

# Suivi de subsidences urbaines par interférométrie radar

Bénédicte Fruneau

Université Paris-Est Marne-la-Vallée  
Laboratoire MATIS, IGN

# Mesure des déplacements de surface

---

la détection et la mesure précise des déplacements du sol  
=  
un enjeu majeur

- Déformations de surface, d'origine naturelle ou anthropique
  - ✓ impact évident sur la **sécurité des personnes**,
  - ✓ dommages potentiels sur les **infrastructures**, ouvrages d'art, bâtiments, différents réseaux de canalisations (gaz, eau, électricité, communication...)
  - ✓ coûts induits importants.

- Nécessité de disposer de techniques performantes de mesure des déplacements de surface, avec une précision élevée,

- Suivi de ces déformations spatialement et temporellement

 une meilleure connaissance et compréhension des phénomènes de déformation, de leur évolution possible et de leur prévision éventuelle.

# Différentes méthodes de mesure des déplacements

---

## ▪ Outils classiques : GPS et Nivellement

- Grande précision, mais :
- étendue spatiale limitée
  - densité spatiale limitée
  - faible densité temporelle de la mesure
  - coût élevé lié à l'implantation d'un réseau de cible

*Bien reconnus par les autorités en charge de la gestion des risques !*

## ▪ Interférométrie différentielle radar - 1991 : lancement d'ERS-1 (bande C - $\lambda=5,6$ cm)

- Une cartographie **étendue** et **dense** des déplacements.
- pas d'instrumentation in-situ

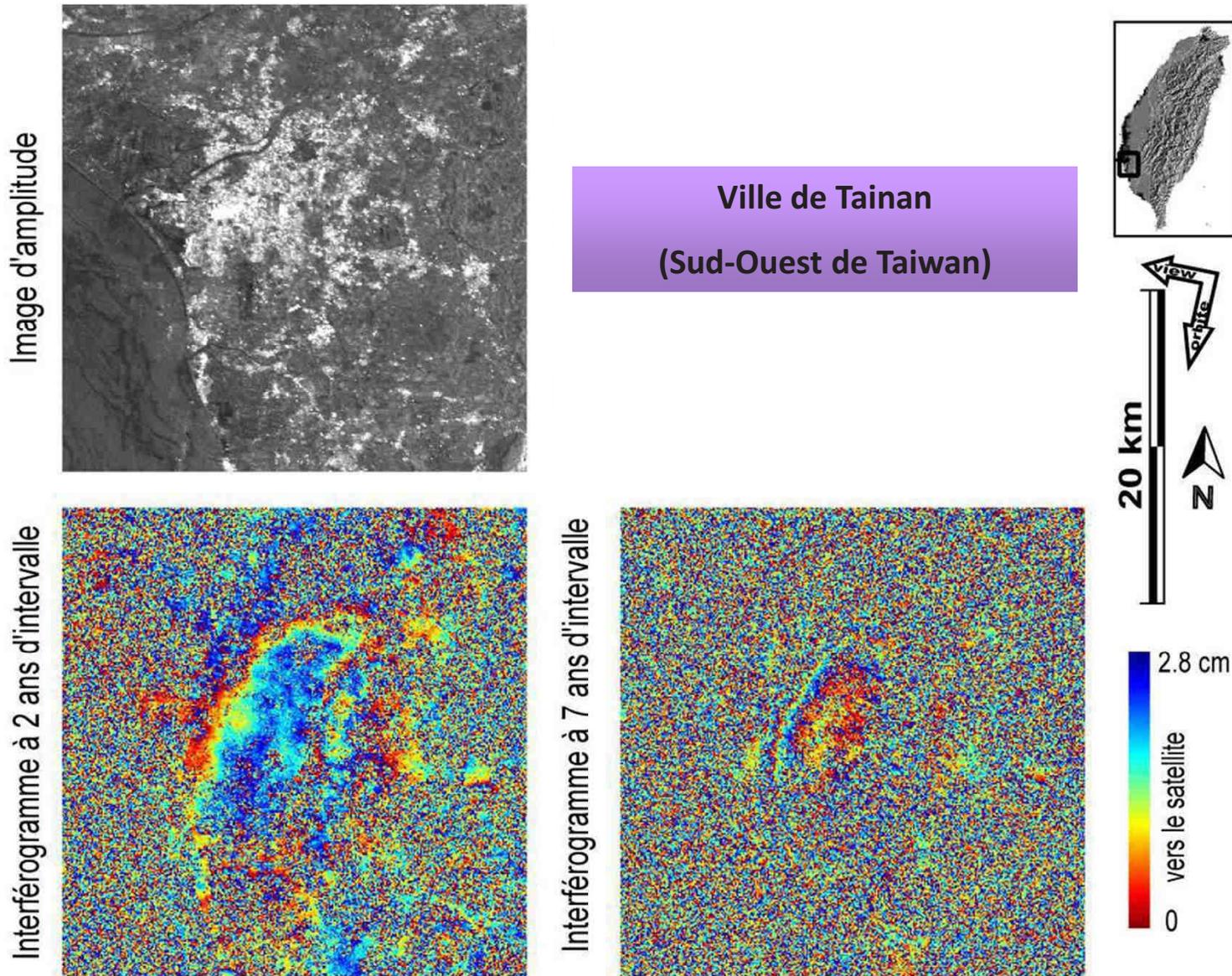
## ▪ Techniques interférométriques « avancées », multi-images

**2000 : Interférométrie PS (Technique des réflecteurs persistants)**  
*(Persistent Scatterers)*

- Mesures ponctuelles sur certains réflecteurs, les PS
- Amélioration de la précision des mesures  déplacements ténus et lents
- Capacité de suivre en temps l'évolution des déformations

# Milieu urbain : contexte particulier

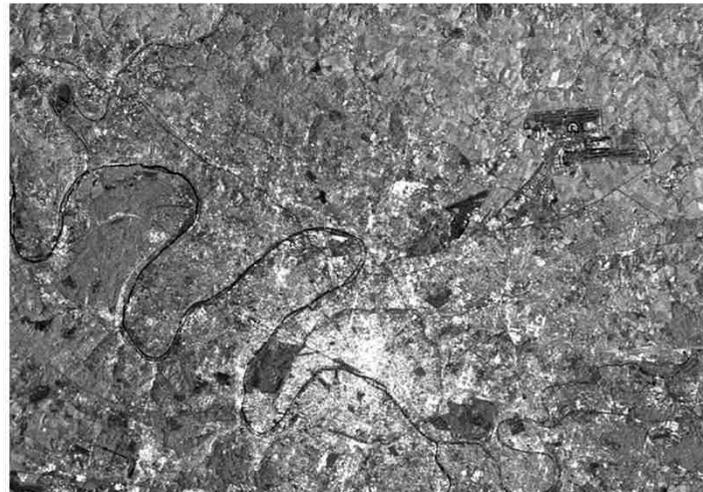
- **Cohérence temporelle** : élevée en milieu urbain, préservée sur plusieurs années



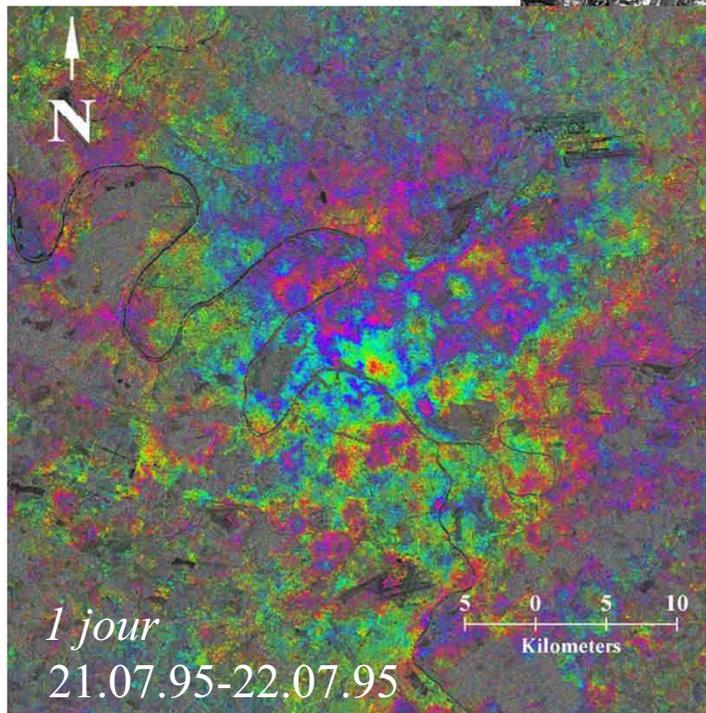
Possibilité d'étude de déplacements lents en milieu urbain

# Milieu urbain : contexte particulier

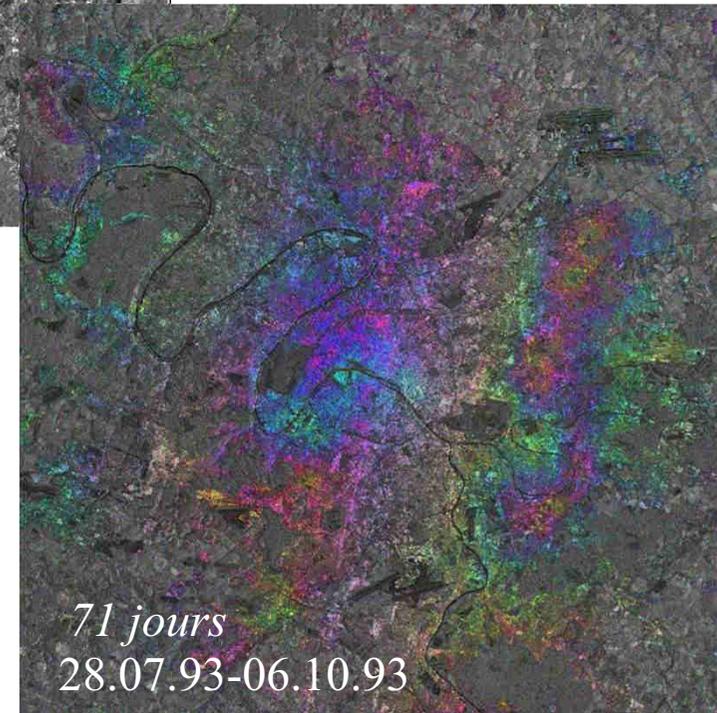
## Perturbations atmosphériques (variations de l'atmosphère)

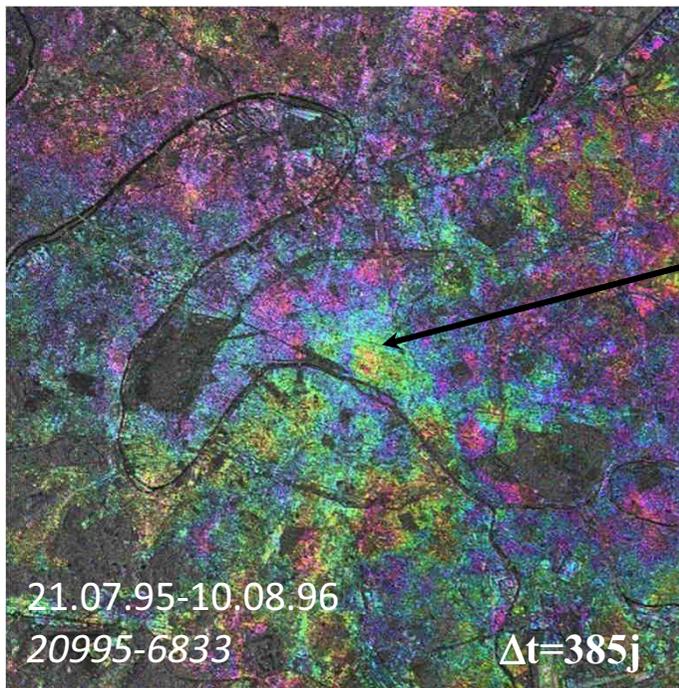
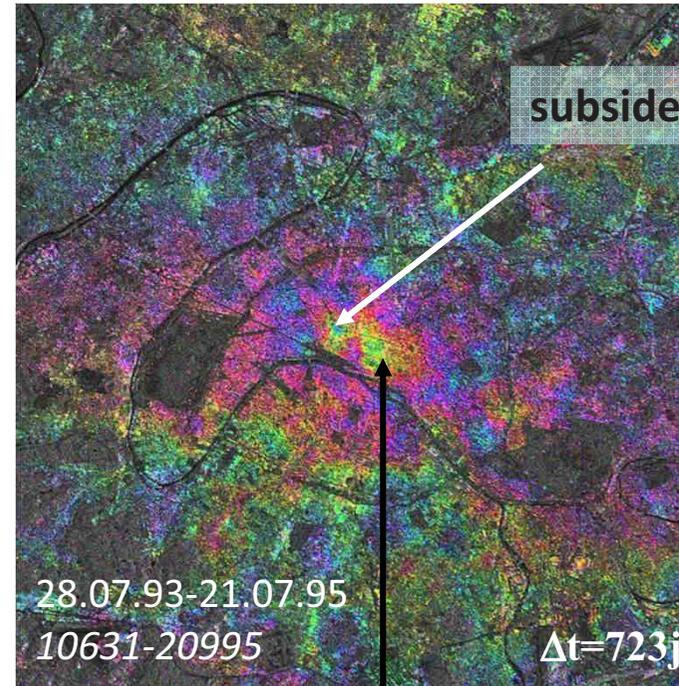
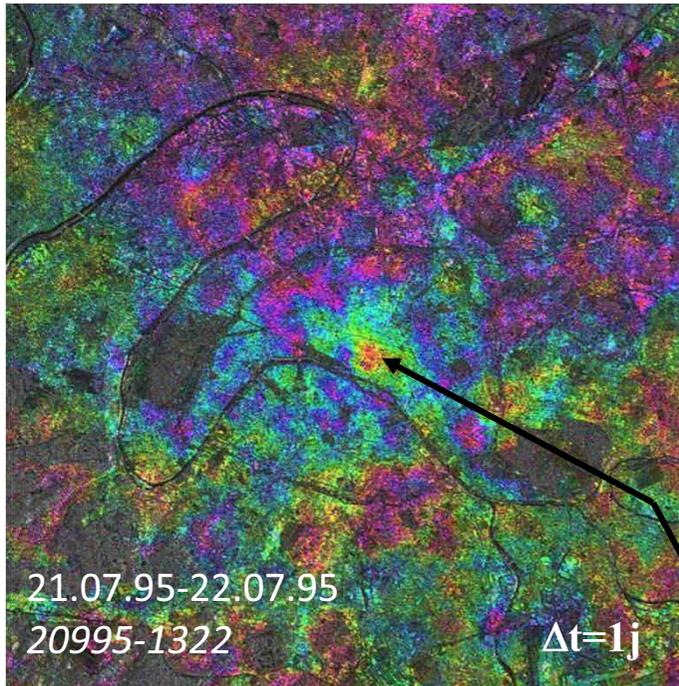


Paris

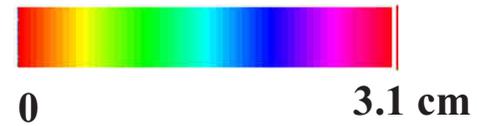


2.8 cm





Artefact lié à l'image 21.07.95



# Interférométrie différentielle conventionnelle

---

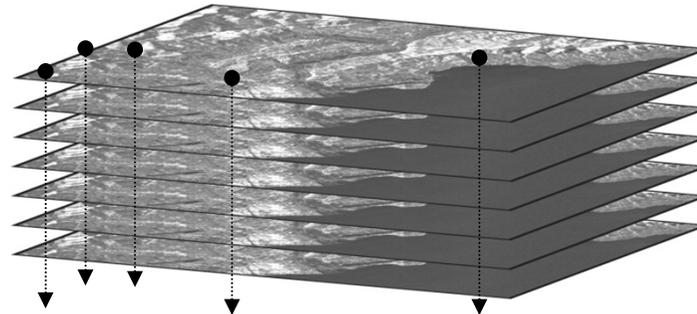
Même si : artefacts atmosphériques : réelle limitation selon l'amplitude et l'étendue spatiale du phénomène

L'interférométrie différentielle conventionnelle reste **bien adaptée** au milieu urbain et à la détection de déplacements lents

**Fin des années 90 :**

Etudes de déformation en zone urbaine basées sur l'analyse de quelques couples d'images seulement

Exploitation d'une **série temporelle 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



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

Mesure des déplacements sur ces *cibles individuelles*

## En milieu urbain

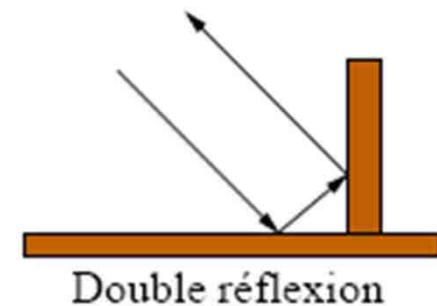
Grand nombre d'objets fortement rétrodiffusants.

Pléthore de PS

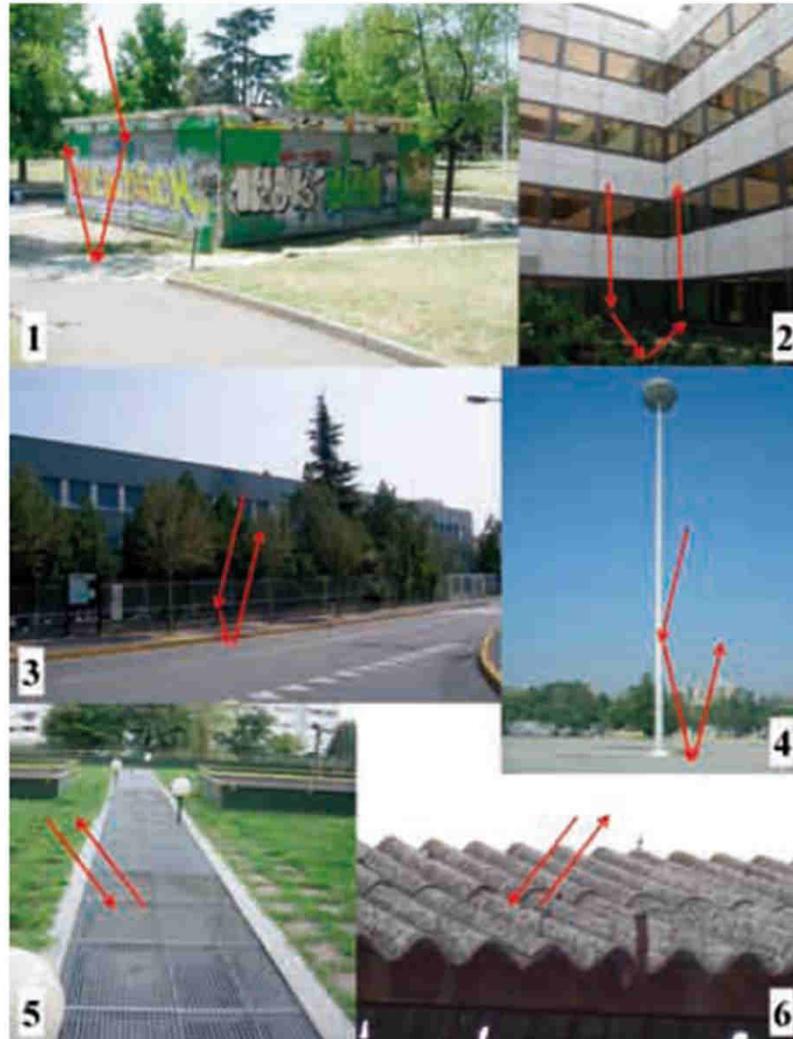
Objets manufacturés : caractérisés par des réponses spécifiques et fortes induites par leur géométrie.

**Phénomènes de rétrodiffusion spécifiques** : forts réflecteurs isolés et multiples réflexions

- Les réflecteurs ponctuels isolés : les petits objets métalliques, lampadaires, éléments métalliques sur les toits de bâtiments
- Les effets **dièdres** (ou coins réflecteurs) : coin mur-sol de bâtiments, escaliers, fenêtres de bâtiments, cheminées sur les toits, etc.
- Les effets **trièdres** : triple réflexions entre trois surfaces
- Les **multiples réflexions** : phénomènes de multi-trajets



## Typologie des PS



Dièdre, trièdre, poteau,  
pylône, toit, barrière, grille  
métallique...

## Interférométrie PS en milieu urbain

Interférométrie PS **particulièrement bien adaptée** au milieu urbain

Réseau de PS en général très dense ( $\gg 15\text{-}20 \text{ PS/km}^2$ ) :

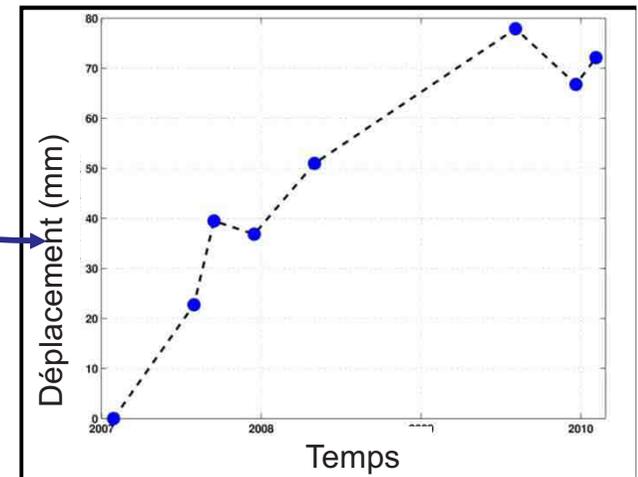
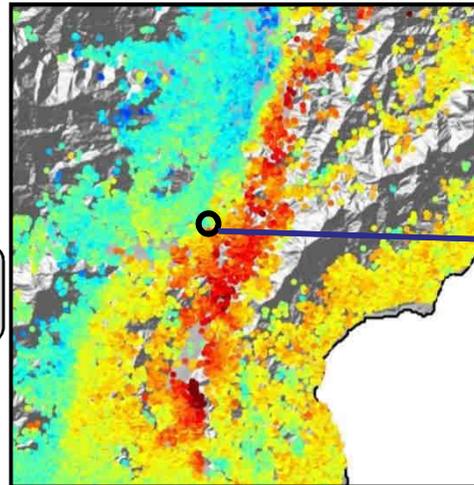
Séparation et estimation des différentes contributions de phase :

résidu topographique

atmosphère

déplacement

Carte des vitesses de déplacements



Évolution temporelle des déplacements sur chaque PS

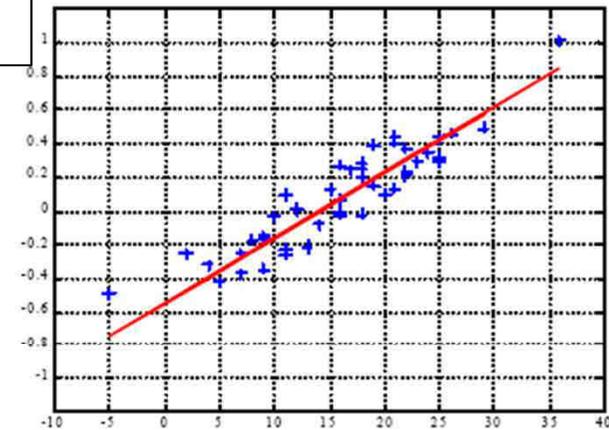
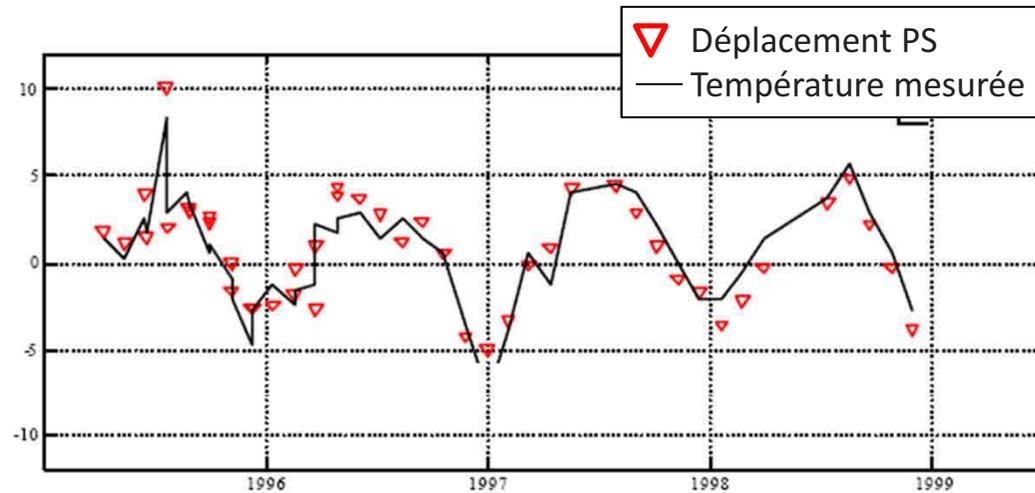
**Résultats** : pour chaque PS

- 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

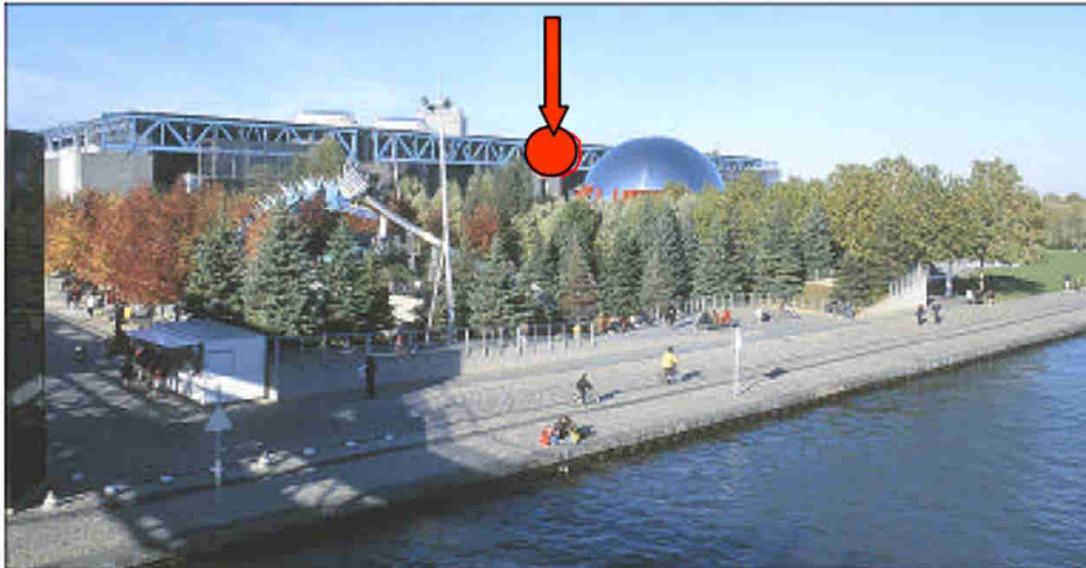
Mesure de déplacements pour chaque date d'acquisition

## Premier exemple : La Villette

Série temporelle du mouvement calculée à partir de 64 images ERS



Corrélation : 0,92



Structure métallique affectée par de la dilatation liée aux variations de la température externe

*Ferretti et al., 2000*

# Interférométrie PS

---

## 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 : **résolution temporelle** liée au cycle de répétitivité du capteur
- **Précision pluri-millimétrique** de la mesure de déplacement
- Une **haute densité** de points de mesure en milieu urbain

Données ERS et Envisat : densité de PS jusqu'à 1000 PS/km<sup>2</sup>

**Bien adaptée au milieu urbain à forts enjeux**

Couverture spatiale et densité spatiale de mesure inégalée

## Interférométrie PS

---

### Conditions d'utilisation et limites :

- Nécessite un nombre d'images important ( $> 10$ )

Précision : dépend du nombre d'images et de la densité de PS

- Mesure relative
- Accès à une seule composante : le long de la ligne de visée (LV ou Line of Sight)
- Réseau de points « opportunistes »
- Problème pour l'estimation des déplacements fortement non linéaires

