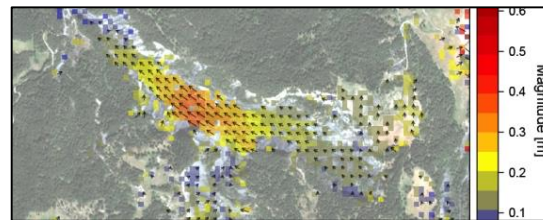
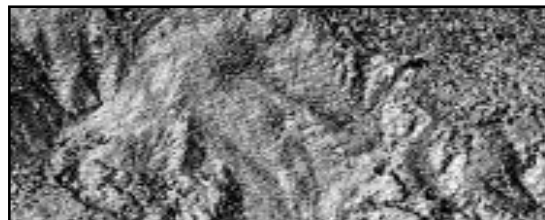


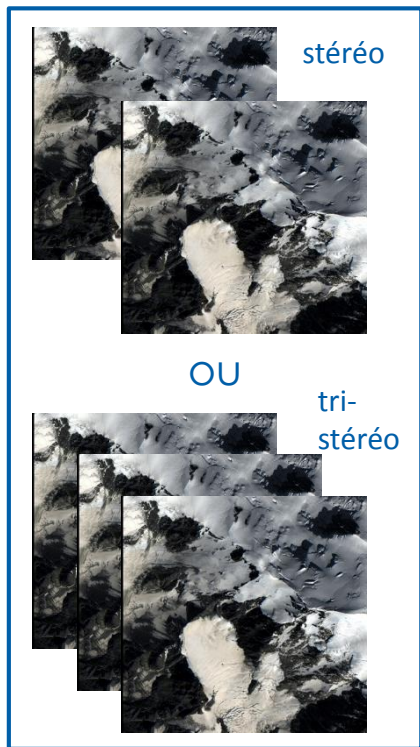
# L'apport de la télédétection pour l'analyse des mouvements du sol

J.-P. Malet, EOST – CNRS / Université de Strasbourg  
avec des contributions de A. Stumpf, P. Bornemann, R. Schlögel,  
C. Heimlich, C. Doubre, F. Masson



# L'imagerie optique stéréoscopique pour créer des modèles de surface

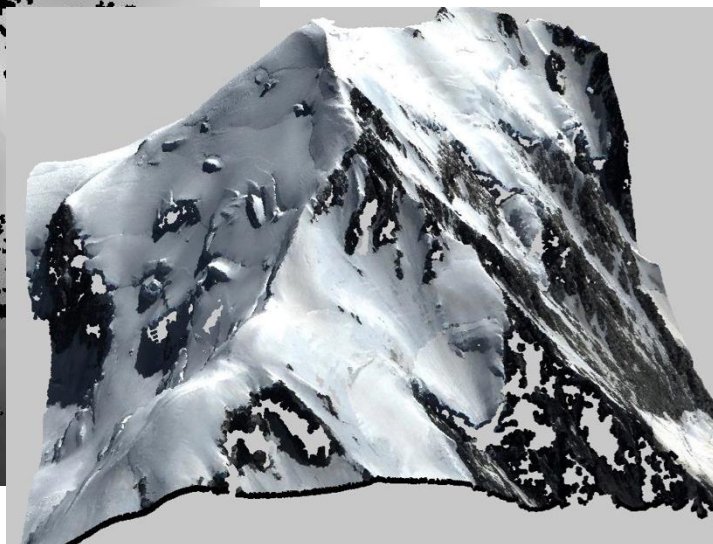
Données d'entrée



Modèle de surface (E,N,Z)



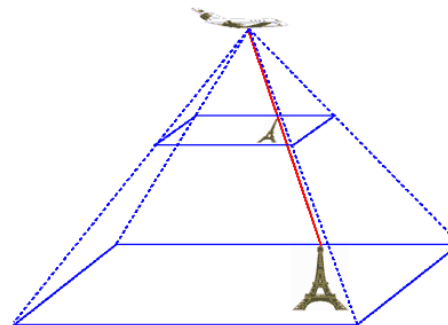
Modèle 3D



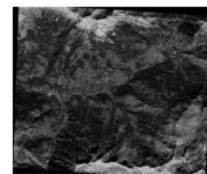
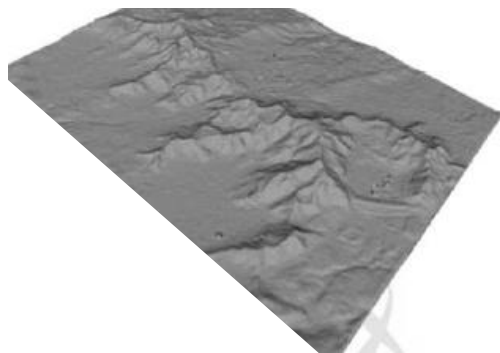
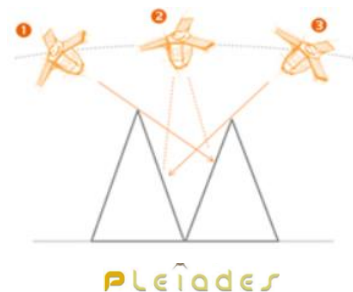
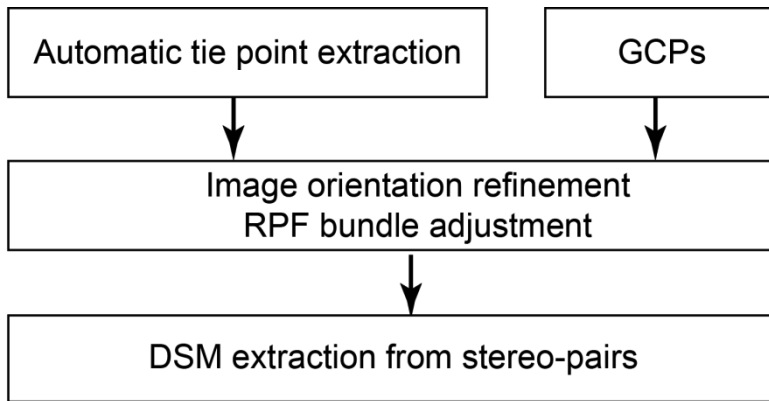
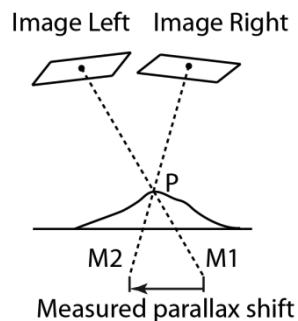
Résultats



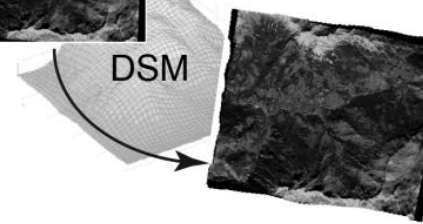
Principe de la vision stéréoscopique



# L'imagerie optique stéréoscopique pour créer des modèles de surface



orthophotographie



## Logiciels commerciaux

- Erdas Imagine 
- PCI Geomatica 
- Pixel Factory 
- Agisoft Photoscan 
- Smart3DCapture 

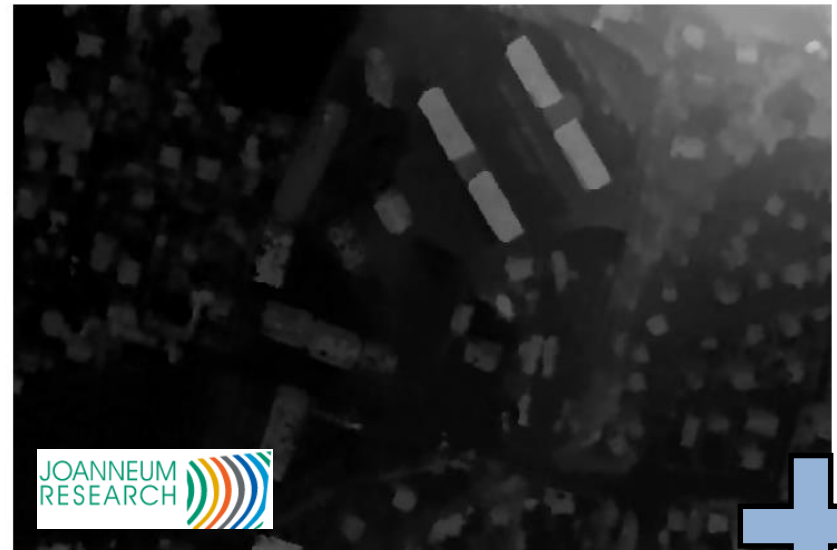
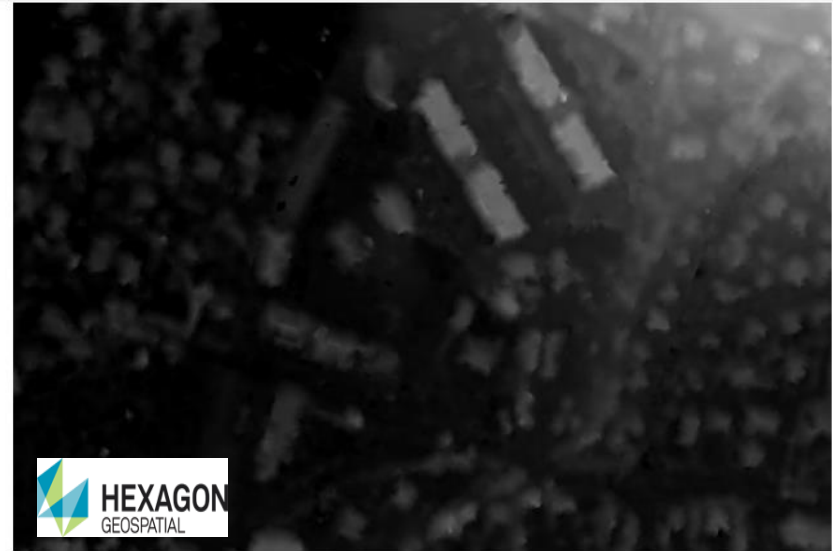
## Logiciels open-source

