{perp}} < B_{\text{lim}}$ (~1000m pour ERS)

➡ Sélection des couples et donc élimination de certaines images

➤ **temporelle** (liée aux modifications de l'état de surface entre les 2 acquisitions)

➡ état de surface stable entre les deux acquisitions

Perte de cohérence temporelle



Problème pour l'étude des déplacements lents

Interférométrie - Limitations

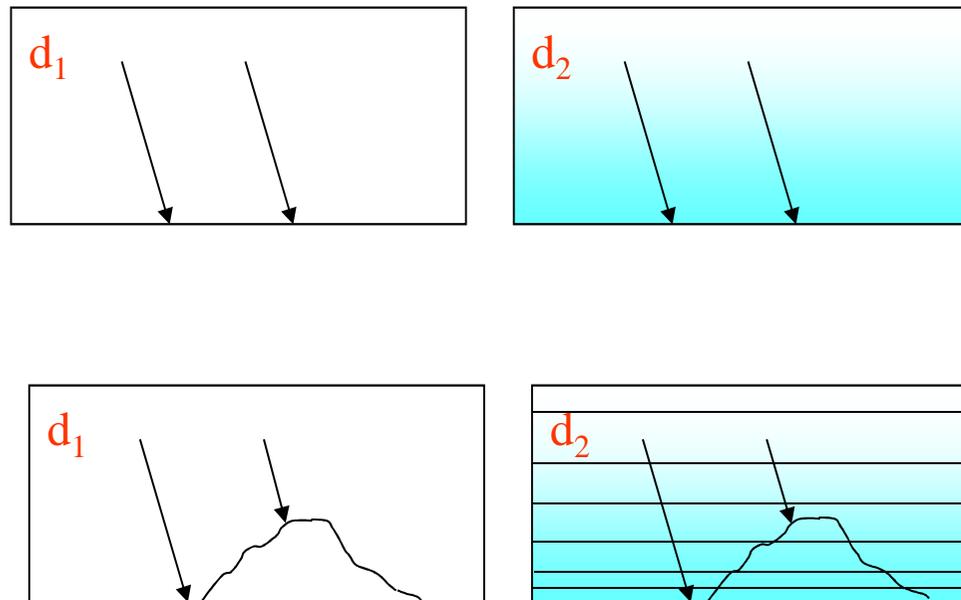
- **Perturbations atmosphériques (variations de l'atmosphère)**

Deux grands types de signaux atmosphériques sont identifiables sur les interférogrammes.

- ceux qui proviennent de perturbations globales de **l'atmosphère standard**, considérée homogène horizontalement et stratifiée verticalement (contributions verticalement stratifiées)
- ceux qui proviennent **d'hétérogénéités atmosphériques locales (contributions turbulentes)**, dûs aux mouvements de convection et aux turbulences dans l'atmosphère

Variations homogènes

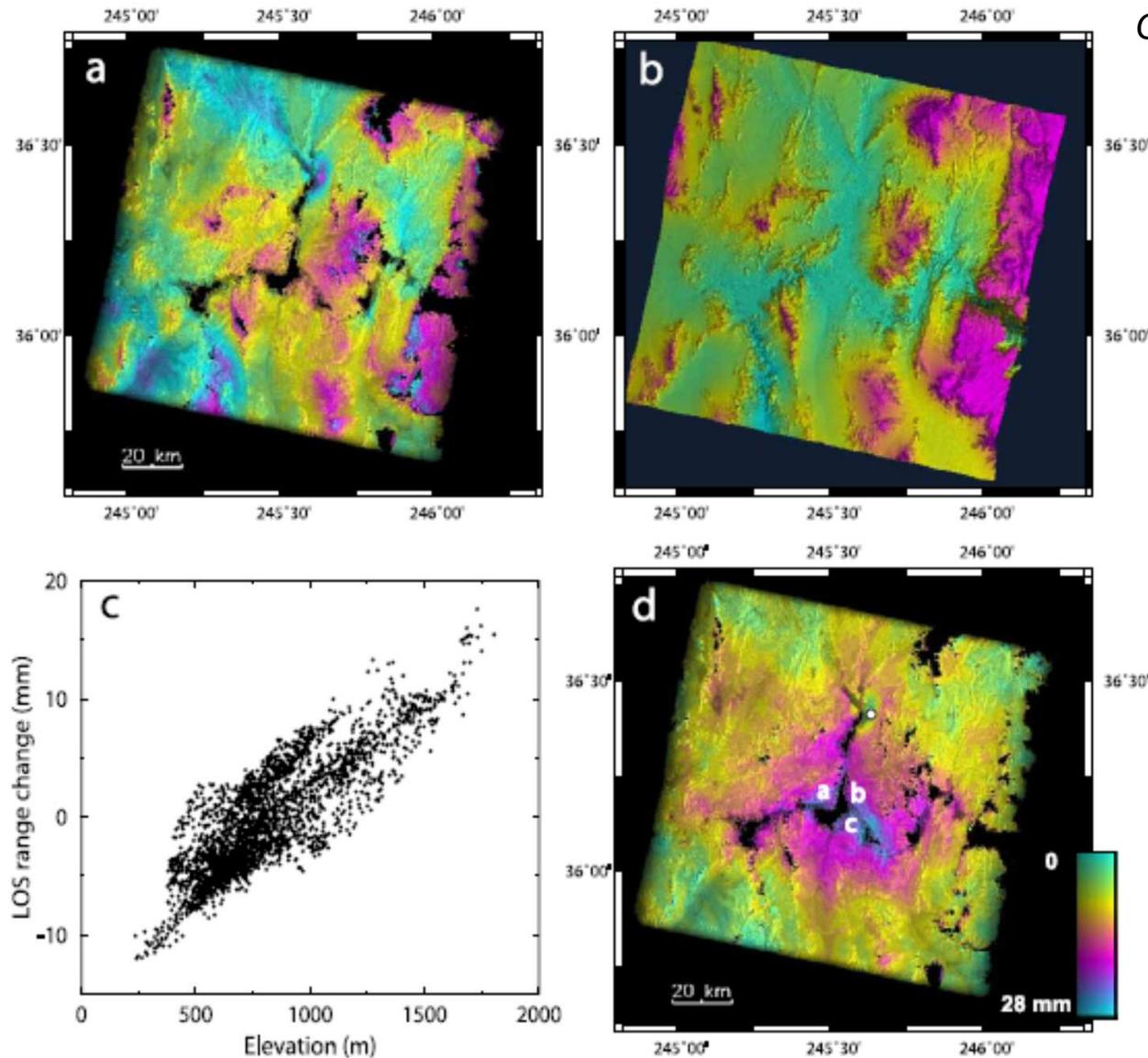
Atmosphère considérée comme horizontalement homogène
température, pression et humidité : fonctions de l'altitude