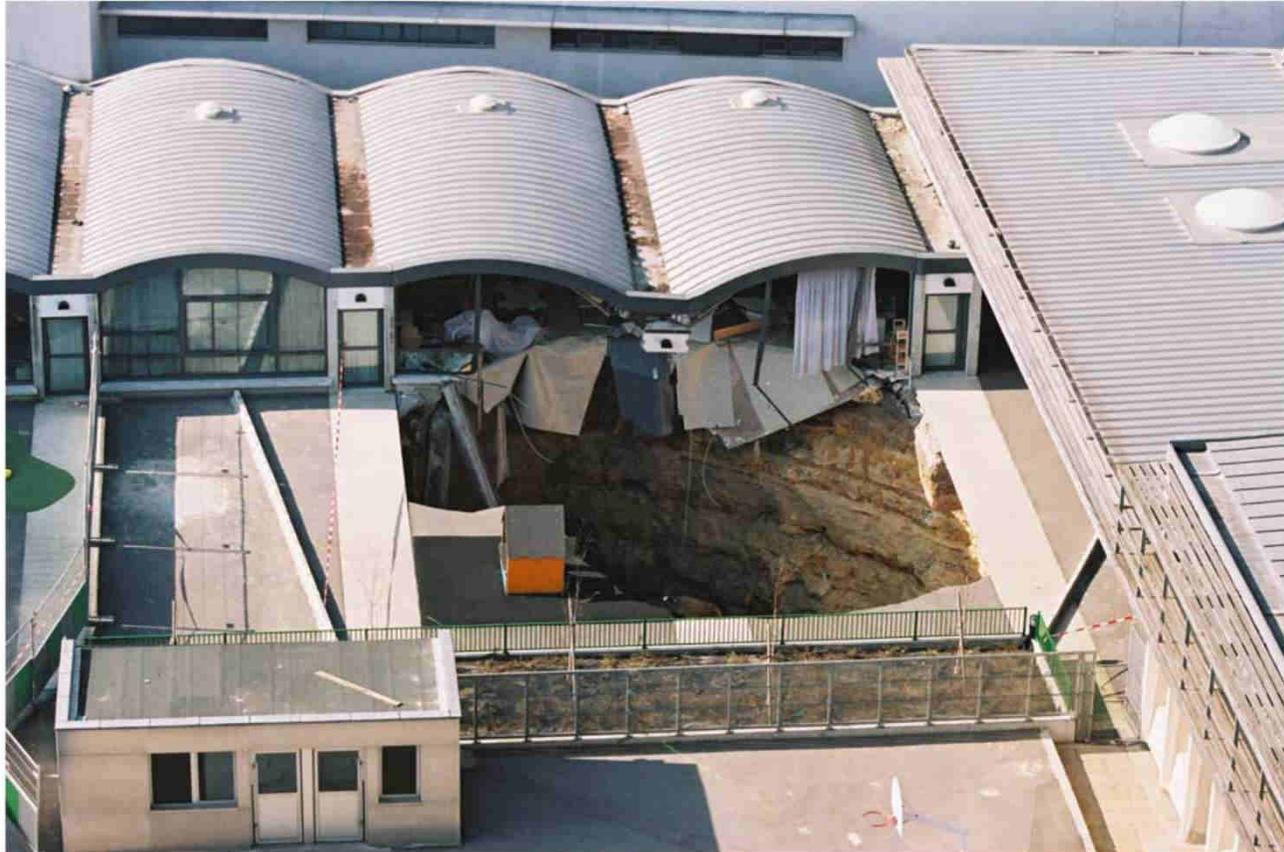
## Mouvements de surface en milieu urbain

---

- Mouvements d'origine tectonique, volcanique
- Les affaissements par compaction ou consolidation de terrains compressibles
- Les affaissements et effondrements :
  - par dissolution de matériaux – dissolution du gypse
  - liés à l'extraction de solides (carrières souterraines)
  - résultants de pompages (rabattement de nappes)
  - dus aux travaux souterrains de génie civil
- Le retrait gonflement des sols argileux
- Les mouvements de pente : glissements ; fluage ; coulées boueuses

**Phénomènes d'amplitudes et extensions spatiales diverses**

Fontis dans la cour de l'école maternelle Auguste Perret (Paris 13<sup>ième</sup>)  
nuit du 14 au 15 février 2003



© RATP PIL - Didier Dupuy

560n10 - 21/02/2003

chantier de prolongation de la ligne de métro Météor

# Mouvements de surface en milieu urbain

---

## Phénomènes de grande ampleur

**Pompages**

**Compaction de dépôts compressibles**

Etendue spatiale importante : plusieurs dizaines à centaines de km<sup>2</sup>

Vitesses : de qq mm/an - jusqu'à 50 cm/an

## Phénomènes localisés

- **Travaux souterrains :**
  - ✓ creusement de tunnels
  - ✓ Pompages...
- **Effondrements**
- **Autres ...**

Vitesses : cm à < 1mm/an

## Phénomènes de grande ampleur

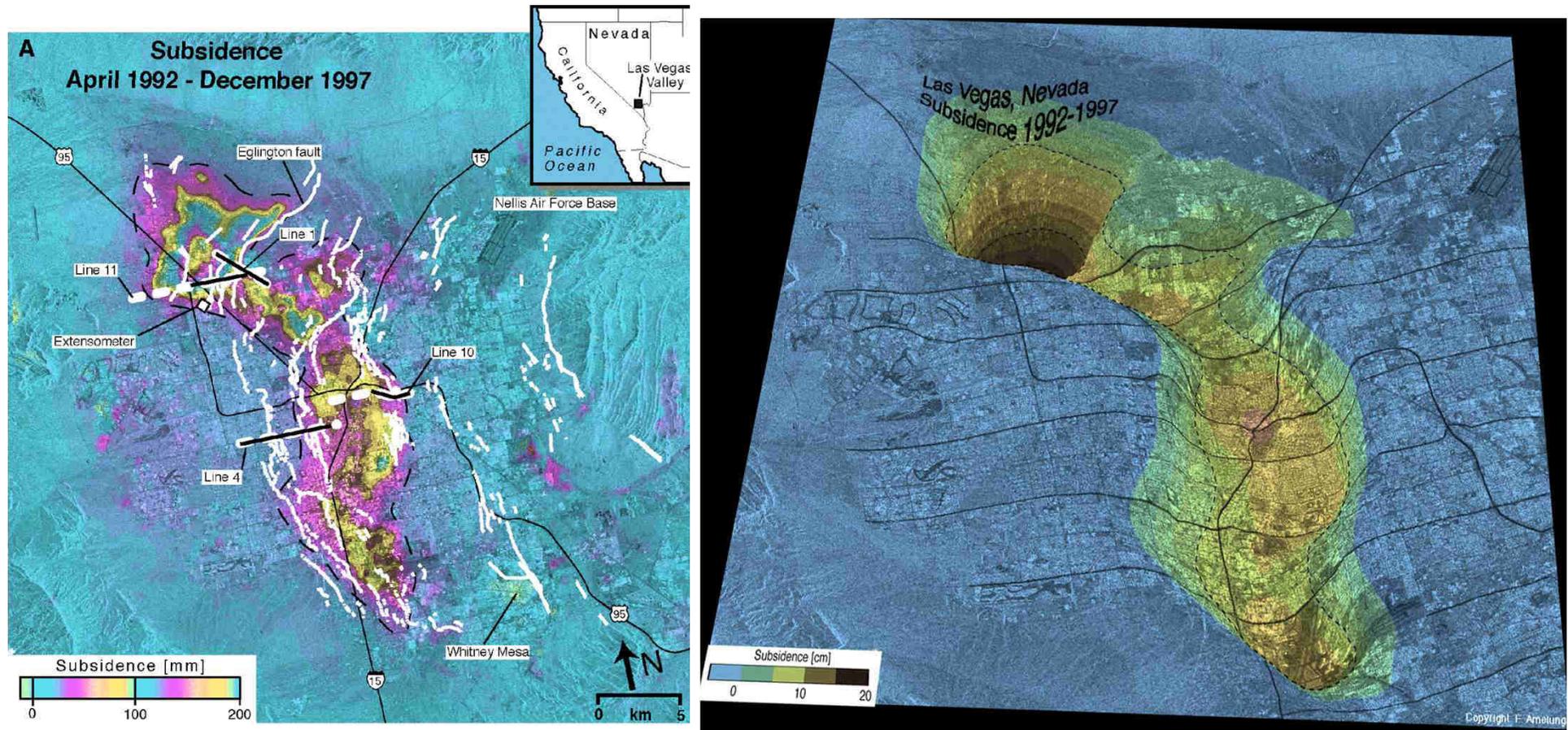
Pour l'essentiel : résultent de compaction d'aquifère dus aux pompages

Exploitation des ressources en eau pour les besoins de la population

Plus de 150 villes au monde : problèmes sérieux de subsidence liée à une exploitation excessive en eau

Déplacements verticaux : millimétriques à métriques  
Sur plusieurs années  
Souvent sur des zones étendues

Interférométrie utilisée pour ces problématiques de ressources en eau  
modélisation des écoulements d'eau,  
estimation des propriétés hydrauliques des aquifères,  
gestion des ressources en eau

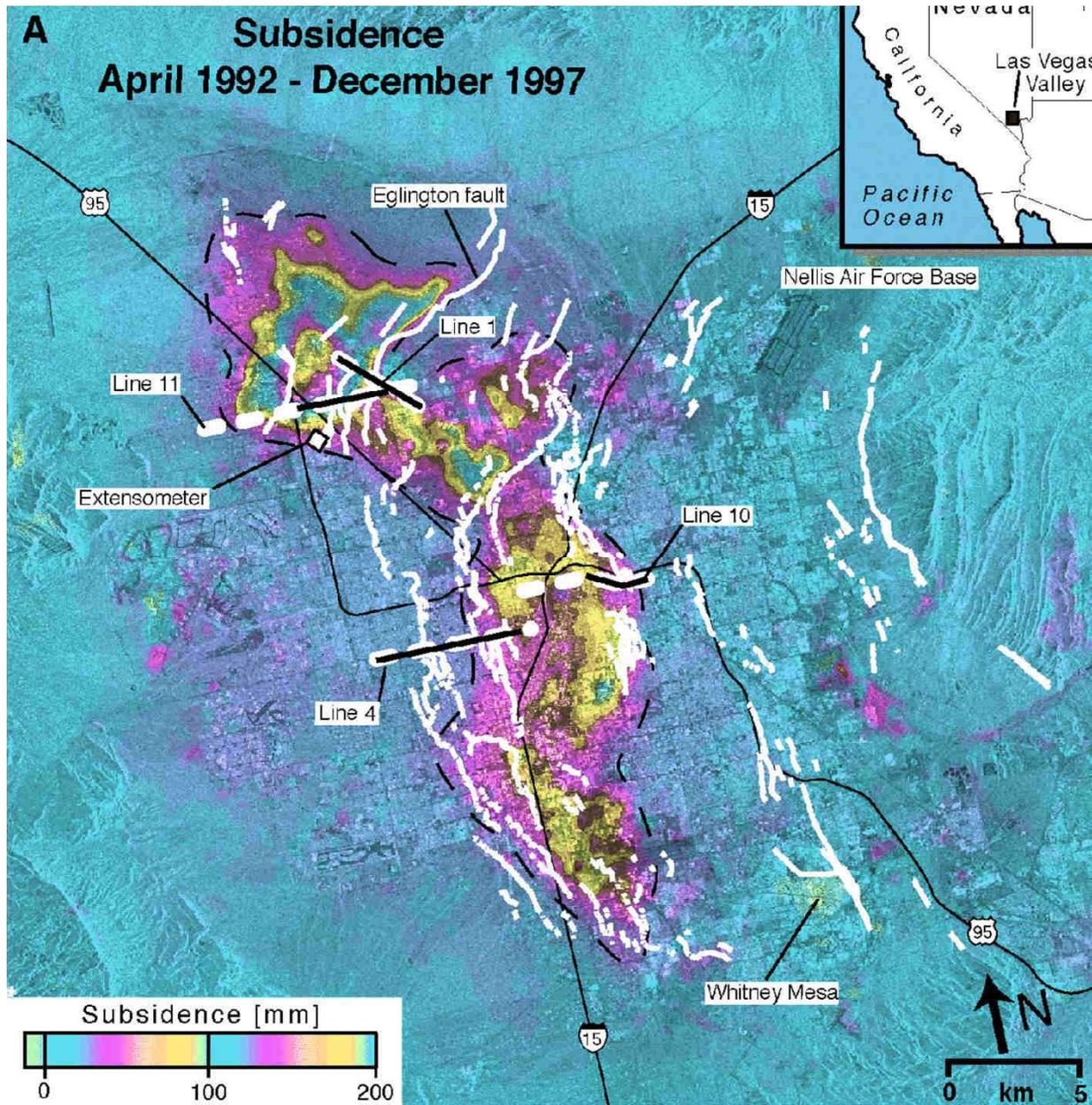


Subsidence mesurée sur la période (~6 ans) : 19 cm maximum

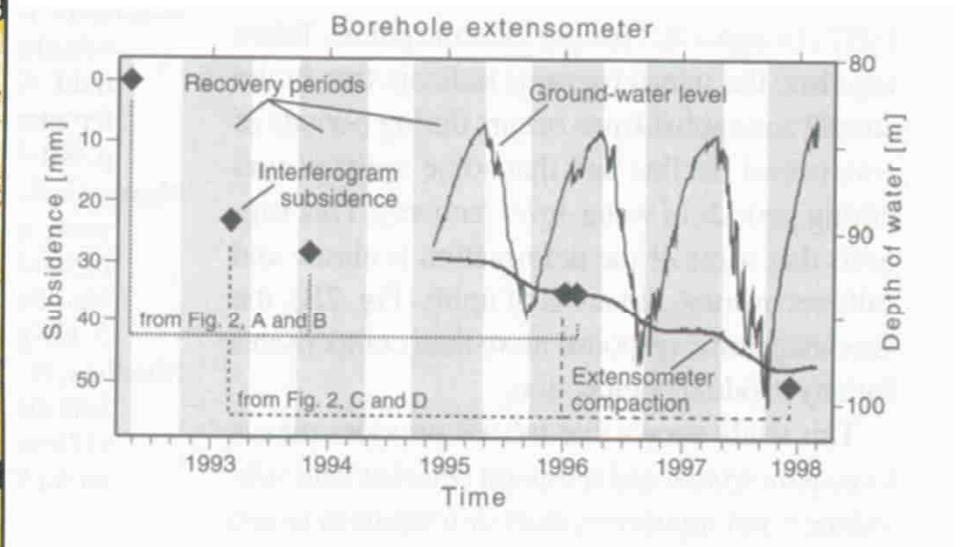
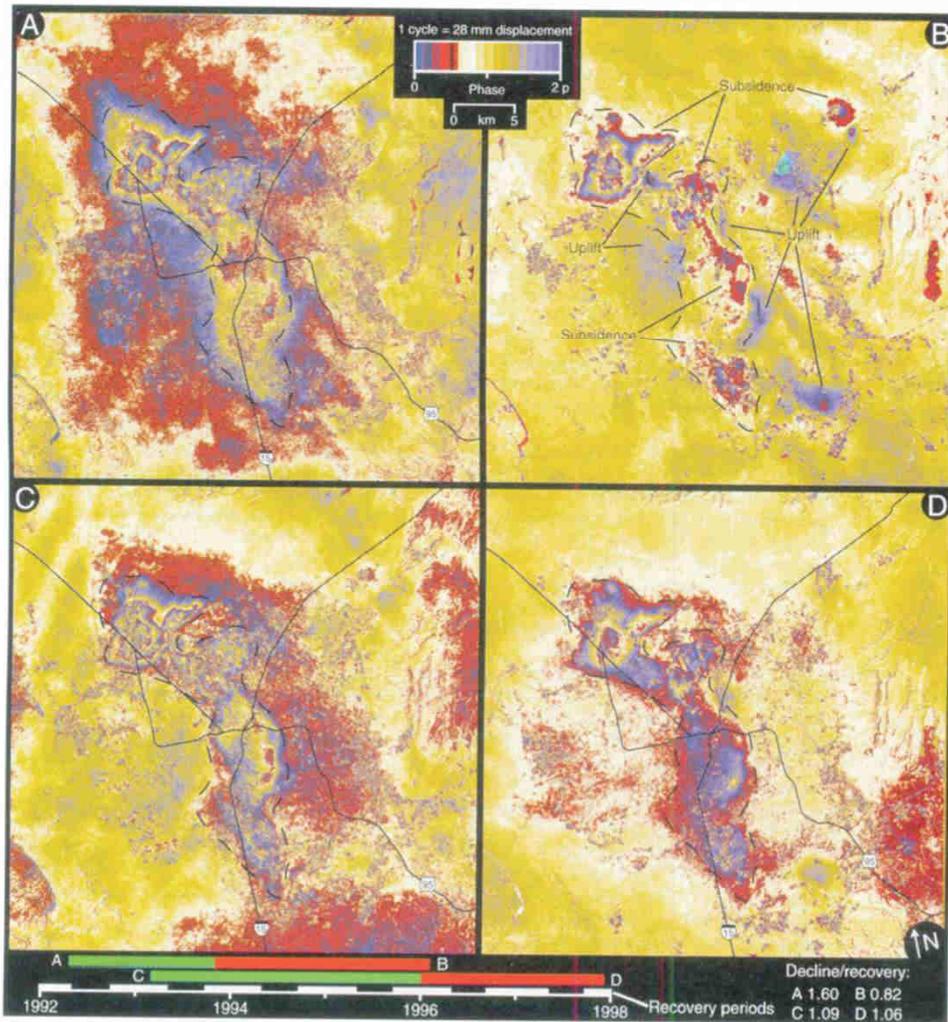
Subsidence causée par la compaction de l'aquifère

Pompage de l'eau à un taux de 2 à 3 fois plus élevé que la recharge naturelle

Correspond à 25% des besoins en eau de la population



Distribution spatiale de la subsidence : contrôlée par les failles, notamment la faille Eglington (barrière) et la composition des sédiments (épaisseur couche d'argile)



Baisse du taux de subsidence depuis le début des années 1990  
 Rôle de la réduction de l'extraction en eau sur l'atténuation de la subsidence

Analyse temporelle : détection de phénomènes saisonniers de subsidence et soulèvement  
 Information sur les propriétés élastiques et inélastiques de l'aquifère

## Ville de Mexico

---

*Strozzi et Wegmüller, 1999; Carnec et al. 2000; Strozzi et al. 2003, 2004; Lopez-Quiroz et al., 2009*

Taux de subsidence : atteint 40 cm/an

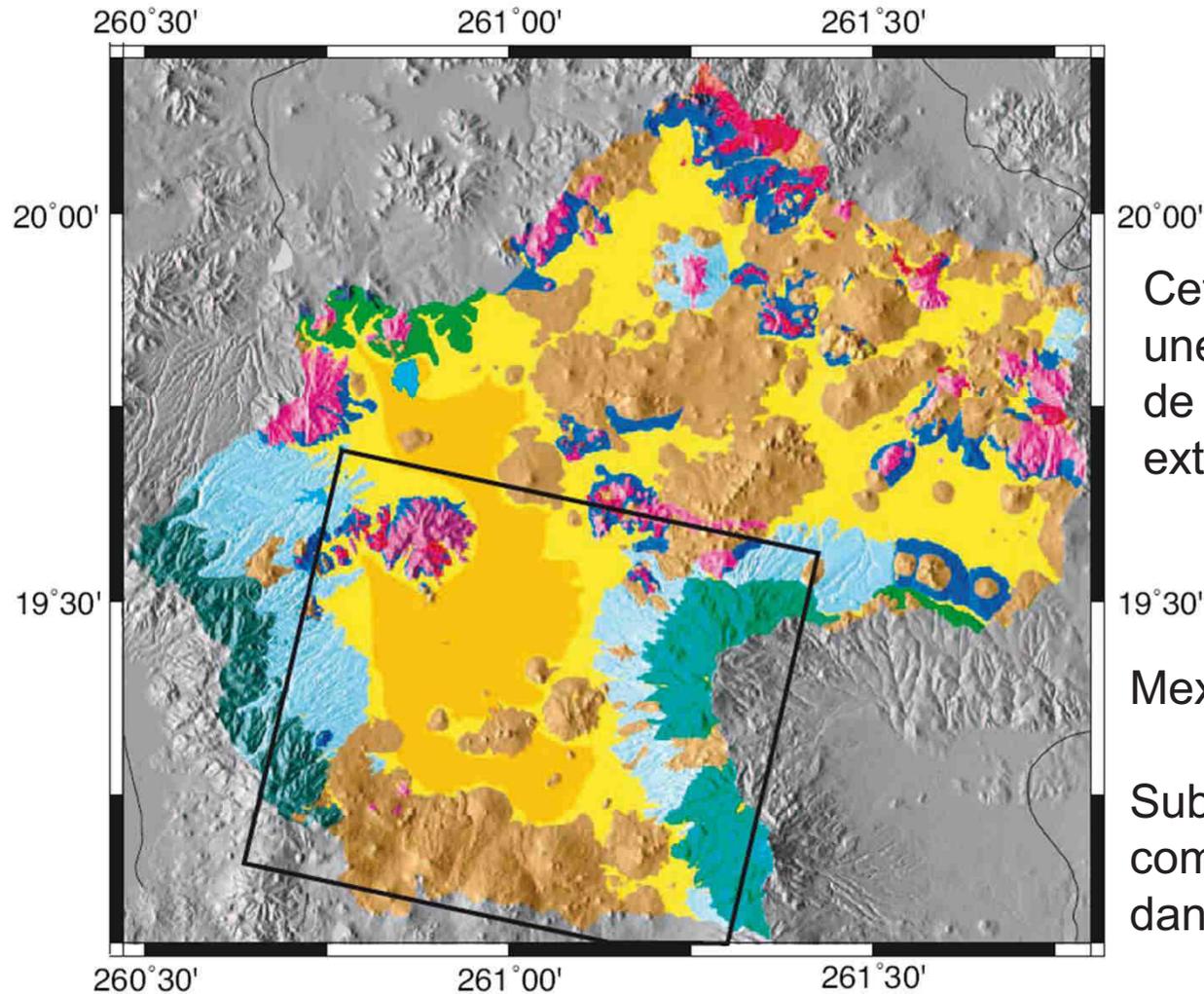
Mexico : la deuxième ville la plus peuplée au monde

Surpopulation engendre une consommation excessive d'eau et une forte surexploitation de l'aquifère.

70% de l'eau consommée par les habitants de la ville provient de l'aquifère situé juste en dessous

- ✓ Epuisement de la ressource
- ✓ Grave problème de subsidence qui affecte diverses structures clefs :
  - les constructions domestiques et historiques,
  - les installations d'approvisionnement d'eau et de gaz,
  - les réseaux d'électricité, les réseaux routiers et le système de drainage...

# Ville de Mexico



Cet aquifère est couvert par une couche peu perméable de dépôts lacustres argileux extrêmement compressibles

Mexico est bâtie sur cet aquitard

Subsidence : résultat de la compaction des dépôts argileux dans l'aquitard

## Couches hydrogéologiques

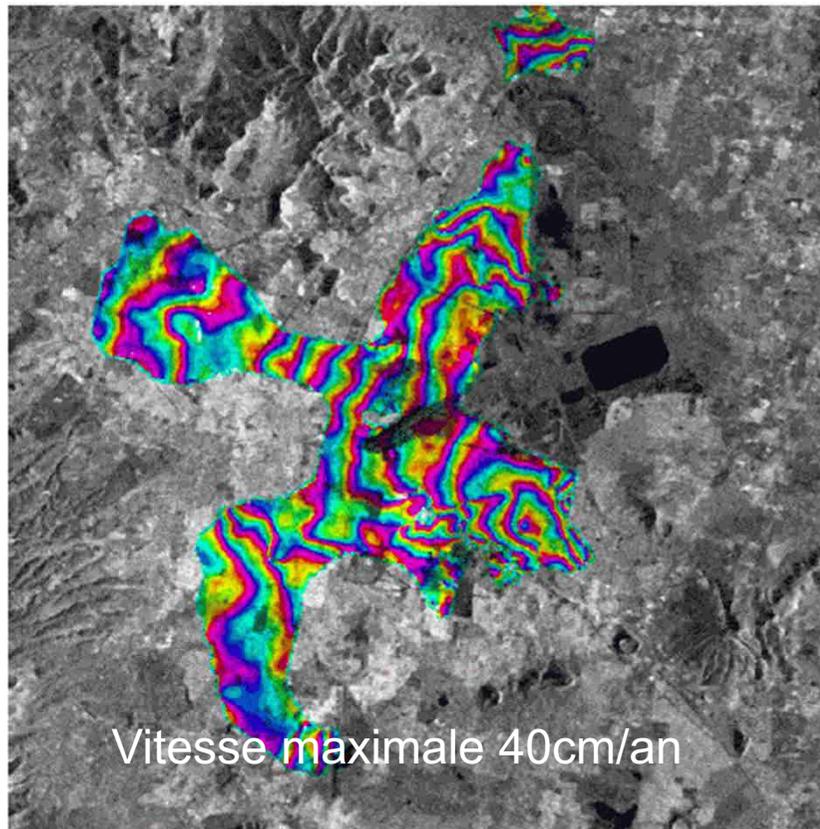
Orange : dépôts lacustres représentant l'aquitard

Jaune : dépôts alluviaux représentant l'aquifère

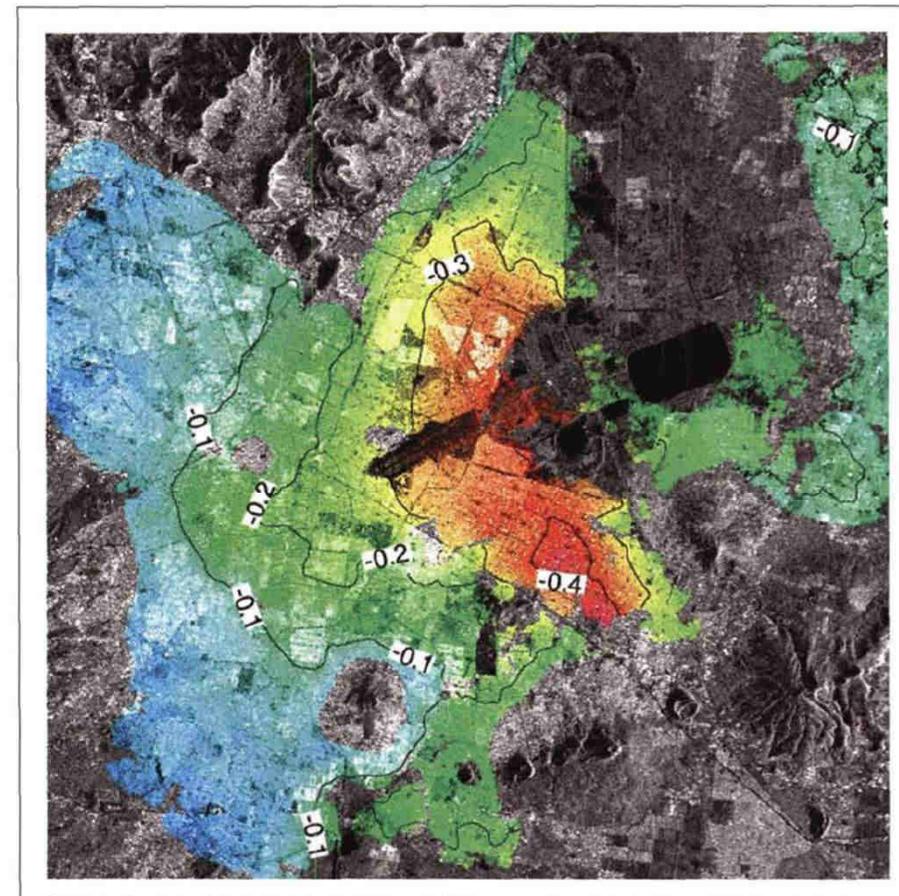
Marrons et autres : roches volcaniques sur les montagnes et volcans

Principal problème du traitement des interférogrammes de la Ville de Mexico  
étape de déroulement

