

INTERFEROMETRIE RADAR

Didier Massonnet & Jordi Inglada

Principe

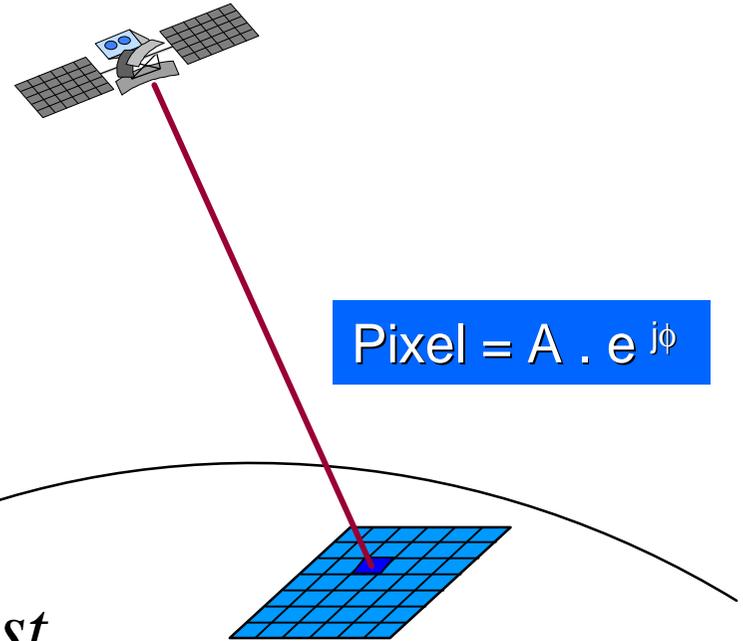
- ◆ Chaque pixel contient deux termes :

- Amplitude

- Phase : $\mathbf{j}_{pixel} = \mathbf{j}_{propre} + \mathbf{j}_{dist}$

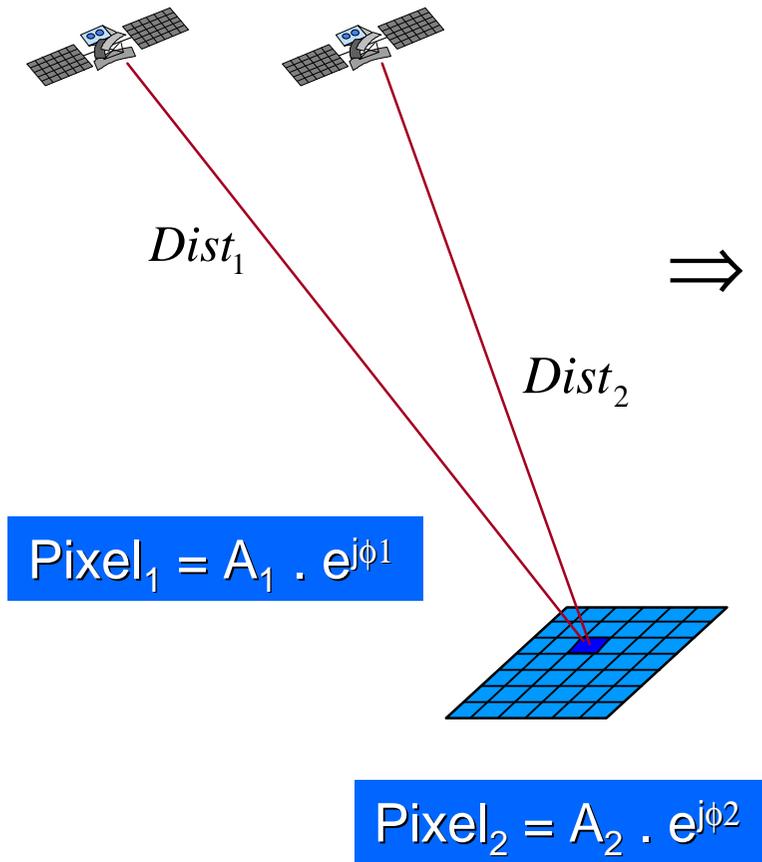
- ◆ \mathbf{j}_{propre} est un nombre aléatoire

- ◆ $\mathbf{j}_{dist} = \frac{2p}{I} Dist_{Aller-Retour} = \frac{4p}{I} Dist$



➡ La phase ne peut être utilisée comme information

Principe



- ◆ Si nous avons deux images et si le sol n'a pas changé :

$$\mathbf{j}_{specific_1} = \mathbf{j}_{specific_2}$$

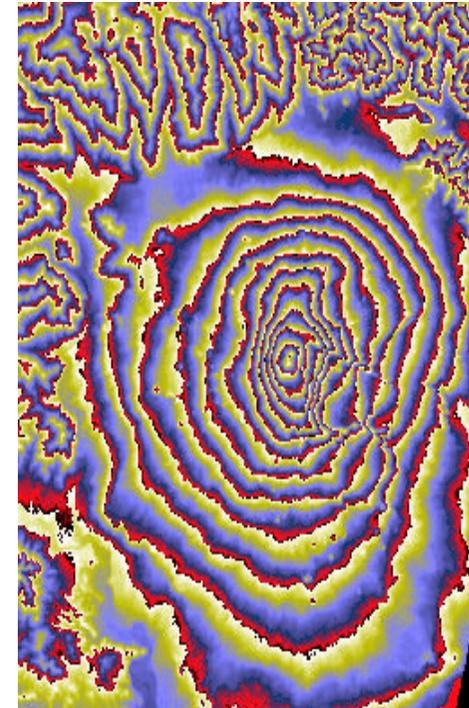
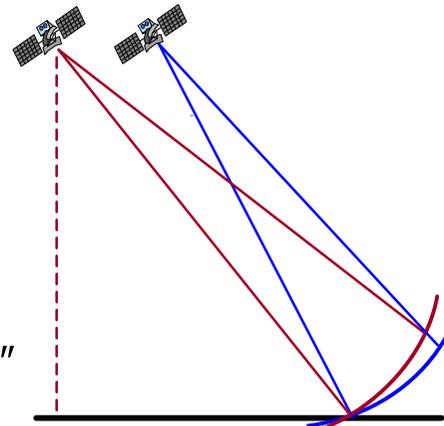
$$\Rightarrow \Delta \mathbf{j} = \mathbf{j}_{im_2} - \mathbf{j}_{im_1} = \mathbf{j}_{dist_2} - \mathbf{j}_{dist_1}$$

$$\Delta \mathbf{j} = \frac{4p}{I} (Dist_2 - Dist_1)$$

- ◆ L'image de $\Delta \mathbf{j}$ est appelée **Interférogramme**
- ◆ Image de "Différences de Distance"
(*suppression du terme de phase inconnu*)

Relief

- ◆ Effet stéréo ($B/H = 10^{-4}$)
- ◆ Faibles distortions
 - de quelques centimètres
 - suffisantes pour produire des rotations de phase
 - proportionnelles à l'élévation
- ◆ Mesure précise
 - mais connue modulo λ
 - crée des franges
 - nécessite un "déroulement"