- Mic-Mac 
- AMES/ASP 
- s2p
- SURE 
- PMVS2
- RSG
- openMVG 
- JOANNEUM RESEARCH 

# L'imagerie optique stéréoscopique pour créer des modèles de surface



Image Pléiades ortho-rectifiée



50 0 50 100 150 200



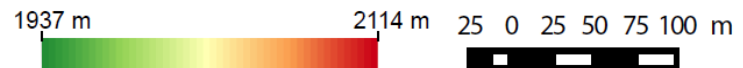
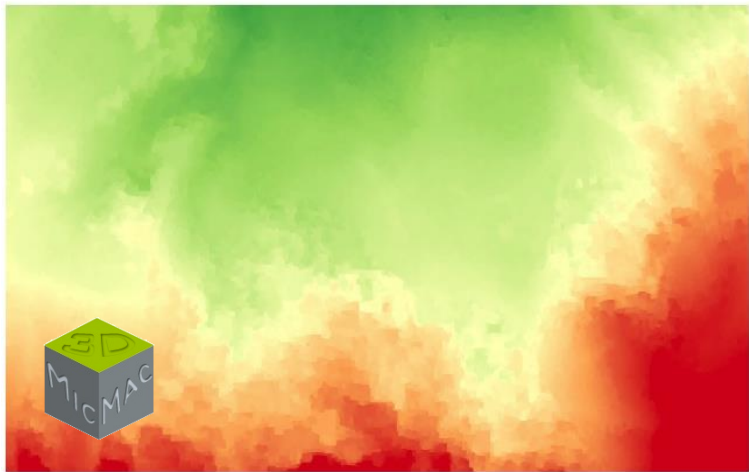
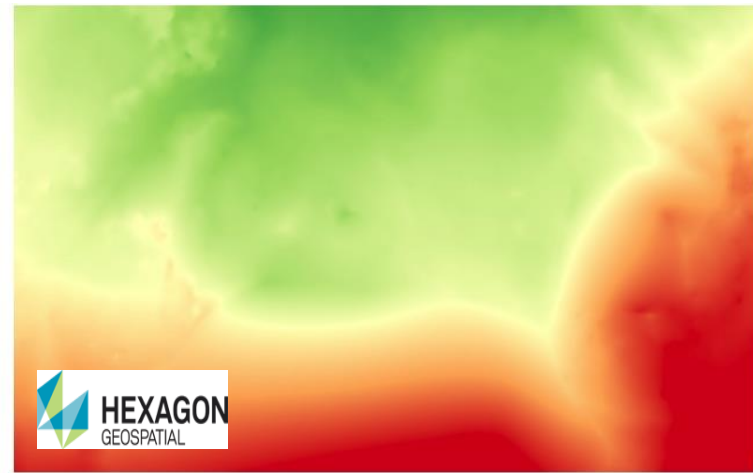
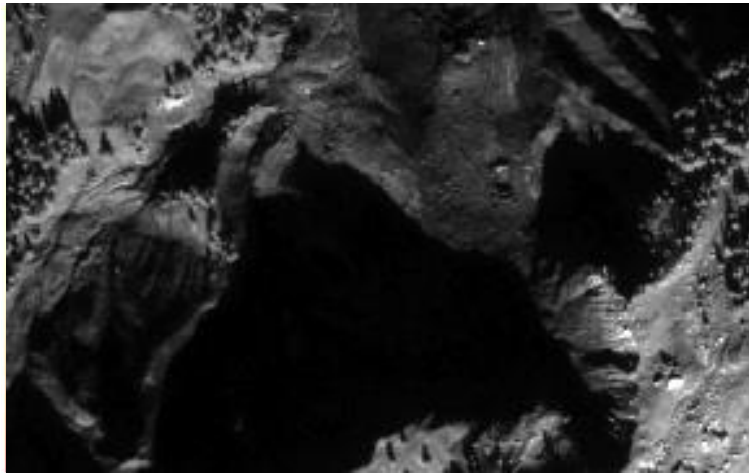
# L'imagerie optique stéréoscopique pour créer des modèles de surface



50 0 50 100 150 200



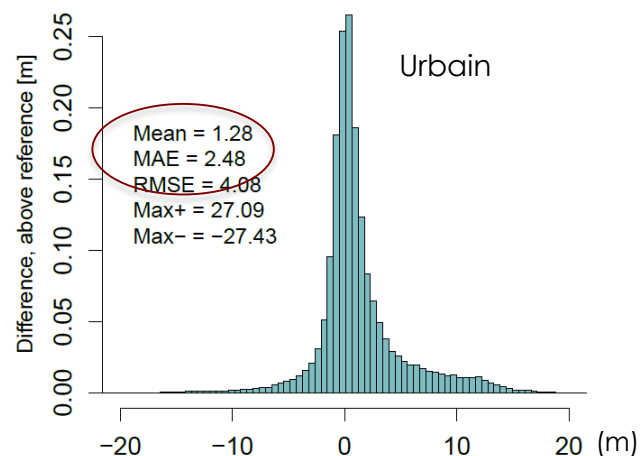
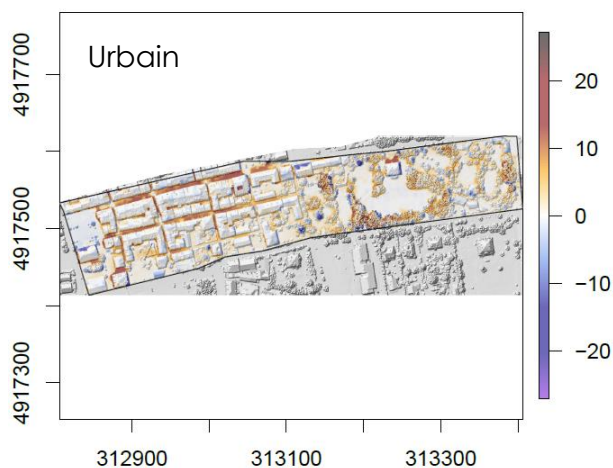
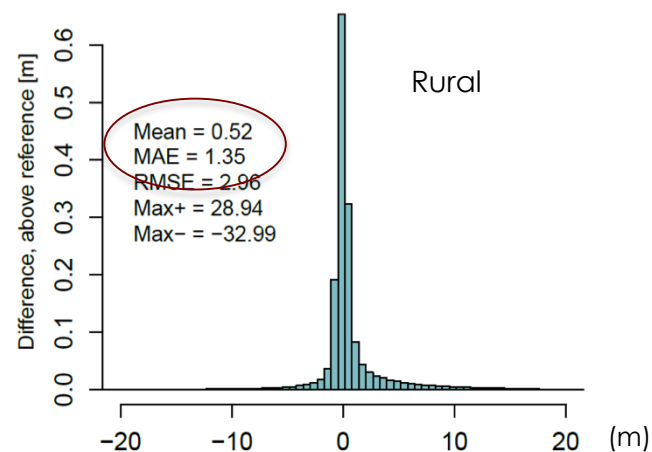
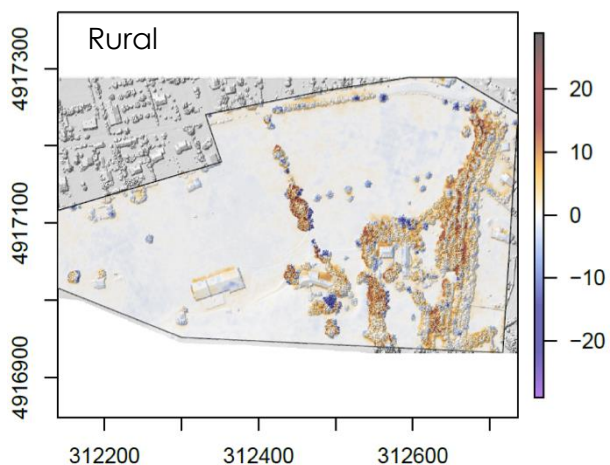
# L'imagerie optique stéréoscopique pour créer des modèles de surface



Stumpf et al. (2014)

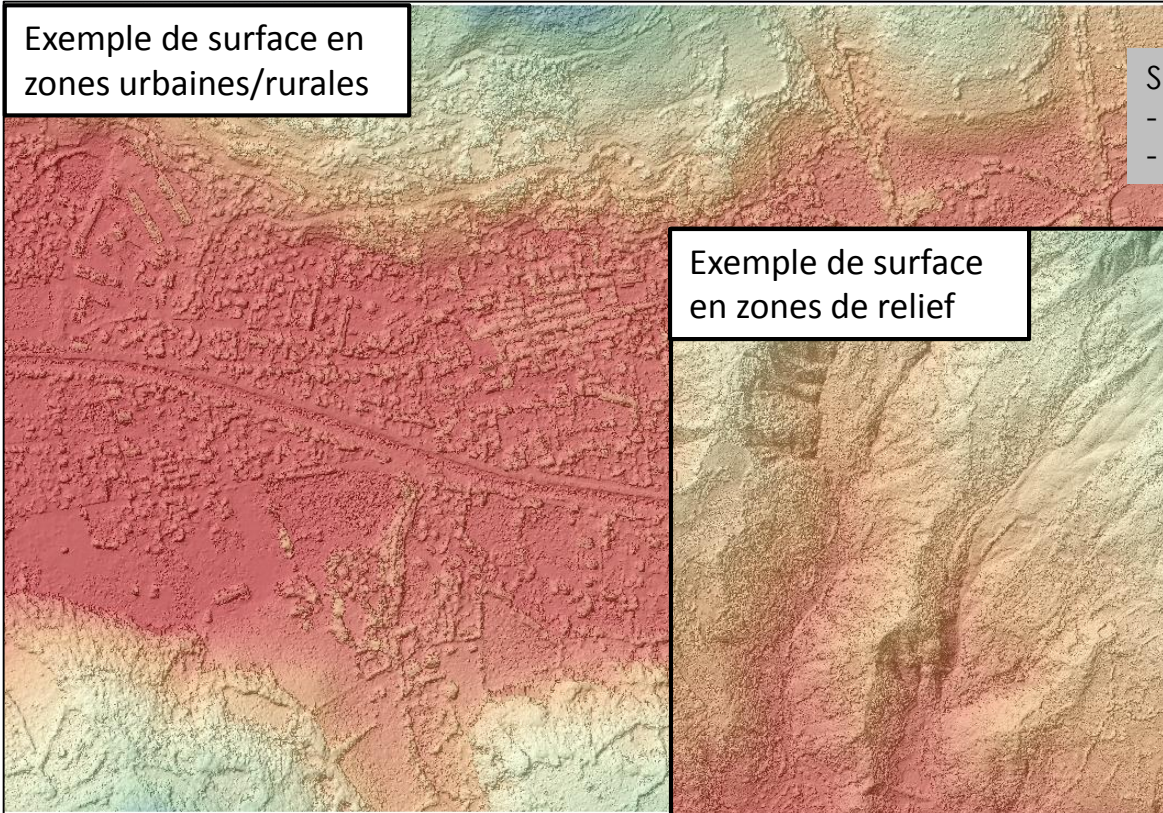
# L'imagerie optique stéréoscopique pour créer des modèles de surface