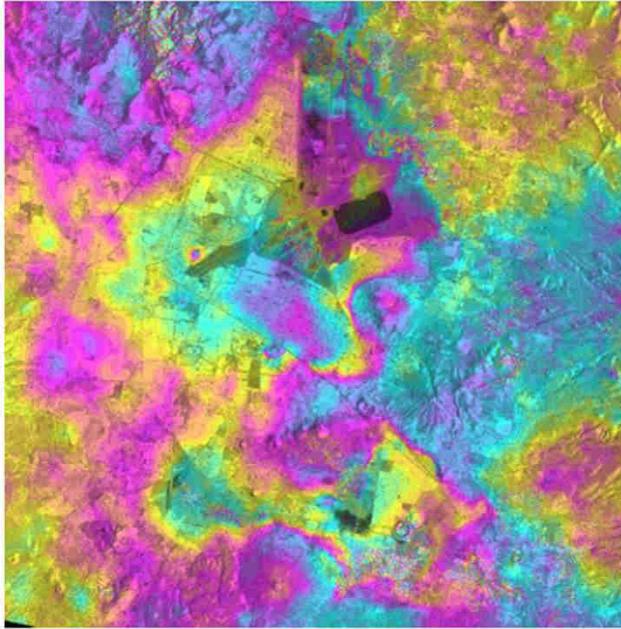
Données ERS



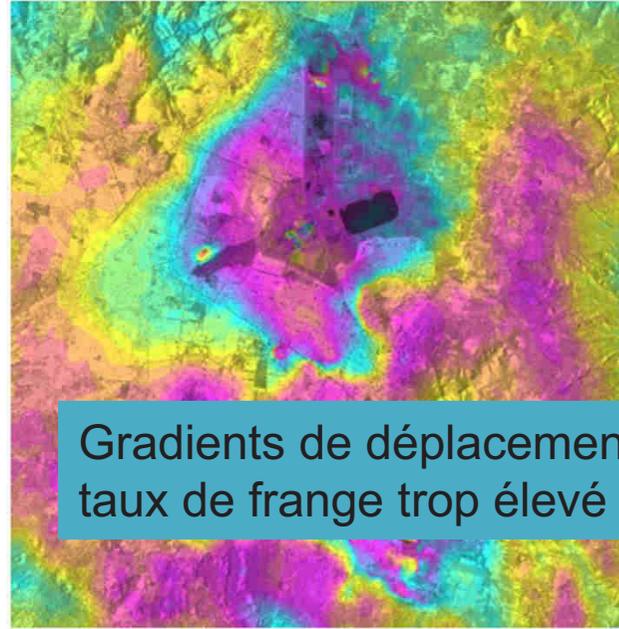
Carte de subsidence calculée à partir  
d'une paire ERS : 29-Dec-1995 / 16-  
May-1996.  
Cycle de couleur : 5 cm/an



Carte de subsidence en m/an

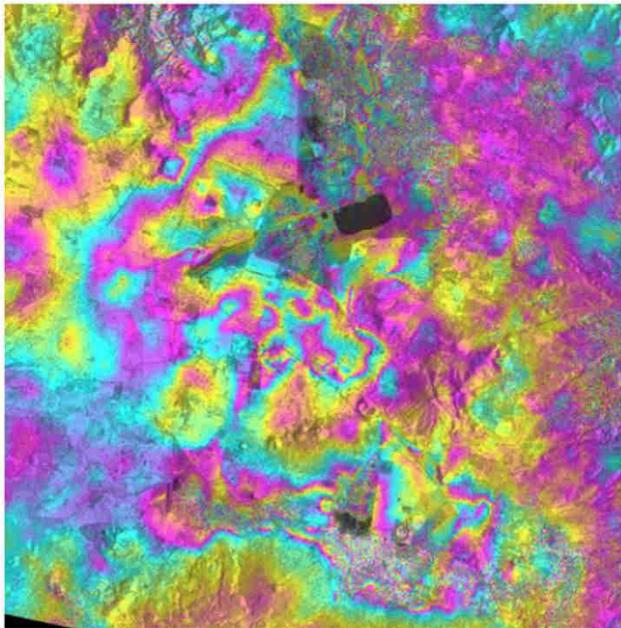


**Figure 4.** Filtered differential interferometric phase image for the pair June 20 to July 25, 2003.

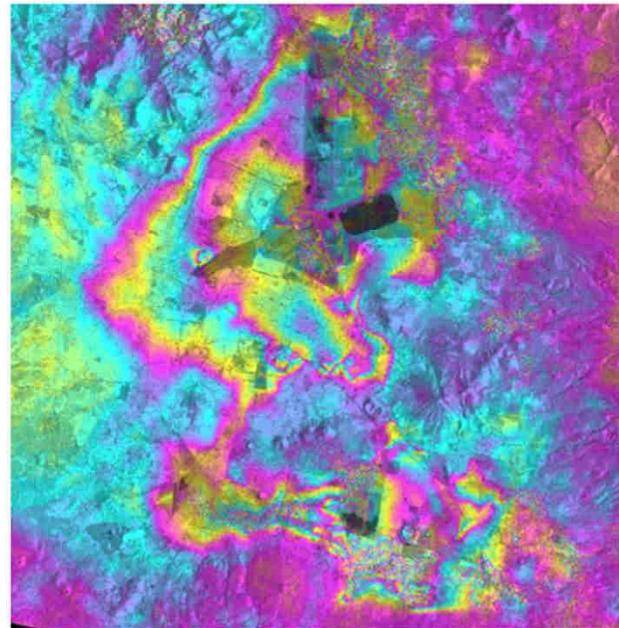


Gradients de déplacements très importants  
taux de frange trop élevé (taux d'aliasing)

**Figure 5.** Filtered differential interferometric phase image for the pair November 7 to December 12, 2003.



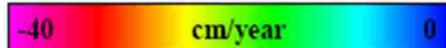
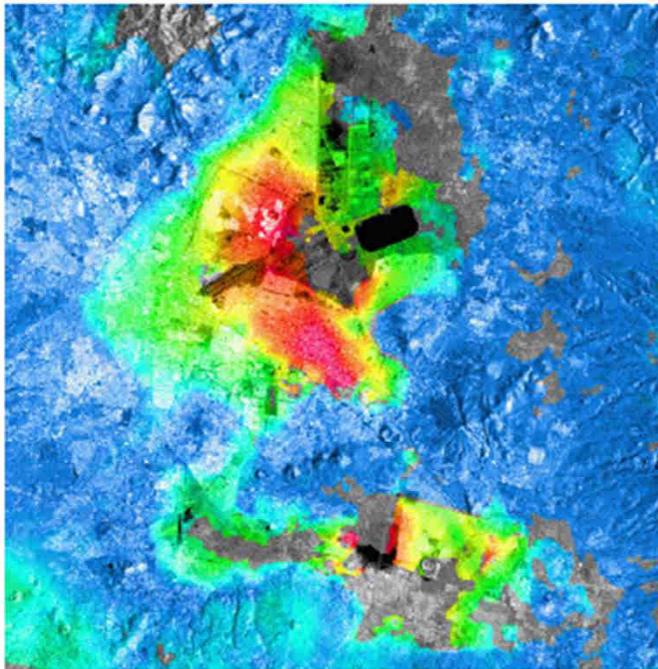
**Figure 6.** Filtered differential interferometric phase image for the pair April 11 to June 20, 2003.



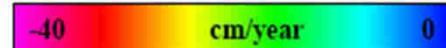
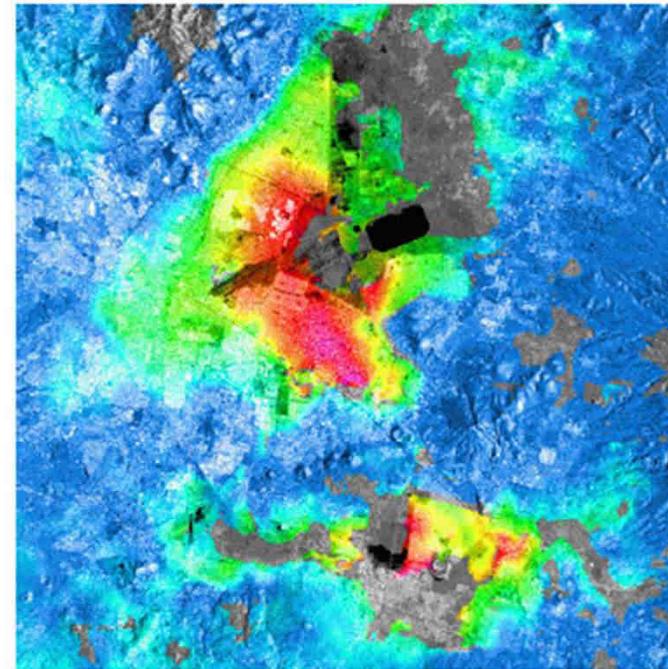
**Figure 7.** Filtered differential interferometric phase image for the pair June 20 to August 29, 2003.

## Interférogrammes à 70 jours

Données Envisat



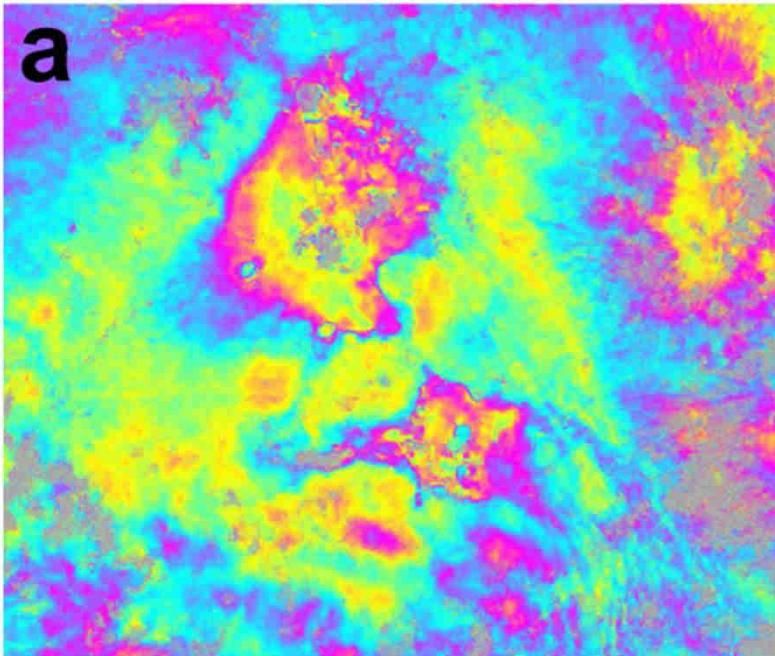
**Figure 2.** Subsidence rate for Mexico City from the differential interferogram between June 20 and August 29, 2003. A backscattering image is used as intensity background.



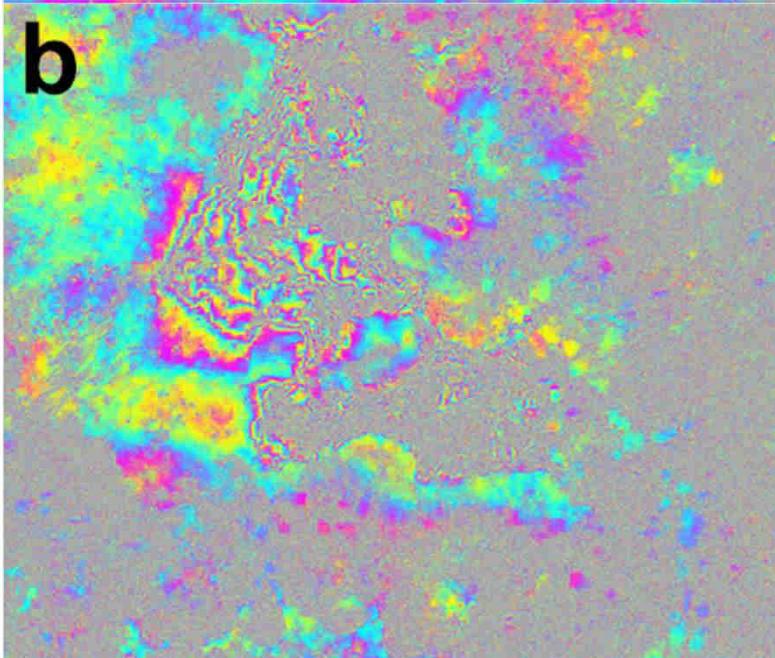
**Figure 3.** Subsidence rate for Mexico City from the differential interferogram between July 25 and October 3, 2003. A backscattering image is used as intensity background.

# Ville de Mexico

---



$B_t=35$  jours

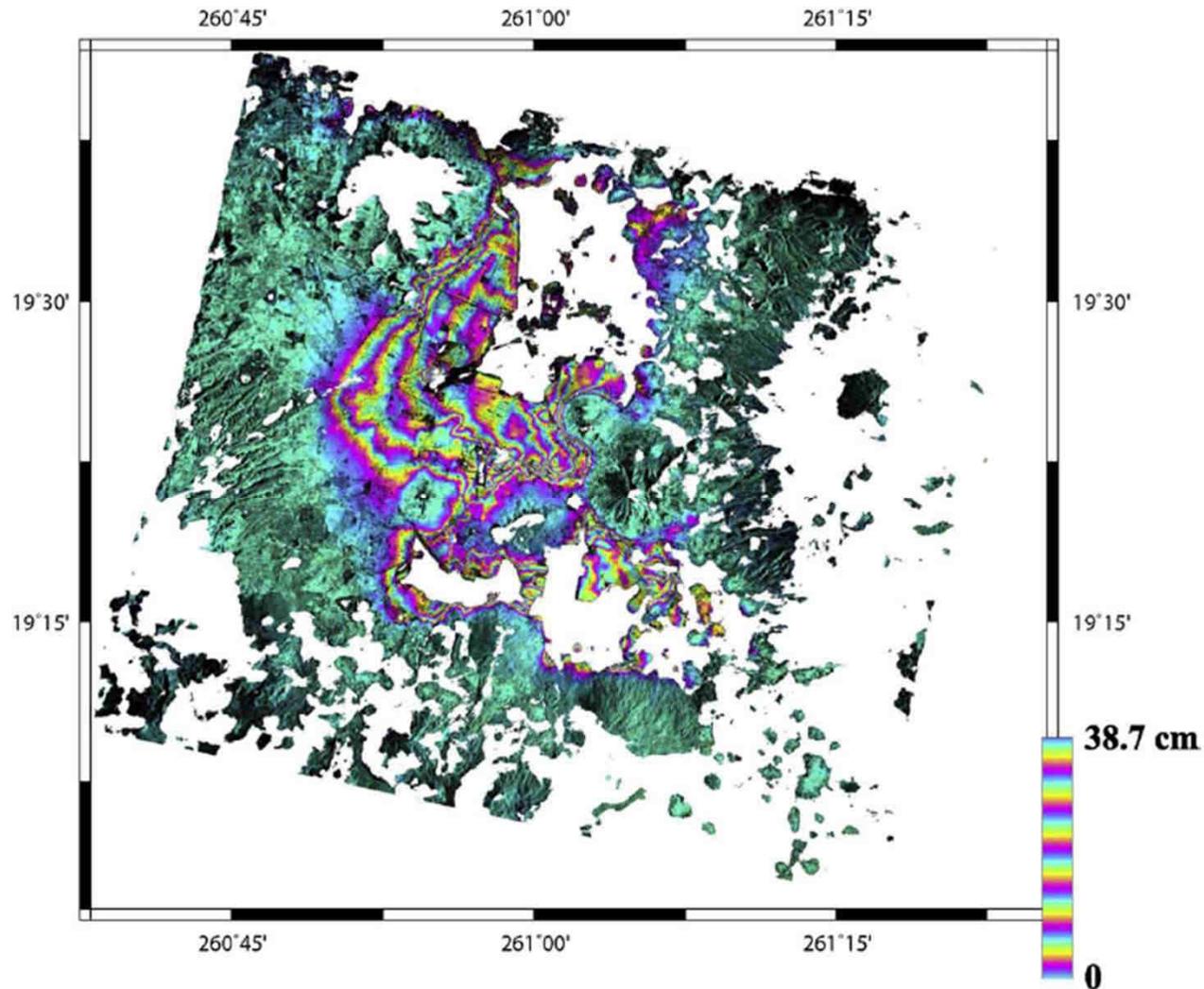


Stratégie de déroulement

$B_t=9*35$  jours

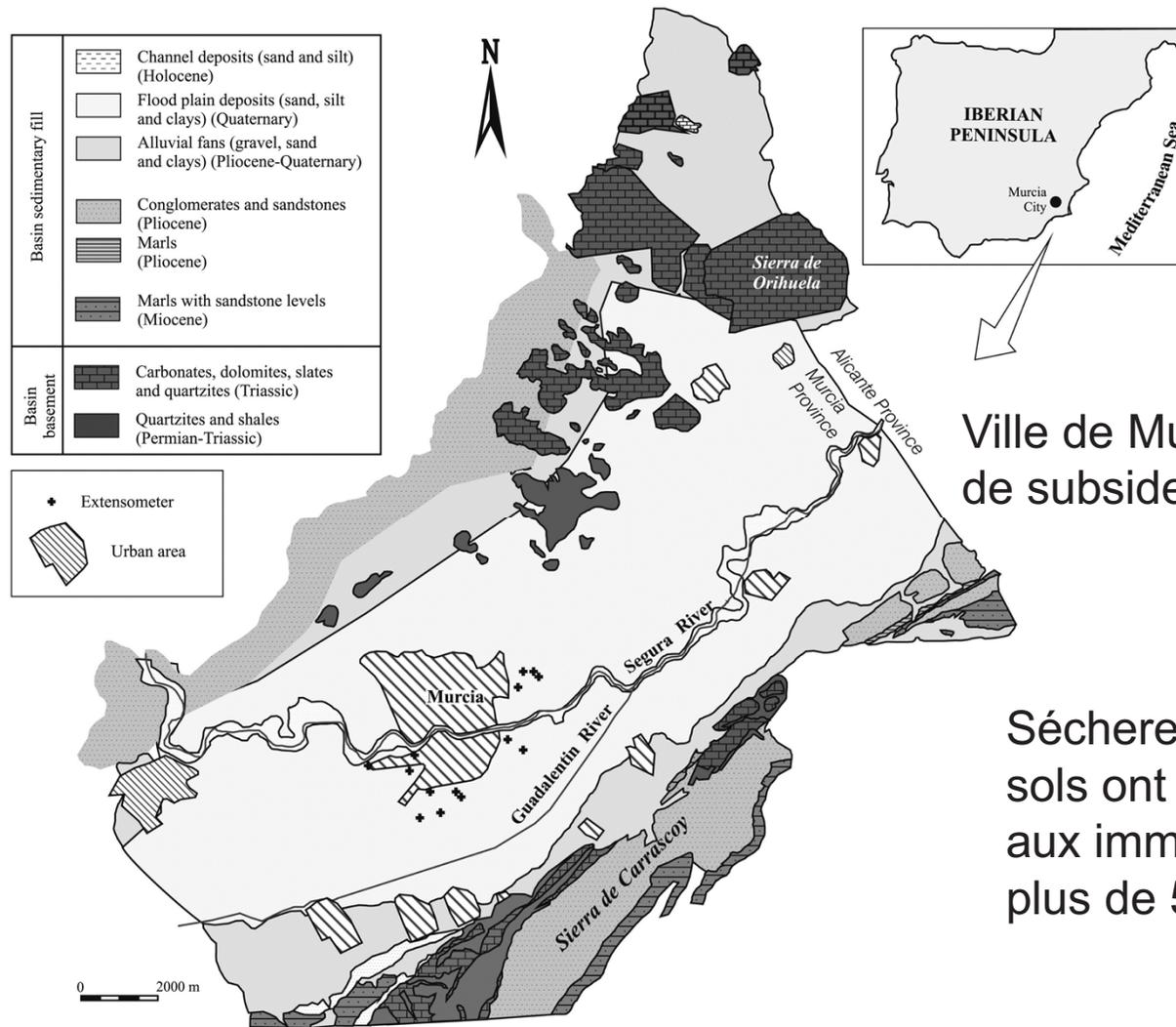
*Lopez-Quiroz, 2009*

Etude complète à partir de 39 images Envisat  
Stratégie de déroulement



Vitesse moyenne de la subsidence sur la période 2003-2009

# Murcia



400000  
habitants

Ville de Murcia affectée par le phénomène de subsidence depuis les années 1990

Sécheresse et consolidation des sols ont entraîné des dommages aux immeubles et infrastructures plus de 50 millions d'euros

Plaine alluviale Vega Media dans le bassin versant Segura  
Sédiments accumulés : 250 m d'épaisseur

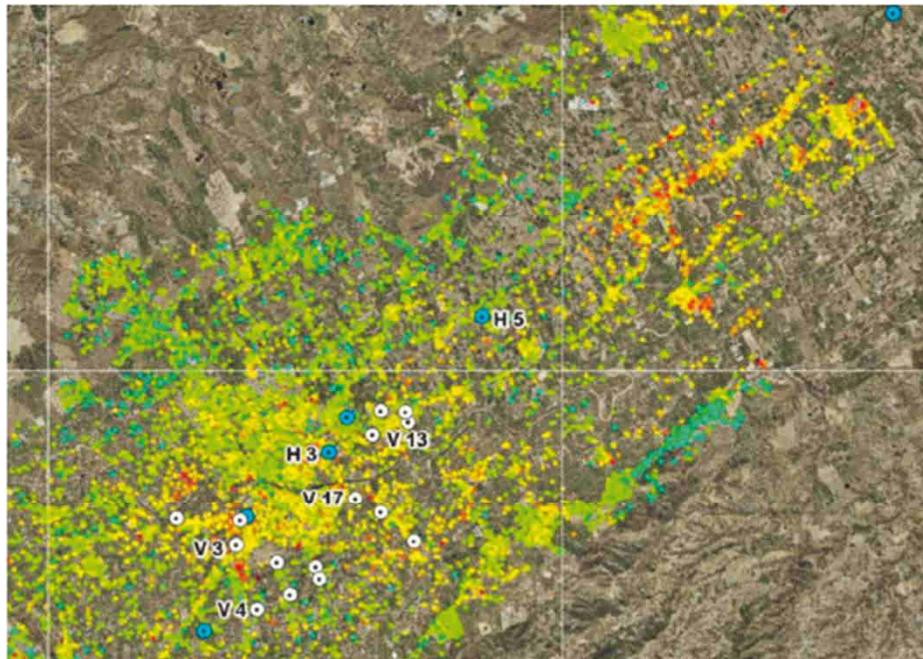
*Tomás et al., 2001*

## Surexploitation de l'aquifère

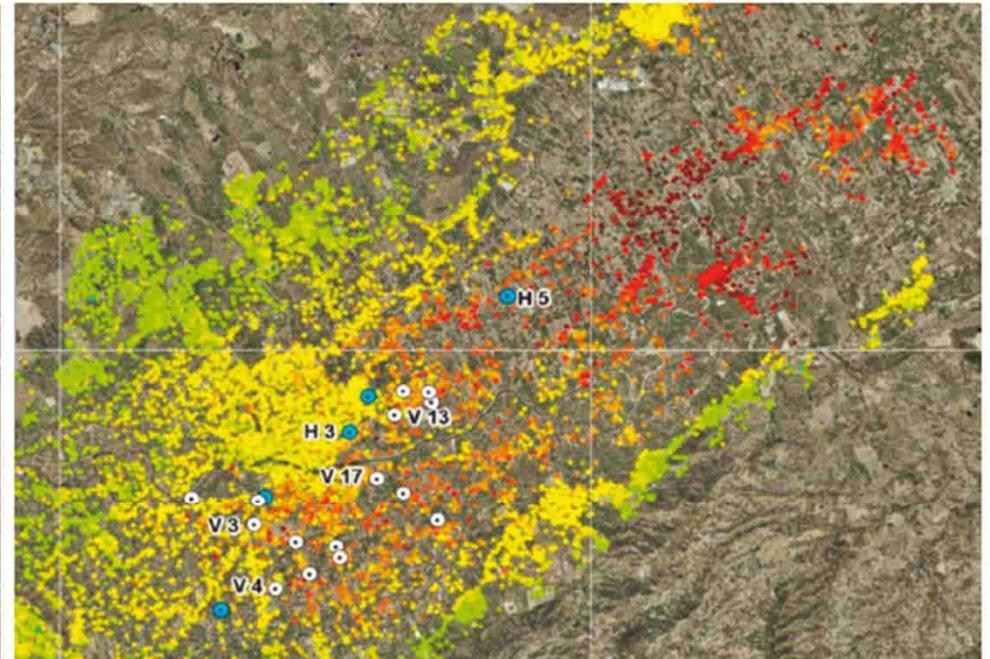
Période de sécheresse de 2005 à 2009

➡ Abaissement de la nappe entre 2005 et 2008

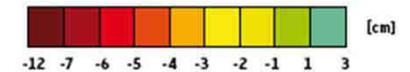
Average annual velocity: 1995–2005



Average annual velocity: 2004–2008

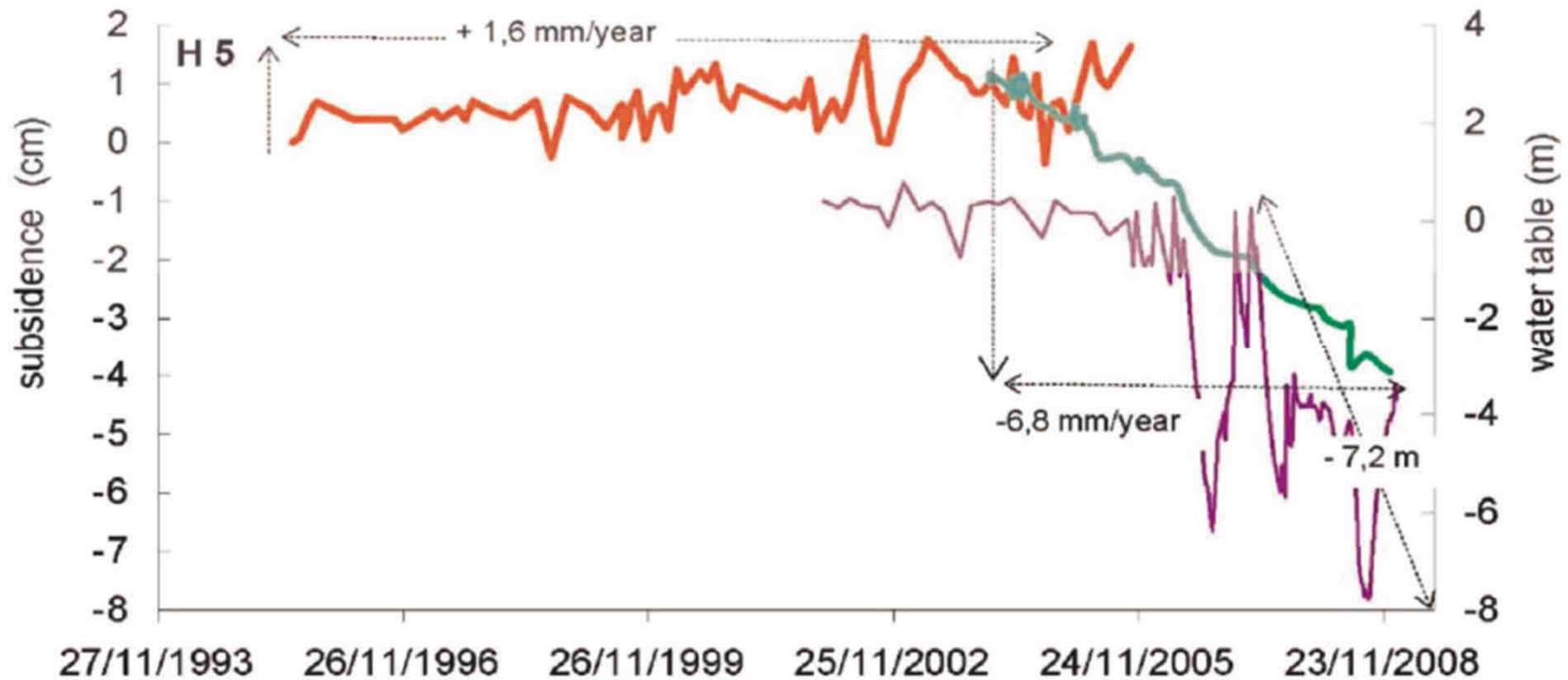


○ Extensometric borehole    ● Piezometric borehole



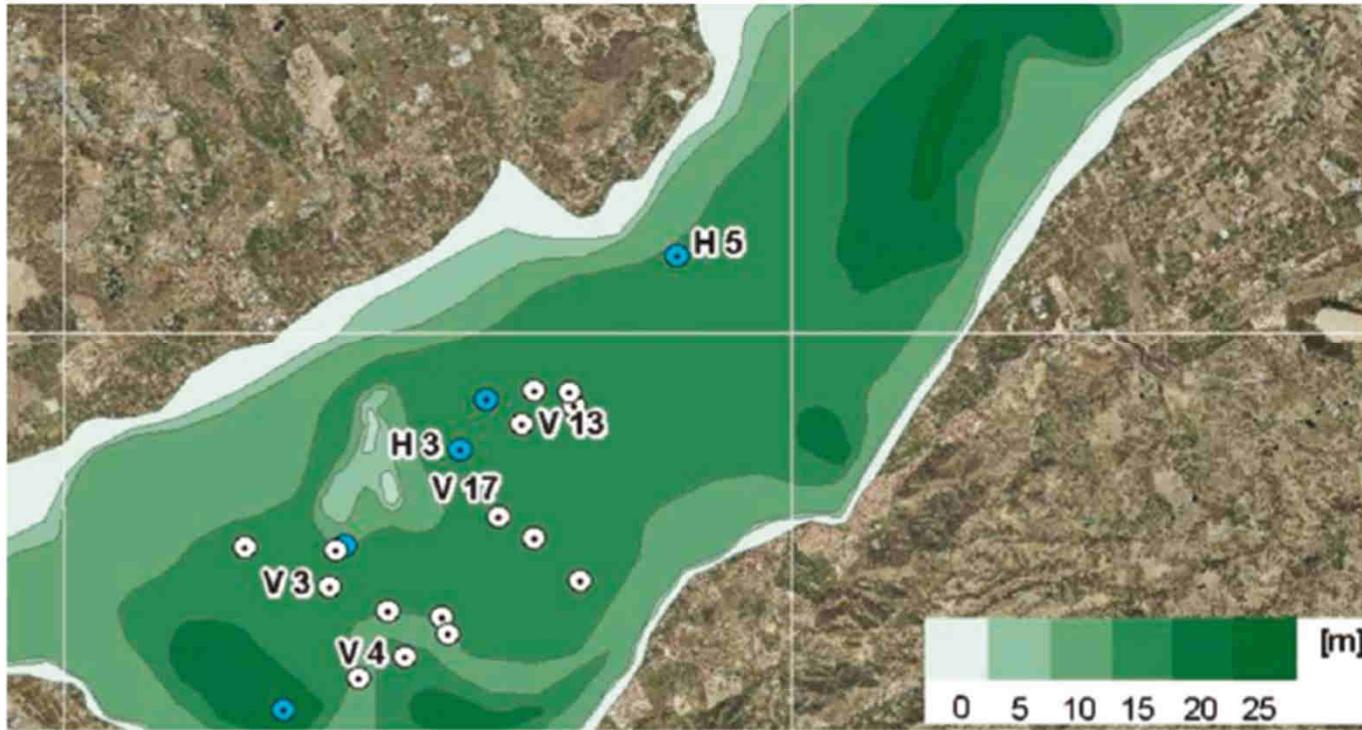
Augmentation significative de la déformation  
entre 2004 et 2008