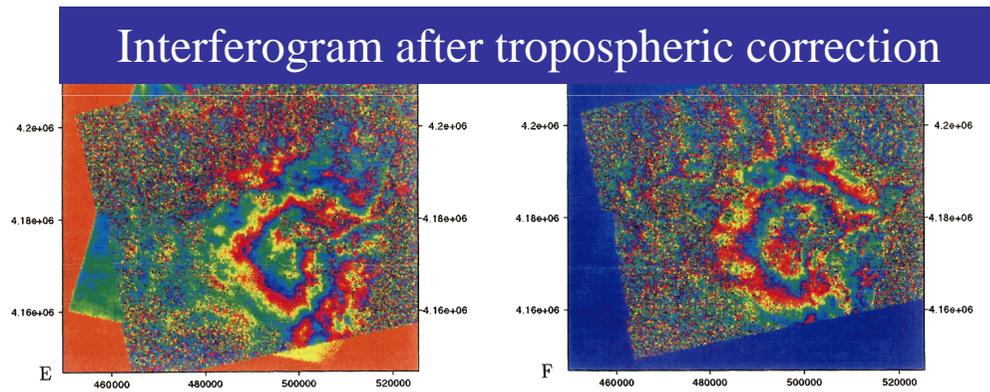
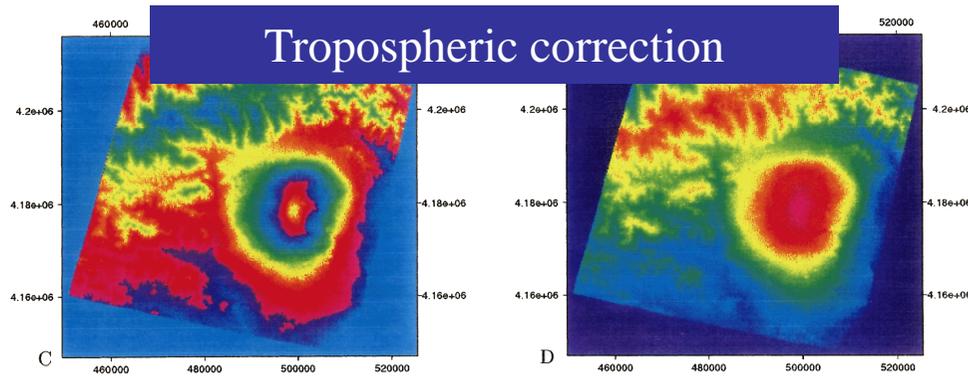
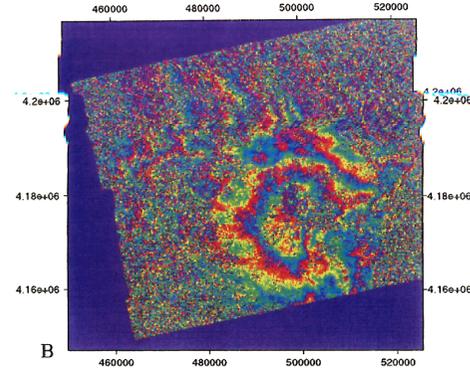
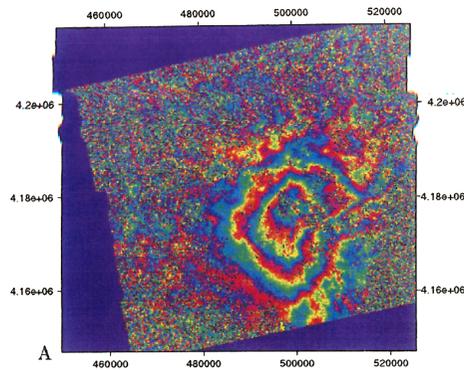
franges corrélées avec le relief

Limitations : Artefacts atmosphériques

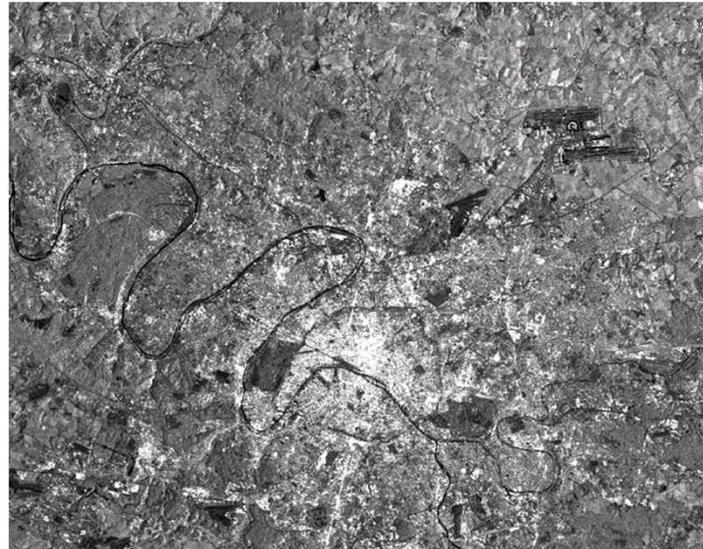
Cavalié et al. (2007)