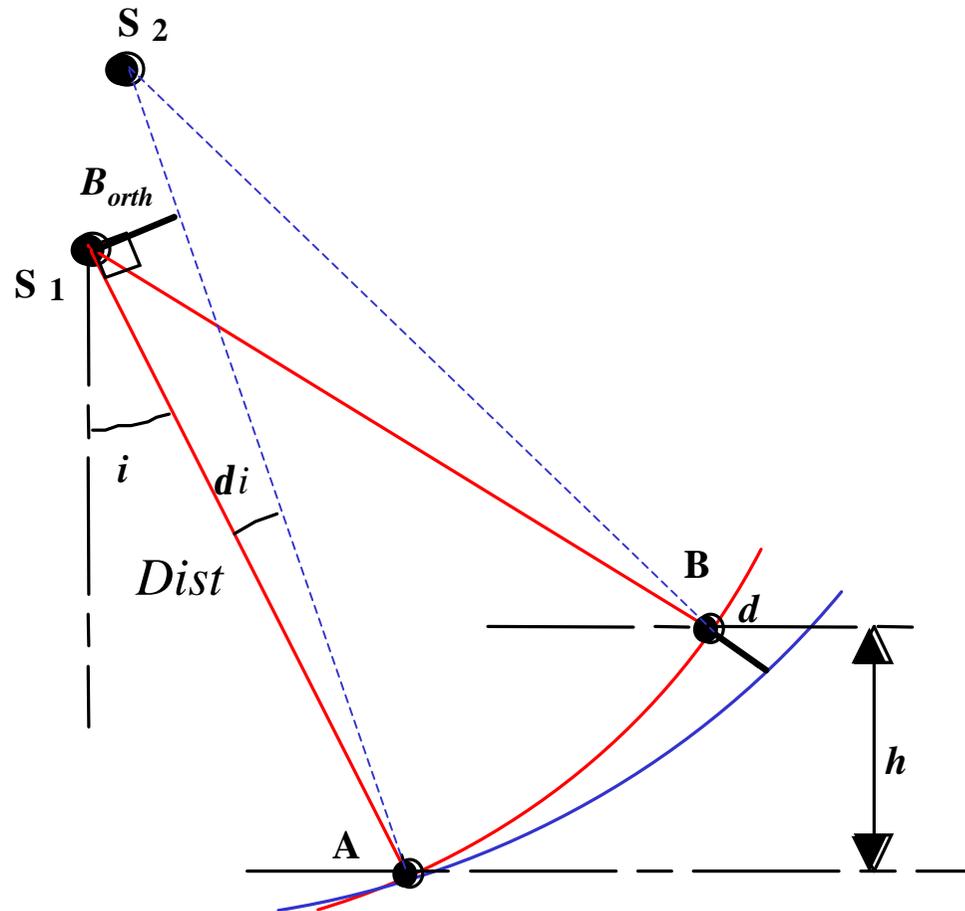
Etna - simulation

Courbes d'iso Altitude

→ question : quelle variation d'altitude correspond à une frange ? Par définition, elle correspond à l'**altitude d'ambiguïté**

Relief

→ L'altitude d'ambiguïté (1/3)



$$\Delta j = \frac{4pd}{l} = \frac{4p h d i}{l \sin(i)}$$

$$h = \frac{l \cdot \sin(i)}{4p \cdot d i} \cdot \Delta j$$

Avec : $d i = \frac{B_{orth}}{Dist}$

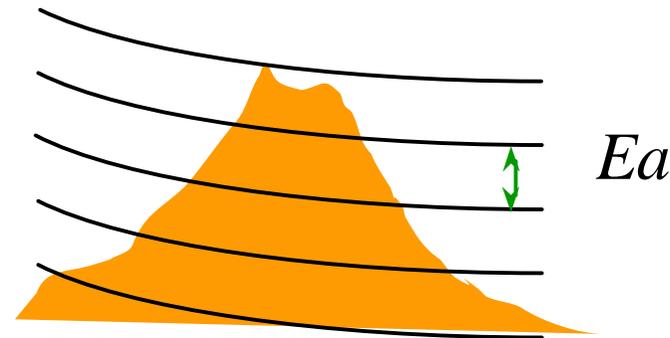
Relief

→ L'altitude d'ambiguïté (2/3)

- ◆ **Altitude d'ambiguïté** : altitude qui correspond à une rotation de phase de 2π

$$\Delta j = 2p \Rightarrow h = \frac{l \sin(i)}{2di} = \frac{l \cdot Dist \cdot \sin(i)}{2 \cdot B_{orth}}$$

$$Ea = \frac{l \cdot Dist \cdot \sin(i)}{2 \cdot B_{orth}}$$

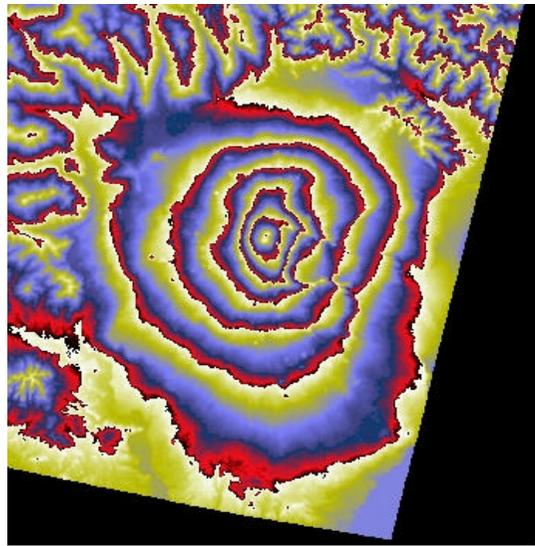
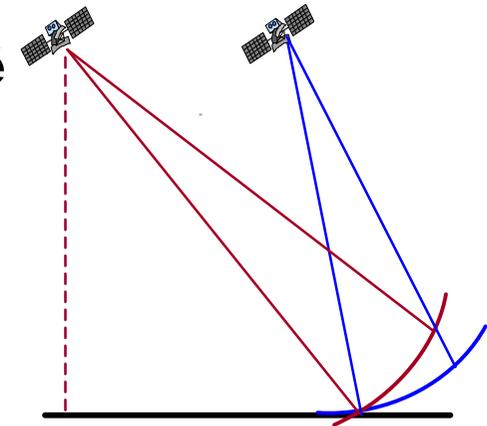
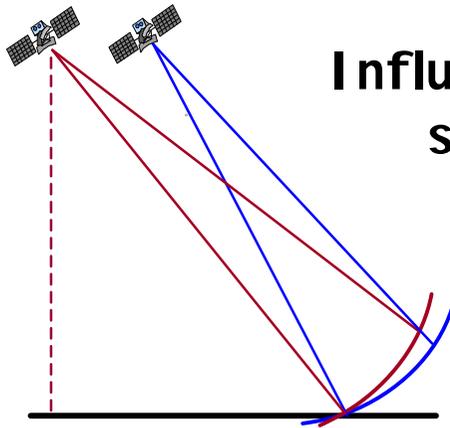


Exemple numérique : B_{orth} : 100 m, Dist=890 km, $i=23^\circ$, $\lambda=5.6$ cm → $Ea=97$ m

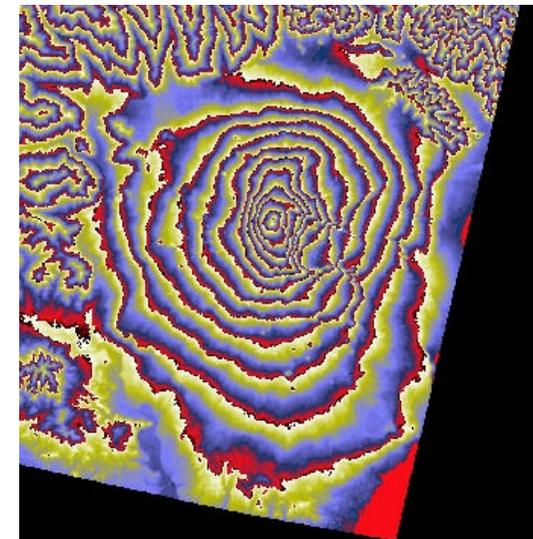
Relief

→ L'altitude d'ambiguïté (3/3)

Influence de l'altitude d'ambiguïté
sur la densité des franges



(Ea=500m)



(Ea=250m)