*Herrera et al., 2009*



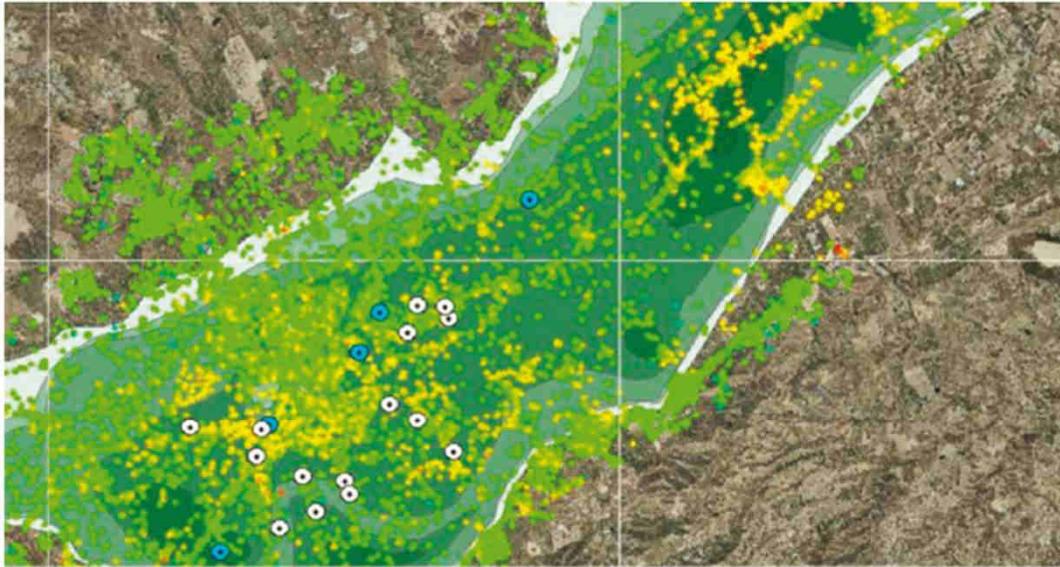
Temporal evolution of: the water table (purple); and Terrafirma results (red 1995-2005; green 2004-2008).

## Compressible layer thickness map

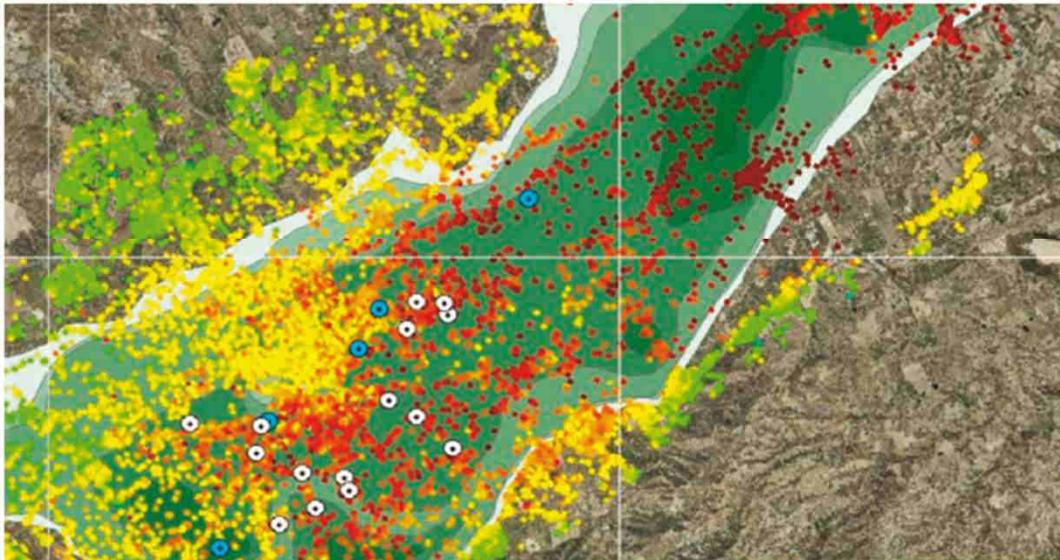


Argiles, sables, graviers

Velocity of displacement: 1995-2005



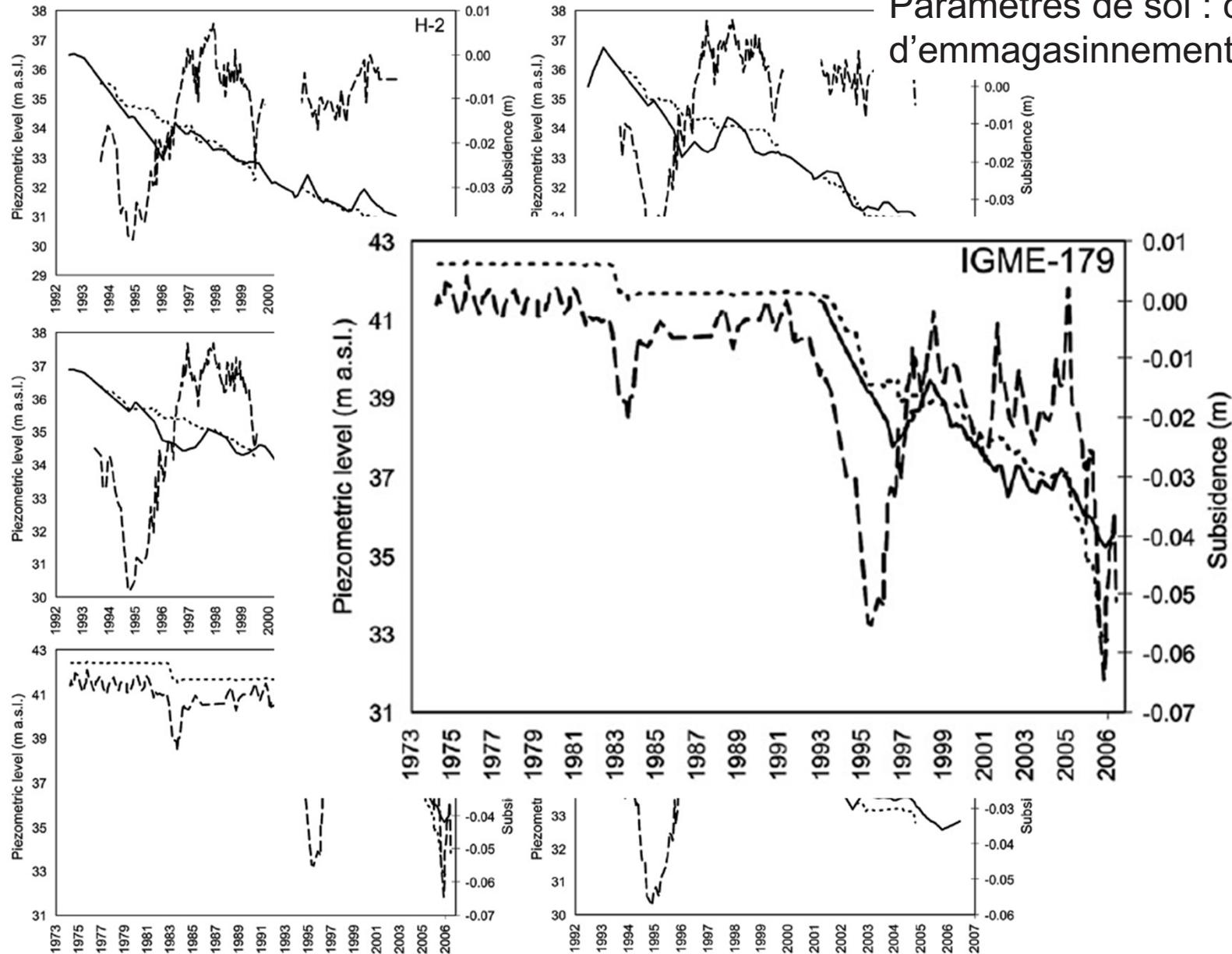
Velocity of displacement: 2004-2008



Epaisseur de la couche non consolidée



Paramètres de sol : coefficient d'emmagasinement



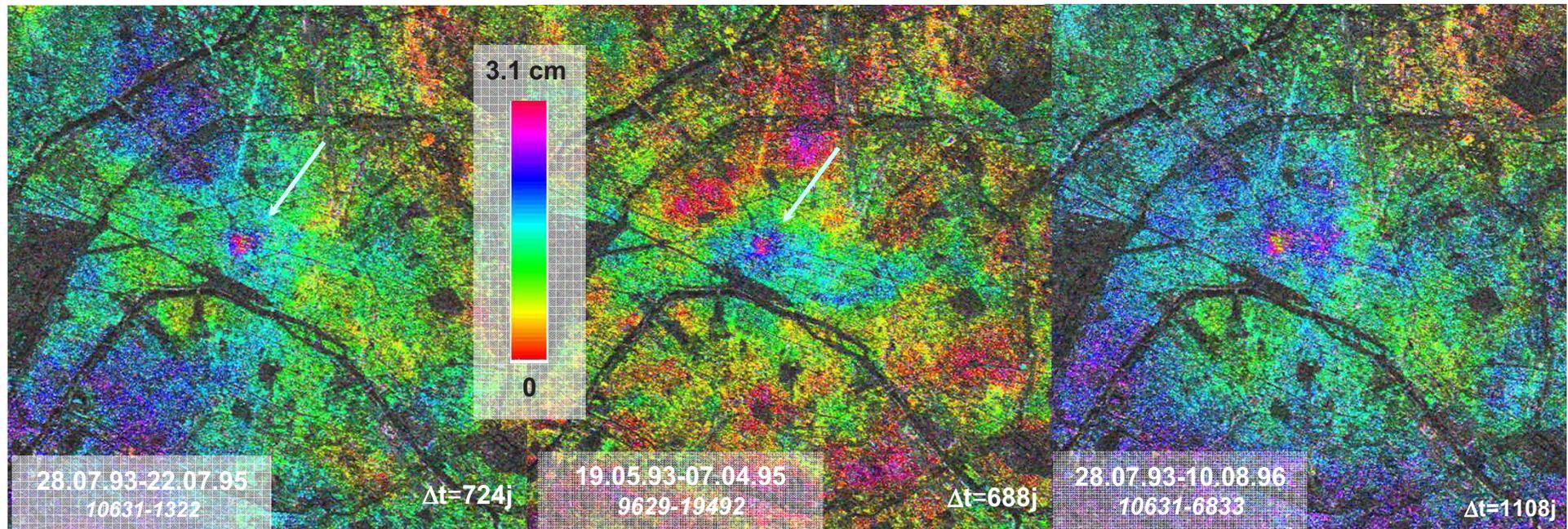
Model prediction results. Dashed line: piezometric level. Continuous line: DInSAR deformation. Dotted line: modeled subsidence.

# Phénomènes localisés

# Paris – Saint-Lazare

## Travaux souterrains

Mise en évidence de déformations sur le secteur Saint-Lazare par interférométrie différentielle

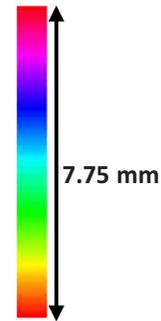
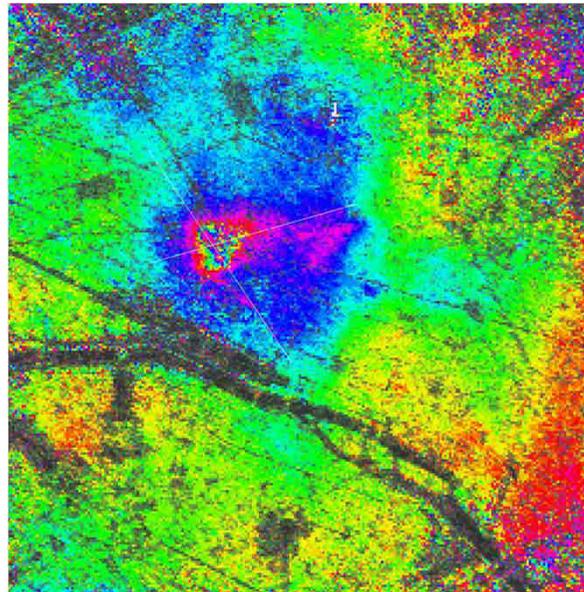


Subsidence

Révéler et localiser sans ambiguïté des déplacements de surface à l'aplomb du chantier de construction de la gare Saint-Lazare Haussman du RER E

*Fruneau et al., 1998*

Avec quelques images :



*Fruneau et Sarti, 2000*

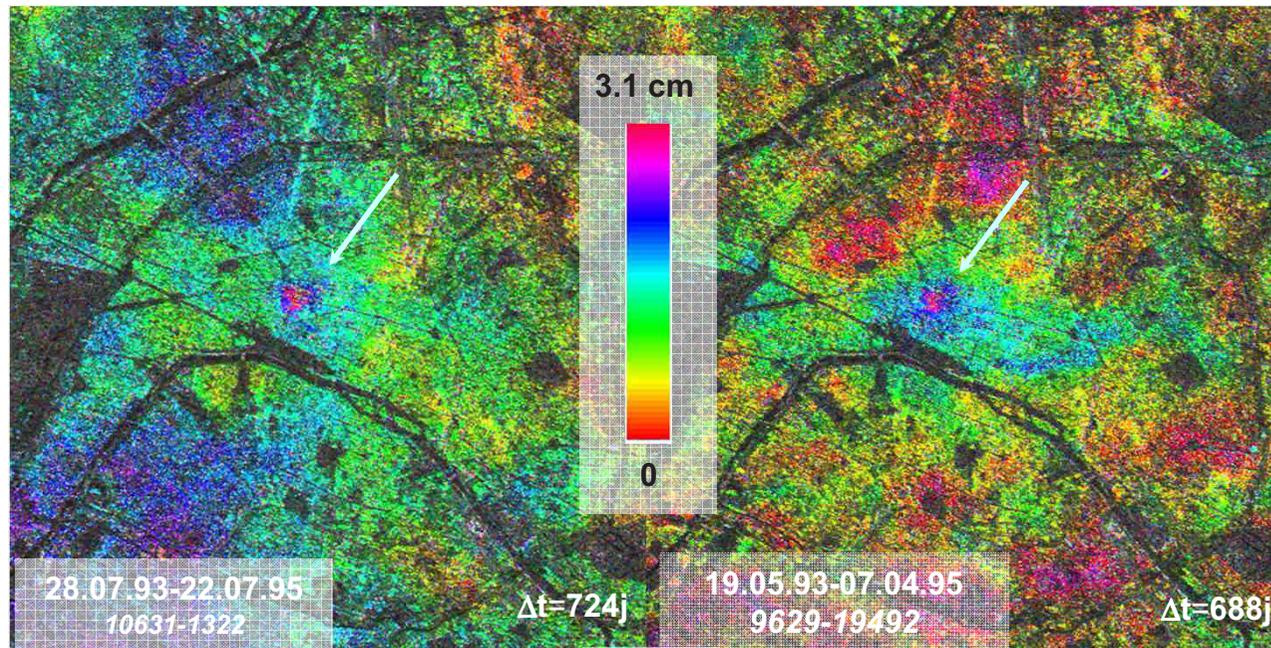
Sommation d'interférogrammes indépendants  
compensation des artefacts atmosphériques, et restitution de la composante de  
déplacement

Capacité de la technique à détecter et quantifier de tels mouvements

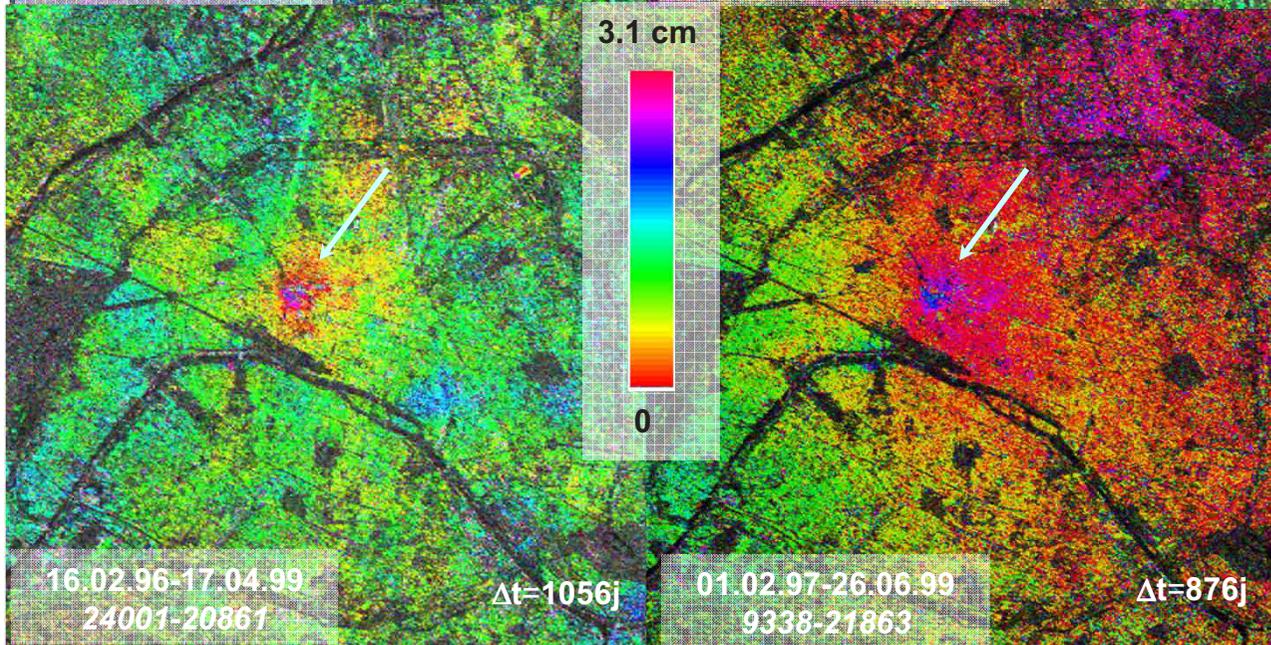
Nouvelles perspectives pour l'étude des **petits déplacements** en milieu urbain et  
des risques associés

# Détermination de plusieurs périodes de déformations : subsidence, stabilité, remontée des terrains

Subsidence

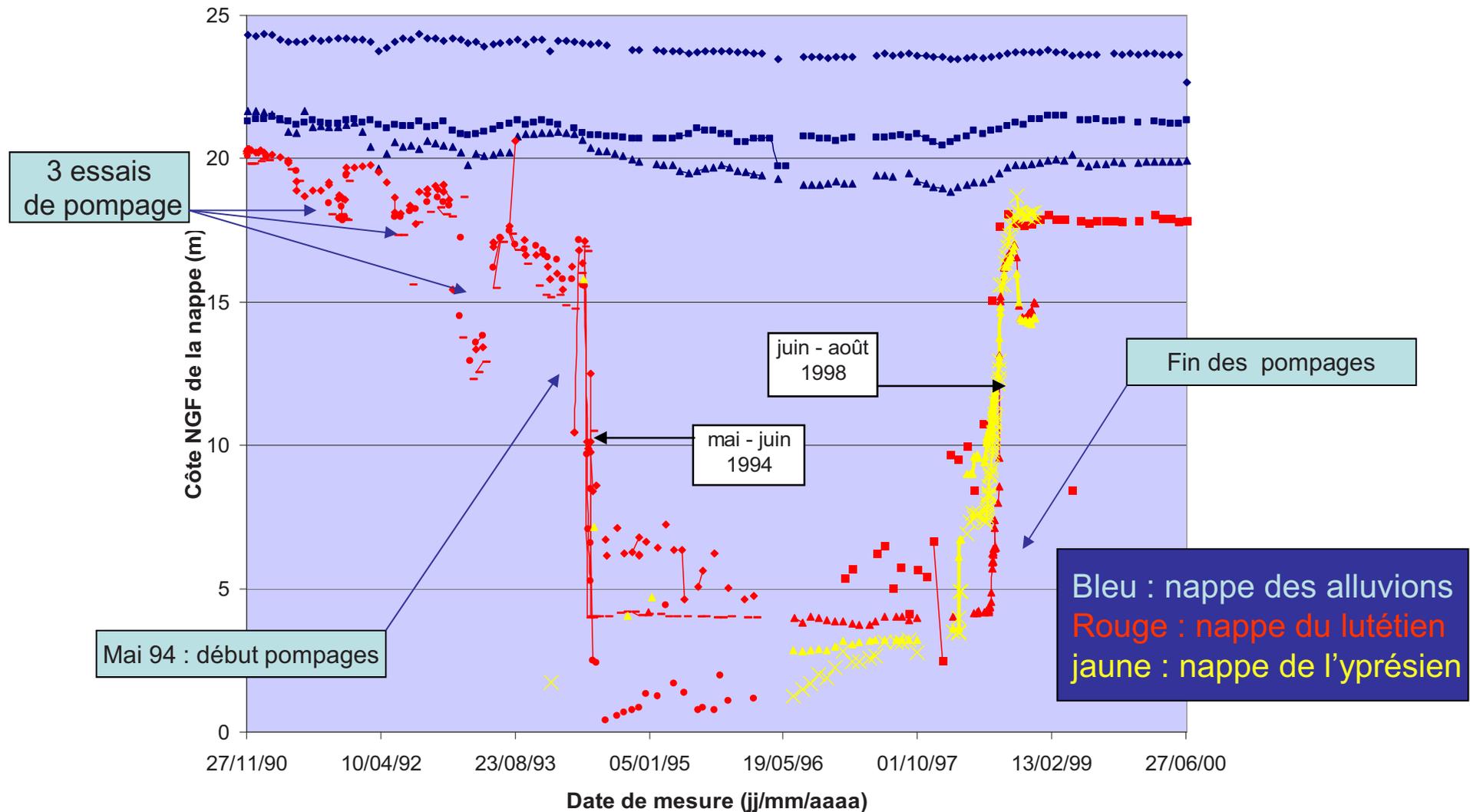


Remontée

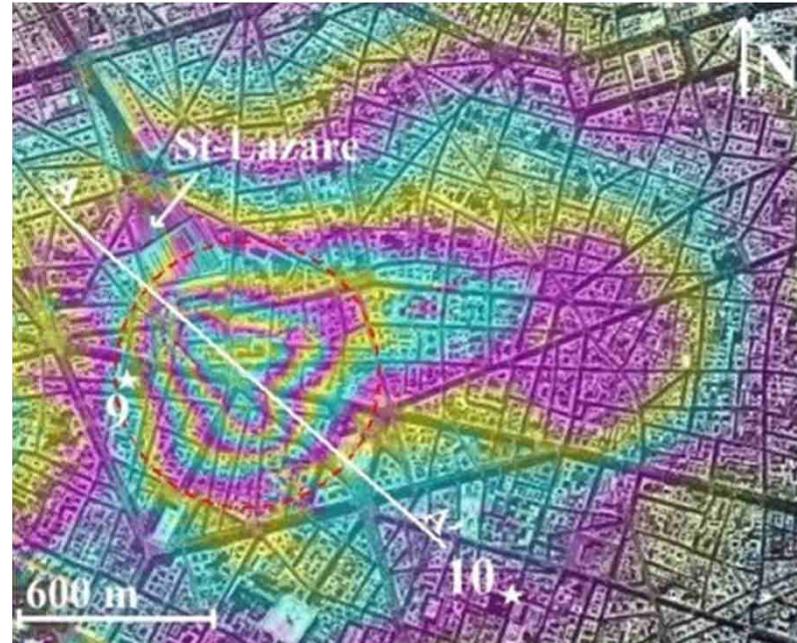


# Piézométrie

Variations piézométriques des nappes du lutétien et de l'yprésien mises en évidence grâce au suivi effectué par l'IGC et la SNCF (87 piézomètres)