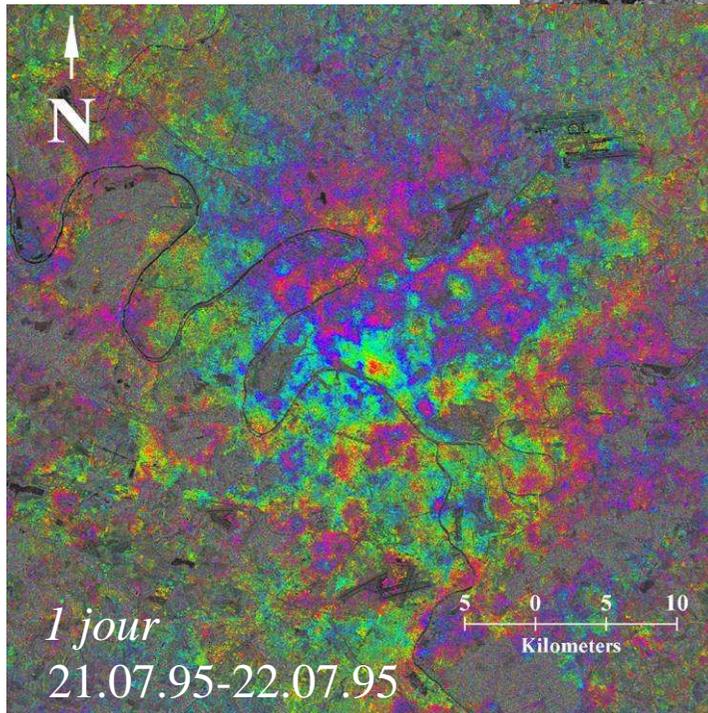
- Corrections empiriques (corrélation phase-topo)
- Modélisation du délai troposphérique stratifié à partir de données ERA-I



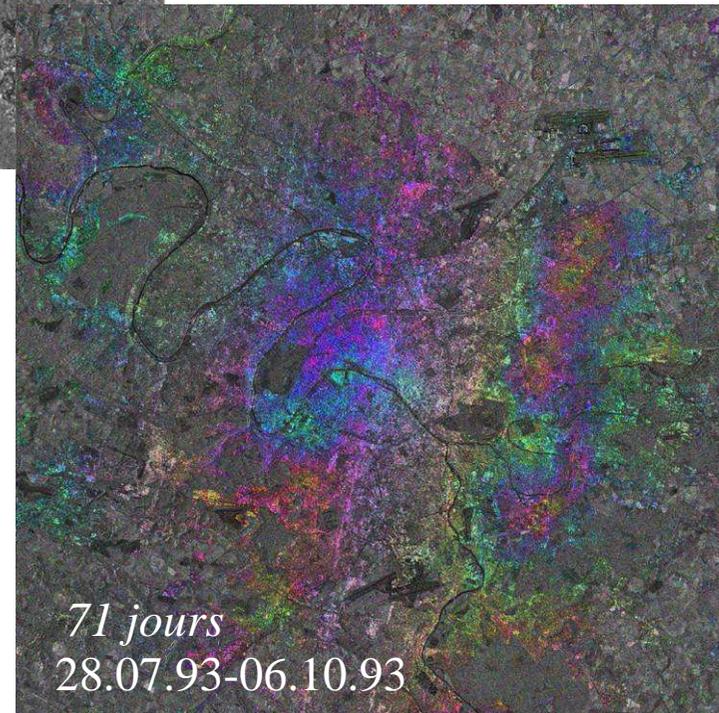
Contribution turbulente

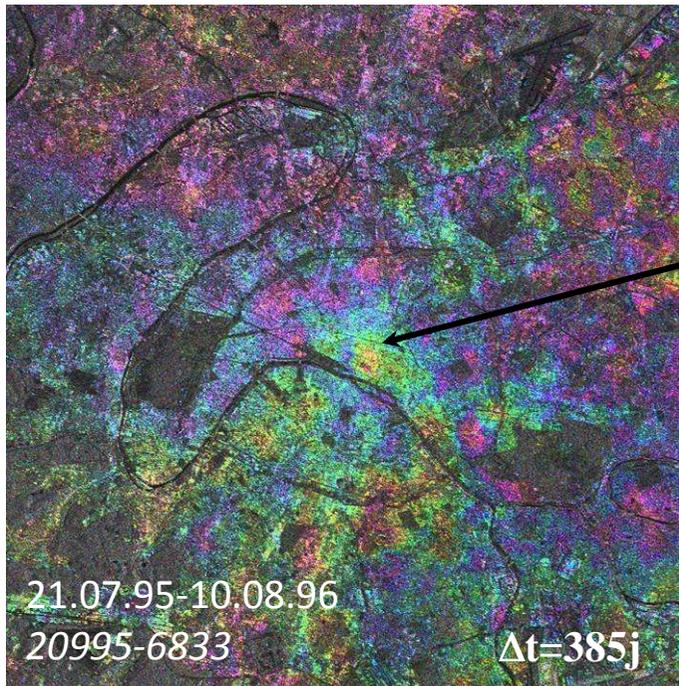
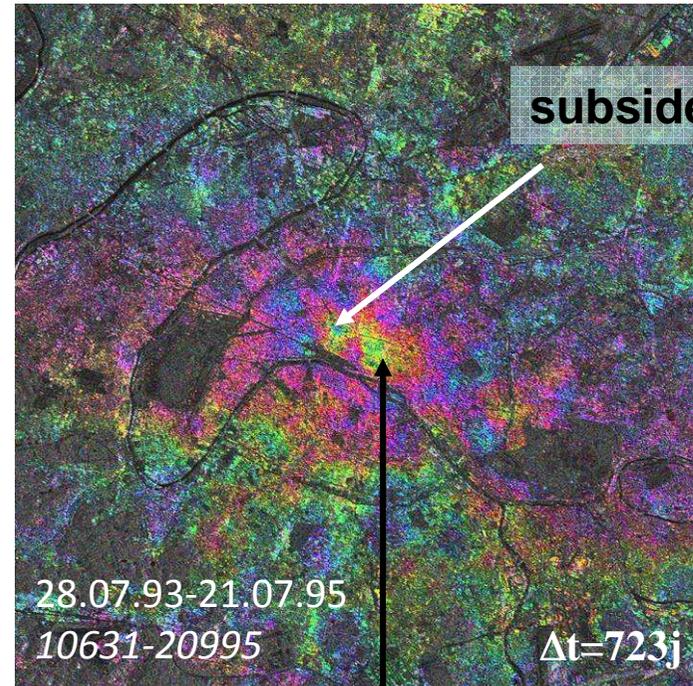
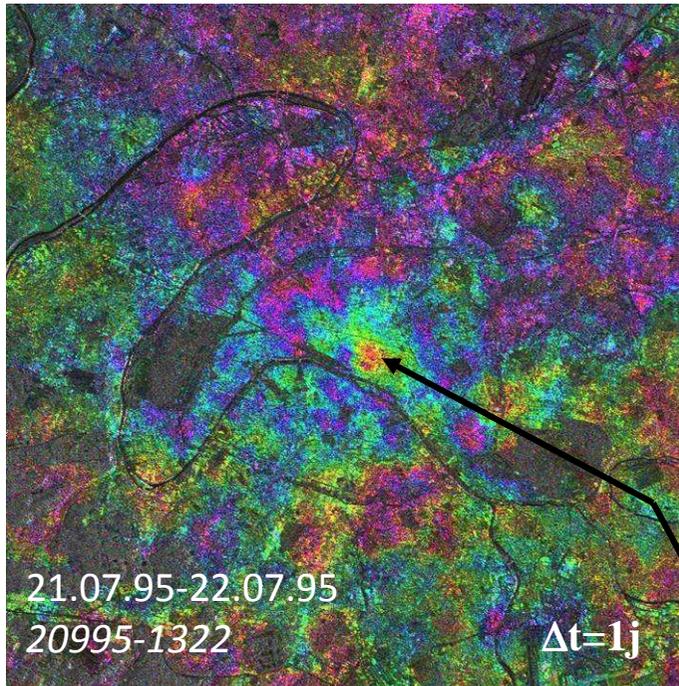