Relief

◆ Précision verticale

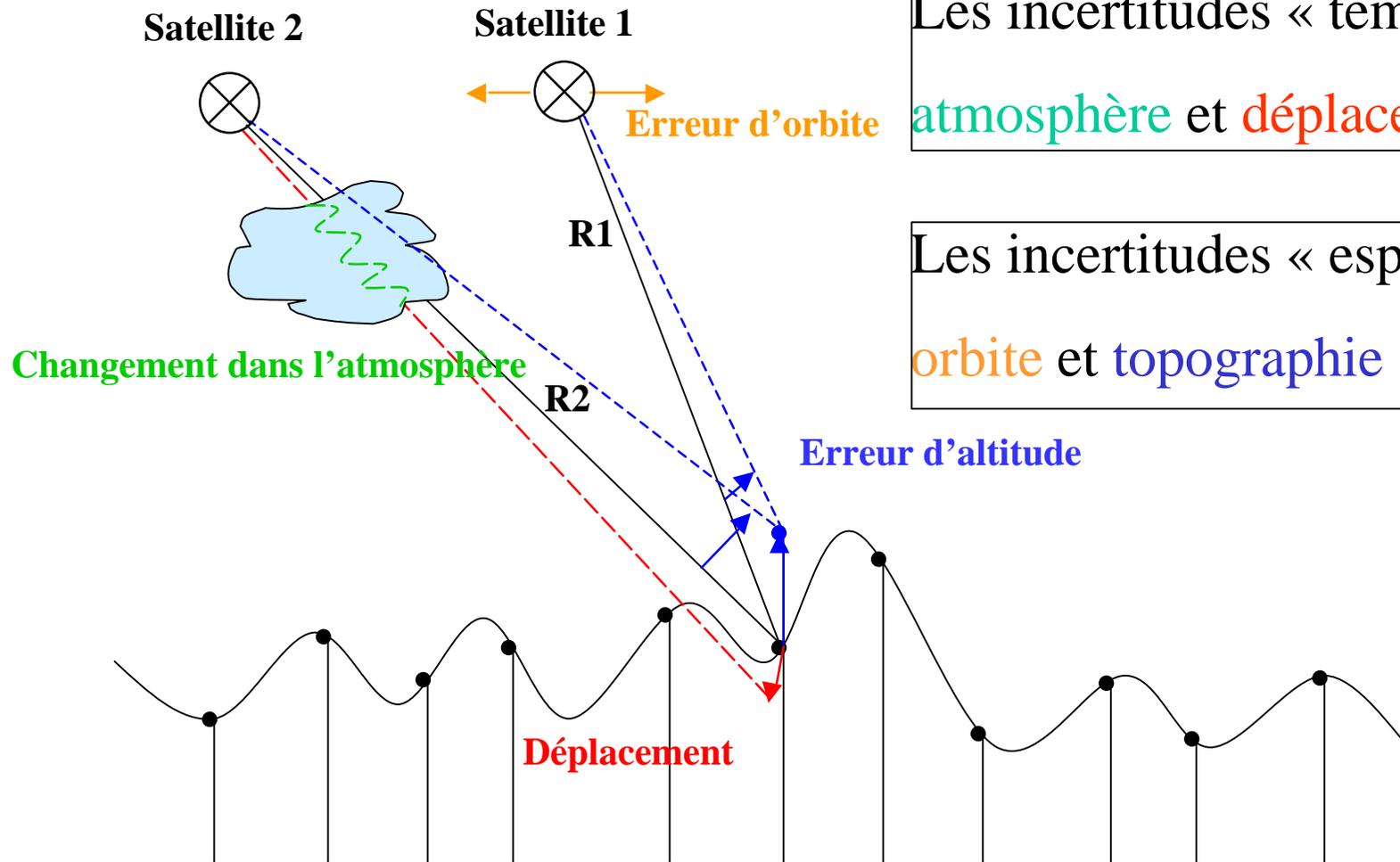
- une fraction de l' "Altitude d'Ambiguïté"
- dépend du rapport signal à bruit de l'interférogramme
 - » dépend de l'écart-type de la phase : S_j

$$S_z = \frac{S_j}{2.p} . Ea$$

◆ Exemples

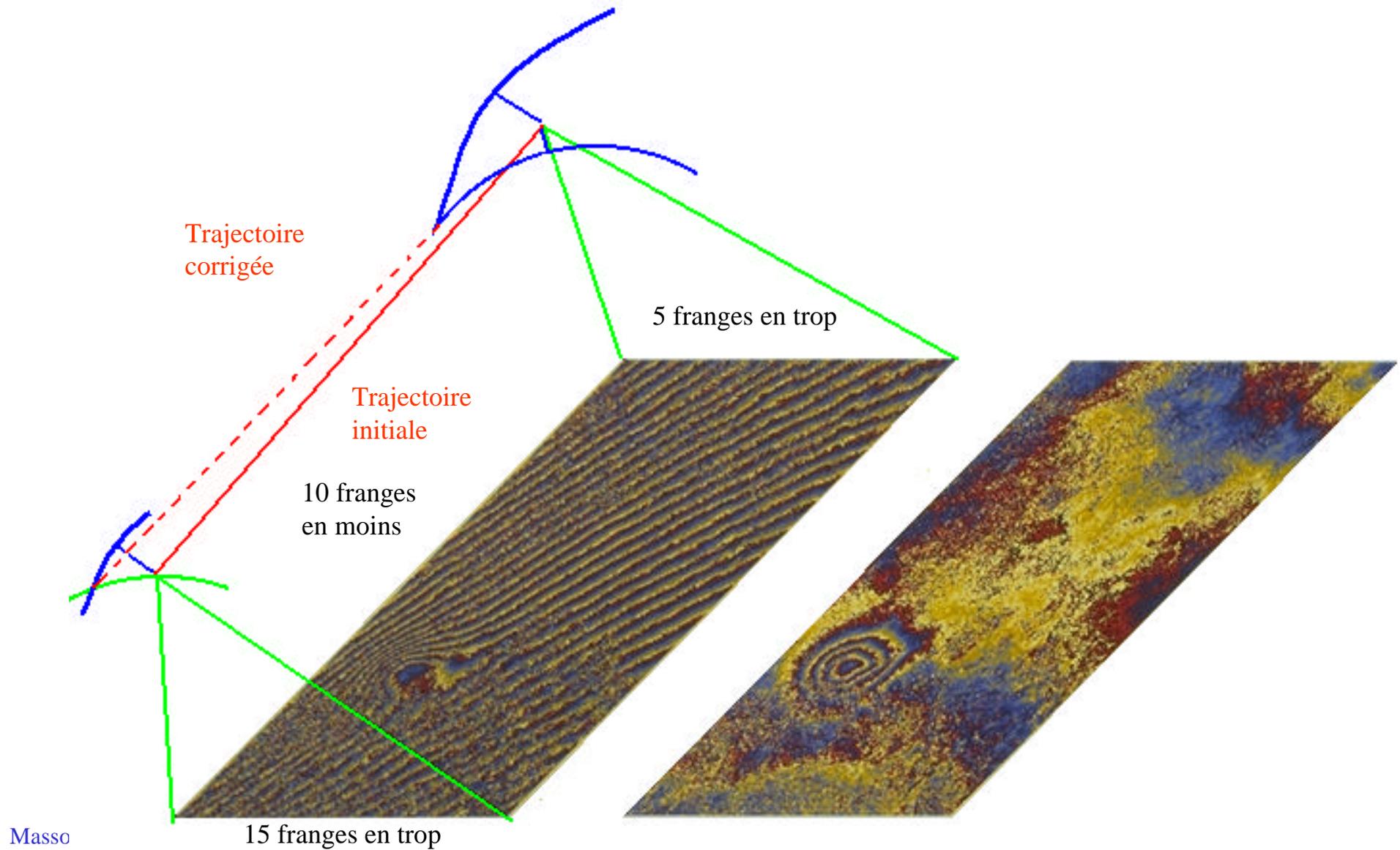
- **ERS** : $Ea/4$ ou $Ea/5$ → de **50** à **3 m**
- **SRTM** : $Ea/15$ → **16 m** en bande C ; $Ea/22$ → **6 m** en bande X
- **Aéroporté** : meilleur que $Ea/100$ → jusqu'à **10 cm**