## Cartographie du soulèvement



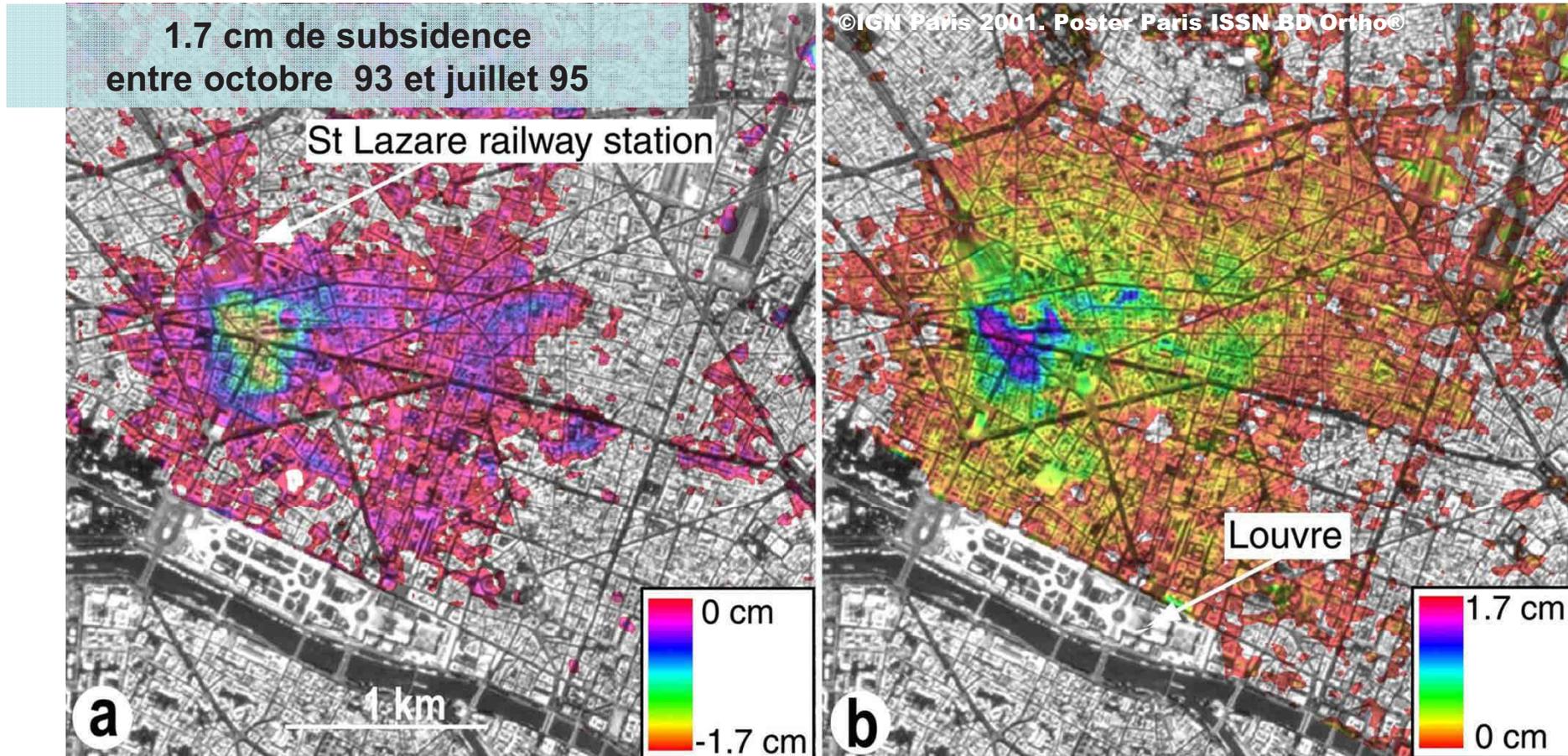
une frange : 3 mm

Moyennage d'interférogrammes indépendants

Projet Resum, BRGM

*Le Mouelic et al., 2002, Raucoules et al., 2007*

## Sommation d'interférogrammes indépendants :



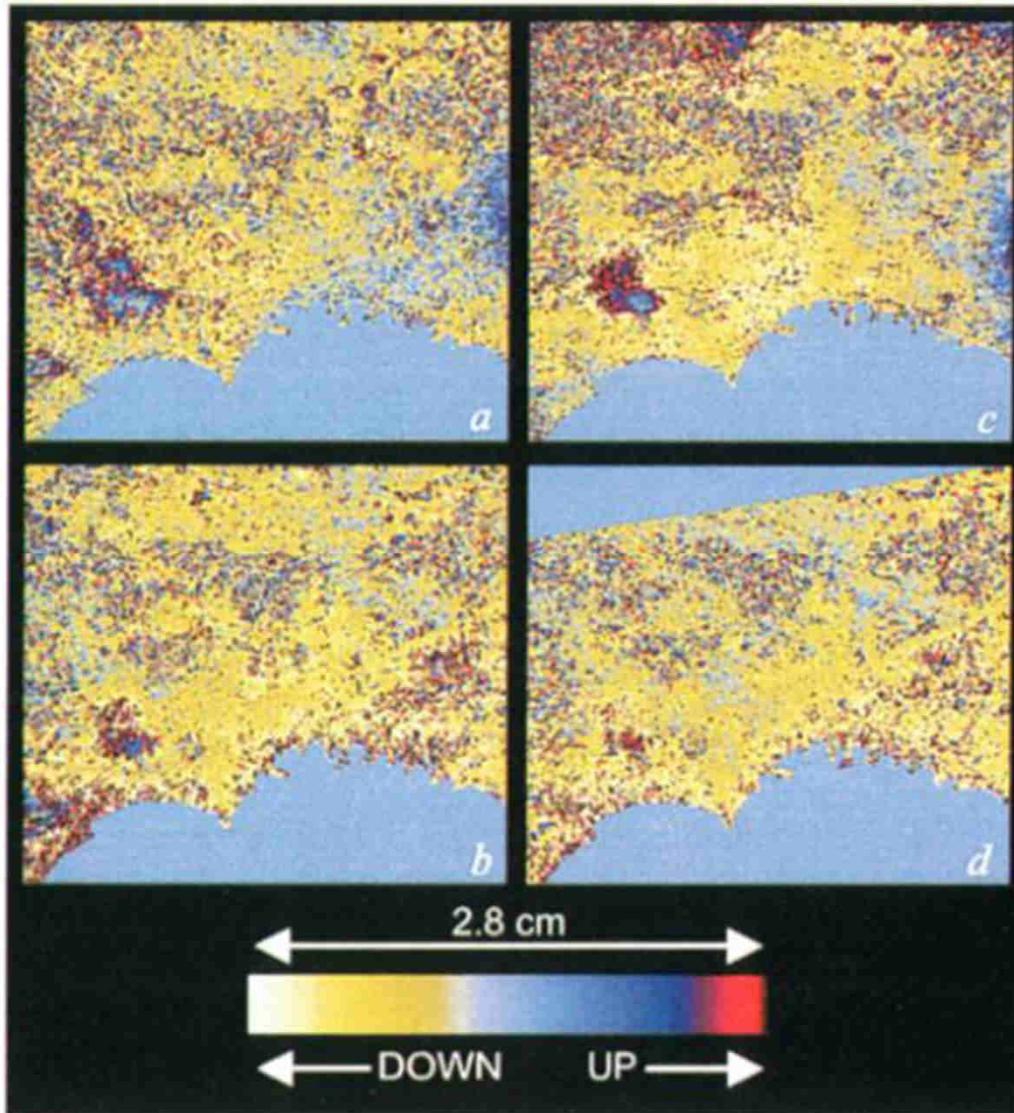
Carte des déplacements verticaux  
correspondant à la subsidence totale

Carte des déplacements verticaux  
correspondant à la remontée totale :  
novembre 1997 - octobre 1998

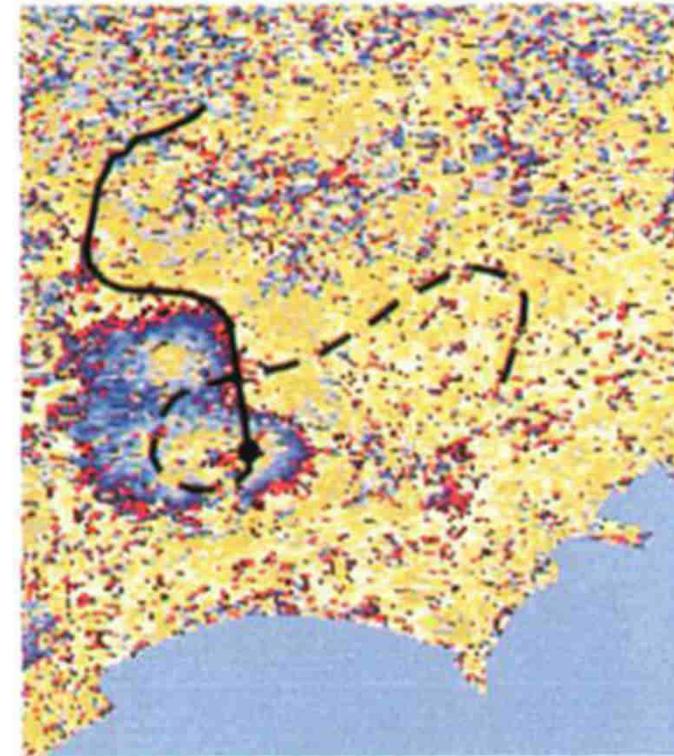
**Déplacements verticaux liés aux pompages**

## Analyse d'une série d'interférogrammes différentiels

- suivi : subsidence et remontée du sol
- séparation des phases de construction de la gare Haussmann-St-Lazare
- **détermination l'amplitude et l'étendue spatiale de la déformation** (étendue spatiale sous-estimée pour le nivellement)
- identification la nappe de l'Yprésien comme responsable de la déformation de surface



5 cm entre 1992/93 and 1996,  
Signal qui décroît entre 1996 and 1998.



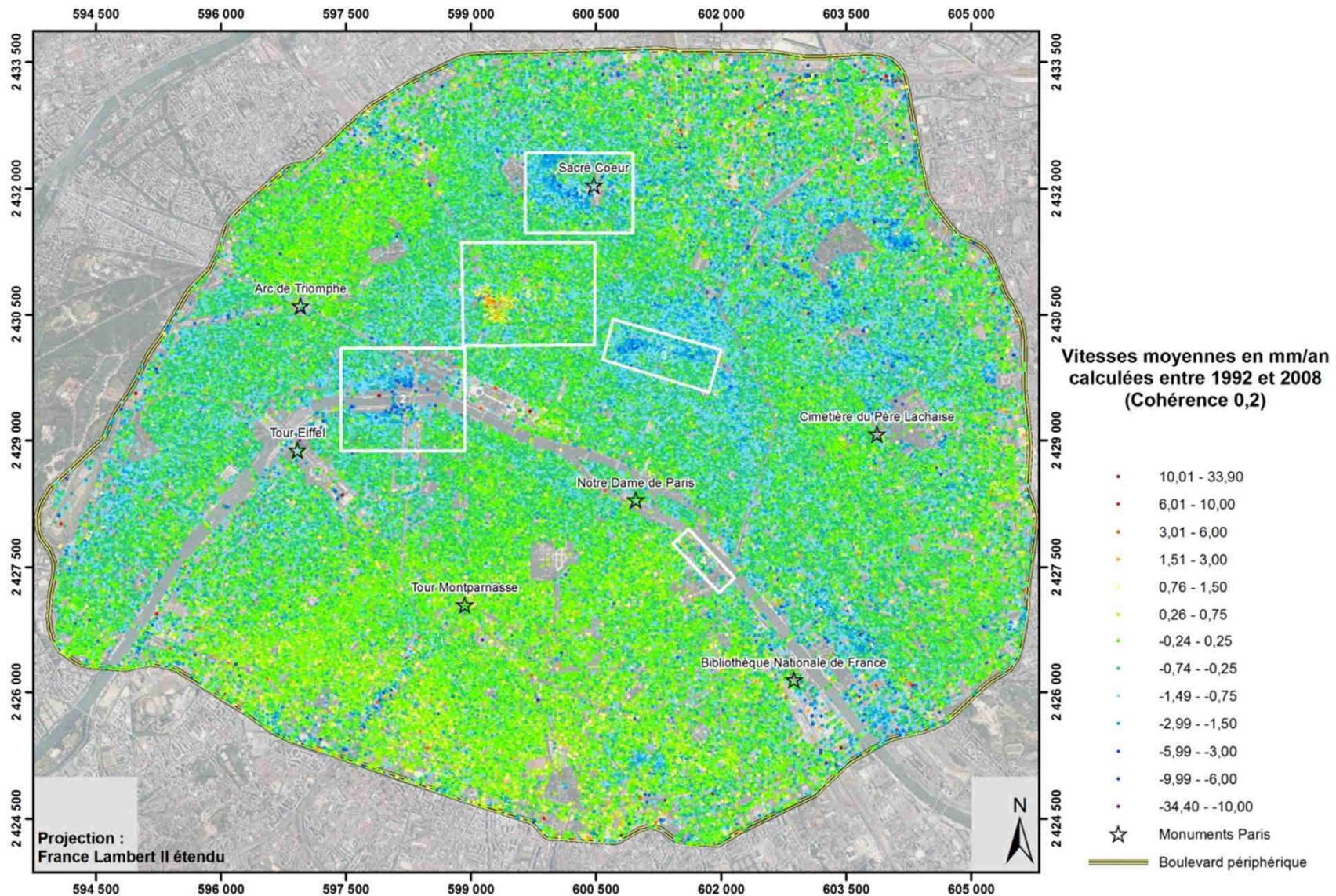
Carte de déformation obtenue par  
moyennage.

En noir : ligne de métro

Partie démarrée en mars 1993

Pointillés : portion en construction entre  
1992 et 1995

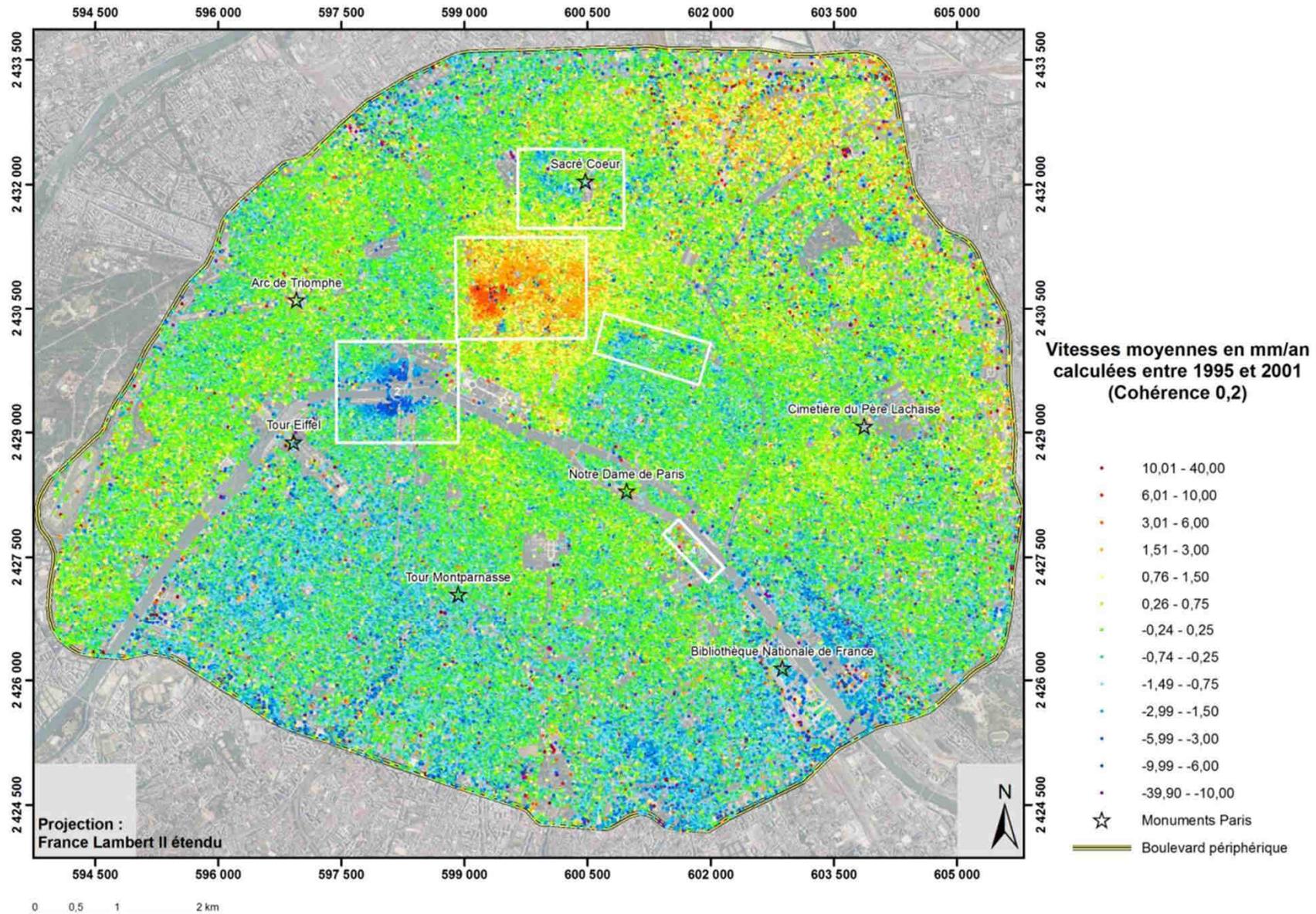
# Ville de Paris - Interférométrie PS – Suivi de différents secteurs



Carte des vitesses moyennes entre 1992 et 2008

Collaboration IGC, SNCF, RATP

# Interférométrie PS



Carte des vitesses moyennes entre 1995 et 2001

*Thèse Samuel Magalhaes, 2010*

## a. Butte Montmartre

Cas particulièrement complexe

### **Butte Montmartre vulnérable aux fontis, glissements et tassements**

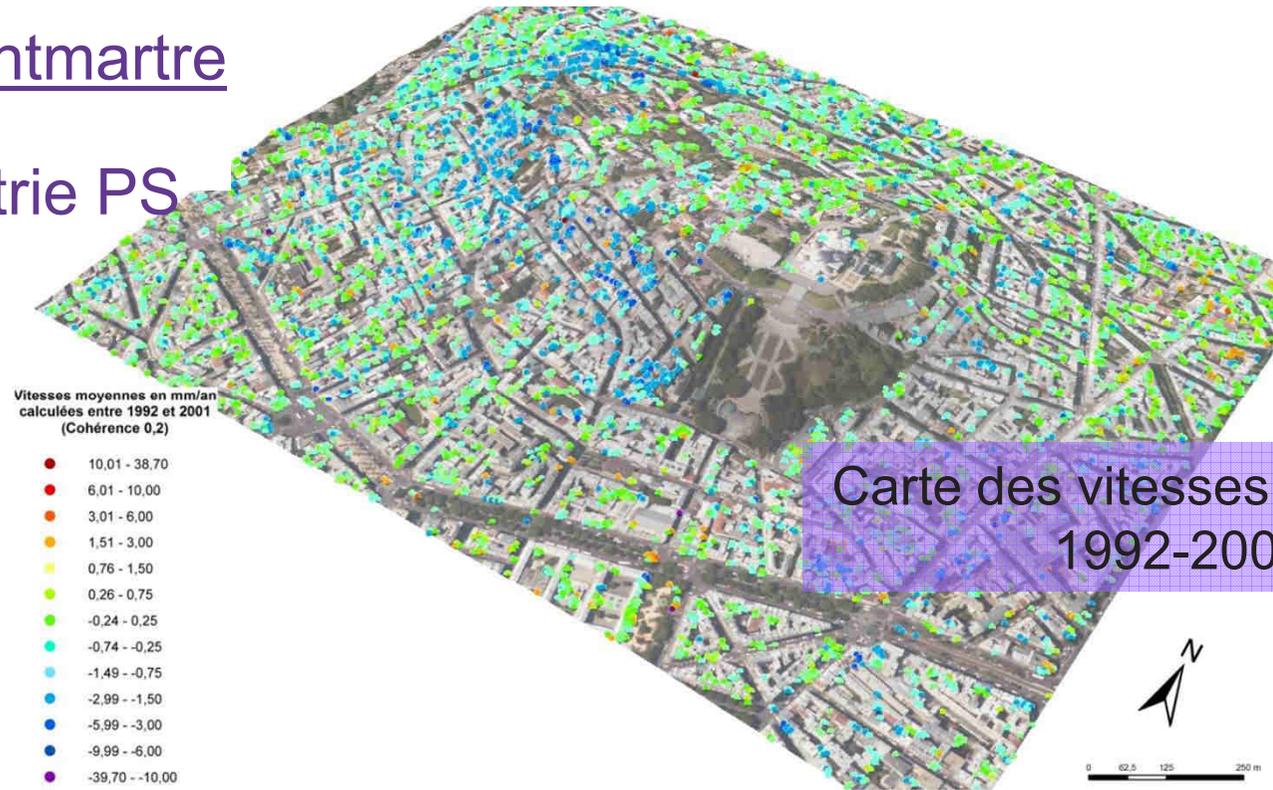
Désordres au niveau des bâtiments, des voiries et des canalisations

causes naturelles et anthropiques multiples :

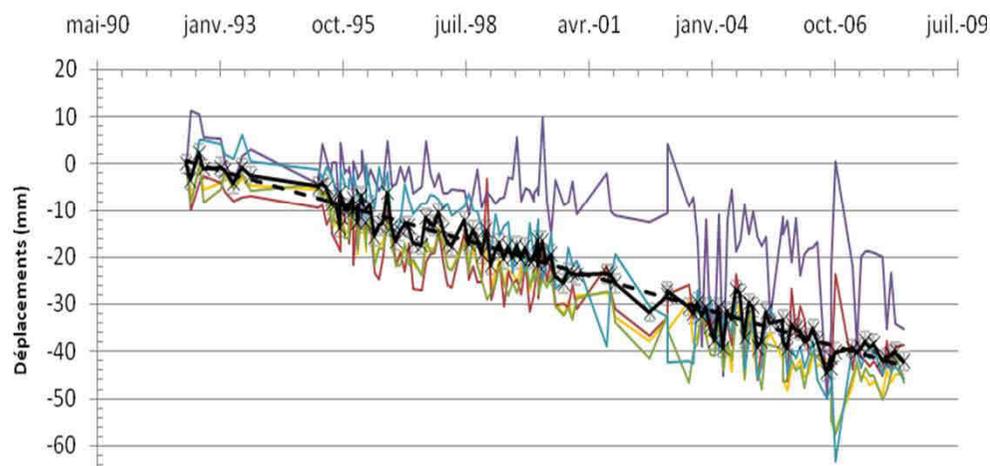
- ✓ Formations de pentes
- ✓ carrières de gypse à ciel ouvert remblayées,
- ✓ carrières souterraines, foudroyées ou mal remblayées,
- ✓ Glaises Vertes
- ✓ nappe perchée
- ✓ dissolution du gypse
- ✓ fragilité des bâtiments

# a. Butte Montmartre

## Interférométrie PS

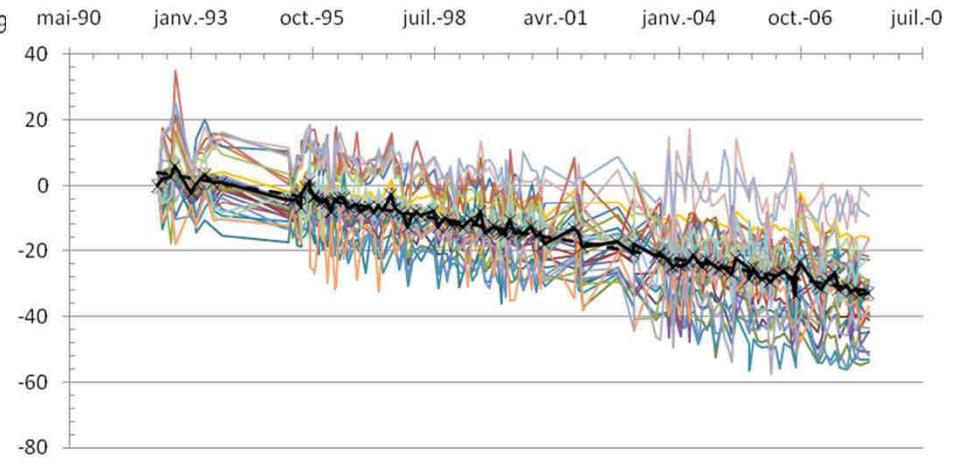


### Pentes Ouest



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

### Pentes Sud sud-ouest



déplacement moyen ~ -3,5 cm (LV)

## Les différentes cartes de vitesses mettent en évidence des **zones de déplacement privilégiées**

LV

- ❑ amplitudes de déplacements les plus fortes : **de l'Ouest au Sud-Sud-Ouest** sur les zones de pentes moyennes à fortes
- ❑ amplitudes plus faibles : **sur le secteur Est** de la Butte, pentes de 20 à 25°
- ❑ stabilité de la partie sommitale de la butte et des replats en bas de pente autour de la butte

### ❑ Hypothèse de déplacements **verticaux**

➡ hiérarchie obtenue identique: amplitudes les plus fortes à l'Ouest et au Sud-Sud-Ouest

### ❑ Hypothèse de déplacements se faisant **suivant la ligne de plus grande pente**

➡ mouvements plus élevés

- -7,2 cm à l'Ouest, et -12 cm au Sud-Sud-Ouest sur toute la période (de  $\sim -0,45$  cm/an et  $-0,7$  cm/an respectivement)
- valeurs aberrantes à l'Est

## Difficultés d'interprétation

déplacement réel : à la fois une composante verticale et une composante parallèle à la pente

### Mais

impossibilité de déterminer les parts respectives de déplacement dans la pente et déplacement vertical.

difficultés d'interprétation des déplacements obtenus liées à la géométrie de la Butte, et au manque de données dans des géométries d'acquisitions différentes