Paris



2.8 cm





Interférométrie multi-temporelle – MT-InSAR

Techniques interférométriques avancées

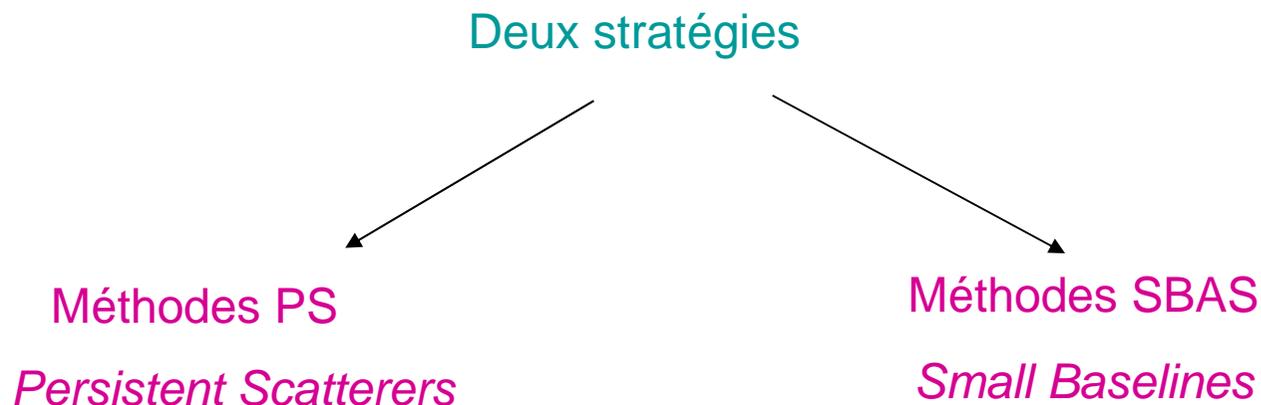
Techniques multi-images

Traitement **de séries d'images** afin de s'affranchir des limites de l'InSAR :
décorrélation temporelle et géométrique
hétérogénéités atmosphériques

Utilisation de la redondance d'information apportée par le traitement de plusieurs interférogrammes

Séparation du signal de déformation des autres composantes de phase

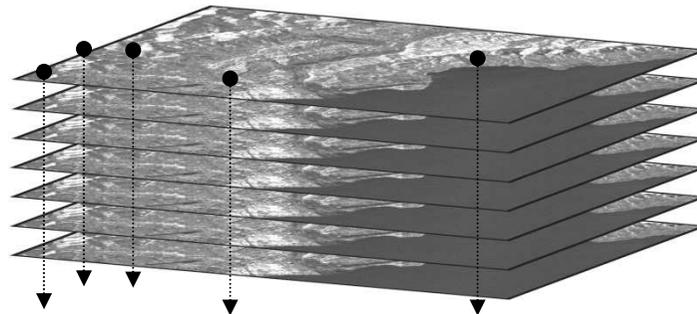
➡ Amélioration de la précision de mesure



Interférométrie sur diffuseurs permanents – PSInSAR

Permanent Scatterer technique™ (Ferretti et al. [2000, 2001])

Exploitation d'une **série temporelle d'images radar**



Pile d'images radar

Identification de **réflecteurs « particuliers » (PS)** dont la phase reste stable sur toute la **série temporelle**, dans le temps et pour toutes les configurations orbitales