Ce que nous ne savons pas

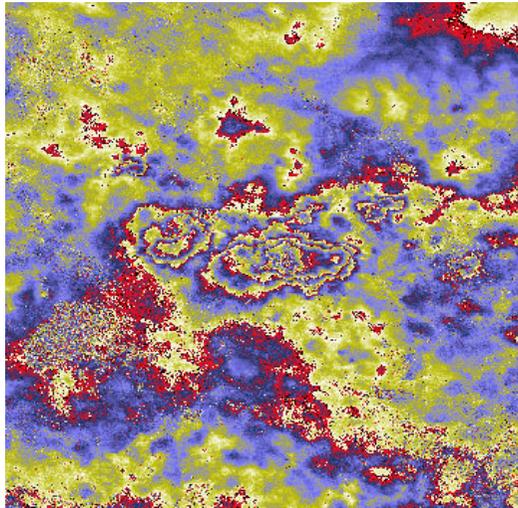


Modèle d'Altitude Numérique

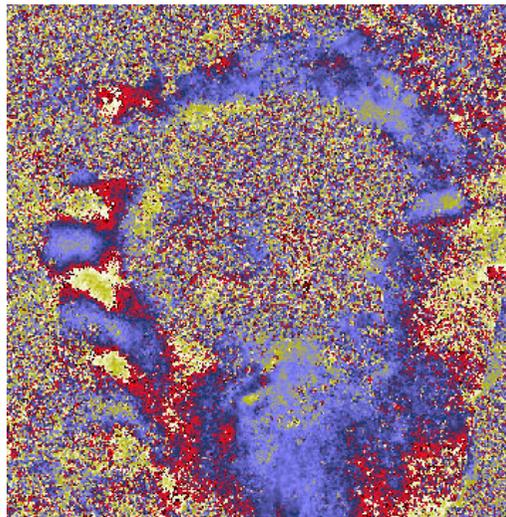
PRI NC IPE DE LA CORRECTON ORBITALE



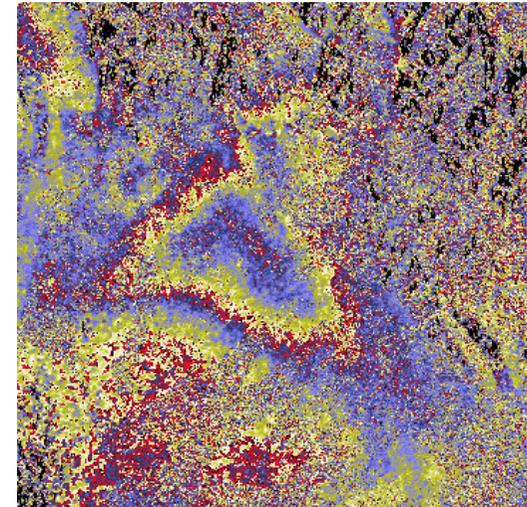
Exemples d'artefacts atmosphériques



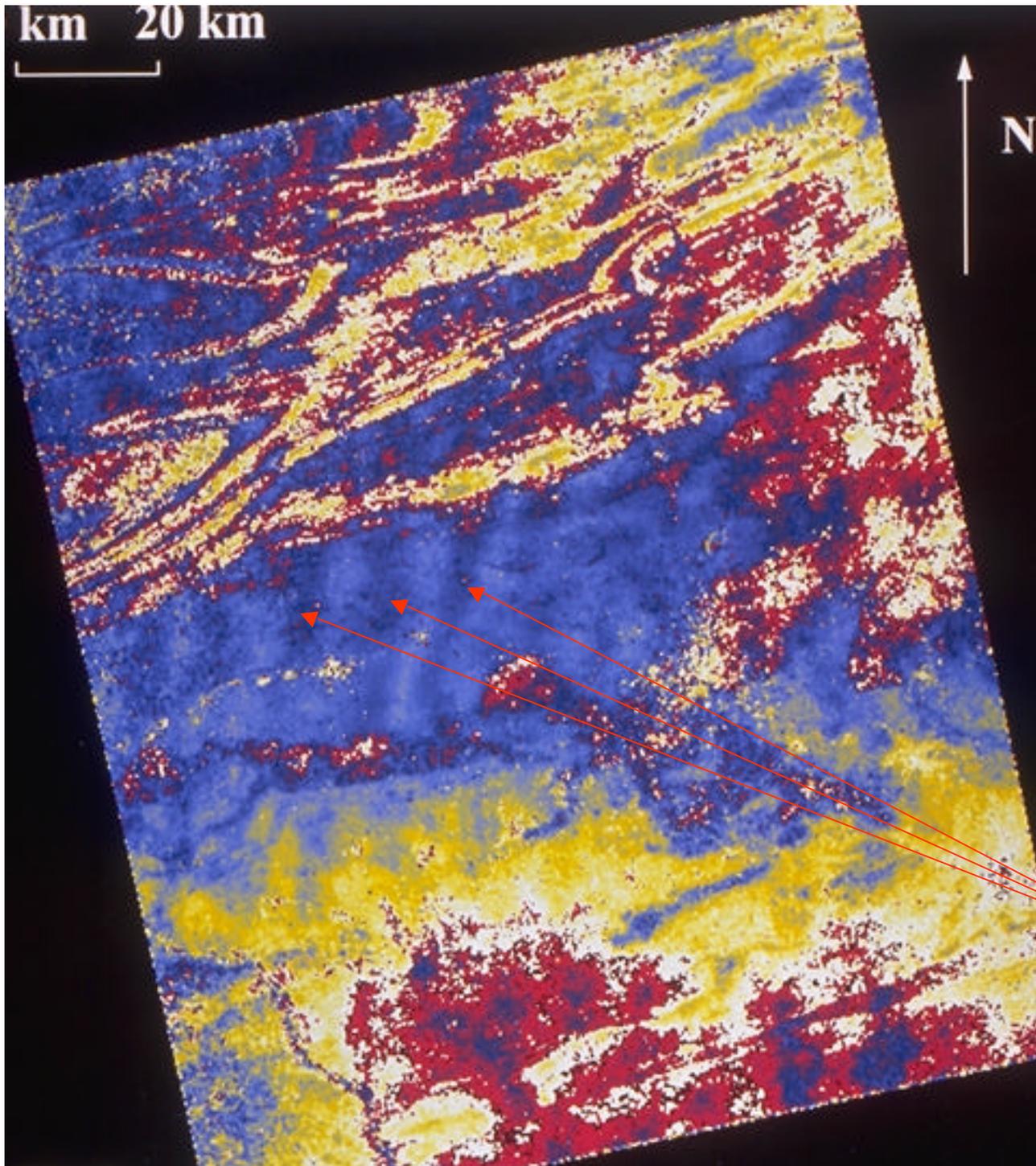
Nuages - Cumulus



Nuages chaînés



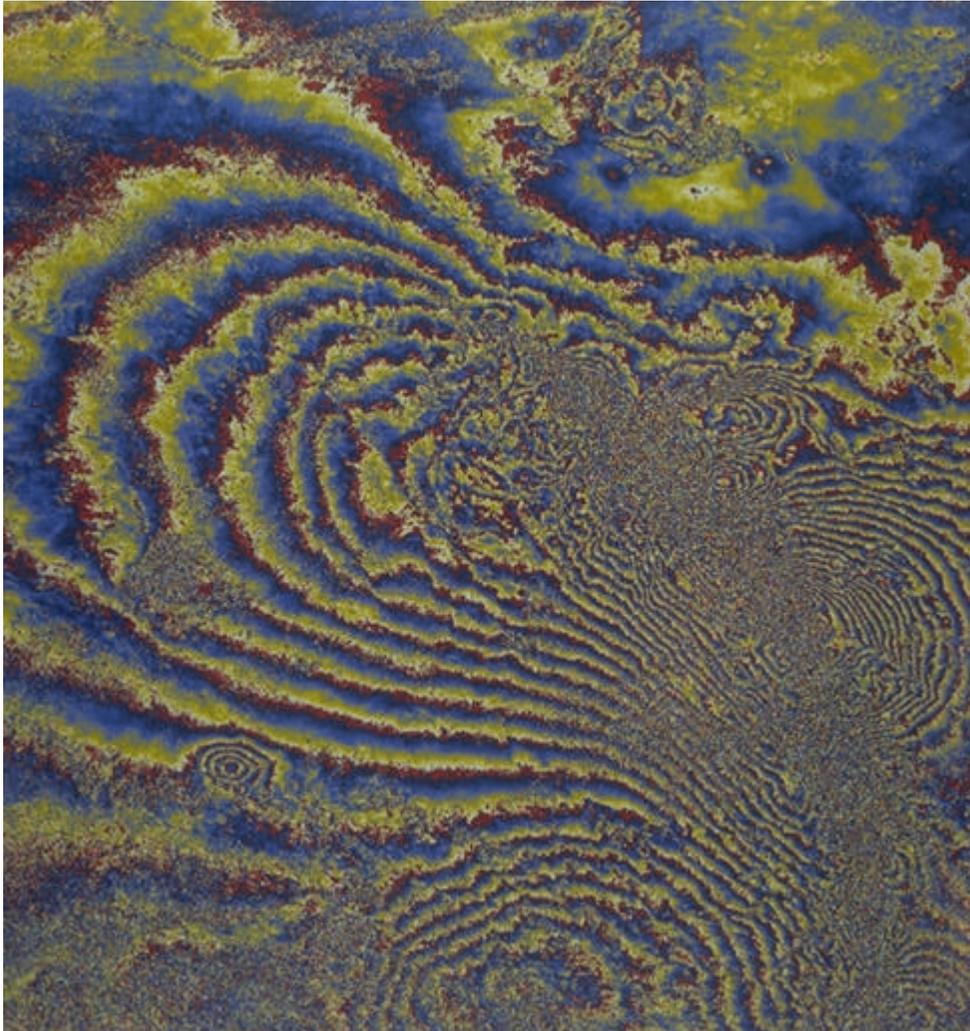
Trou Ionosphérique



Un effet dû à la
troposphère:

l'interaction du
vent avec le relief

Les oscillations
sont équivalentes à
3 mm crête à
crête



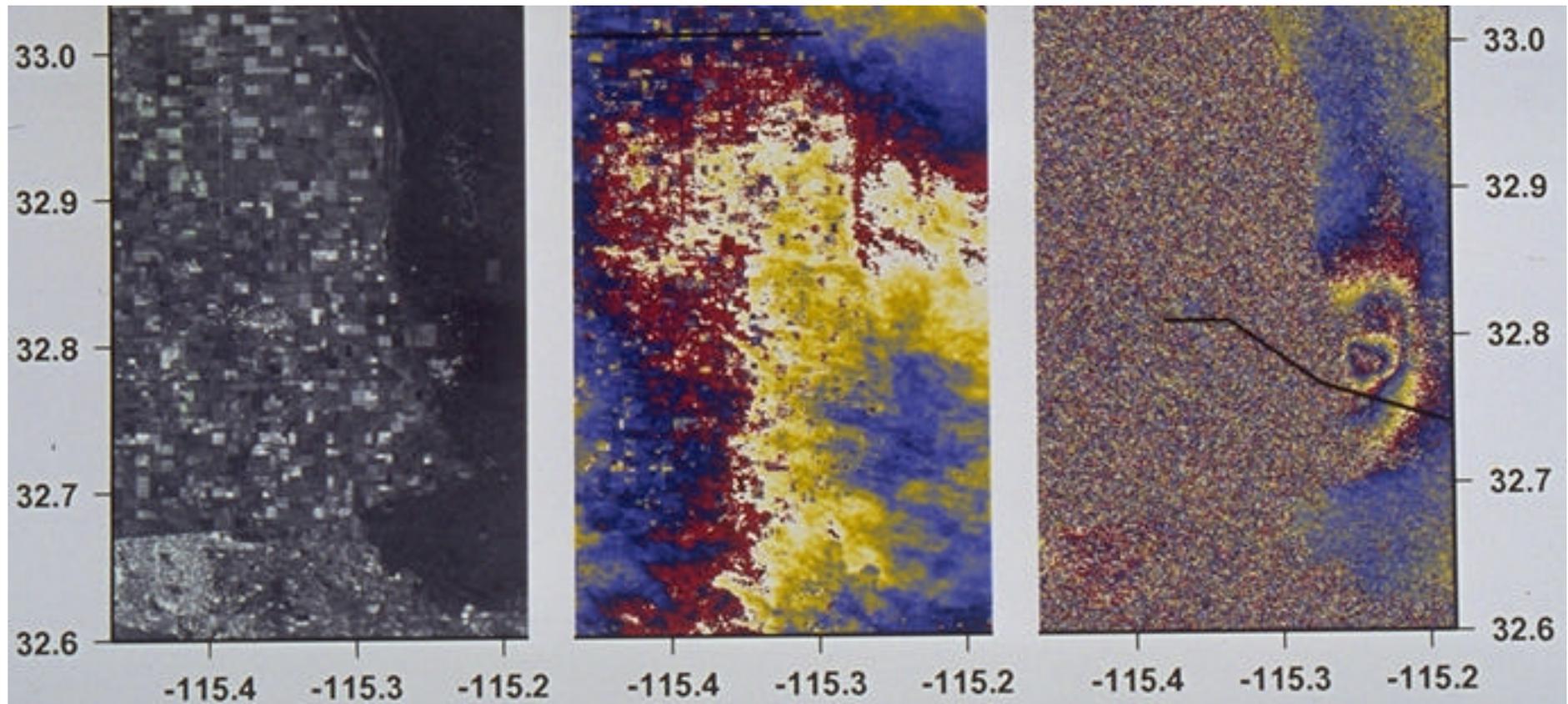
Le tremblement de terre de Landers (Californie):

Une mesure ambiguë, mais tellement puissante !

Toutes les déformations créées entre les instants des prises de vue radar « s'empilent »

Les risques industriels font partie des observables !

Un « trou » de 18 km par 10 km profond de 9 cm est créé par une usine géothermique.



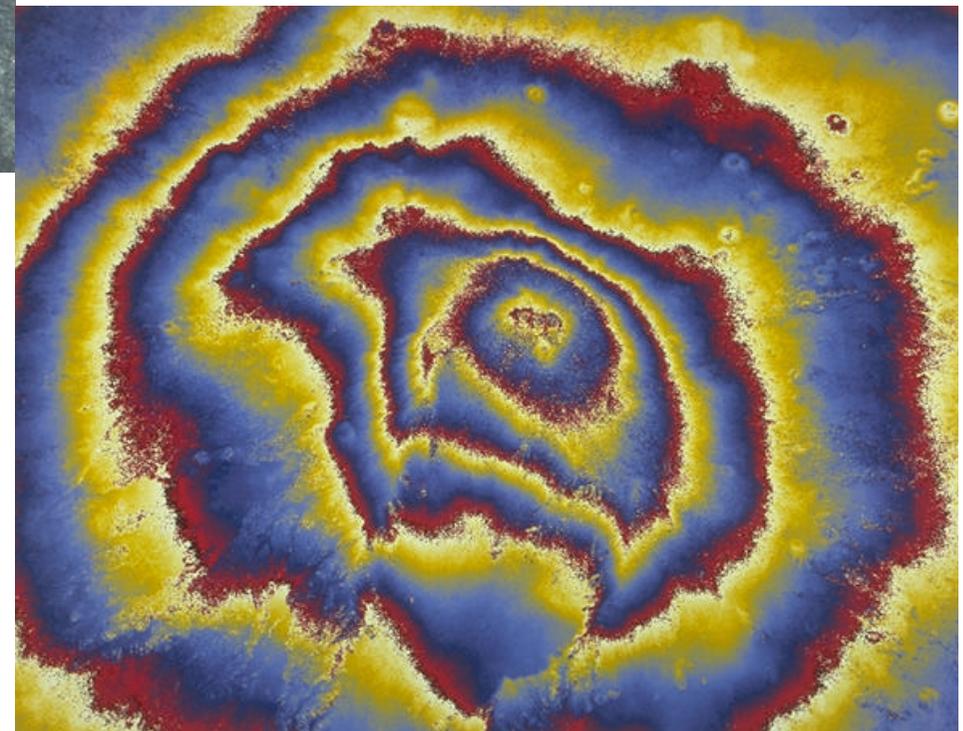


L 'image radar classique
du Mont Etna produite
par un radar embarqué
sur la Navette

Comparaison des phases de
deux images prises à un
jour d 'intervalle depuis des
positions orbitales très
proches.

