

# COURS DISPONIBLE SUR INTERNET

Serveur [step.ipgp.jussieu.fr](http://step.ipgp.jussieu.fr)

→ TICE

→ Serveur de Cours

# PLAN

1°) Energie et températures dans la Terre

2°) Eléments de dynamique

3°) Champ de pesanteur

**4°) Mesure de la déformation**

5°) Sismologie et tremblements de terre

6°) Chimie des roches

# Chapitre 4

## Mesure de la déformation (suite et fin)

# Objectifs

1. Déplacements et vitesses de déplacement
2. Déformation (et contraintes tectoniques)

# Trois grandes catégories de mesure

(1) Station sol - station sol

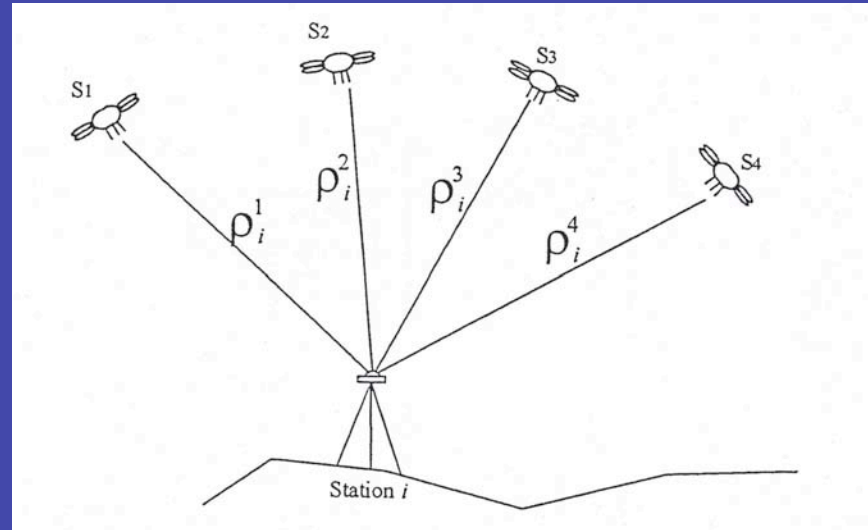
Réseau géodésique

Réseau laser grande maille (VLBS)

(2) Satellite - station sol : GPS

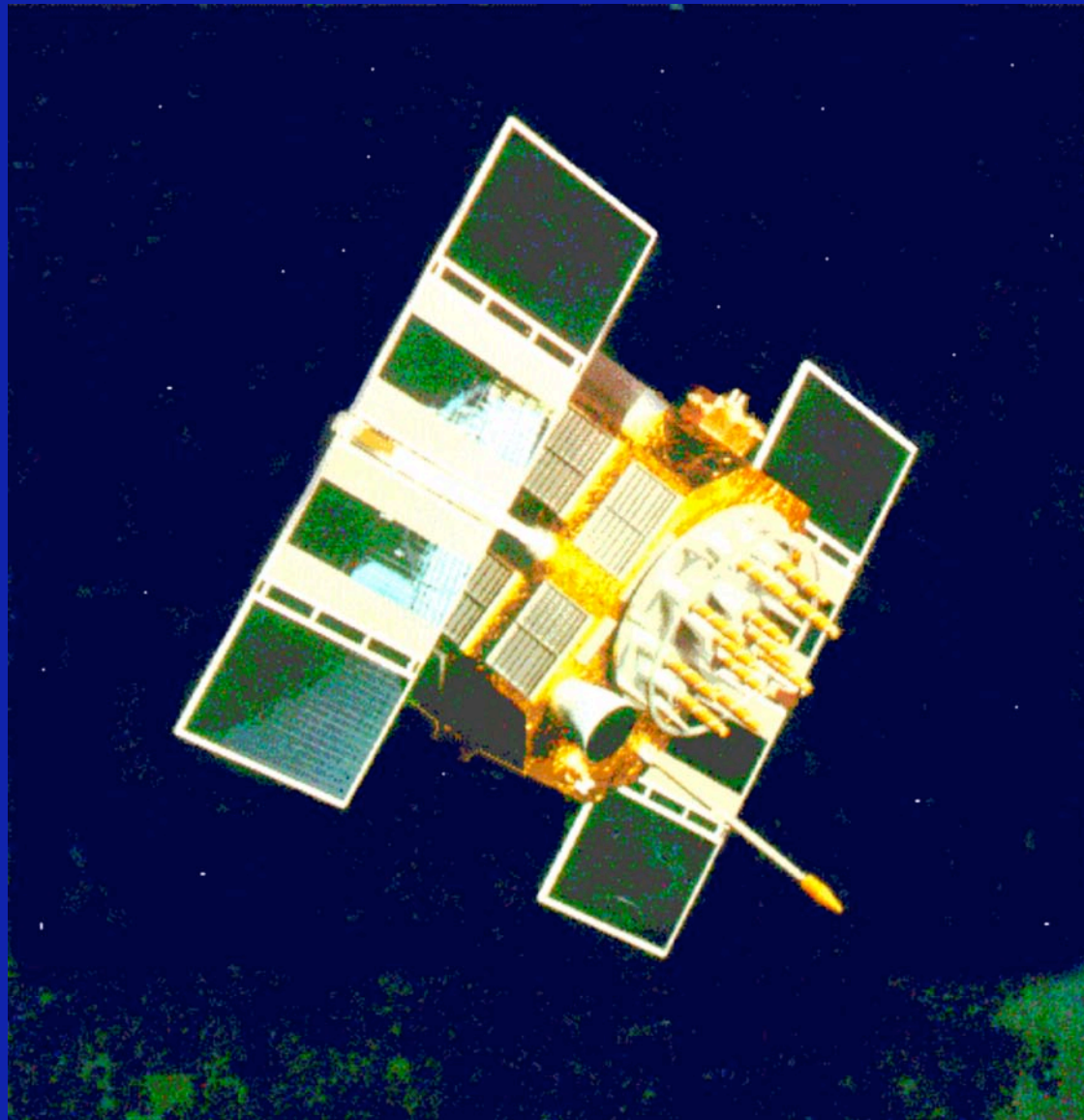
(3) Satellite -satellite : interférométrie SAR