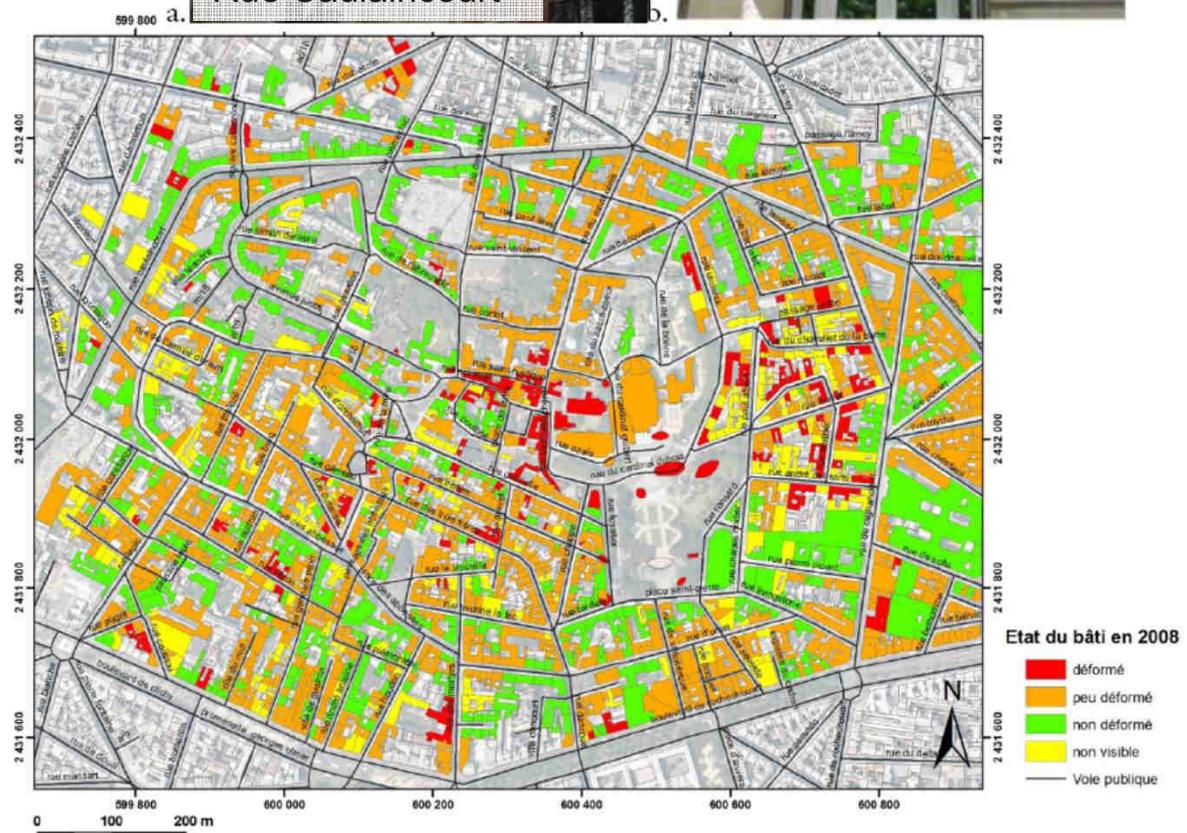
# Cartographie des désordres

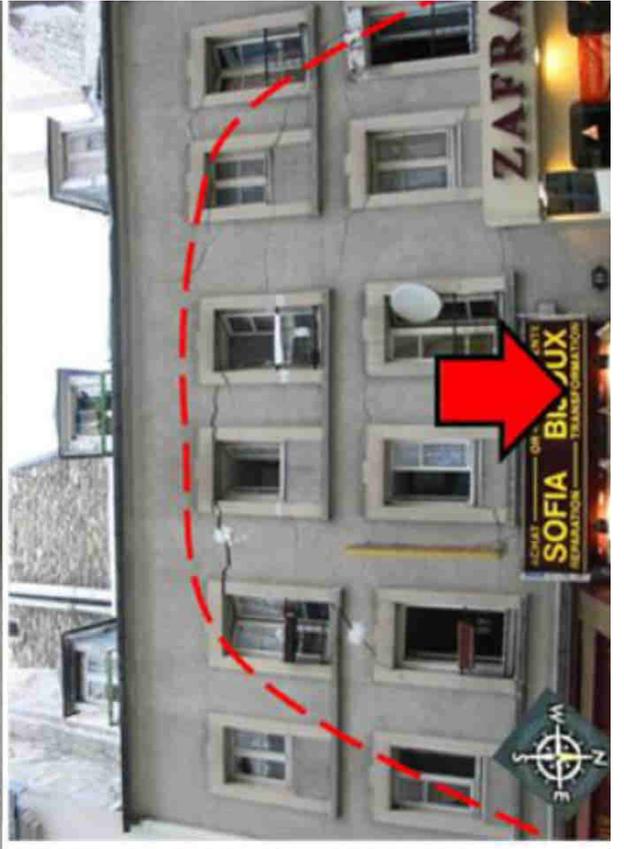
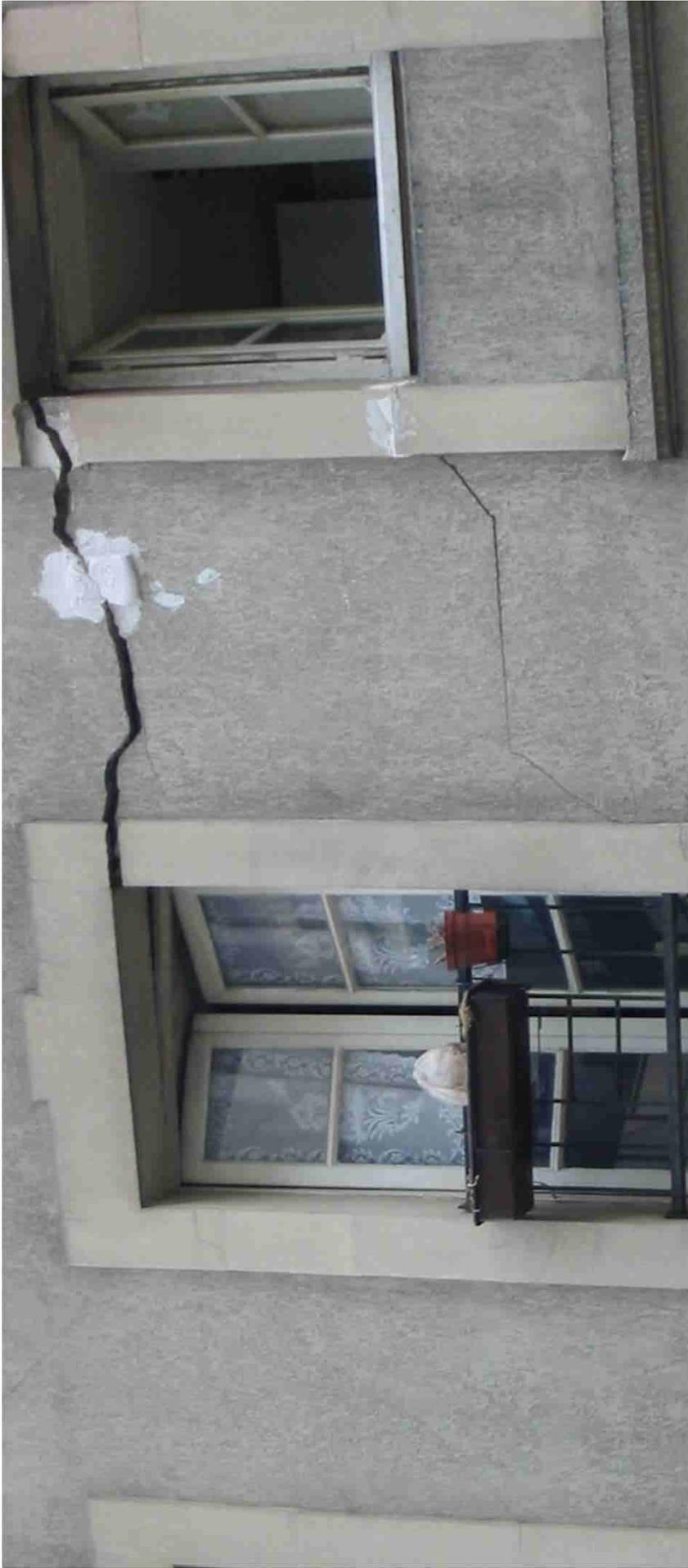


Rue des Trois Frères



Rue Caulaincourt

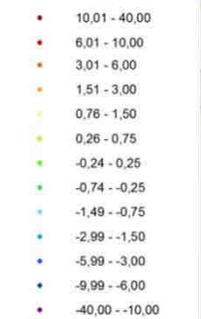






Comparaison entre  
interférométrie PSI  
et constatations terrain  
55 - 57 rue Berthe

Vitesses moyennes en mm/an  
calculés entre 2003 et 2008  
(Cohérence > 0,2)



Etat du bâti en 2008

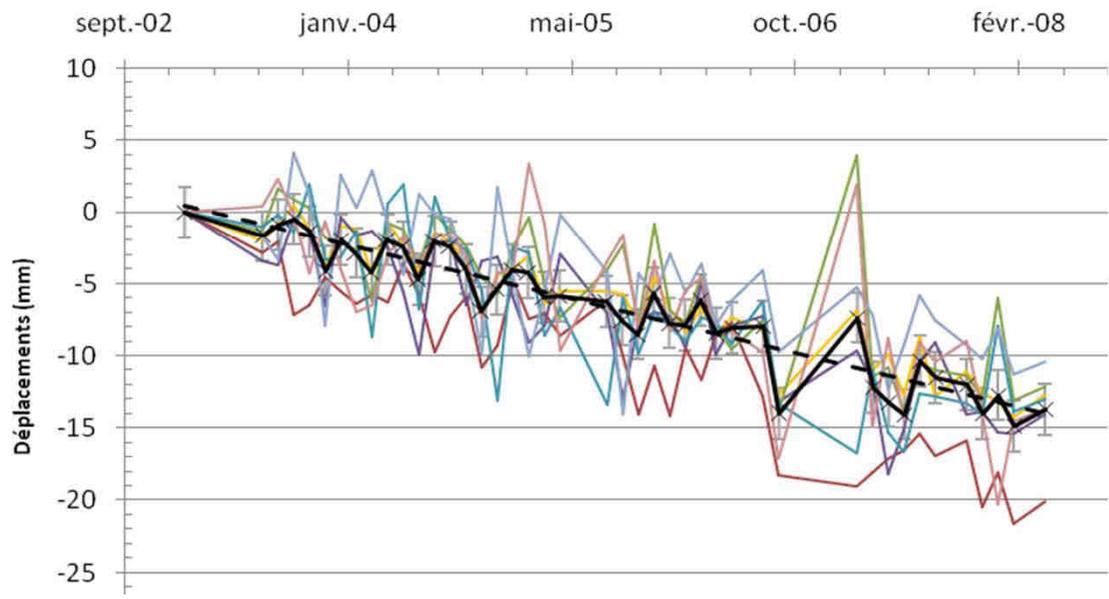
- déformé
- peu déformé
- non déformé
- non visible
- ★ Monuments Paris

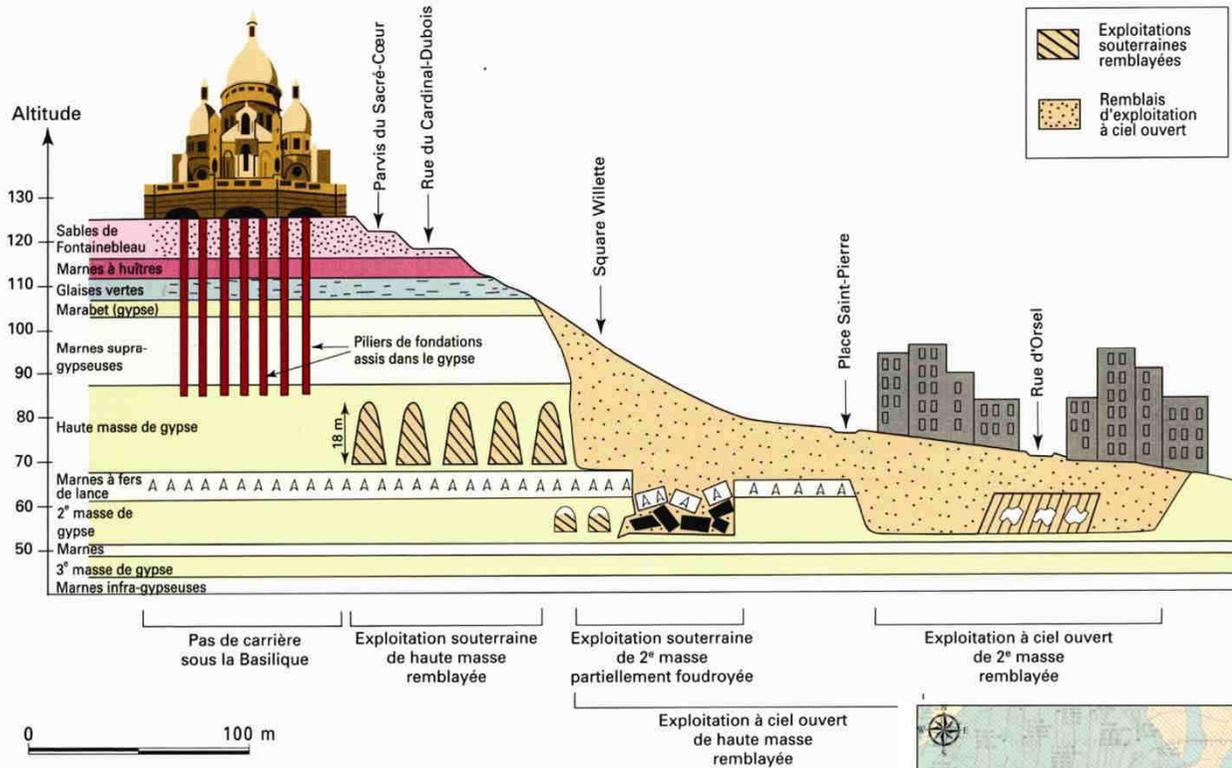


55-57 rue Berthe /  $0,60 < \text{Cohérence} < 0,91$



Deffontaines et al., 2005  
Magalhaes et Deffontaines, 2009





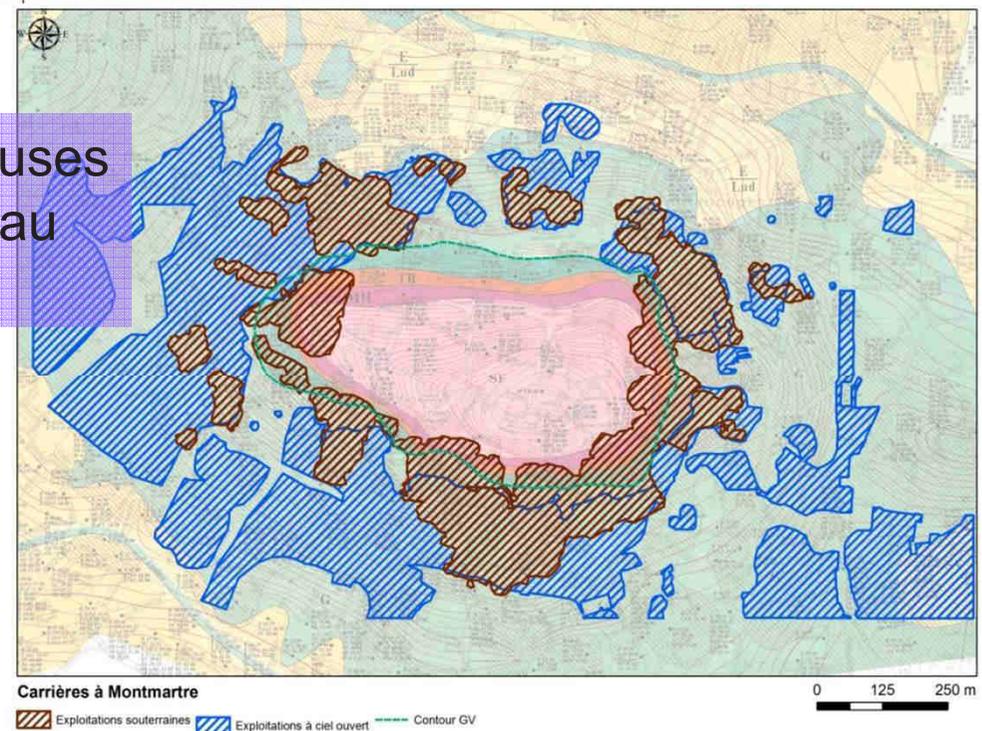
## Facteurs anthropiques :

- exploitation du sous-sol
- urbanisation

exploitations des Marnes Supra-gypseuses et du gypse : en périphérie de la butte au pourtour de la Butte

plâtre

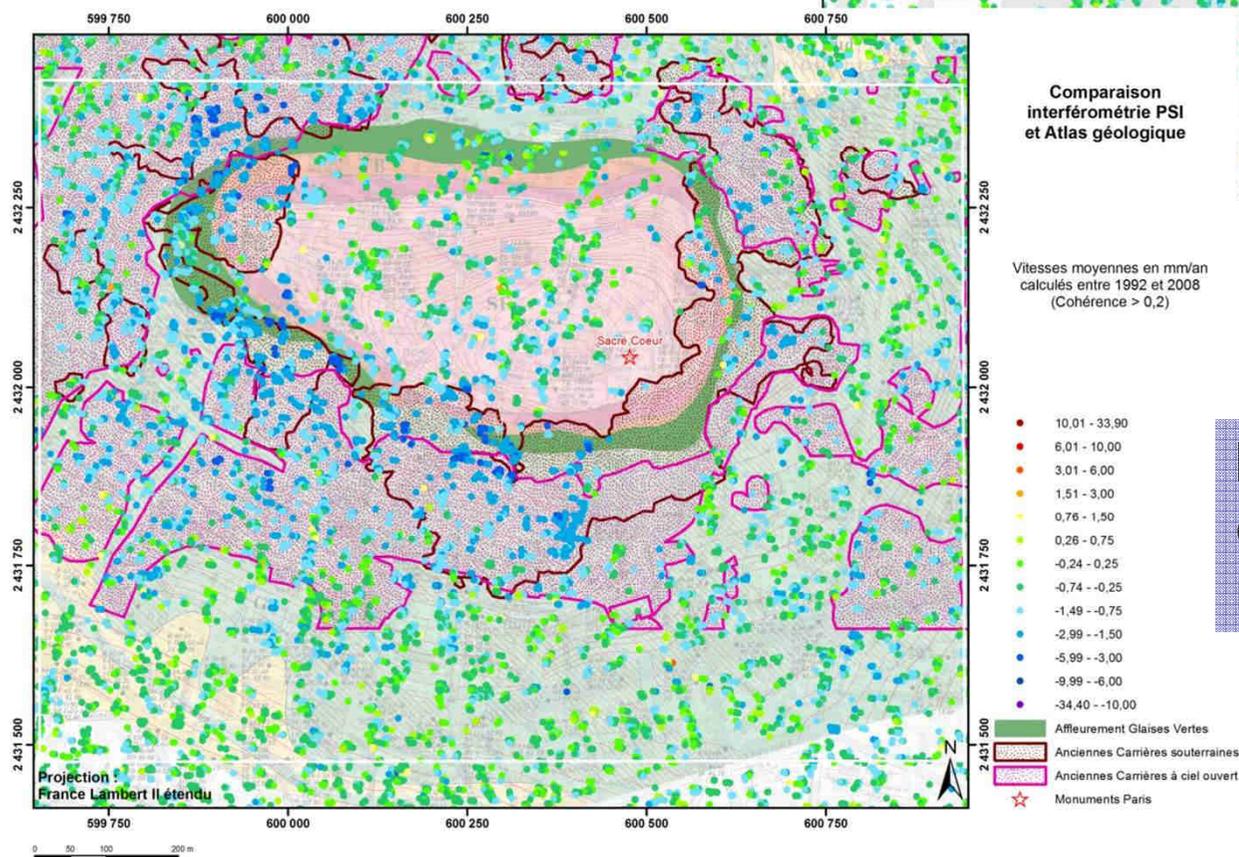
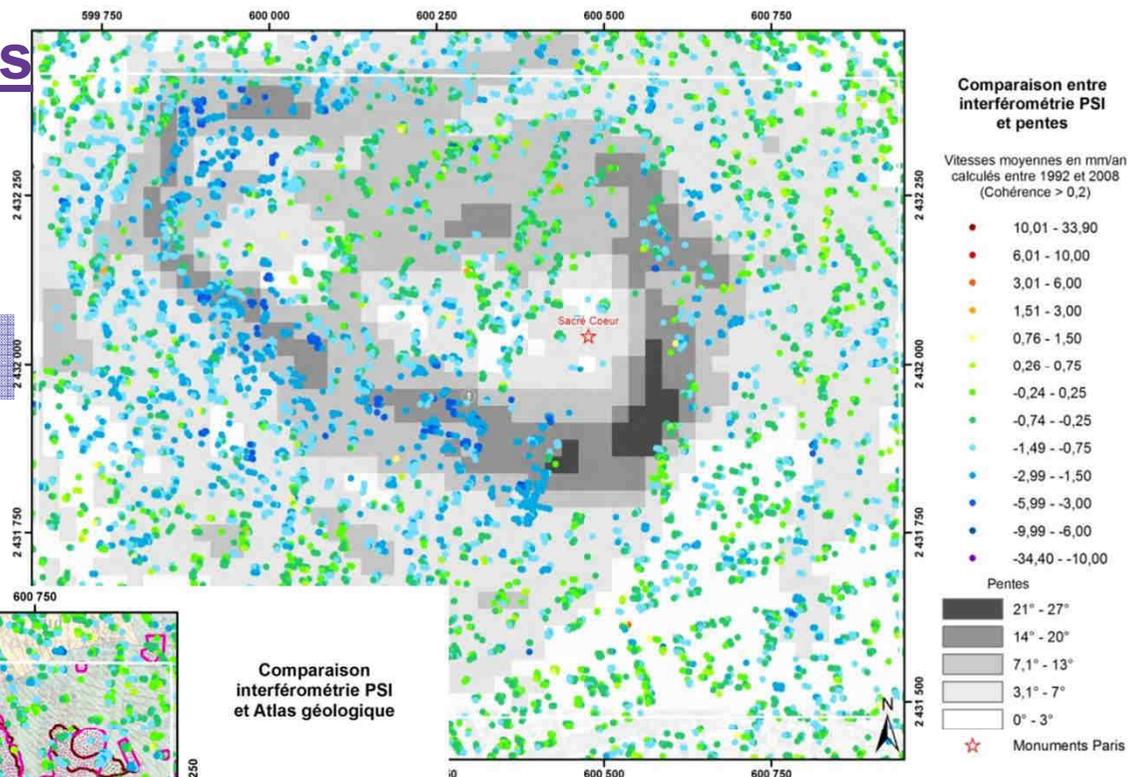
Calotte sommitale non sous-minée



# Analyse des déformations

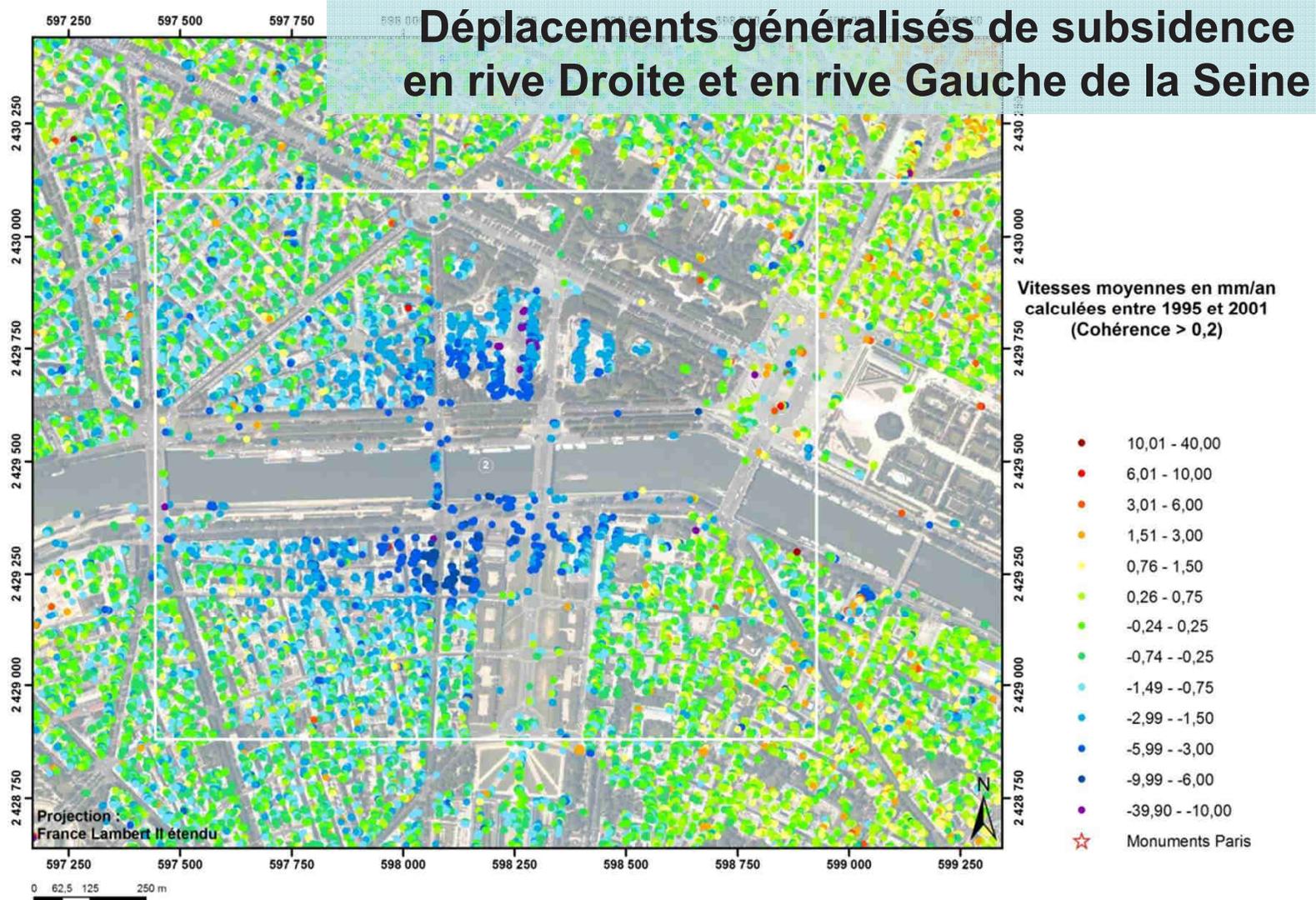
## Facteurs principaux

la présence de pentes fortes



la présence d'anciennes carrières foudroyées ou mal remblayés

## b. Grand Palais-Invalides



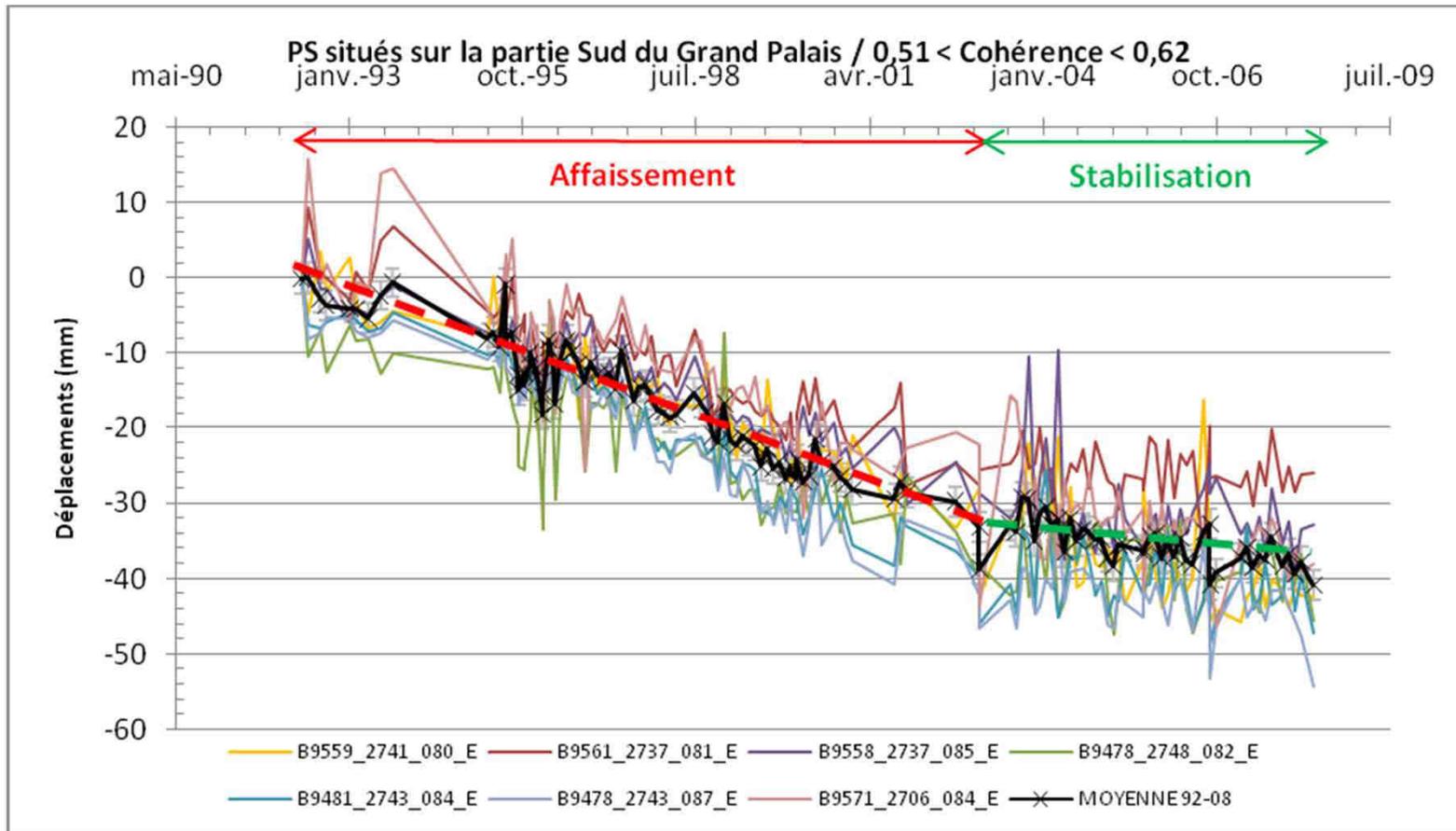
Déplacements :

en rive Droite : -3 à -6 mm/an

en rive Gauche : -4 à -9 mm/an.