Erreurs : Comparaison MNS LiDAR aérien (référence) et MNS Stéréo-photogrammétrie Pléiades



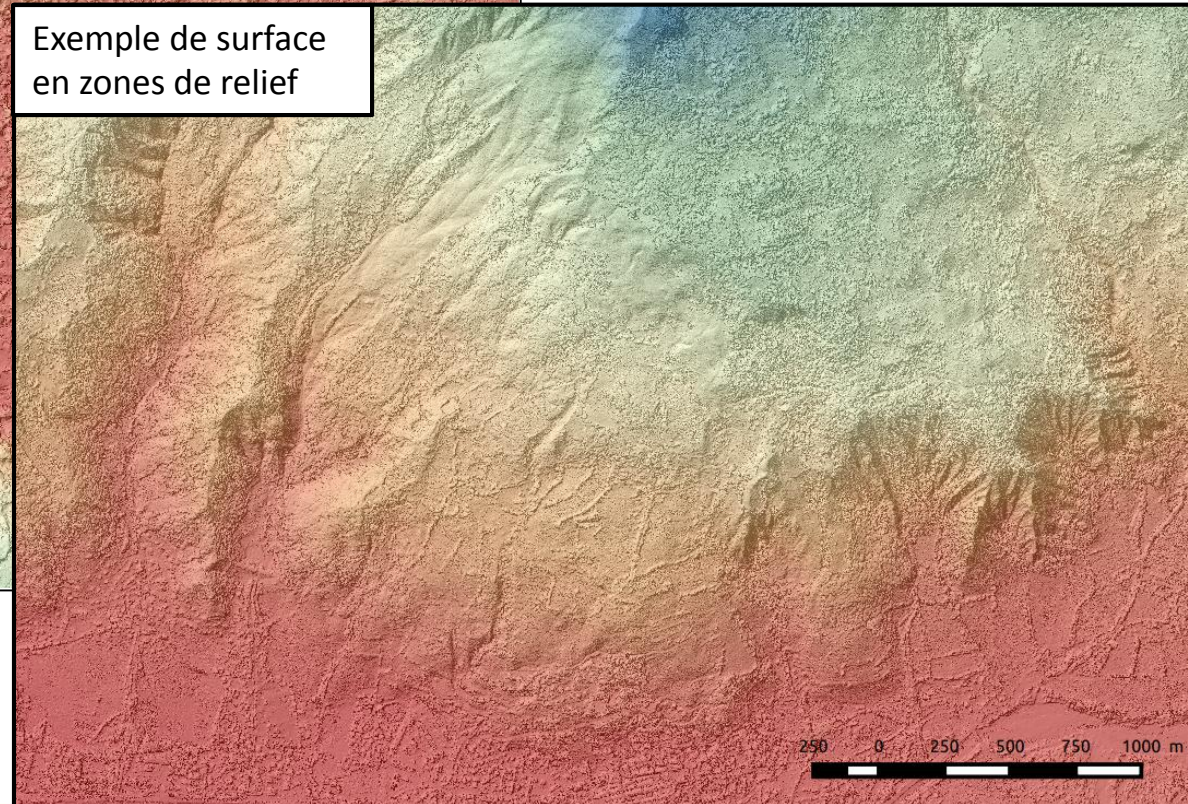
# L'imagerie optique stéréoscopique pour créer des modèles de surface

Exemple de surface en zones urbaines/rurales



Stereo processing of a Pléiades scene:  
- local workstation 8 cores: 16h  
- HPC: 4 nodes of 16 cores: 30 min

Exemple de surface en zones de relief



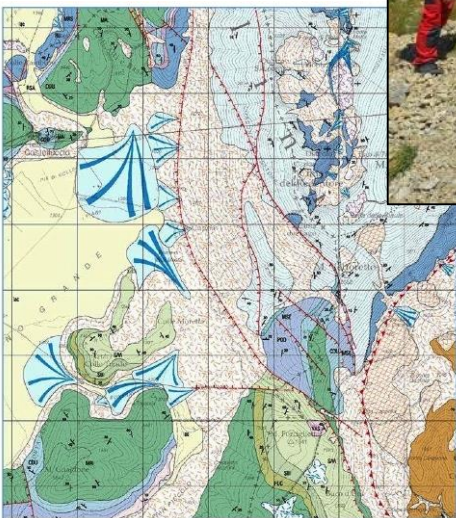
Stumpf et al. (2014)



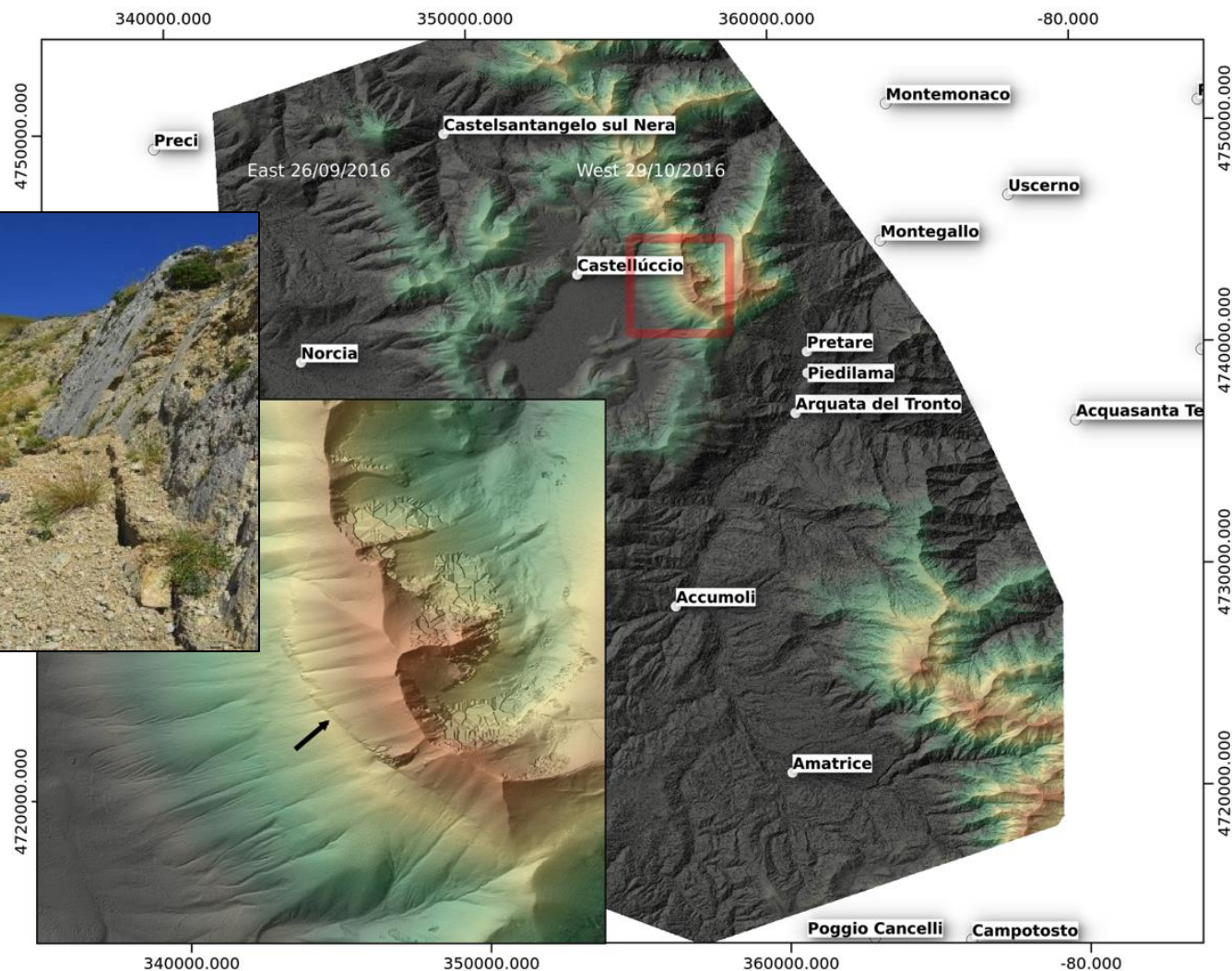
# L'imagerie optique stéréoscopique pour créer des modèles de surface

Application :  
Cartographie des  
ruptures de surface  
du séisme Mv 6.6  
de Norcia / Italie