# GPS -> Galileo

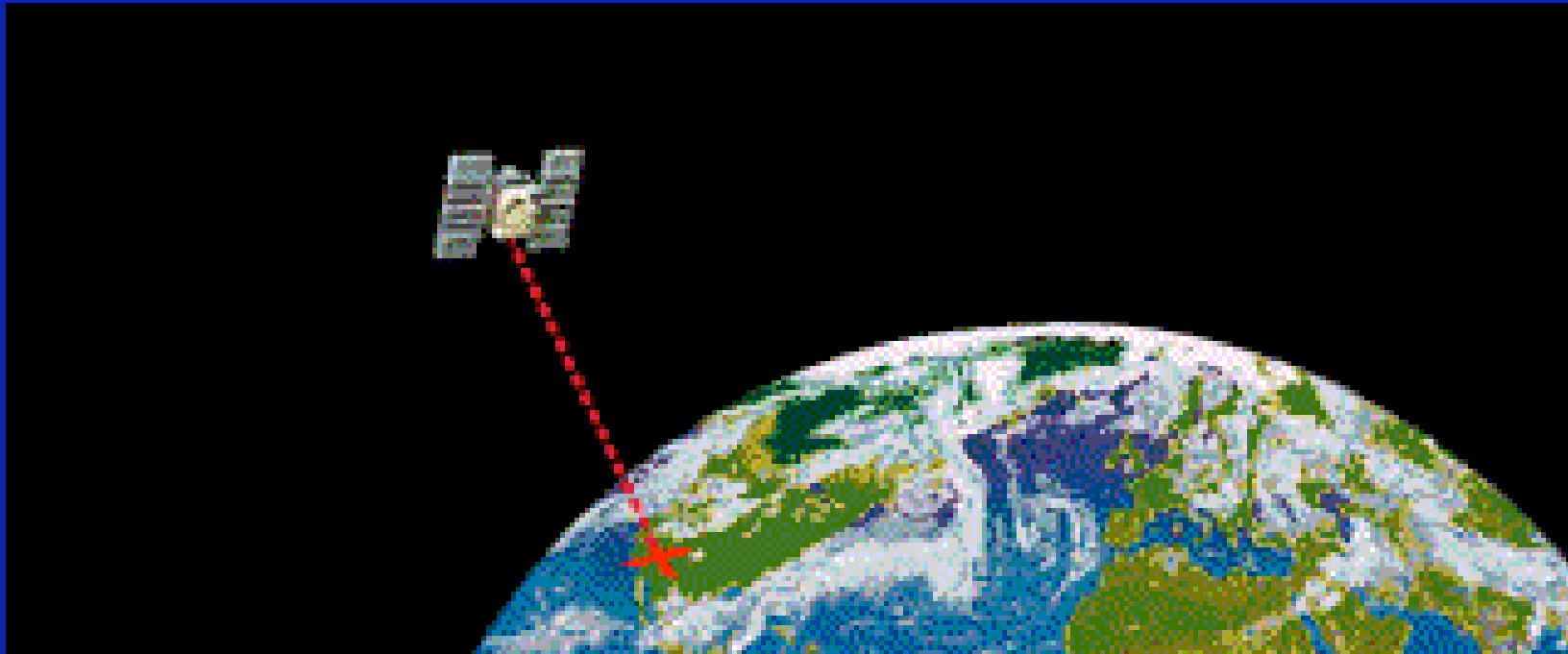


Un point au sol a besoin de recevoir les données  
provenant de quatre satellites au moins:

- \* trois pour connaître sa position absolue
- \* un pour connaître le temps.