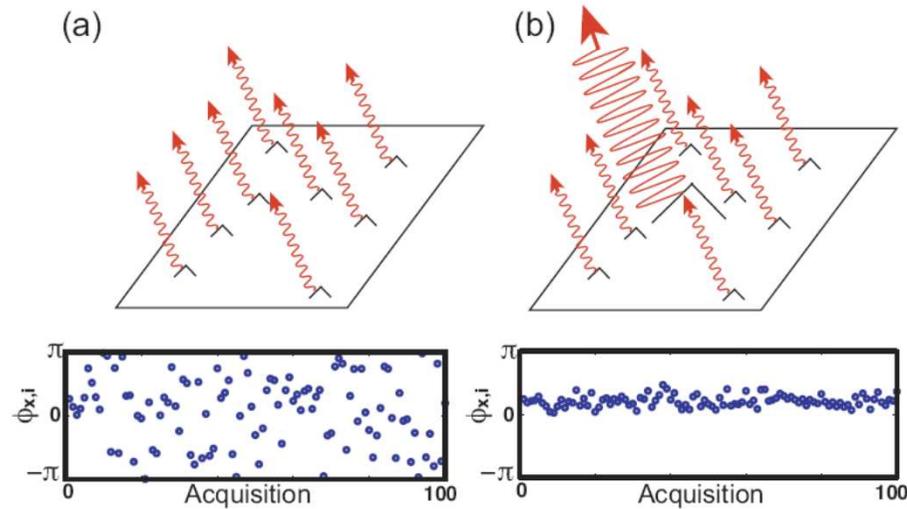
PS : ne sont pas (ou peu) affectés par la **décorrélation temporelle et géométrique**

Suivi de la phase de chacun de ces réflecteurs sur l'ensemble des acquisitions

Mesure des déplacements sur ces *cibles individuelles*

Interférométrie sur diffuseurs permanents – PSInSAR

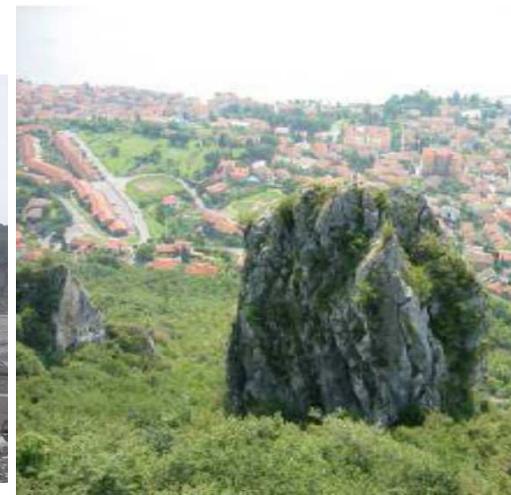
Taille du PS : inférieure à celle d'un pixel



Diffuseur dominant dans la cellule de résolution

(Hooper, 2003)

A quoi correspond un PS ?



Structures anthropiques, rocher..

Interférométrie sur diffuseurs permanents – PSInSAR

Si le réseau de PS est suffisamment dense (15-20 PS/km²) :

Séparation et estimation des différentes contributions de phase :

| | |
|-------------|---|
| topographie | } en prenant en compte leur différent comportement spatio-temporel |
| atmosphère | |
| déplacement | |

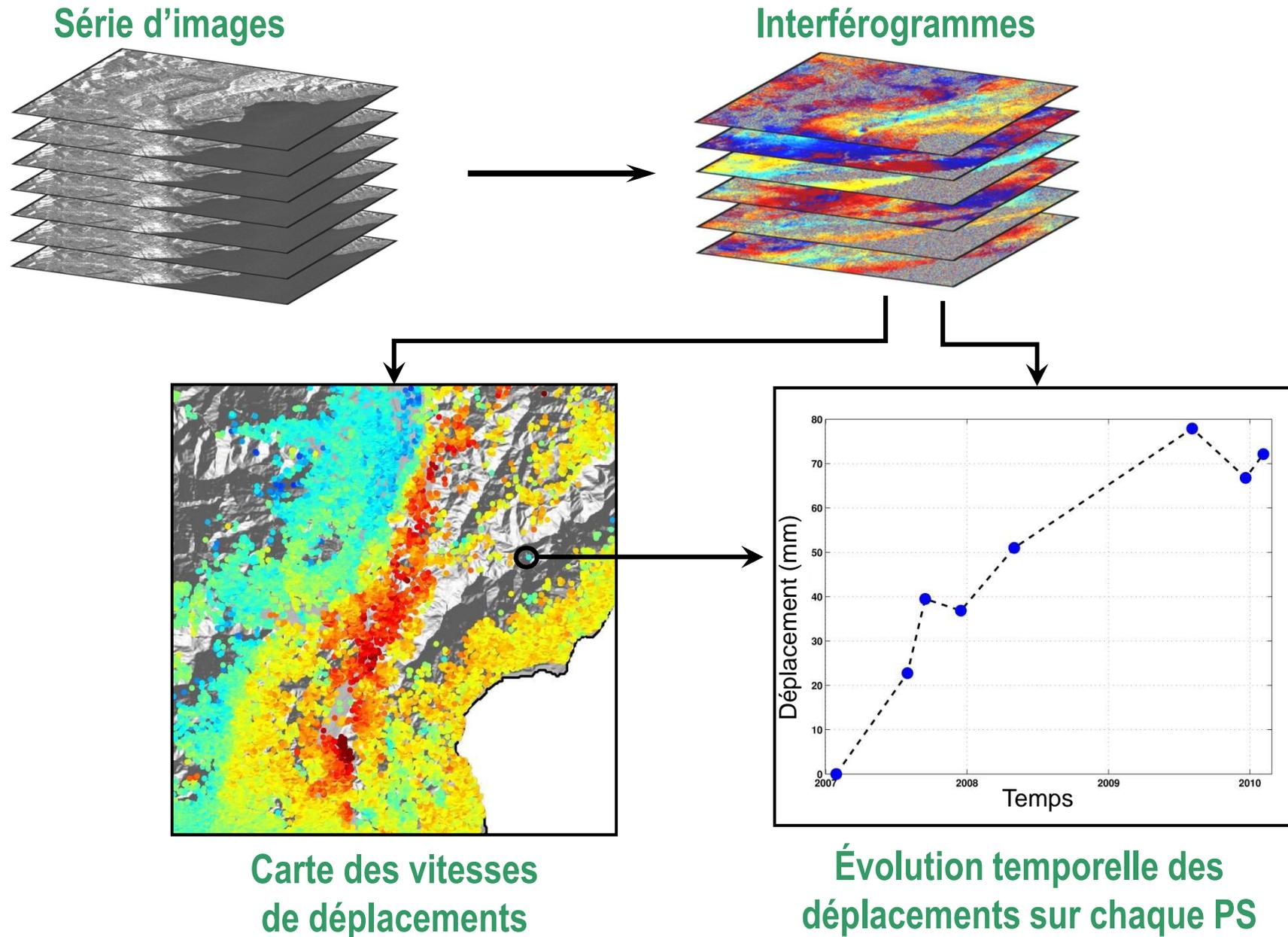
- artefacts atmosphériques : supposés être **décorrélés temporellement** corrélés spatialement
- modèle fonctionnel de déplacement a priori : souvent modèle linéaire dans le temps / ou hypothèse d'une déformation spatialement corrélée