Geological map – Mte Vettore

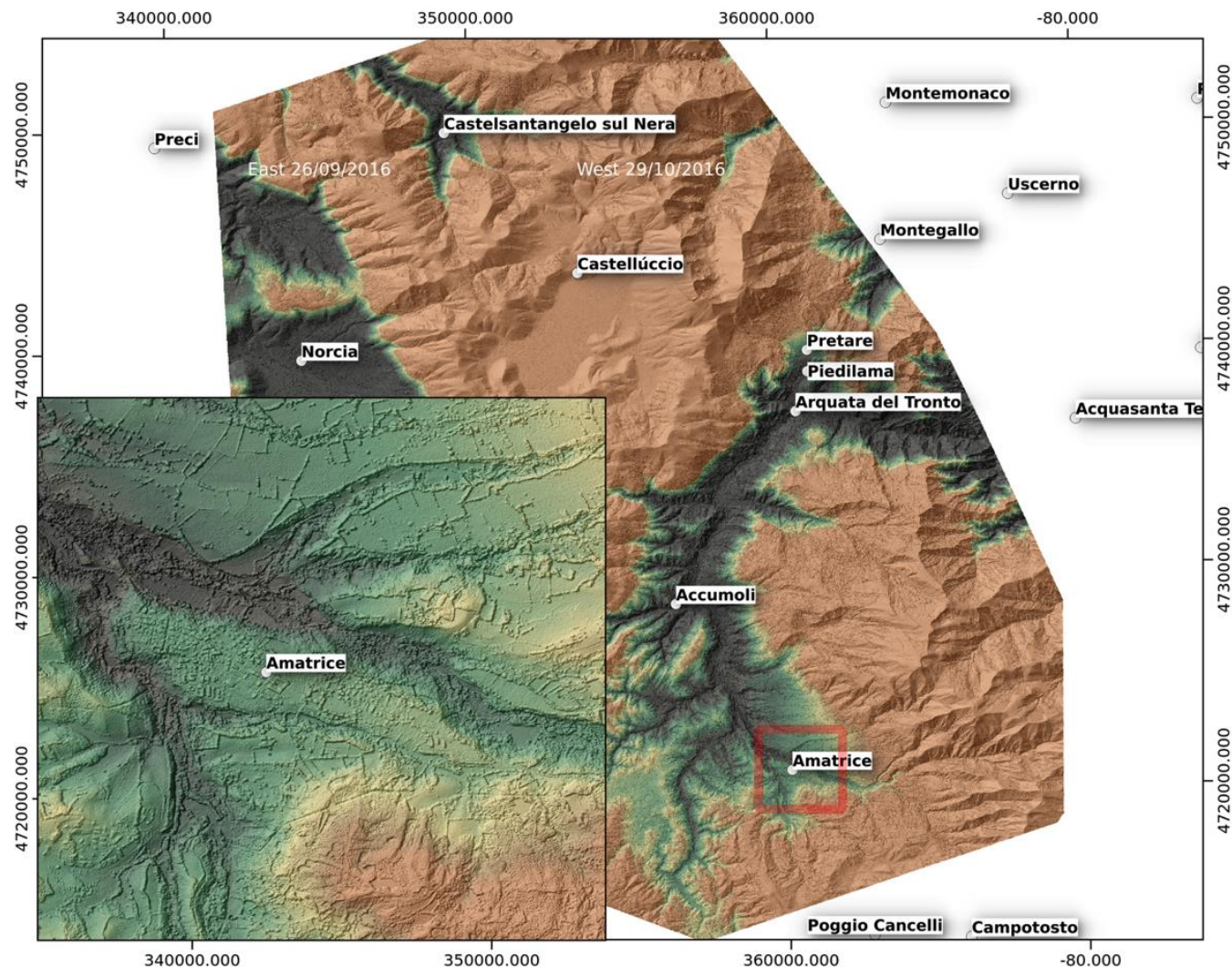


Pierantoni et al. (2013)



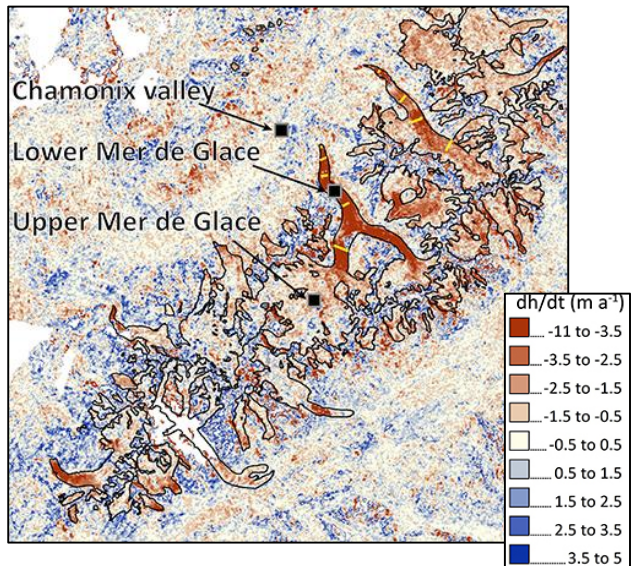
# L'imagerie optique stéréoscopique pour créer des modèles de surface

Application :  
Cartographie des  
dommages de la  
ville d'Amatrice

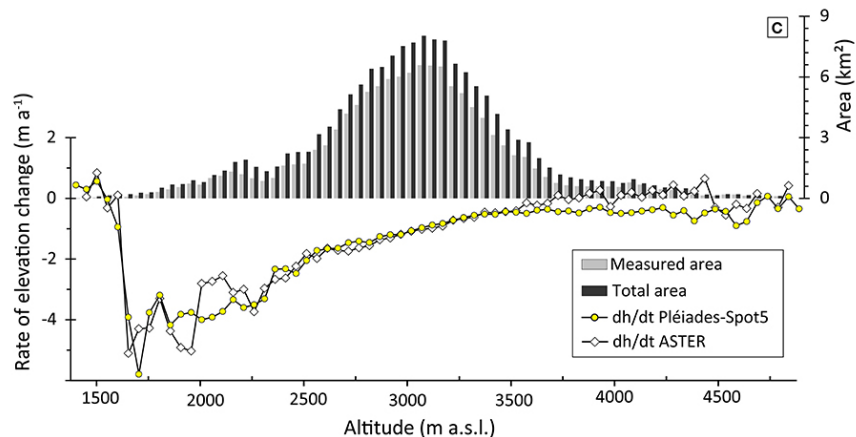


# L'imagerie optique stéréoscopique pour étudier les mouvements verticaux

Berthier et al. (2016)

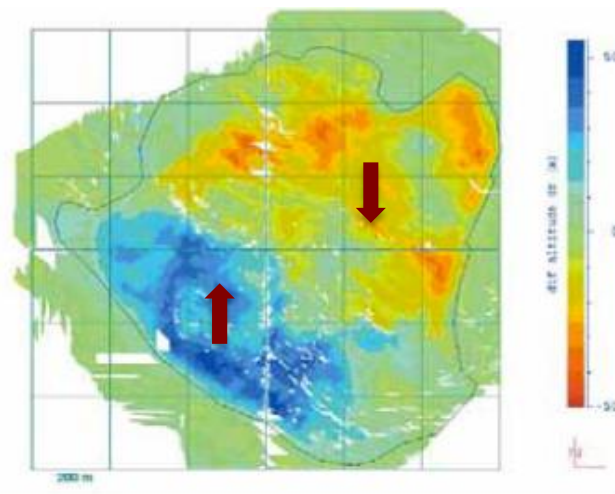
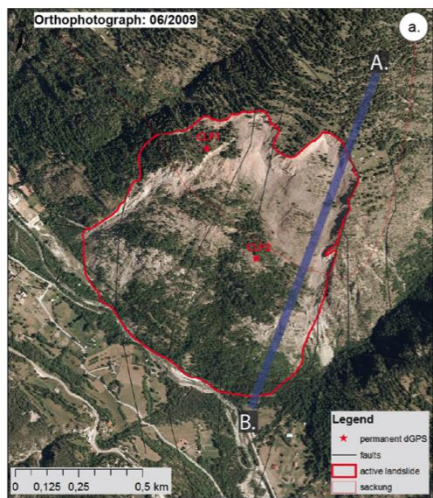


Application : Taux d'ablation de glaciers par altitudes  
Massif du Mont Blanc, Période 2000-2014



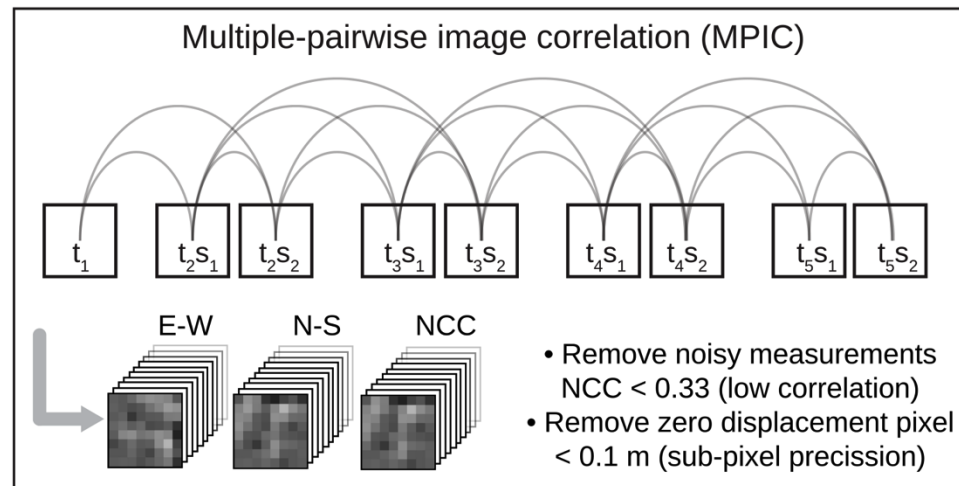
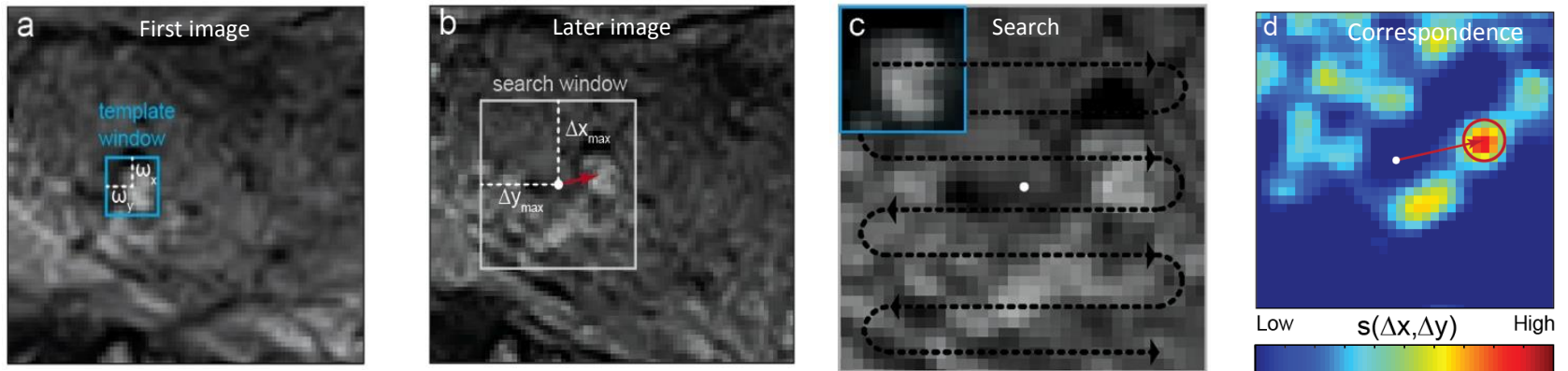
Application : Mouvements  
verticaux de glissements de terrain  
La Clapière – 1995-2010