Une frange correspond à
une différence d 'altitude

de 500 m: C 'est l 'altitude d 'ambiguïté, qui dépend de l 'écart orbital

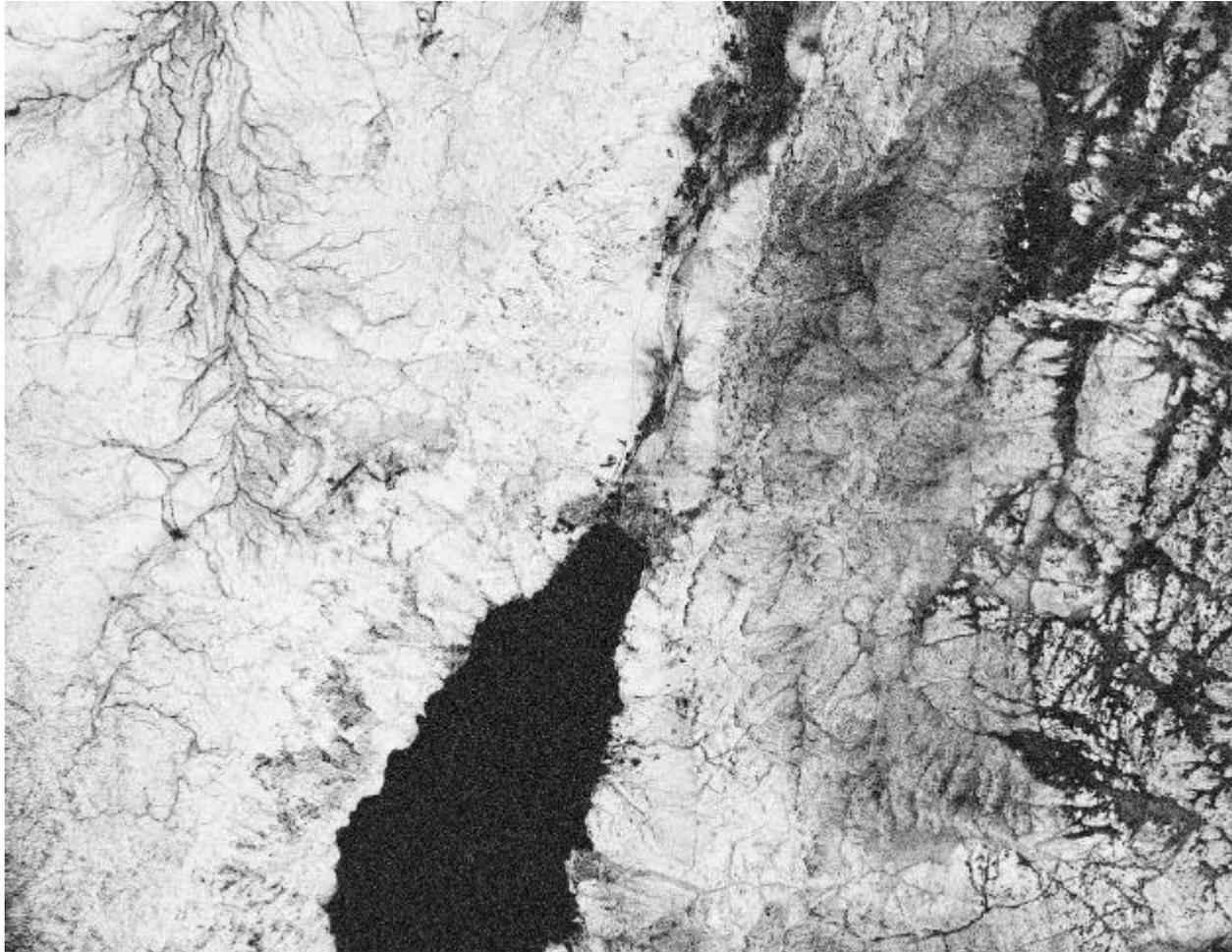


Carte de cohérence

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

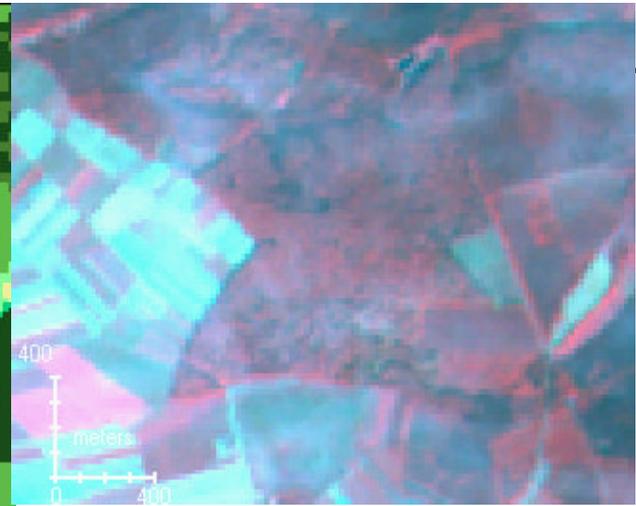
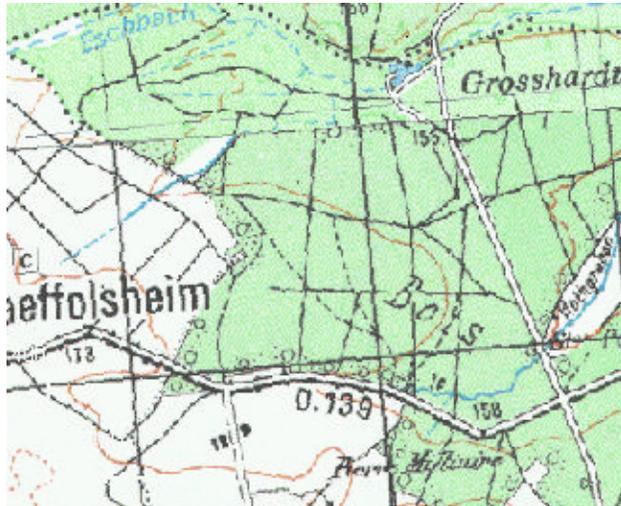
- ◆ Calculée sur une fenêtre (n = 5, 20, 80, ...)
- ◆ Mesure la stabilité de phase entre deux acquisitions
- ◆ Une cohérence faible révèle le fait qu'il y a eu un changement sur le sol entre les deux acquisitions
- ◆ Indicateur très sensible (végétation, surfaces liquides, activités humaines, ...)
- ◆ Ambiguïté décorrélation volumique/ décorrélation temporelle!

Carte de cohérence



Golfe d'Aqaba

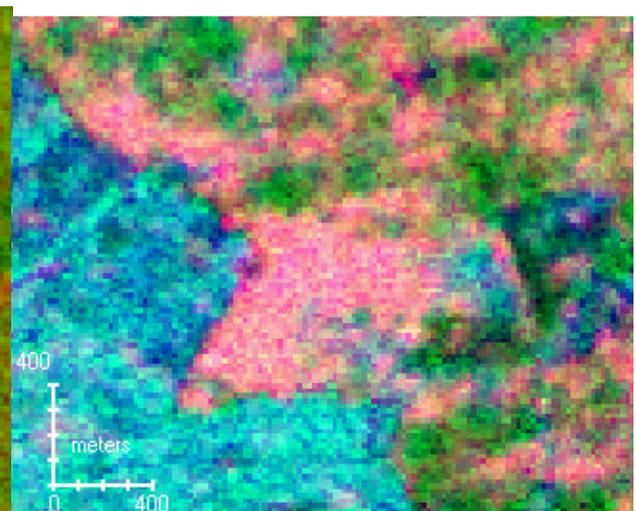
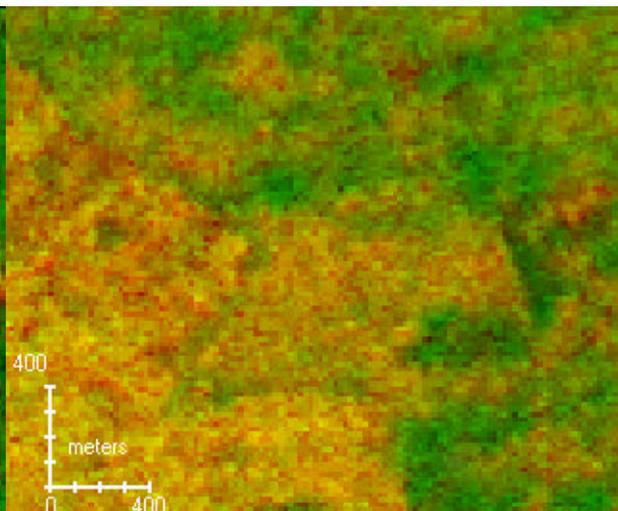
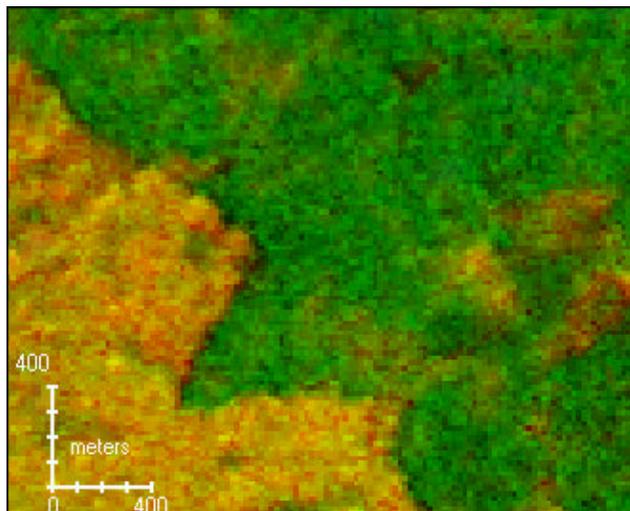
Estimation des dommages en forêt (tempêtes de 1999)



1) Référence Cartographique

2) Inventaire forestier

3) Données SPOT



4) Cohérence avant tempête

5) Cohérence après...