Résultats : pour chaque PS

- ses coordonnées et son altitude précise
- sa vitesse de déplacement le long de la ligne de visée
- suivi de l'évolution du déplacement dans le temps

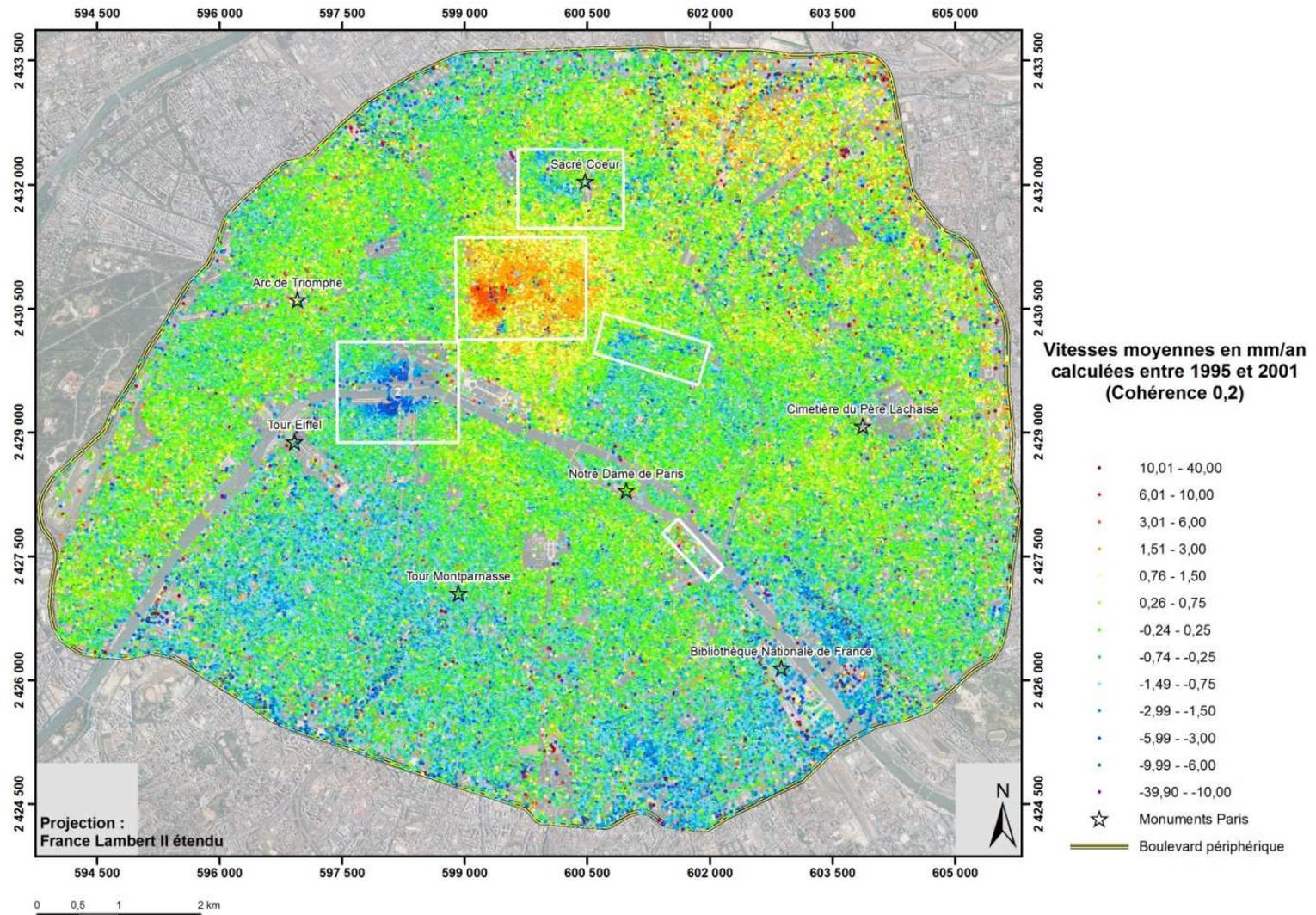
➡ Mesure de déplacements pour chaque date d'acquisition