Schlögel et al. (2016)



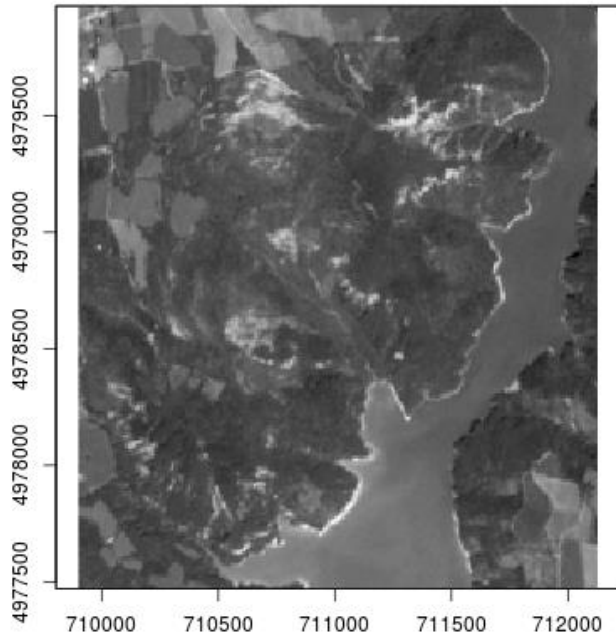
# Les séries temporelles optique pour étudier les mouvements horizontaux

Techniques de corrélation d'images entre deux ou n dates



# Les séries temporelles optique pour étudier les mouvements horizontaux

Harmalière landslide 2016-06-24

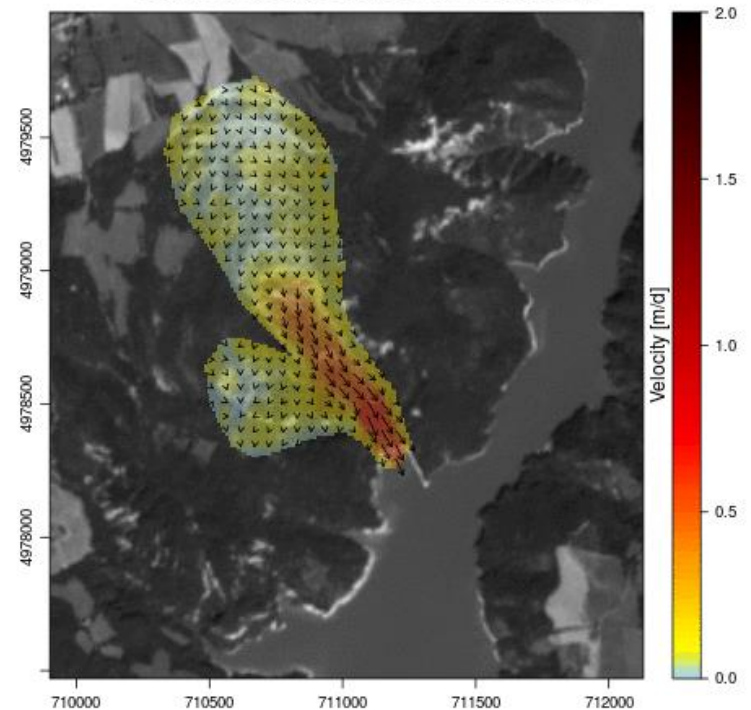


MPIC of 6 S2 images (12 pairs):

- Use of S2 green band (560 nm)
- More atmospheric scattering in the blue band (490 nm)

*Harmalière landslide  
(acceleration in July/Aug. 2016)*

Surface velocities 2016-08-03 - 2016-08-13

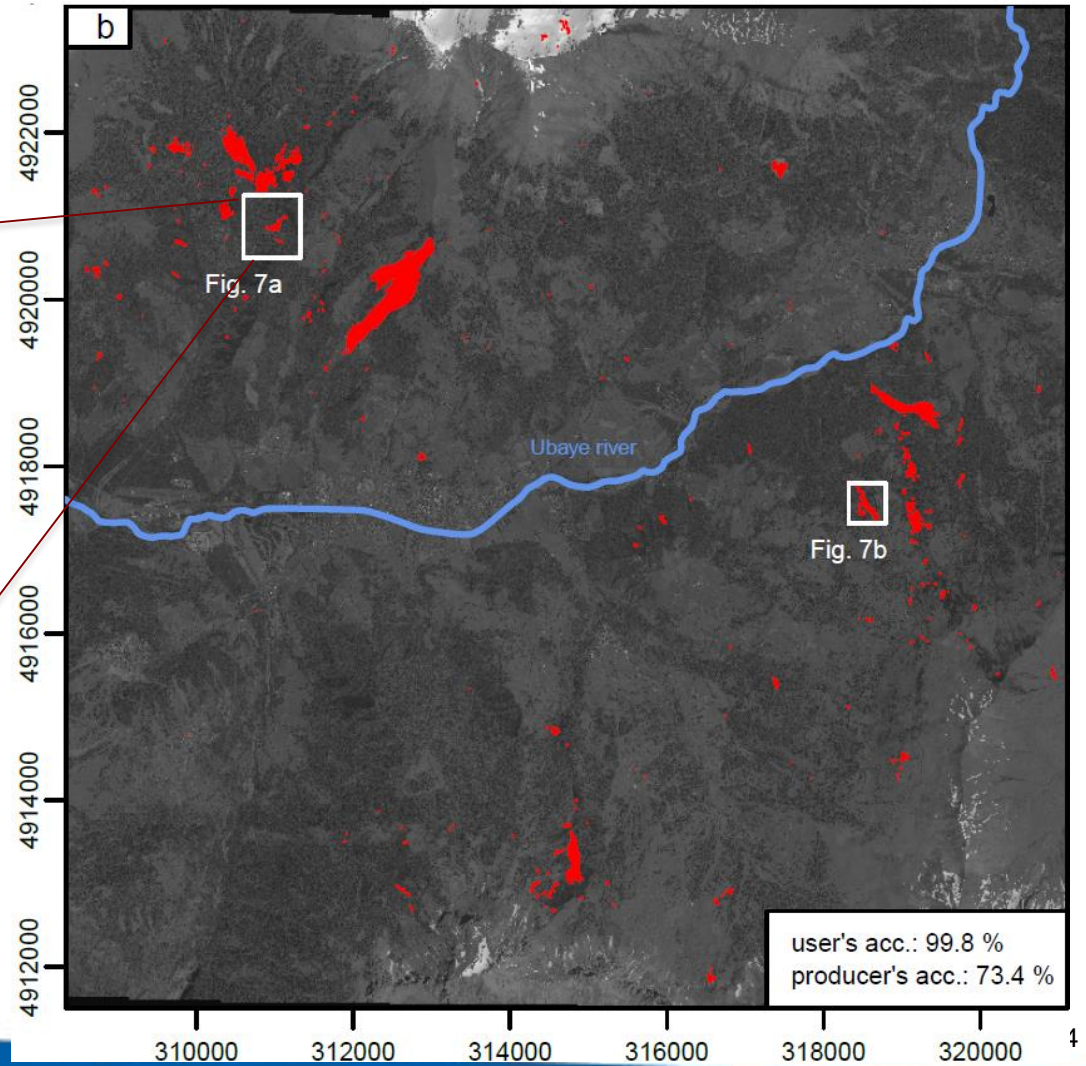
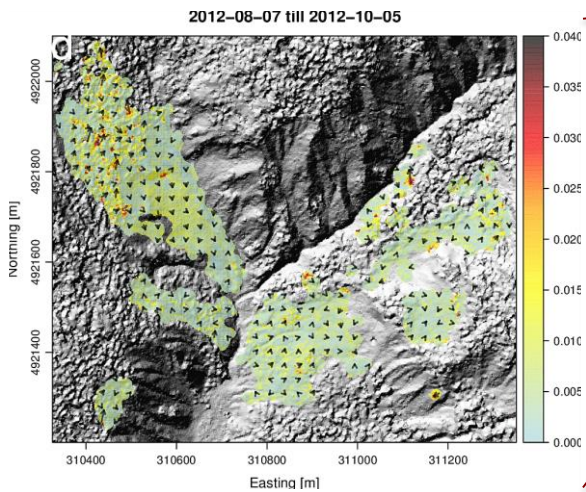
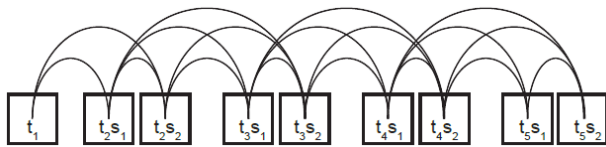