Dissymétrie Nord-Sud

## Partie Sud du Grand-Palais



Les premiers travaux de restauration, avec reprise en sous-œuvre ont débuté en 2001

# Interprétation des déformations

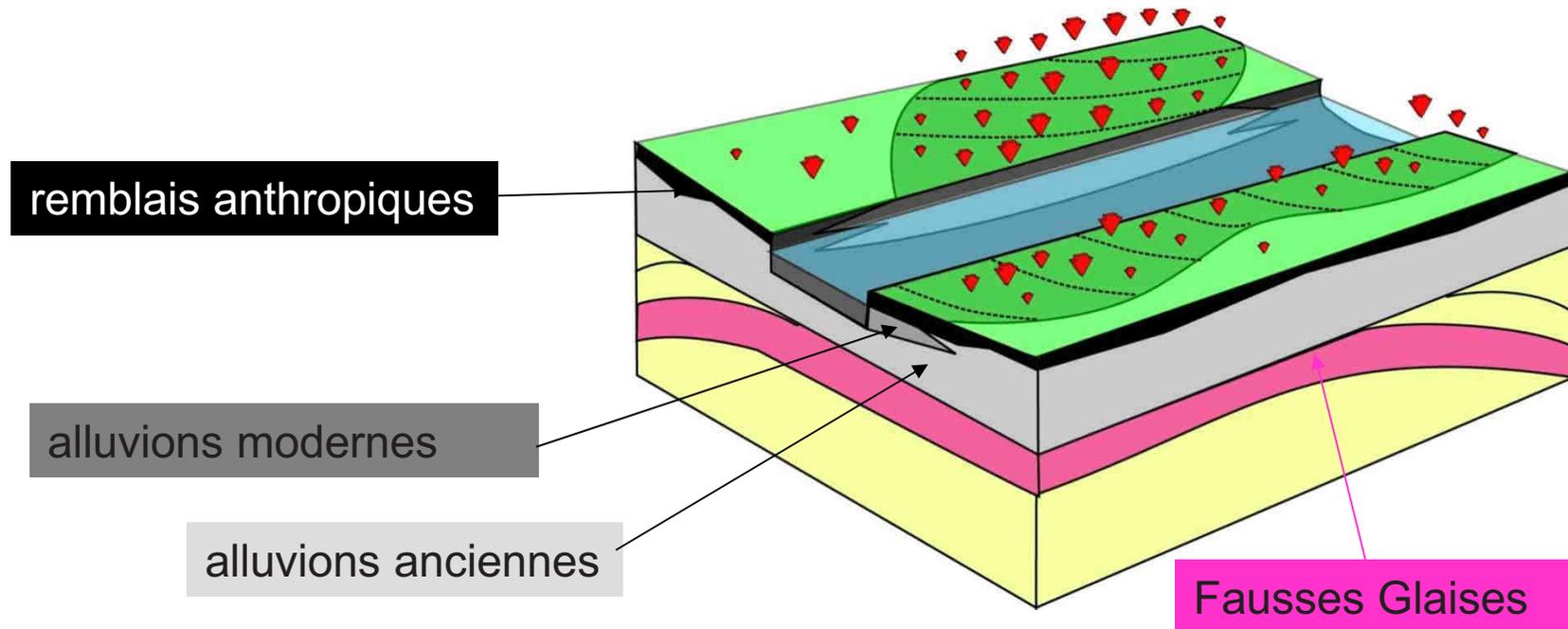
## Déformations observées sur le Grand Palais

- Liées à la technique de construction

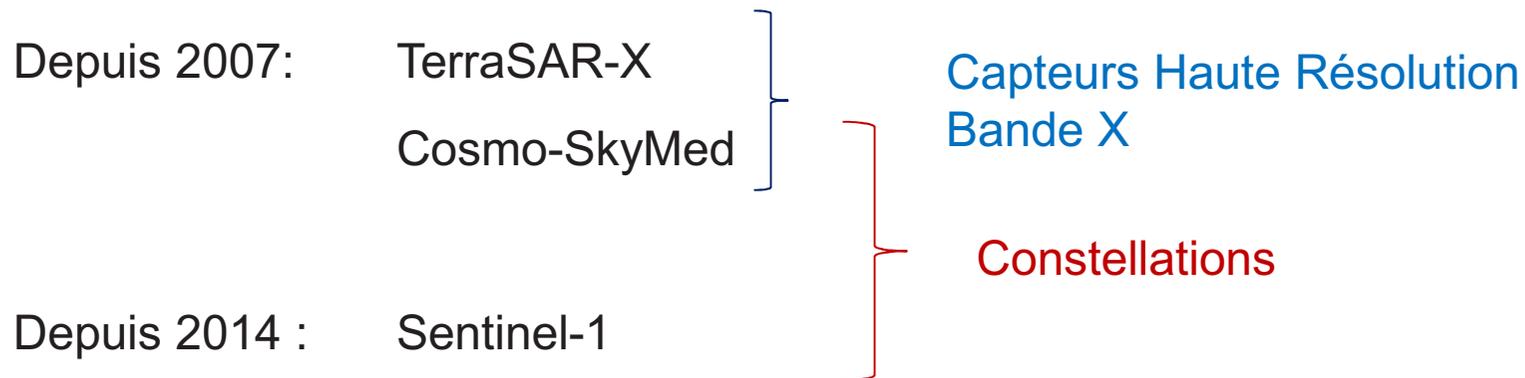
délavage, puis un pourrissement progressif des têtes de pieux en bois maintenant l'infrastructure

dû aux modifications du niveau de la nappe phréatique (travaux successifs)

- Mais aussi : présence de remblais, alluvions modernes de la Seine (tourbes et vases d'un ancien bras de la Seine)



## 2007 : nouvelle génération de capteurs Nouvelles missions - Constellations



	Bande de fréquence	Résolution (m)	Temps de revisite jours	Longueur d'onde (cm)	$\lambda/2$ (mm)
ERS/Envisat	C	20	35	5,6	28
TerraSAR-X	X	1 - 3	11	3	15
CosmoSky-Med	X	1 - 3	16	3	15
Sentinel-1	C	20	12	5,6	28

**Bande X** : meilleure sensibilité aux déplacements que la bande C  
amélioration de la précision de mesure

**Haute Résolution** :

Amélioration de la résolution des images : densité spatiale de PS accrue

**Temps de revisite plus élevé** : amélioration de la résolution temporelle

Accéder à des phénomènes plus rapides

Amélioration de la précision (nombre d'images plus importants)

**Constellation** : assurer la continuité de l'archive !

# Distribution spatiale des PS

## Radarsat-1

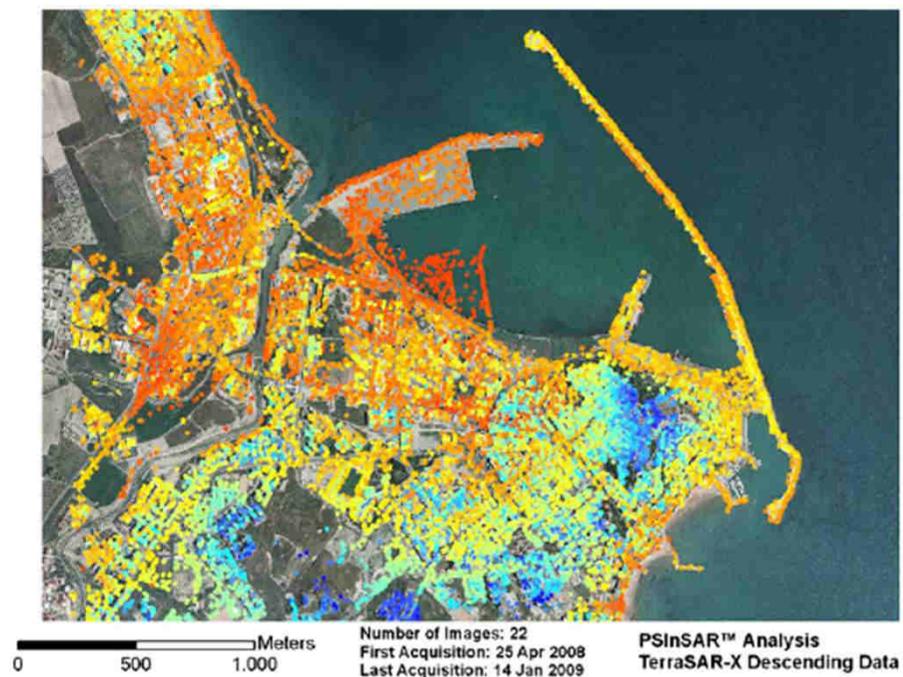
62 images  
RADARSAT-1 S3 (Standard Beam)  
Période 2003–2007.



## TerraSAR-X

22 images TerraSAR-X (Mode Strip-Map)  
April 2008 -January 2009.

Zone semi-urbaine au  
Sud de l'Italie



# Tianjin city (Chine)

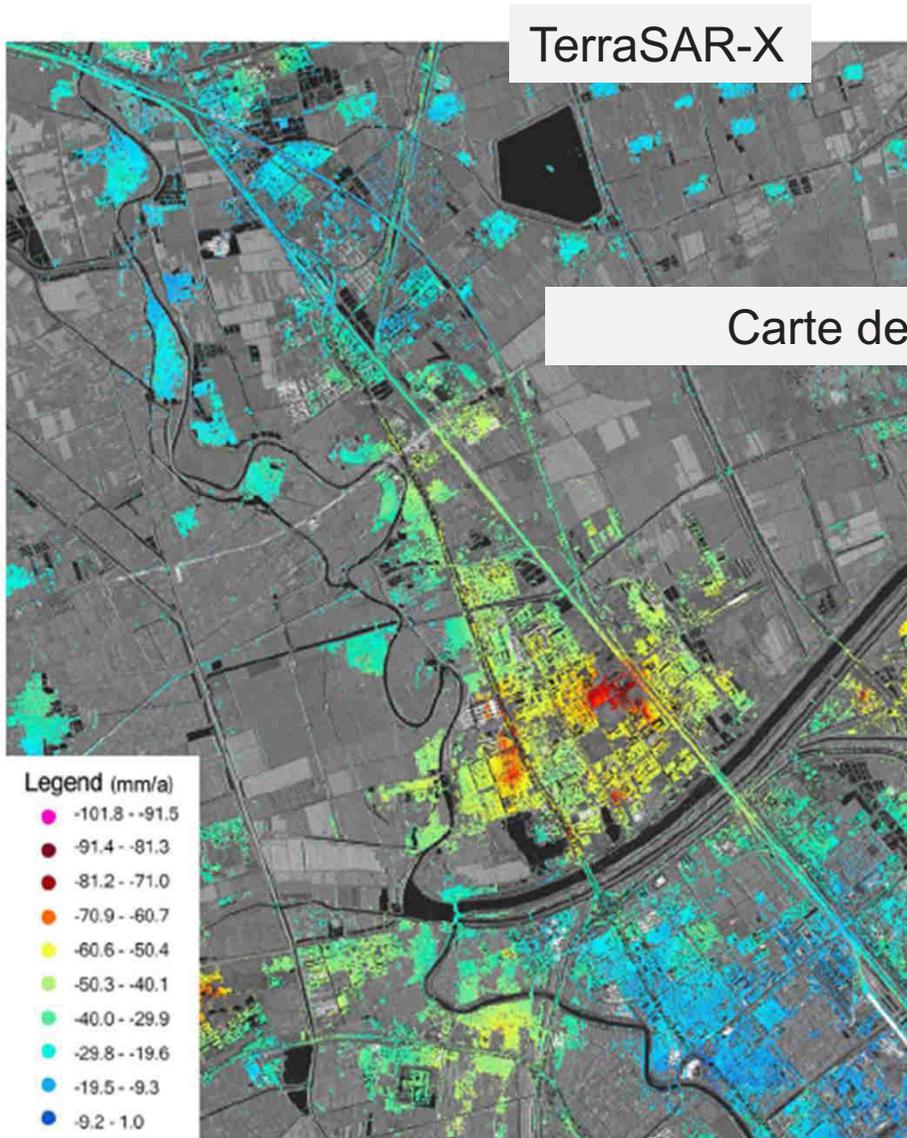


Figure .3 PSI derive velocity map by using TerraSAR-X data. Totally 554412 PSs have been analyzed and shows detailed urban subsidence.

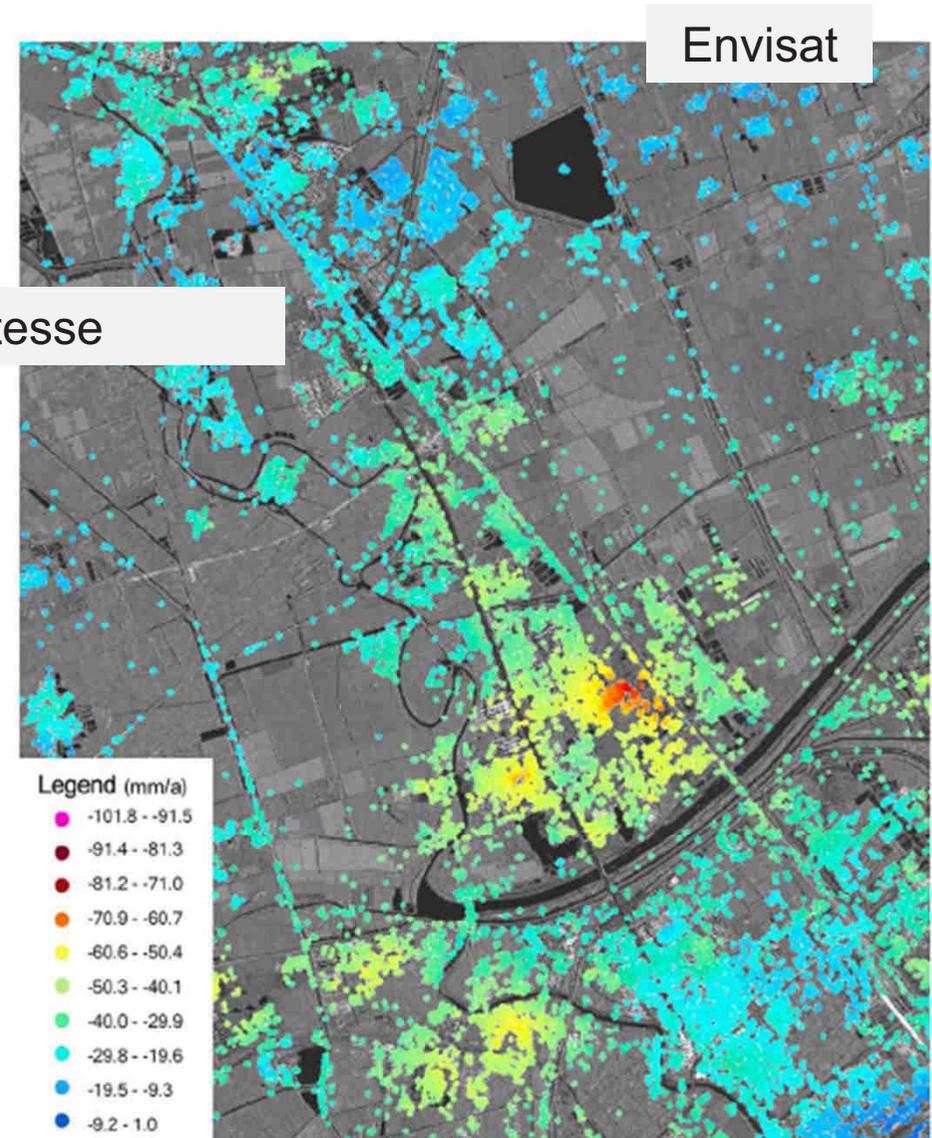


Figure .4 PSI derive velocity map by using ENVISAT data. Totally 15521 have been analyzed and shows the similar trend with fig.3.

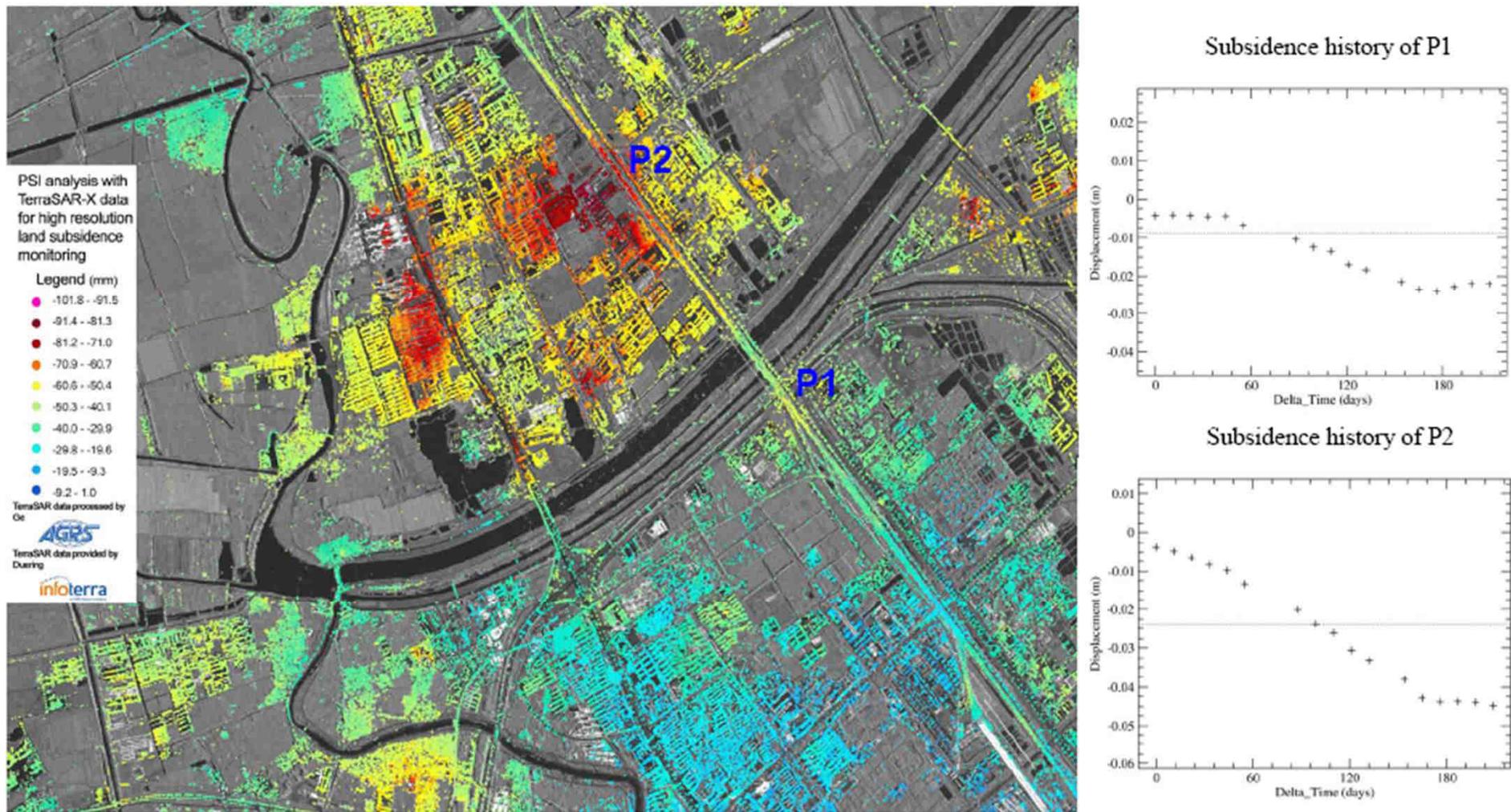
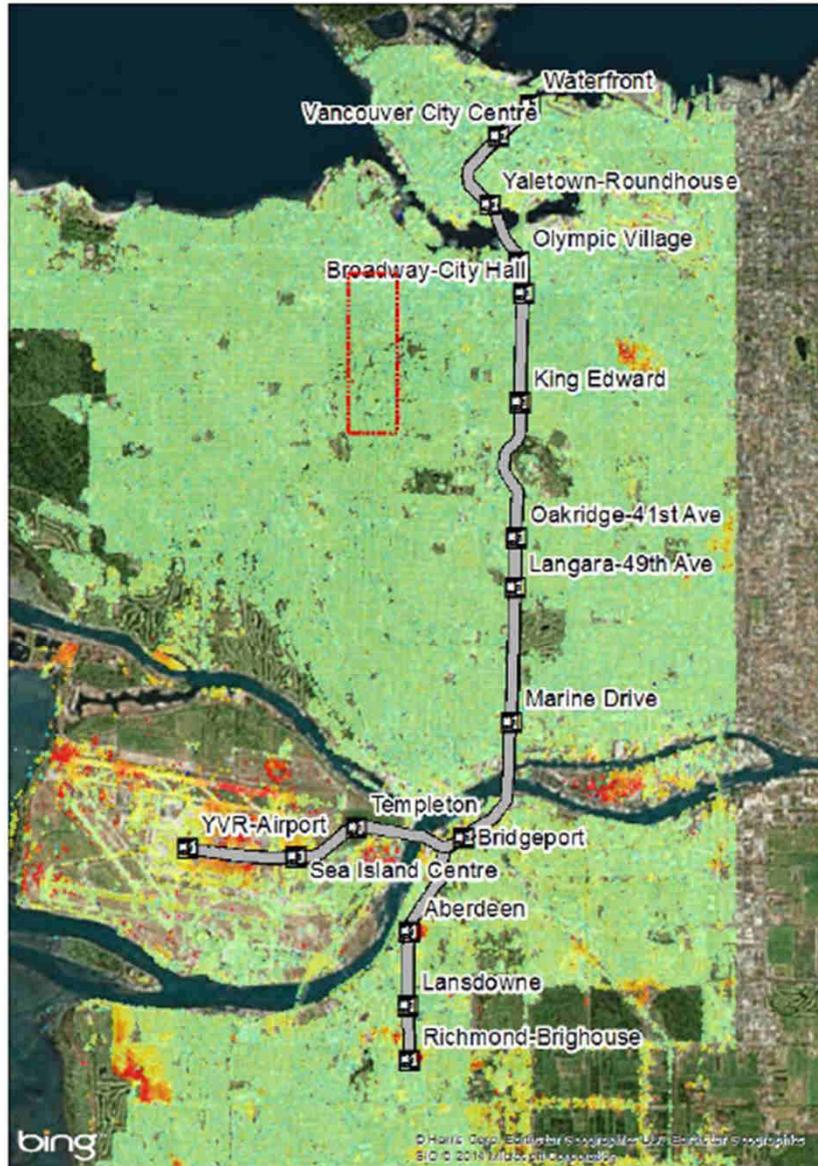
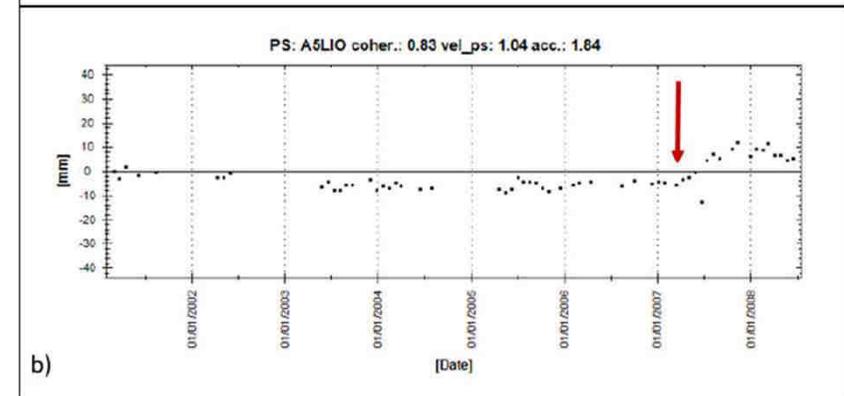
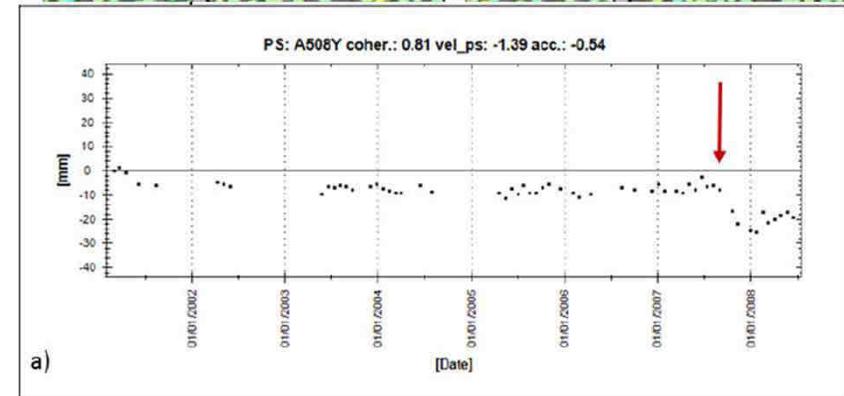
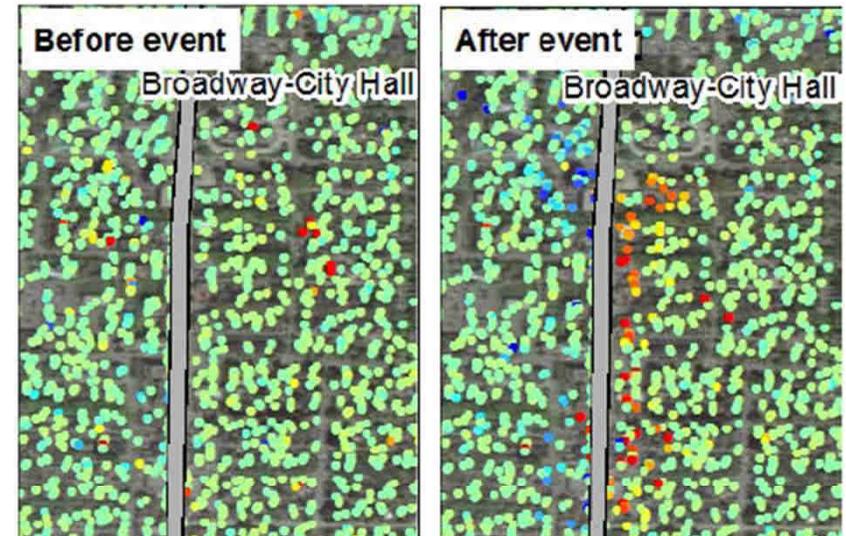


Figure .6 Velocity map of Beichen subsidence center. It indicates the subsidence center and its impact to the Jingjin high speed railway. P1 and P2 are samples selected in the railway and the subsidence history in the time interval have been retrieved as figure on the right.



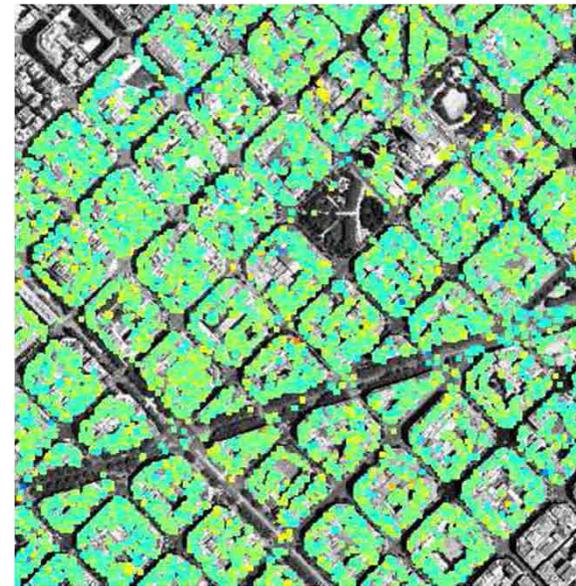
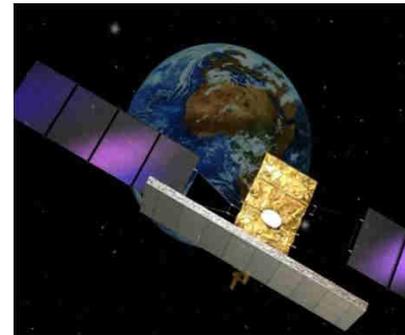
Canada Line stations  
 Canada Line  
 Displacement Rate [mm/y]  
 -10 10  
 2001-08 deformation rate along Canada Line.