6) Zones endommagées

Pour ne conserver que la topographie, une solution coûteuse mais radicale, la Navette !

Deux images radar simultanées:

pas de déplacements

pas d'effets atmosphériques

Une poutre rigide:

peu ou pas de résidus orbitaux



Couverture du magazine de Ball Aerospace

Mais:

Une couverture en latitude limitée

Une précision moyenne (10 à 15 m)

Une grande variabilité angulaire

Conditions Géométriques

Si la taille du pixel est : $R_2 - R_1$,
la limite interférométrique est :

$$-\frac{1}{2} < (R_4 - R_3) - (R_2 - R_1) < \frac{1}{2}$$

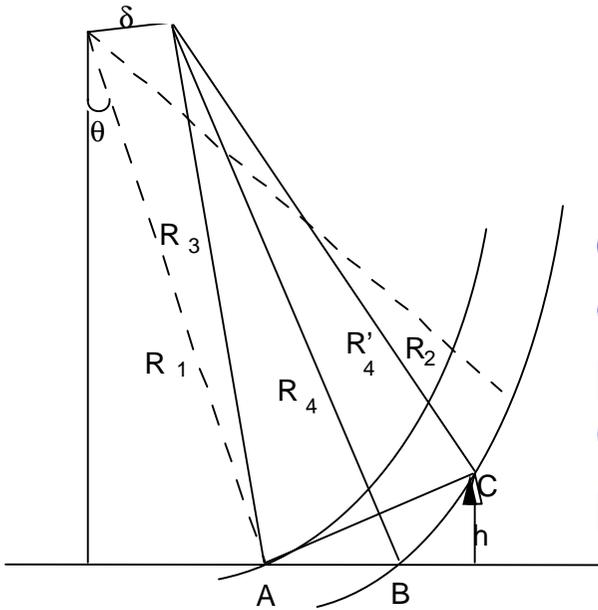
Avec $(R_4 - R_3) - (R_2 - R_1) = a \frac{1}{2} (|a| < 1)$

Le taux de franges orbitales est : a
ce qui donne un taux maximum « par pixel »
égal à $1/Q$ ($Q = 279.5$ pour ERS, $Q = 100$
pour Cosmo, $Q = 43$ pour Alos).

Ces contraintes géométriques sont « adoucies »
par la résolution, car

$$Q \propto \frac{\text{résolution}}{\frac{1}{2}}$$

et donc, plus la résolution s'améliore, plus Q
diminue.



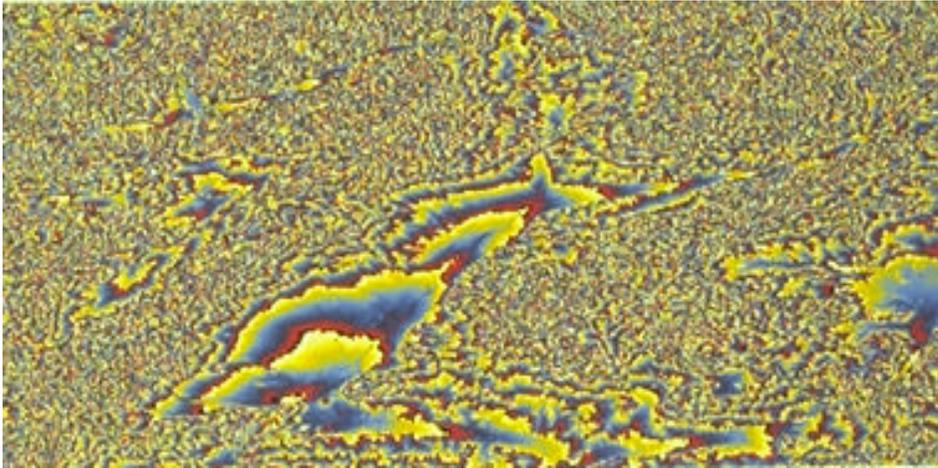
Conditions Géométriques - 2

Meilleur est la superposition des images (par corrélation)
plus faible est le rang d'ambiguïté

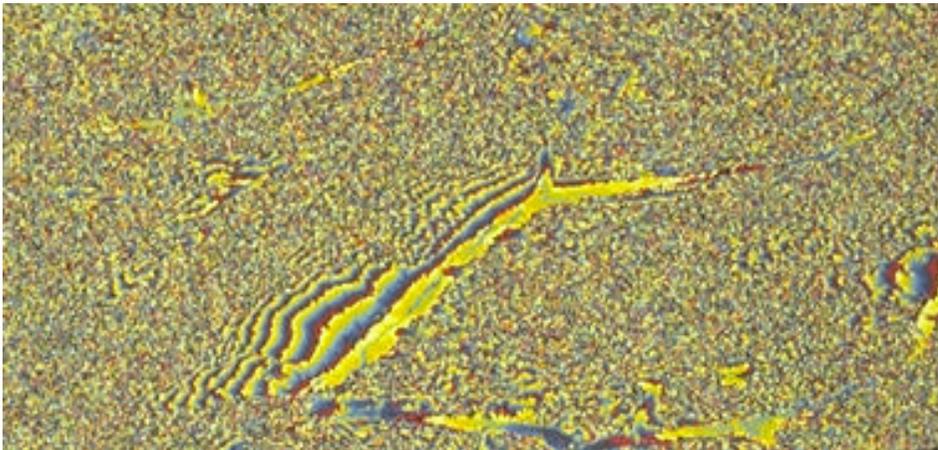
Ex: $Q < 50$ et corrélation au 10ème de pixel
supprime l'ambiguïté!

si : $R_2 - R_1$ atteint quelques pixels en distance
H est l'altitude d'ambiguïté si :

$$(R_4 - R_3) - (R'_4 - R_3) = \frac{\lambda}{2}$$



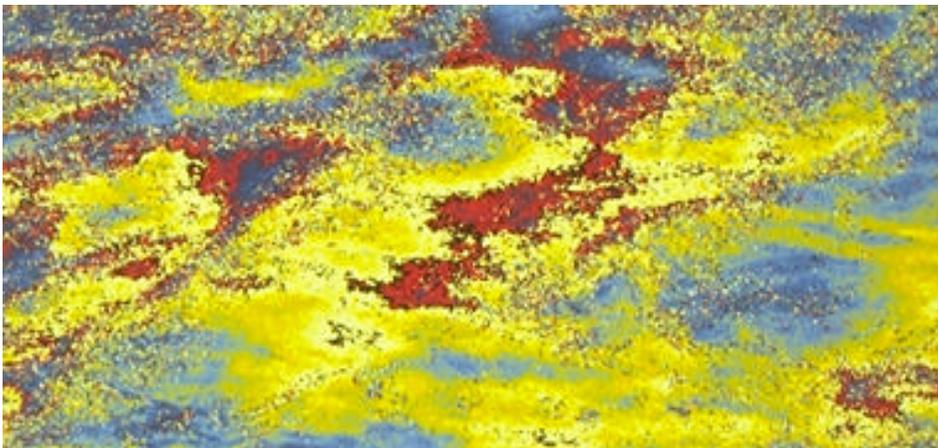
La combinaison entière élimine la contribution topographique en Turquie