Stumpf et al. (2016)



# Les séries temporelles optique pour étudier les mouvements horizontaux

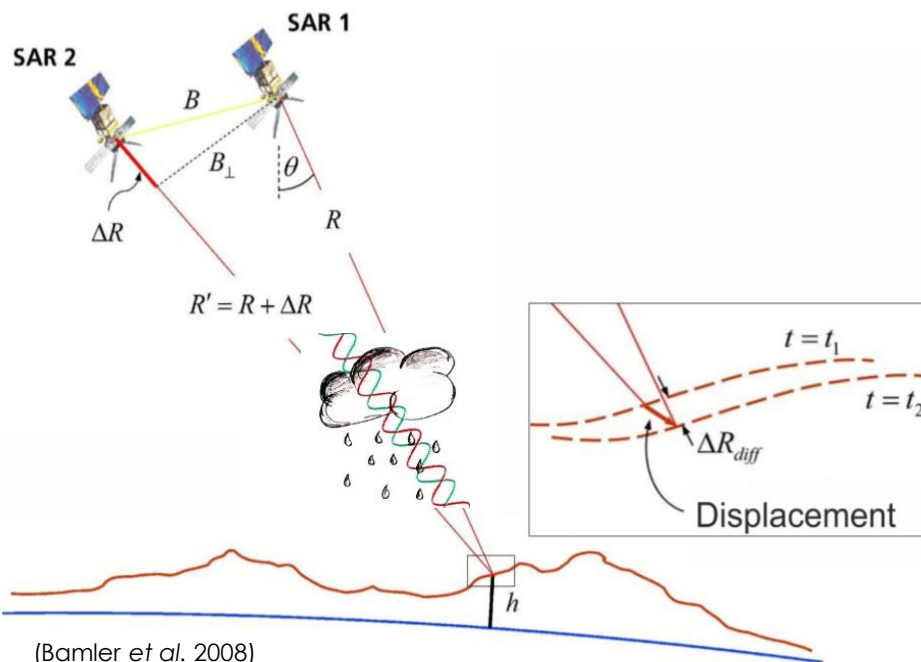
Persistence des déplacements dans le temps – Détection de zones en mouvement



Stumpf et al. (2016)

# L'imagerie radar pour étudier les mouvements horizontaux et verticaux

Interférométrie différentielle d'images radar : SAR – Radar à Synthèse d'Ouverture



(Bamler et al. 2008)

Traitement complexe :

- Création d'interférogrammes (e.g. carte des différences de phase)
- Corrections atmosphériques
- Inversion de séries temporelles
- Filtrage / Mesure relative par rapport à un point de référence (déroulage)

Analyse de 2 images d'une même zone à  $\Delta t$

Différence de phase  $\Delta\varphi \propto \Delta R$

Signal affecté par plusieurs effets :

$$\varphi_{\Delta t} = \varphi_{\text{topo}, \Delta t} + \varphi_{\text{atm}, \Delta t} + \varphi_{\text{orb}, \Delta t} + \varphi_{\text{bruit}, \Delta t} + \varphi_{\text{def}, \Delta t} + \varphi_{\text{dem}, \Delta t}$$

- Topographie
- Atmosphère
- Géométrie de la Terre / Géométrie d'acquisition Radar
- Orbites
- Rétrodiffusion sol – Etats de surface
- Bruit systématique

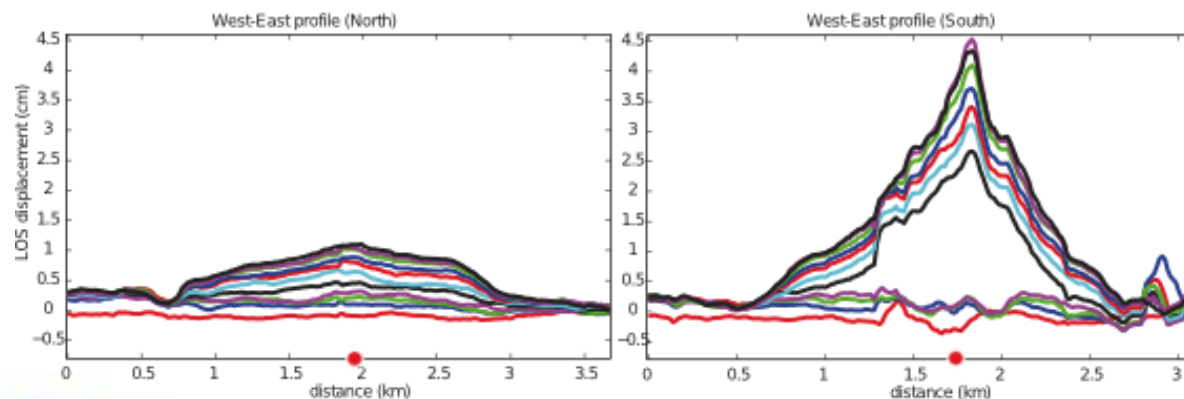
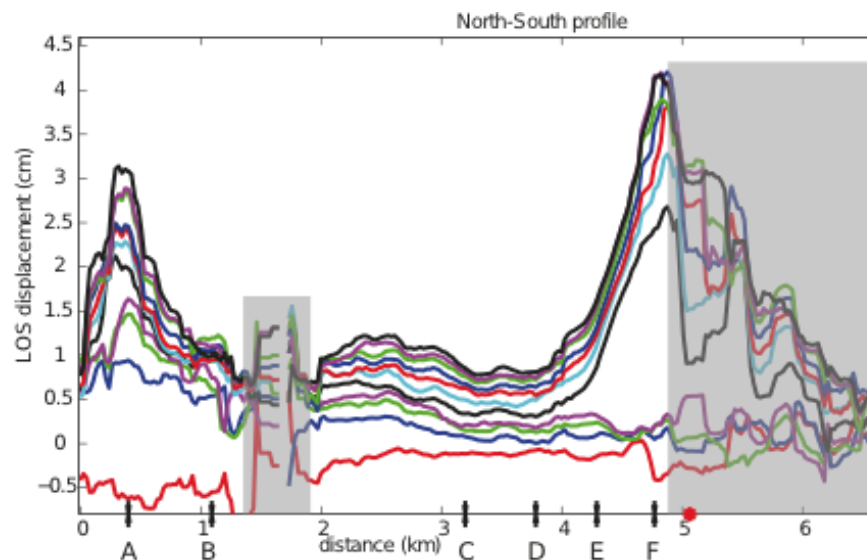
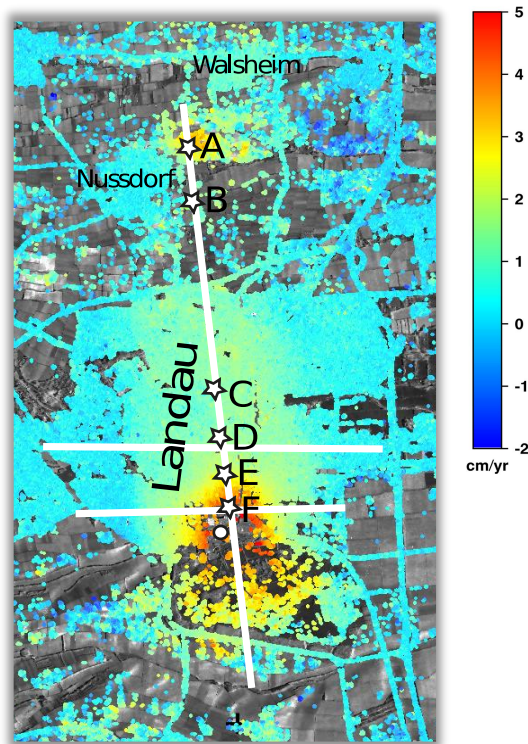
Technique sujette à dé-corrélation temporelle et à des mesures selon ligne de visée

Sensibilité / Précision : millimétrique selon longueur d'ondes du capteur et caractéristiques du terrain

# L'imagerie radar pour étudier les mouvements horizontaux et verticaux

Application : Déformation (taux de déplacement, ligne de visée) de réservoirs (géothermie)  
Landau, 2013-2014

(Heimlich et al., 2015)



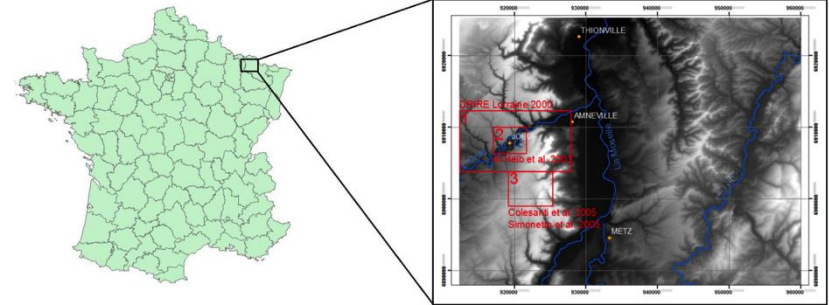
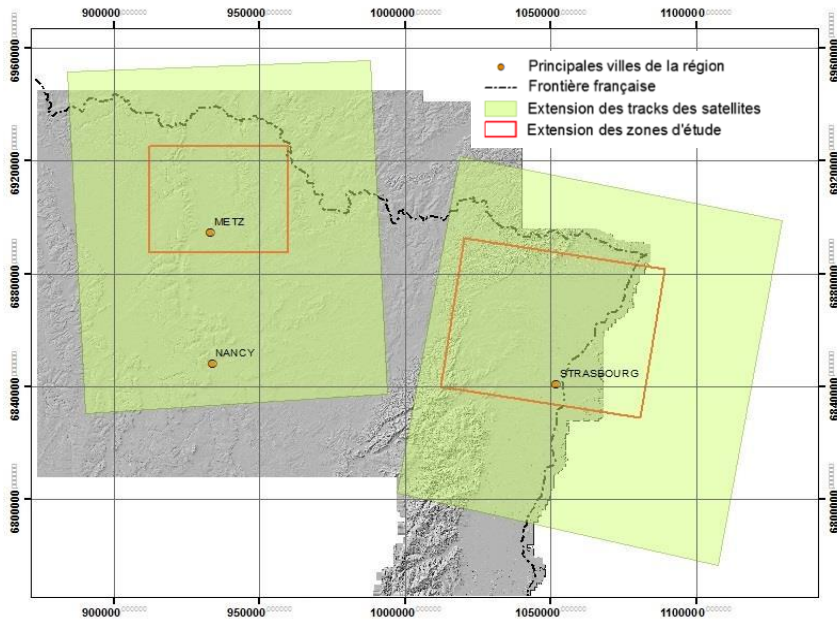
Réflecteurs Permanents  
(Persistent Scatterers, PS / StaMPS)