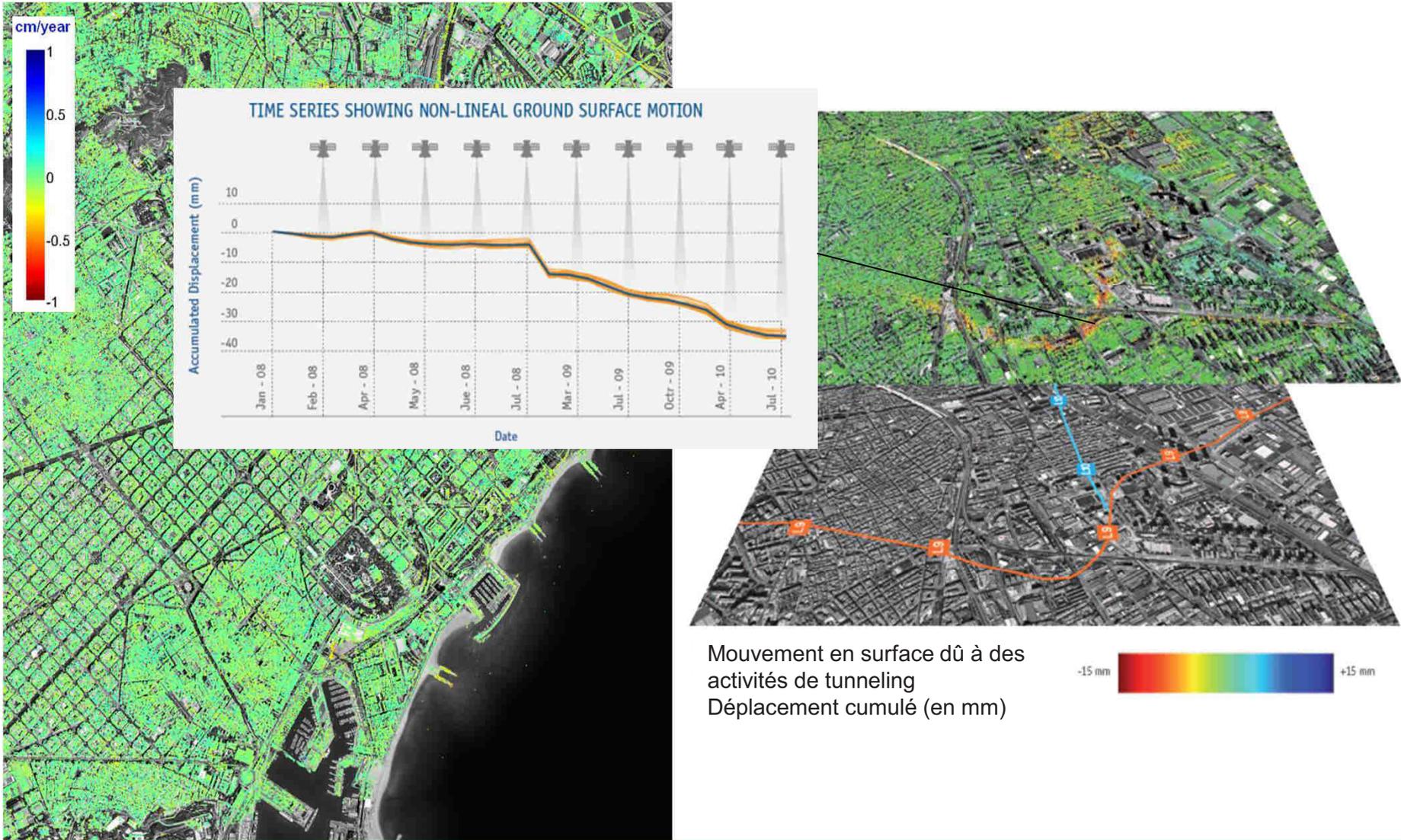
Missions moyenne  
résolution ERS/ENVISAT



Missions Haute Résolution  
Bande X (TSX-CSK)



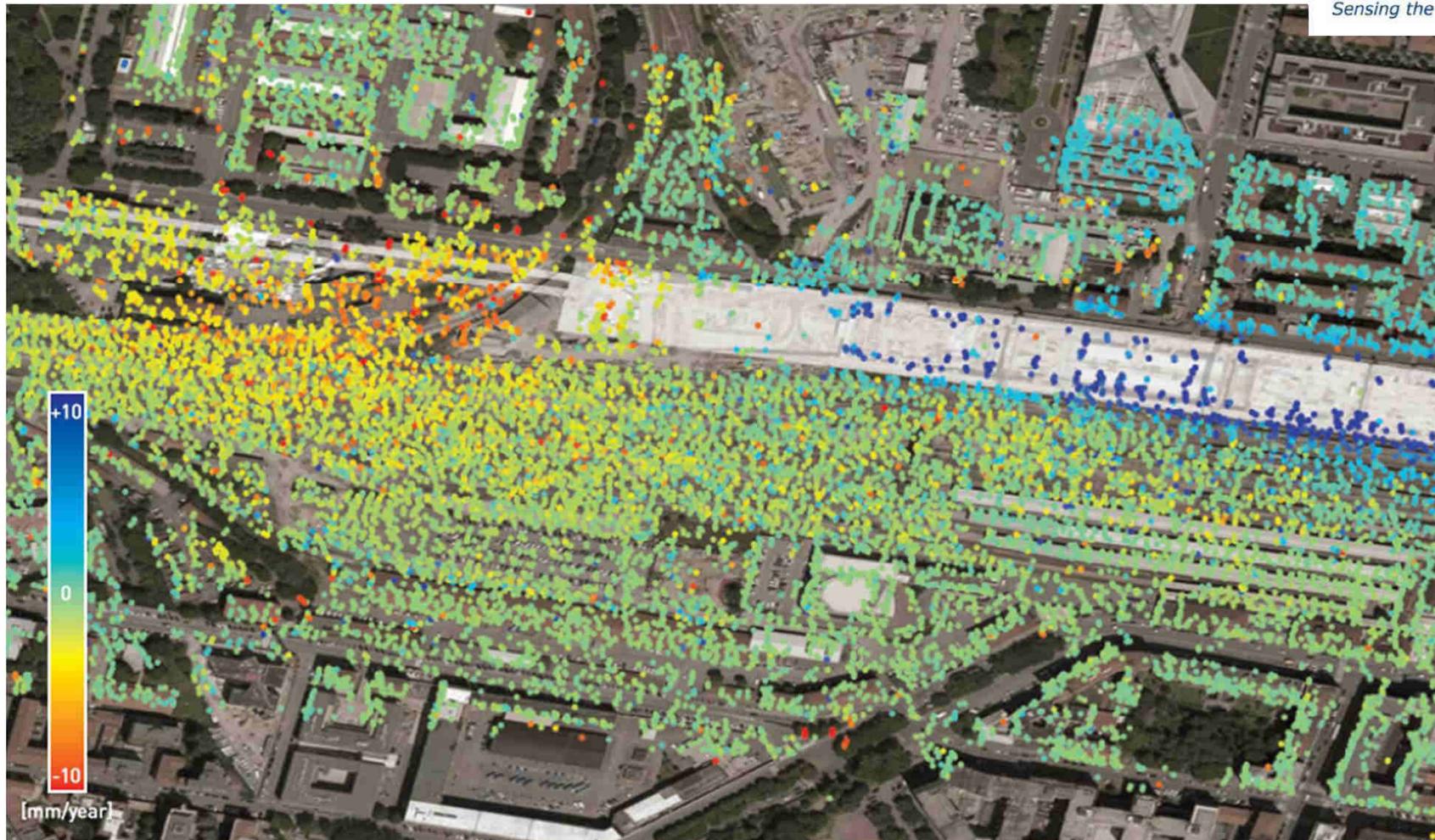
# Carte des déformations sur Barcelone



Les différentes couleurs sont significatives des mouvements de la surface et des infrastructures durant la période de l'étude. Les séries temporelles permettent de suivre l'évolution dans le temps du mouvement affectant les points de mesure.

## Bologne (Italie)

Suivi de la phase de construction phase du tunnel et de la nouvelle station à Bologne pour la ligne à grande vitesse



Travaux de construction de la ligne à grande vitesse

Zone rouge : zone en subsidence liée au tunnel

Zone bleue : phénomène de rebond dû à l'excavation pour la station souterraine

# Italie : Analyse interférométrique à l'échelle nationale

Constantini et al., 2014

Interférométrie PS  
ERS-Envisat

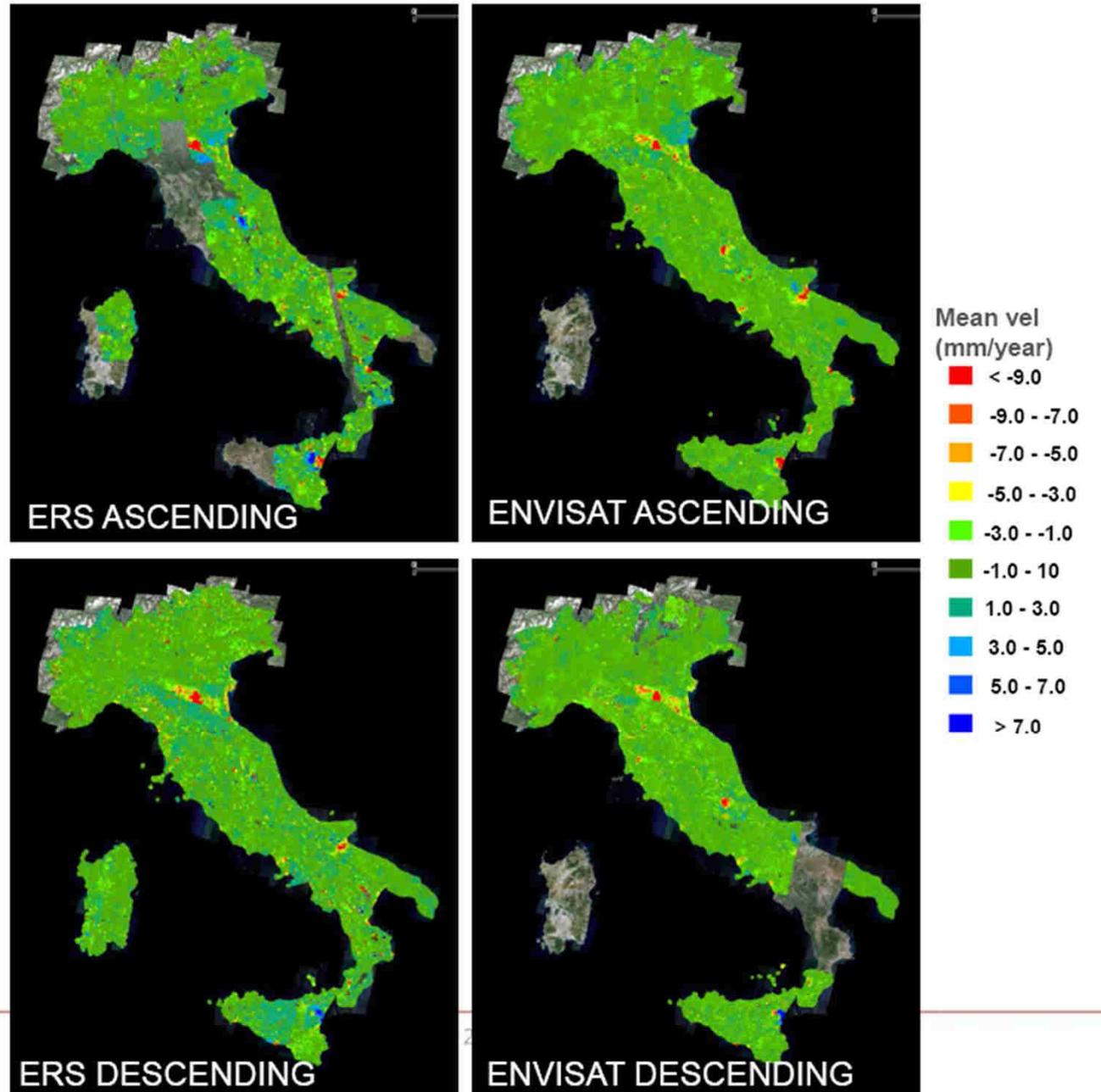
Analyse de l'archive  
complète

ERS : 1992 - 2000

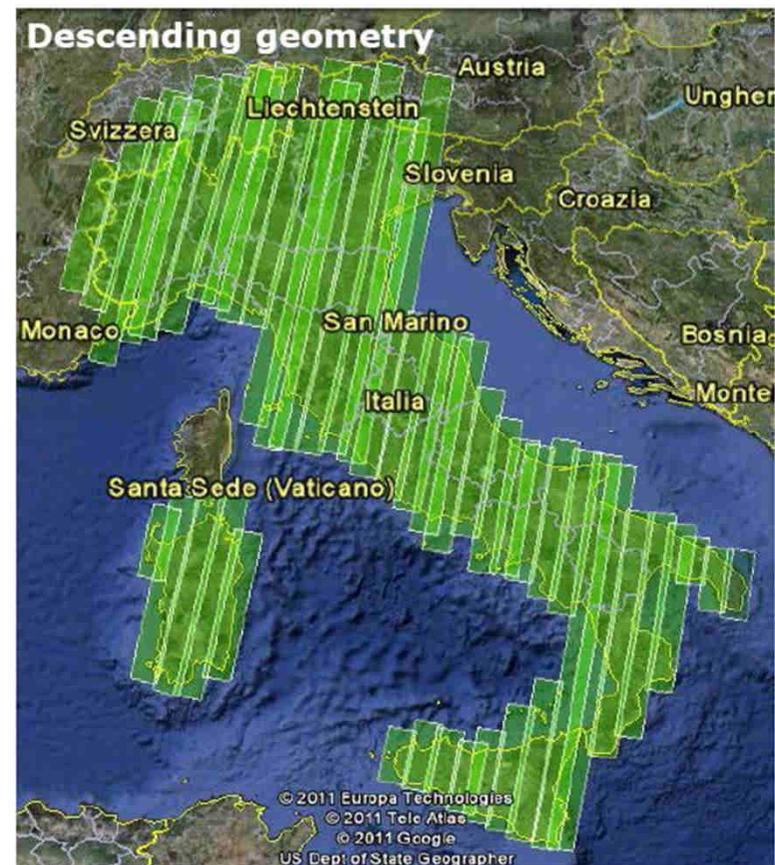
Envisat : 2003 - 2010

**First PS SAR  
interferometry project  
at national scale.**

**e-geos**  
AN ASI / TELESPAZIO COMPANY

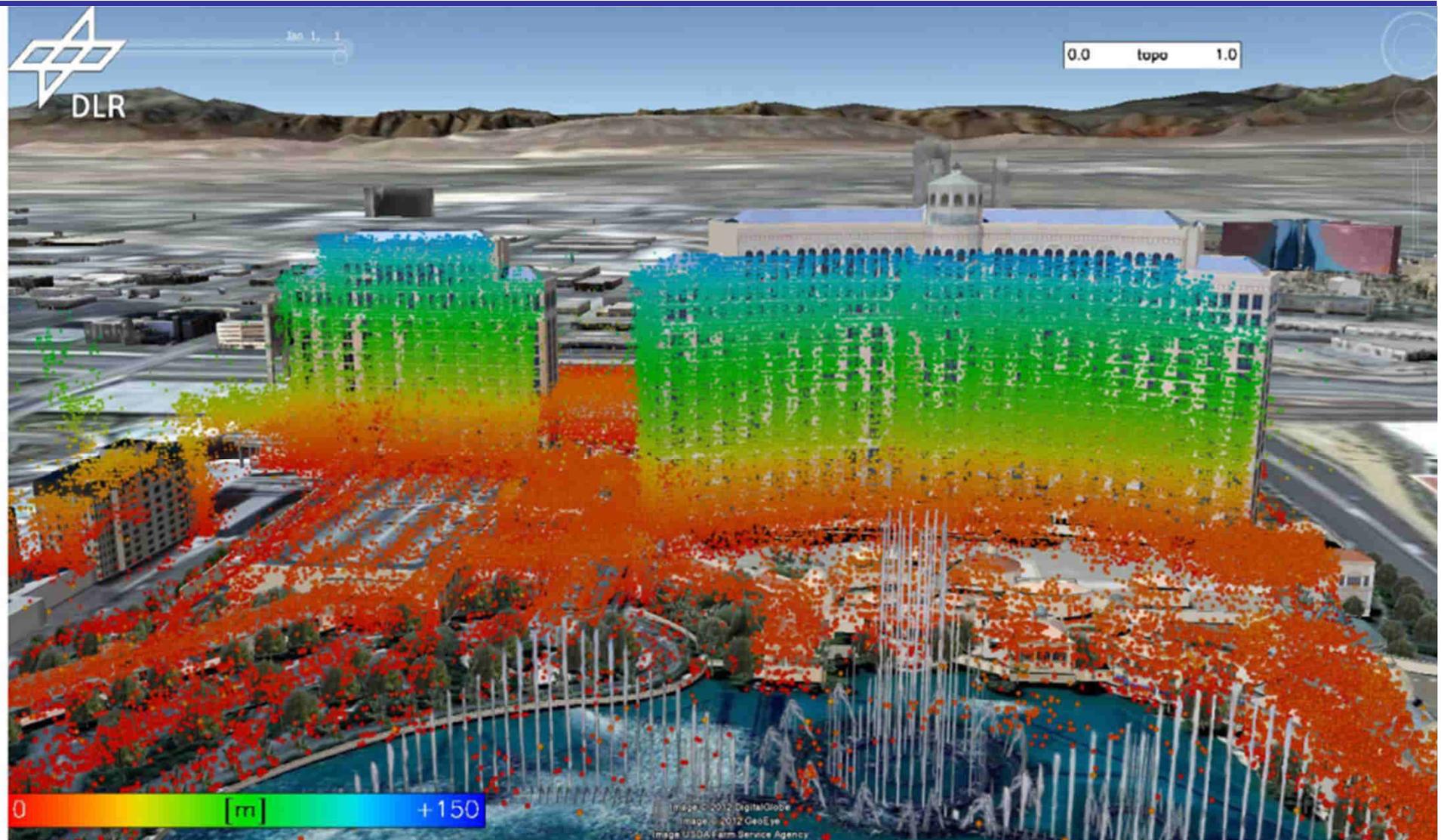


# Données Cosmo-SkyMed en cours de traitement

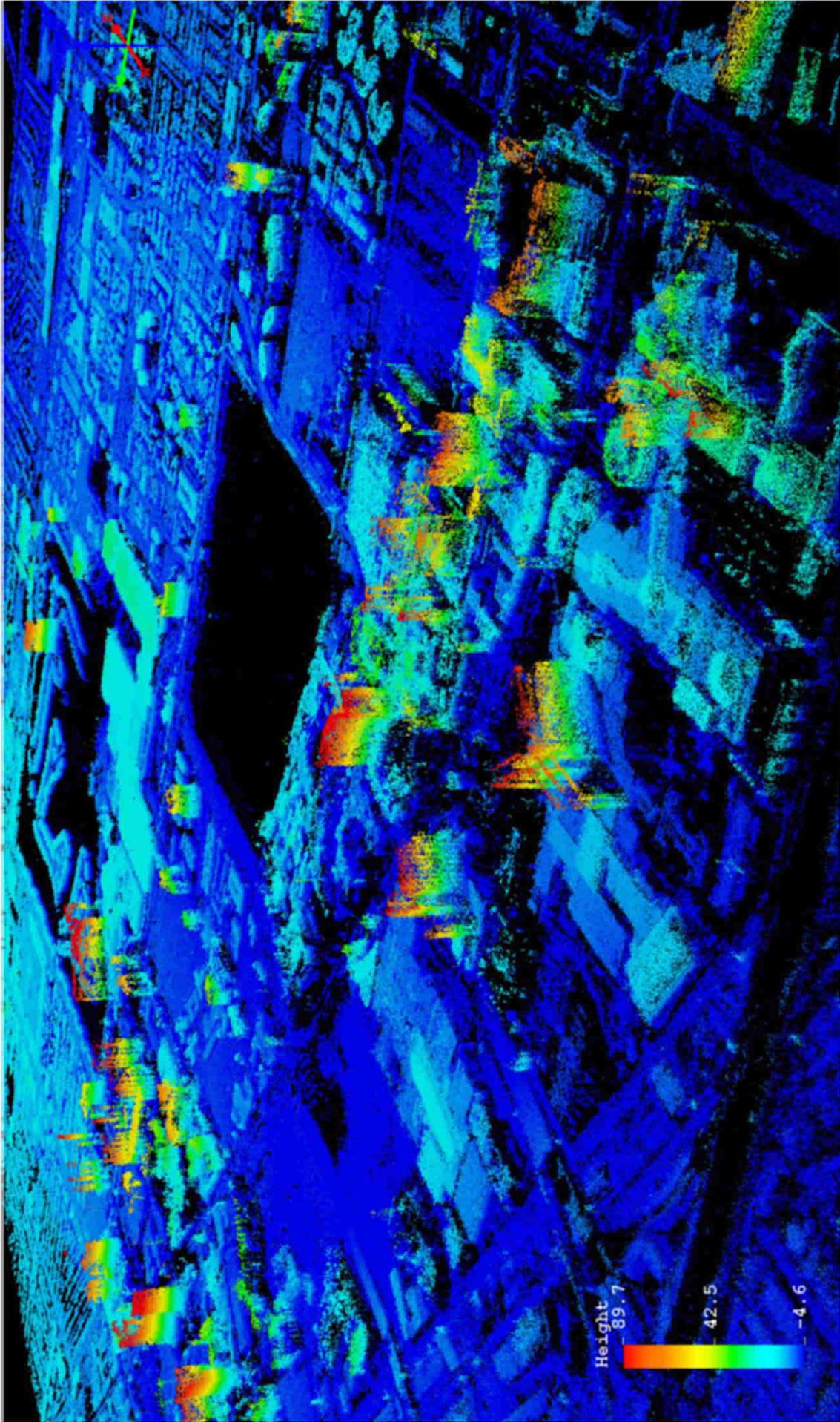


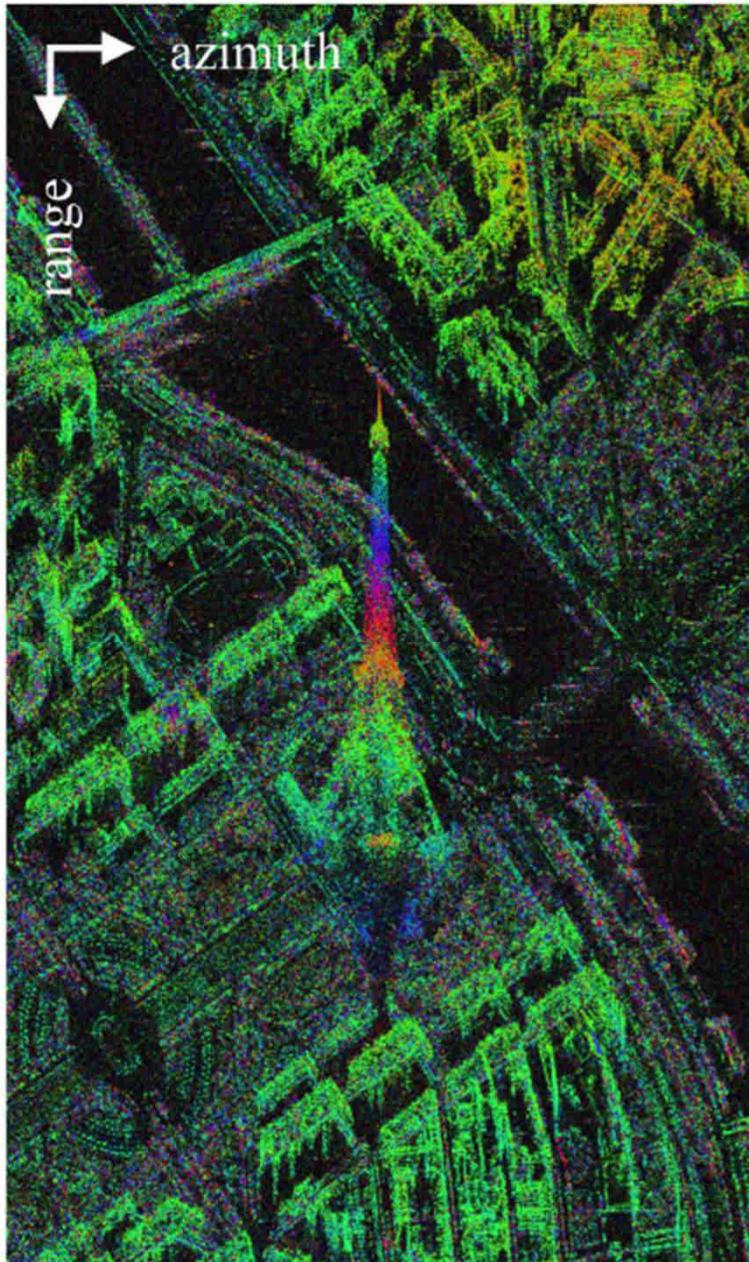
Plan d'acquisition

# TOMO SAR



TerraSAR-X high resolution spotlight data with a slant-range resolution of 0.6 m and an azimuth resolution of 1.1 m. 30 images covering a time period of more than one year, from February 2008 to June 2009, over downtown Las Vegas.





The covered area measures 5 km in azimuth and 13.7 km in range at a pixel spacing of 0.79 m in ground range and 0.87 m in azimuth.

Mouvement de 7.5 mm en 11 jours

16-27 janvier 2008  
H=321

# Conclusions

---

## □ Utilisation des techniques interférométriques

- **Information complémentaire ou nouvelle** sur le champ de déformation
- Dans certains cas, **avancées notoires** dans la connaissance des déplacements.

*Meilleure détermination de l'étendue spatiale du phénomène*

## □ Techniques interférométriques vs. méthodes traditionnelles

- **couverture spatiale** importante et **échantillonnage spatial très dense** d'observation

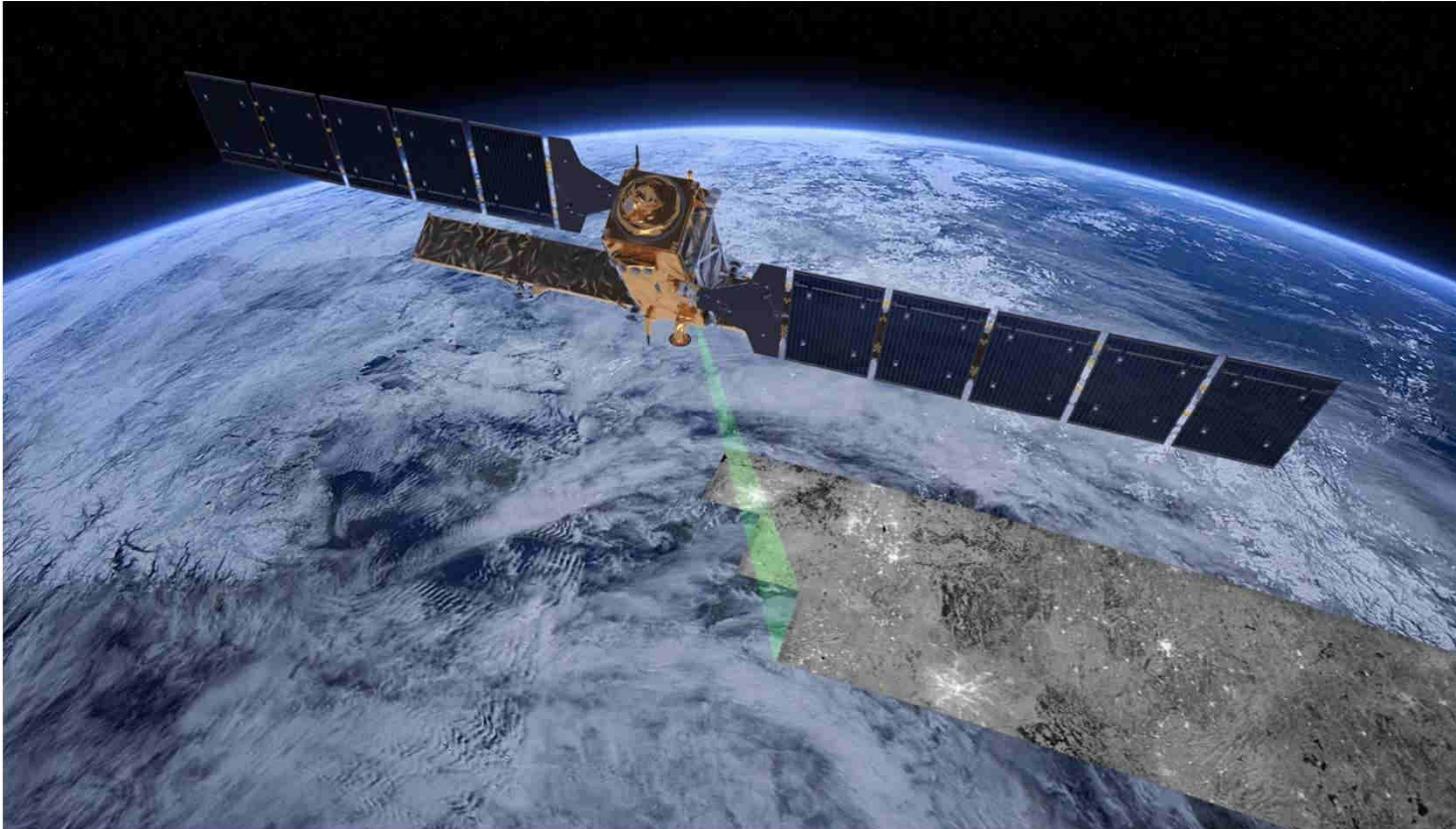
*densité de points de mesure en général supérieure aux autres sources de mesure*

- **échantillonnage temporel élevé**
- **précision de la mesure élevée**

*performances du nivellement ou du GPS ?*

- **une seule composante**

Nécessité d'acquisitions régulières de données radar



Sentinel-1 : Résolution moyenne, mais données gratuites