1^{er} interférogramme : $h_a = 59$ m

2^{me} interférogramme : $h_a = 29.4$ m

$2 * n^{\circ}1 - n^{\circ}2$ donne : $h_a > 8000$ m

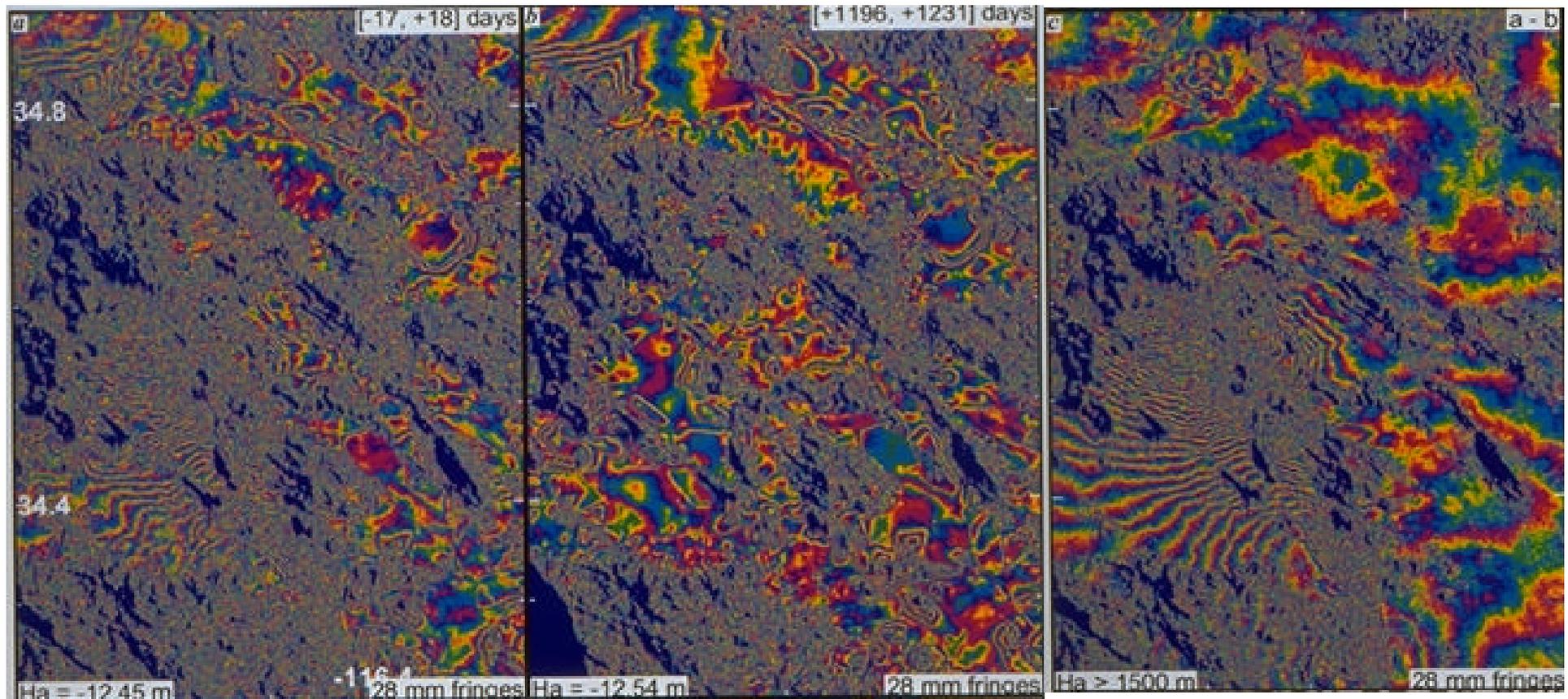


$$\frac{1}{h_{ae}} = \frac{q_1}{h_{a1}} + \frac{q_2}{h_{a2}}$$

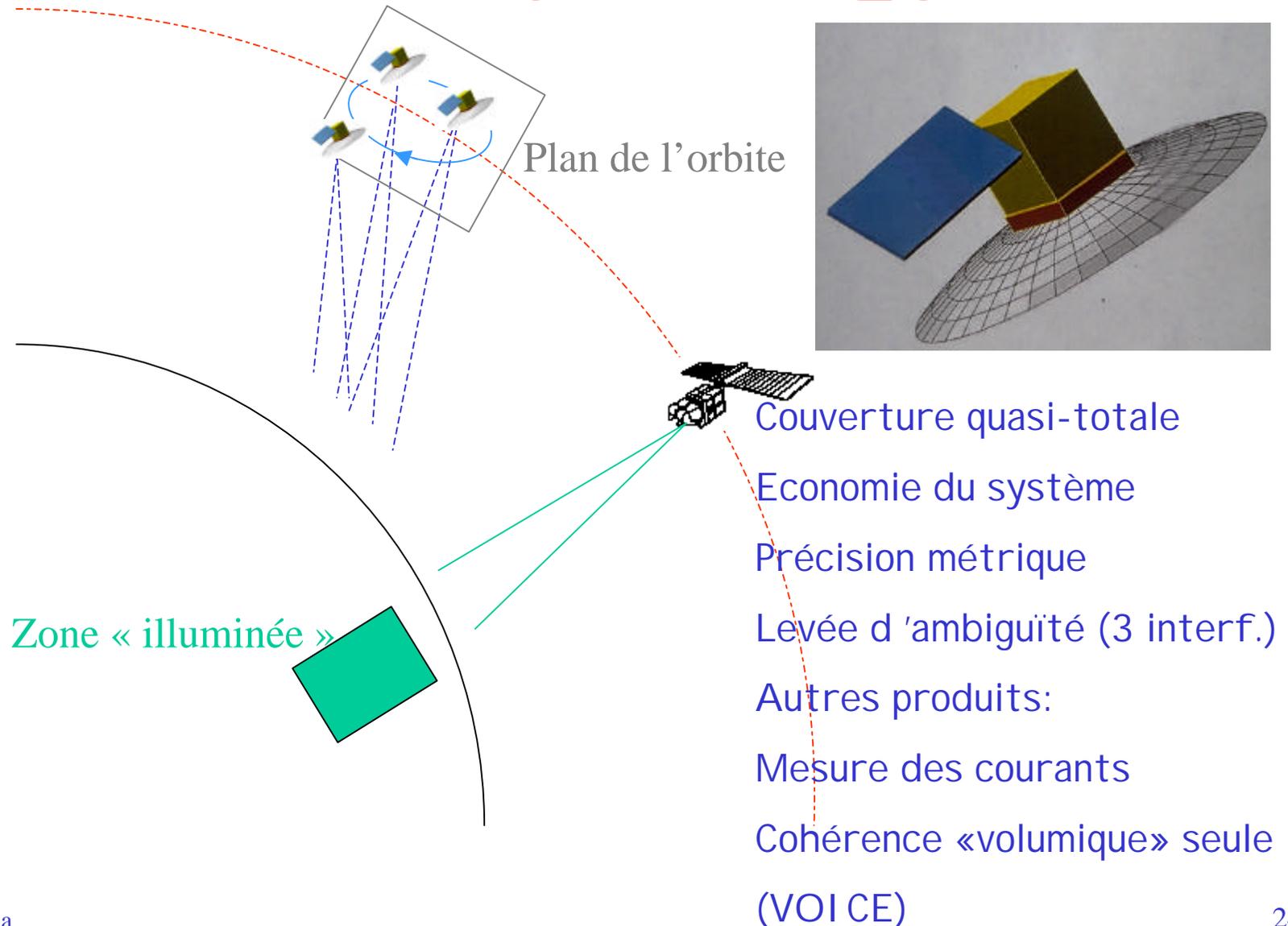
Levée d'ambiguïté «pixel based»

Utilisation de la combinaison entière:

Un interférogramme tandem permet de valoriser un autre interférogramme acquis quatre ans plus tôt



SYSTEME DE « ROUE » INTERFEROMETRIQUE



Conclusion

- Plus de résolution = plus de précision du MNT
- La production de MNT précis permettra une comparaison directe de MNT
 - On s'affranchit de la conservation des surfaces
 - Pas besoin d'utiliser le même système radar
 - Erosion
- Les techniques de type Permanent scatterers seront facilitées :
 - Moins de cibles par pixel, meilleure localisation de la cible dans le pixel