# L'imagerie radar pour étudier les mouvements horizontaux et verticaux

Application : Déformation du Fossé Rhénan et du bassin ferrifère lorrain –  
Analyse d'archives d'images SAR (ERS/Envisat)

(Bornemann, 2015)



## Contexte général

- Cours d'eau principaux
- Villes principales
- Etudes précédentes sur la déformation

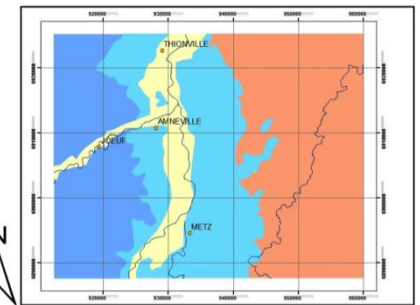
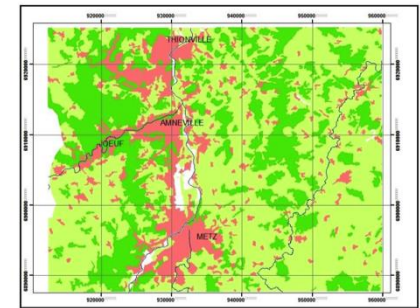
## Occupation du sol

- Territoires artificialisés
- Territoires agricoles
- Forêts et milieux semi-naturels

## Lithologie simplifiée

- Alluvions sableuses
- Marnes
- Grès
- Calcaire (muschelkalk)

Sources :  
MNT : BP TOPO 25 m (IGN)  
Cours d'eau : BD CARTHAGE (IGN)  
Occupation du sol : BD CORINE Land Cover (Europe)  
Lithologie : carte lithologique simplifiée 1/1000000  
carte géologique vecteur 1/50000 (BRGM)

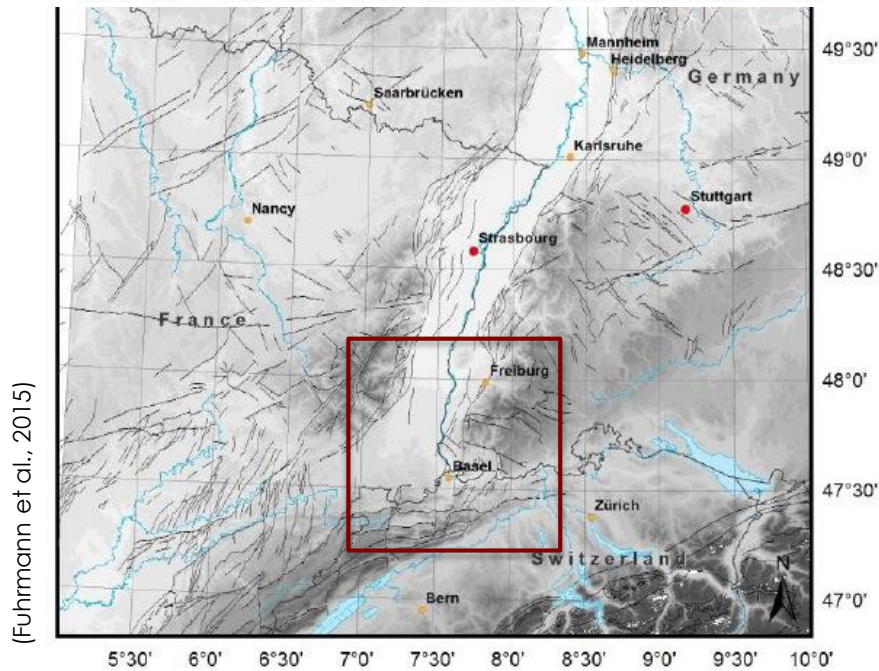
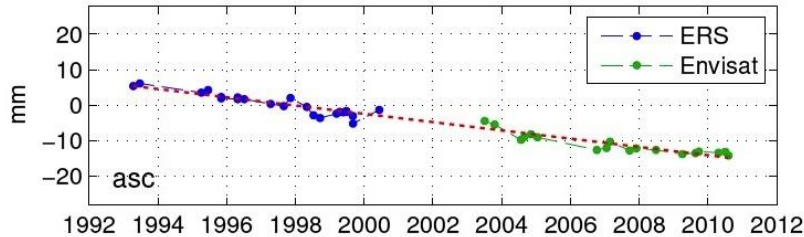


Fossé Rhénan : 33 images  
du 12/07/2004 au 08/12/2008  
Lorraine : 17 images  
du 29/11/2004 au 06/08/2008

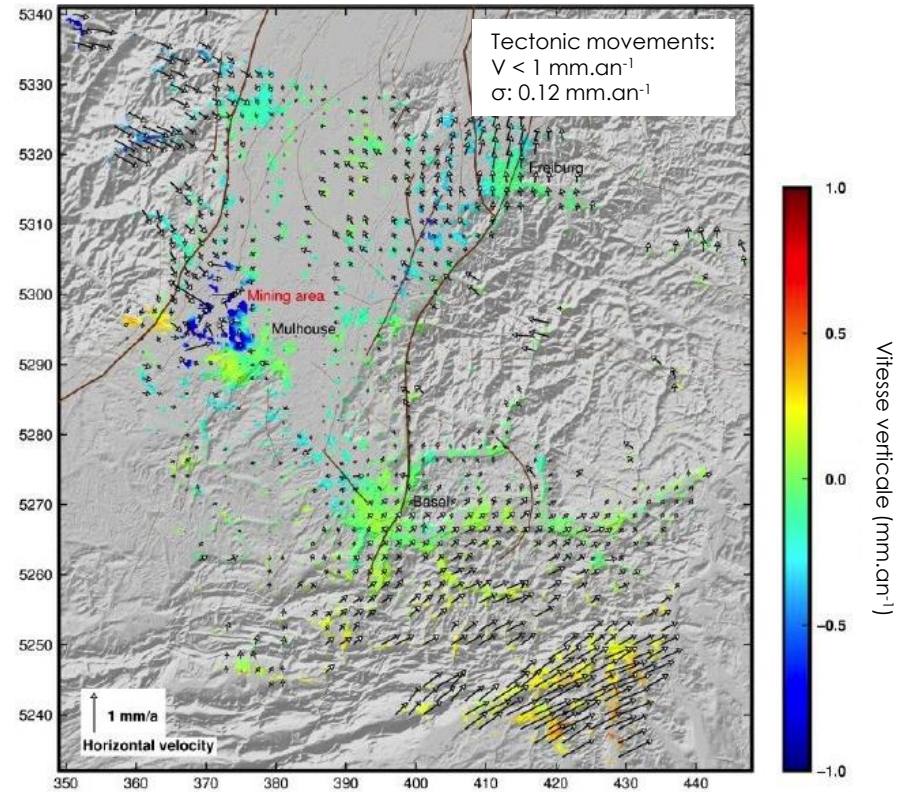
Mode image  
Capteur ASAR  
Répétitivité : 35 jours  
Orbites : VOR (ESA – TUD)

# L'imagerie radar pour étudier les mouvements horizontaux et verticaux

Application : Déformation du Fossé Rhénan



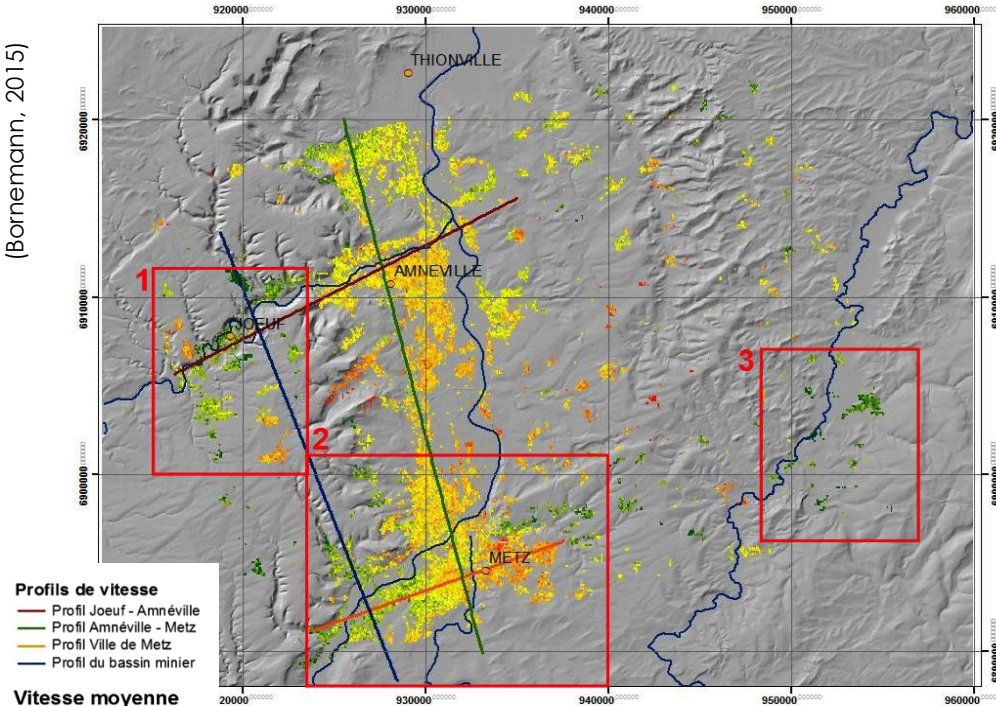
(Fuhrmann et al., 2015)