Interférométrie sur diffuseurs permanents – PSInSAR

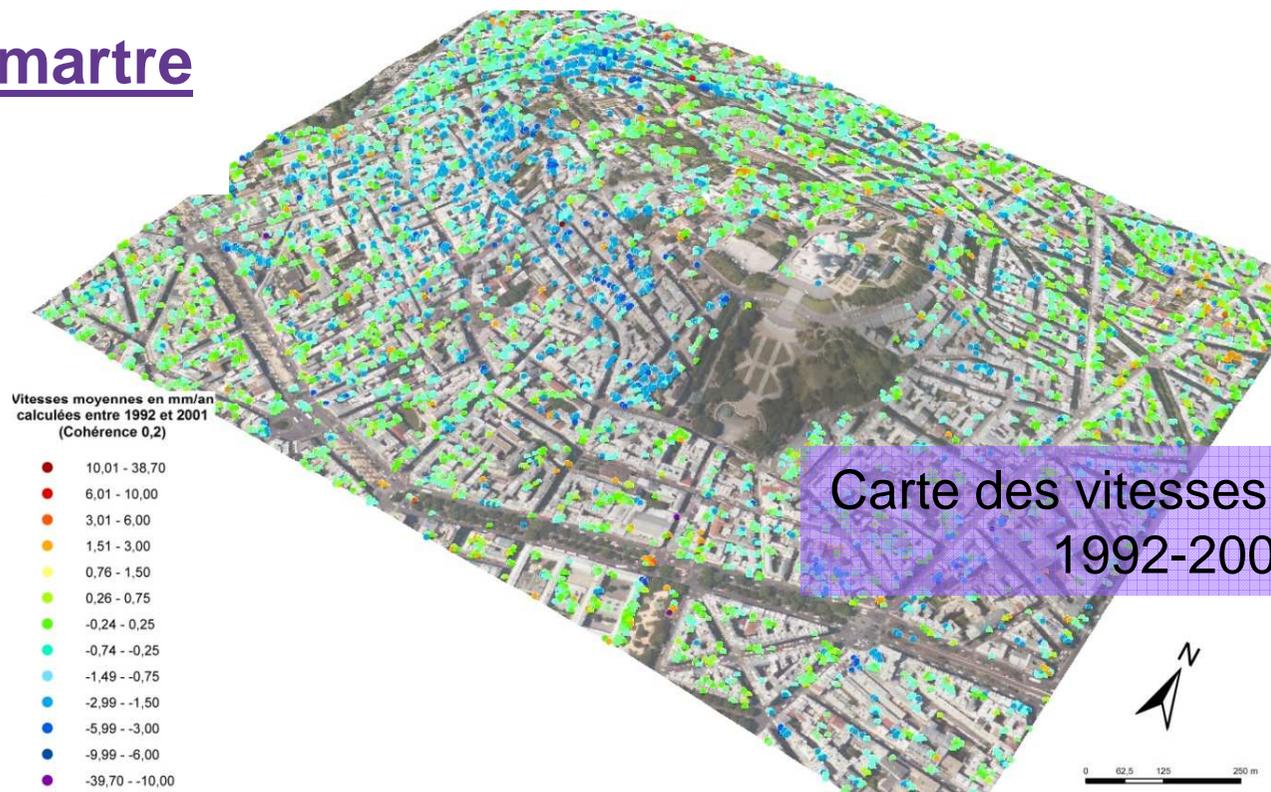


Suivi de petits déplacements de surface en milieu urbain : Exemple de la Ville de Paris

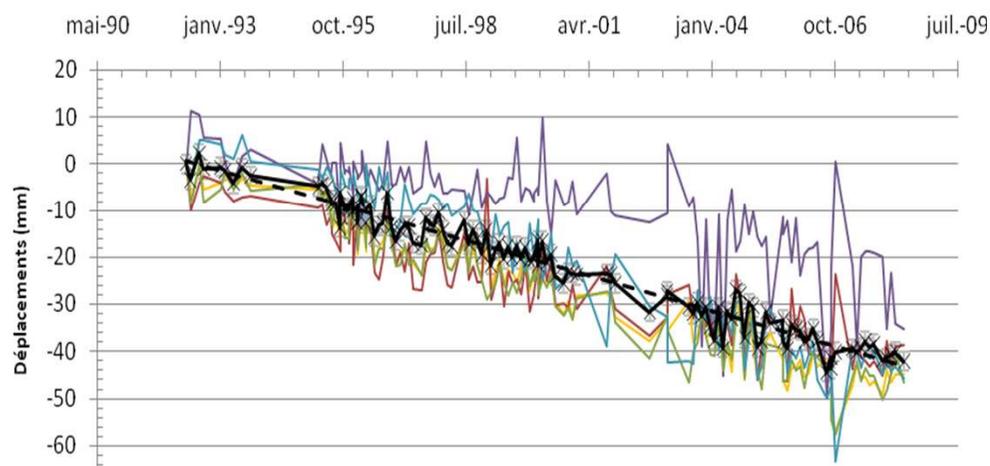
Carte des vitesses moyennes entre 1995 et 2001



Butte Montmartre

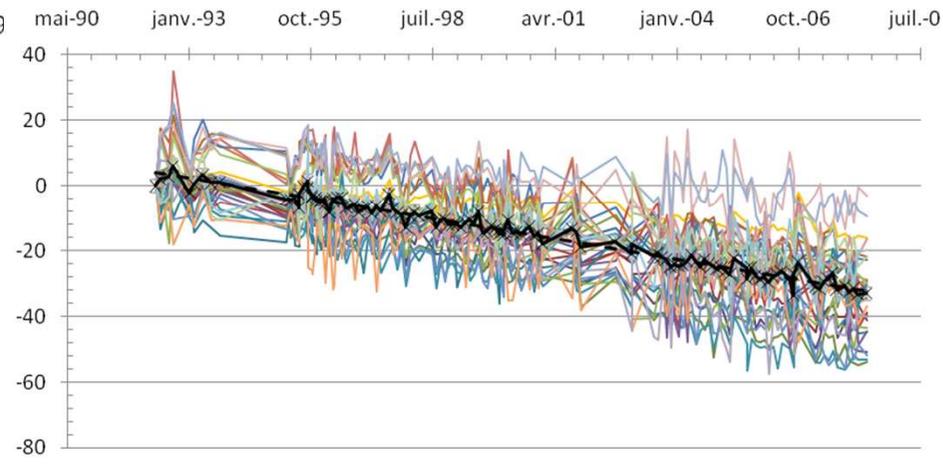


Pentes Ouest



déplacement moyen ~ -4 cm (LV) de 1992 à 2008

Pentes Sud sud-ouest



déplacement moyen ~ -3,5 cm (LV)

Interférométrie sur diffuseurs permanents – PSInSAR

Principaux avantages

- Utilisation de **cibles « naturelles »**
- Étude sur **zones d'étendue spatiale importante**
et **suivi très local**, à l'échelle du bâti.
- Possibilité de mesures sur **des points isolés**, même entourés de pixels incohérents
- Exploitation de toutes les images : **bonne résolution temporelle**.
- **Précision pluri-millimétrique** de la mesure de déplacement
- Une **haute densité** de points de mesure sur certaines régions
En milieu urbain, la densité de PS jusqu'à 1000 PS/km²
Mais en milieu non urbain, peut chuter drastiquement !!