Réflecteurs Permanents 1992-2012  
(Persistent Scatterers, PS / StaMPS)

# L'imagerie radar pour étudier les mouvements horizontaux et verticaux

(Bornemann, 2015)

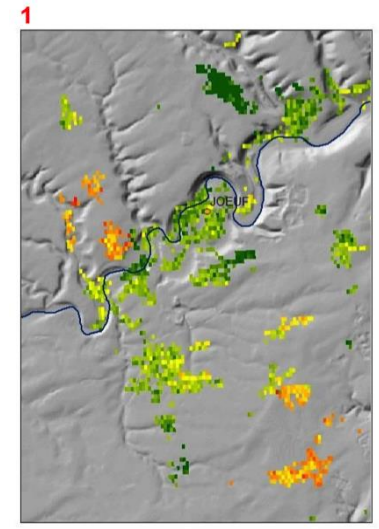
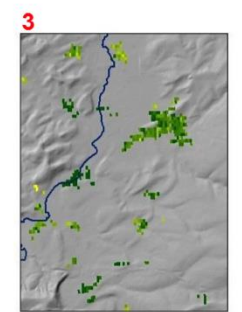
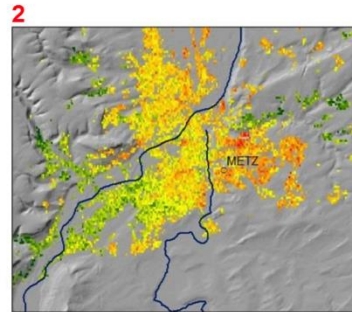
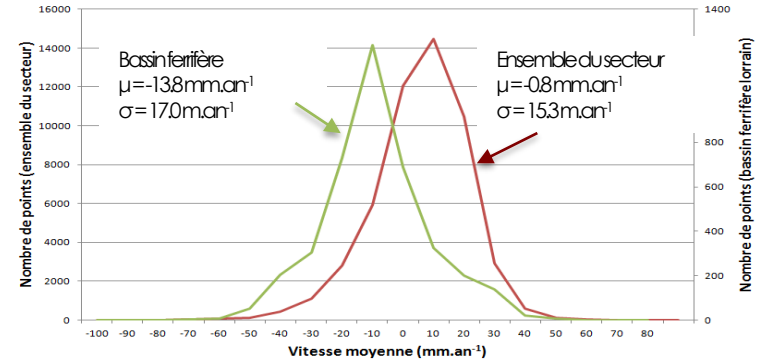


Vitesse moyenne du sol LOS (mm/an)

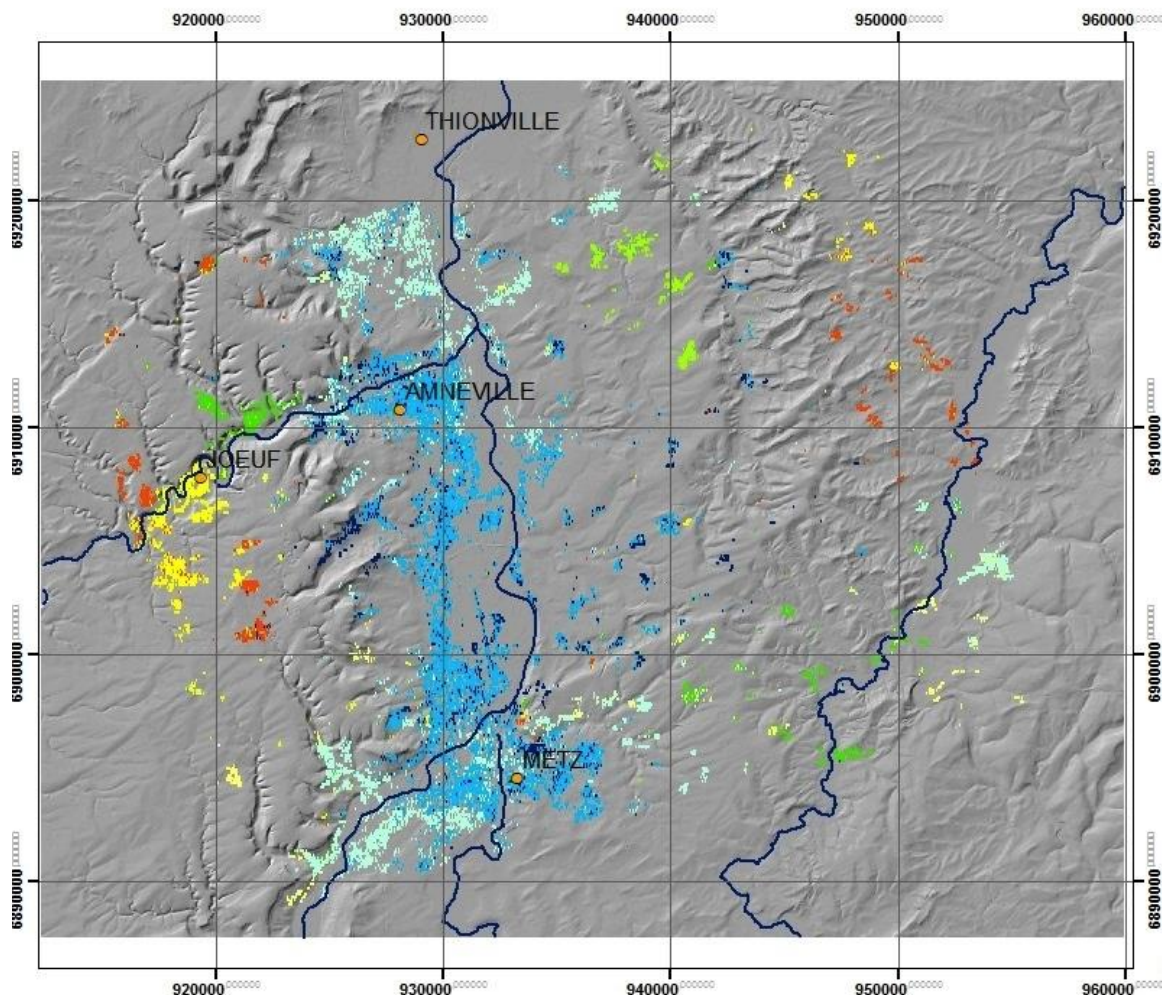


Réflecteurs Permanents 2008-2010  
(Persistent Scatterers, PS / StaMPS)  
Distribution des vitesses moyennes

## Application : Déformation du bassin ferrifère lorrain



# L'imagerie radar pour étudier les mouvements horizontaux et verticaux



Application : Déformation du bassin ferrifère lorrain

## Évolution temporelle instable

- Instable et forte subsidence générale
- Instable et subsidence générale
- Instable et surrection générale

## Évolution temporelle stable

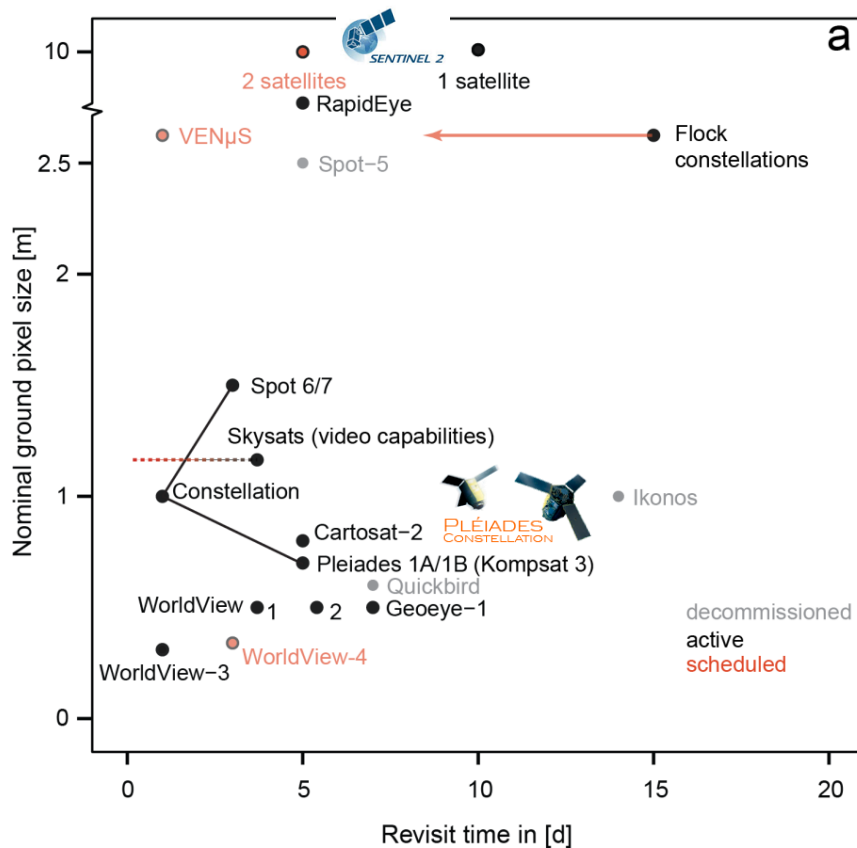
- Stable et subsidence générale
- Stable et surrection générale
- Stable et forte surrection générale

## Autre évolution temporelle

- Autre - forte subsidence générale
- Autre - subsidence générale

Groupes de points avec une évolution temporelle comparable

# Conclusion



De nombreuses données :

résolution spatiale (m – dm)

fréquence temporelle (5 – 30 j)

longueurs d'onde (visible, thermique, micro-ondes)

De nombreuses méthodes de traitement pour quantifier les déformations verticales / horizontales :

stéréophotogrammétrie / radargrammétrie satellitaire

corrélation d'image (optique, amplitude radar)

interférométrie (phase radar)

Des traitements ± complexes selon les sensibilités et précisions recherchées

Un besoin de données de référence au sol

Des problèmes inhérents aux images : ombre, végétation, nuage, orbite, état de surface, etc