Bien adapté au milieu urbain à forts enjeux

Conditions d'utilisation et limites :

- Nécessite un nombre d'images important (> 15)
- Une densité de points suffisante (15 à 20 points/km²)
Technique inopérante sur certaines zones
- Réseau de points « opportunistes »
- Problème pour l'estimation des déplacements fortement non linéaires

Techniques Petites lignes de base - Small baseline technique

Berardino et al., 2002

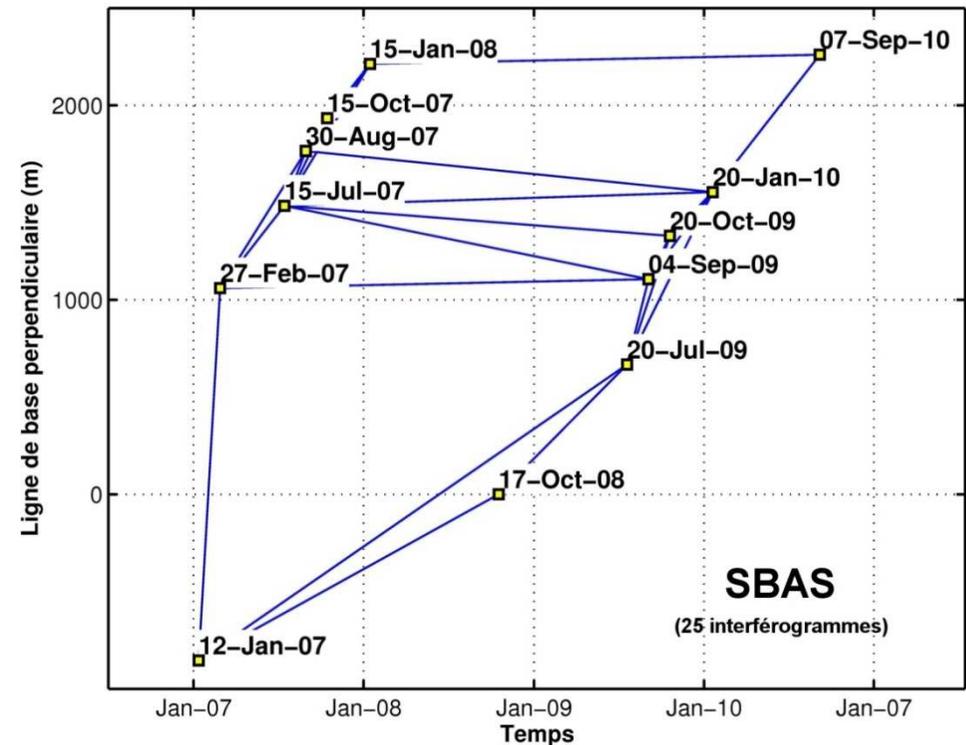
Série d'interférogrammes différentiels choisis

Maximiser la cohérence (minimiser la décorrélation, temporelle et géométrique)

Sélection de paires d'images radar avec des petites lignes de base B_t et B_{perp}

Interférogrammes entre couple d'images

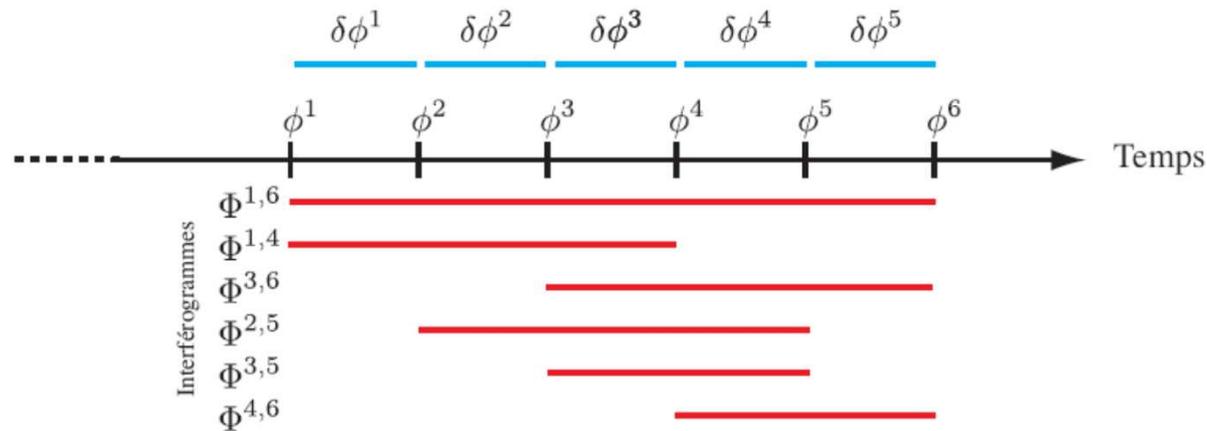
- séparés par un faible intervalle de temps
- avec une prise de vue proche



- Déroulement des interférogrammes
- Inversion de la série d'interférogrammes (méthode des moindres carrés)

Ajustement au sens des moindres carrés des interférogrammes (Usai (2001,2003))

en entrée : y ensemble des N interférogrammes **déroulés**
 formés à partir de M images acquises aux dates d_1, \dots, d_M .



Phase interférométrique d'un pixel $\Phi^{i,j}$

$$\Phi^{i,j} = \phi^j - \phi^i$$

ϕ^i et ϕ^j sont les phases aux acquisitions i et j .

Système linéaire à résoudre :

$$y = Ax$$

y contient les valeurs de phase de chaque interférogramme, pour un même pixel,
et x l'évolution temporelle de la phase de ce pixel

$$A = \begin{pmatrix} 0 & -1 & 0 & \dots & 1 & 0 \\ & & \dots & & & \\ -1 & 0 & \dots & 1 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

Chaque ligne correspond à un interférogramme
Chaque colonne à une date d'acquisition

$$\hat{x} = (A^t A)^{-1} A^t y$$

➡ Séries temporelles de la déformation