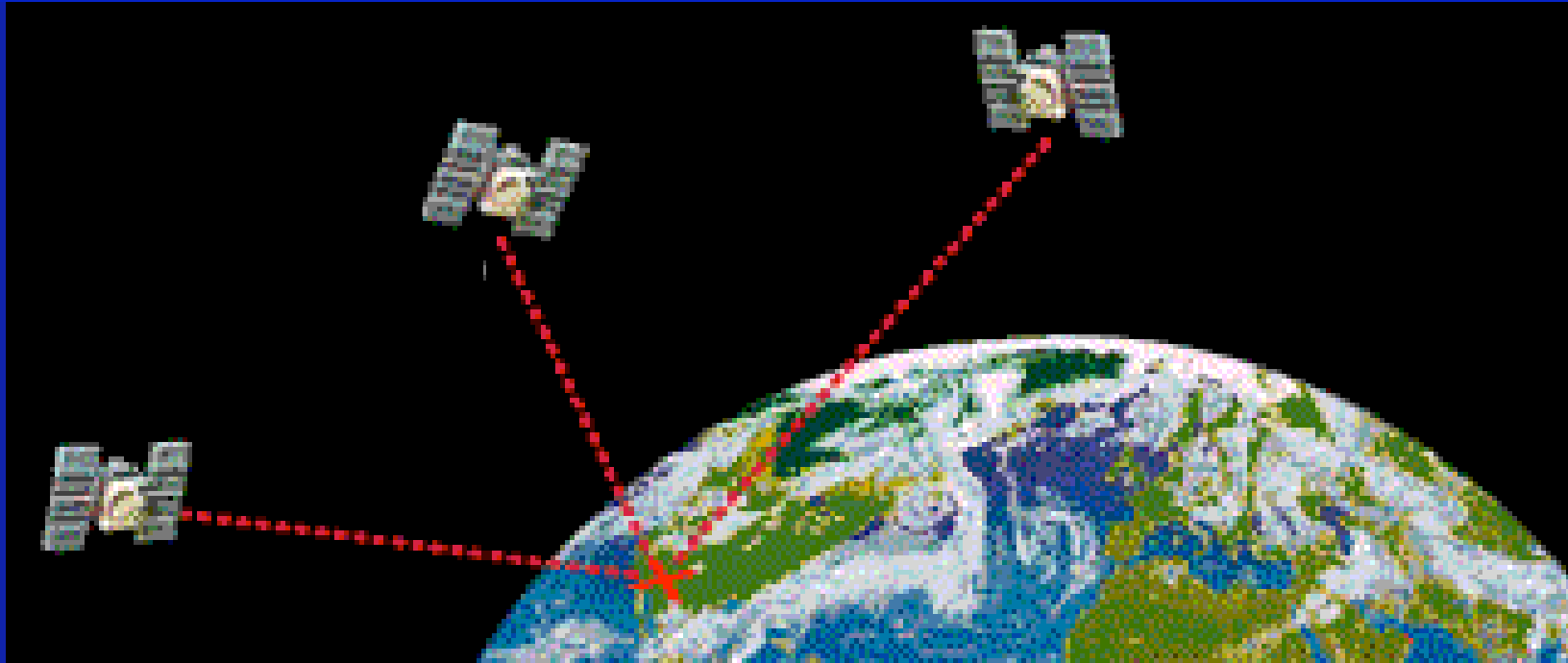


## Etape 1 : mesurer la distance entre le satellite et le récepteur





Trois satellites peuvent localiser un point si leurs positions sont connues



## Distance récepteur - satellite

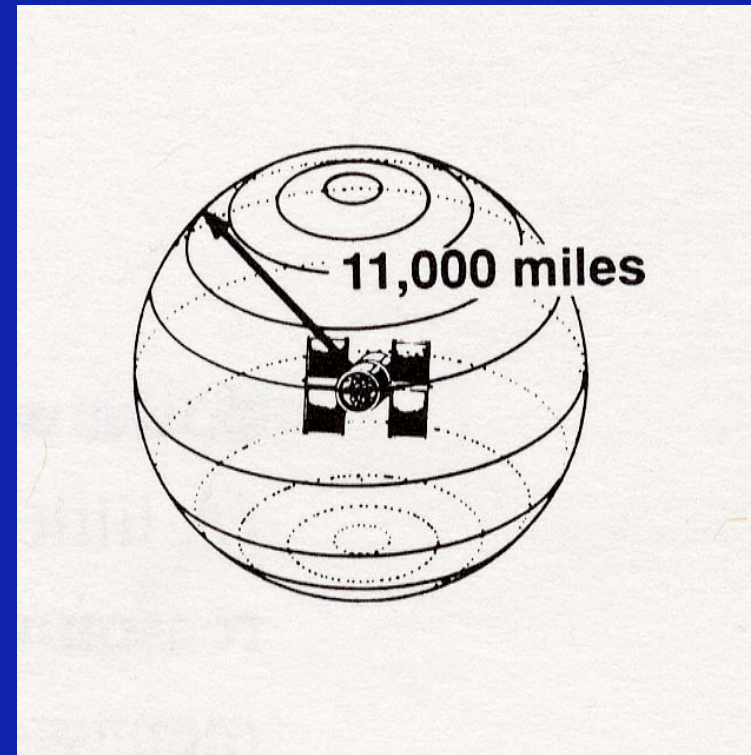
Les satellites sont des références précises:

On mesure la distance entre le satellite et le récepteur

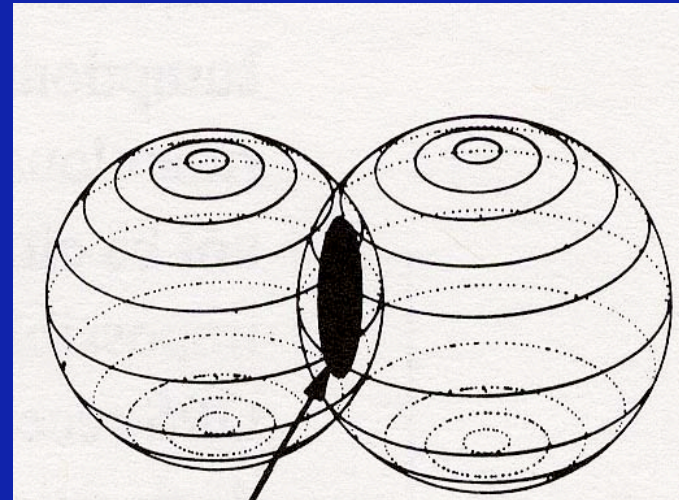
*On suppose que la position du satellite est parfaitement connue*

Exemple: le récepteur est à  
une distance de **11,000 miles**  
du satellite A...

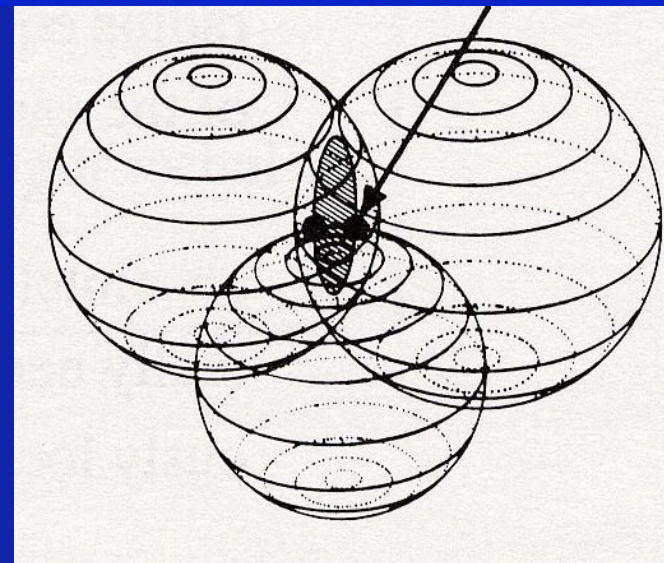
Il est sur une sphère  
dont le rayon est 11,000 miles  
et le centre est occupé par le  
satellite A



Si le récepteur est à  
**12,000 miles du satellite B**  
il est à l'intersection de deux sphères:  
sur un cercle



Si le récepteur est à  
**13,000 miles du satellite C**  
il est à l'intersection de deux cercles:  
deux localisations possibles



Cela peut suffire car l'un des deux points est très loin de la Terre dans la plupart des cas.

Pour lever cette légère incertitude, une connaissance (même mauvaise) de l'altitude du récepteur suffit (cela fait une quatrième sphère dont le centre est aussi au centre de la Terre).

## Etape 2: la mesure de la distance

Mesure faite sur le principe simple:  
distance = vitesse x temps

Les ondes radio traversent l'espace à la vitesse de la lumière  
 $\approx 300.000 \text{ km s}^{-1}$

**Problème:** il faut savoir quand le satellite a envoyé son signal

## Etape 3: déterminer le temps avec grande précision

Une erreur de 1/100 seconde entraîne une erreur de 3000 km !

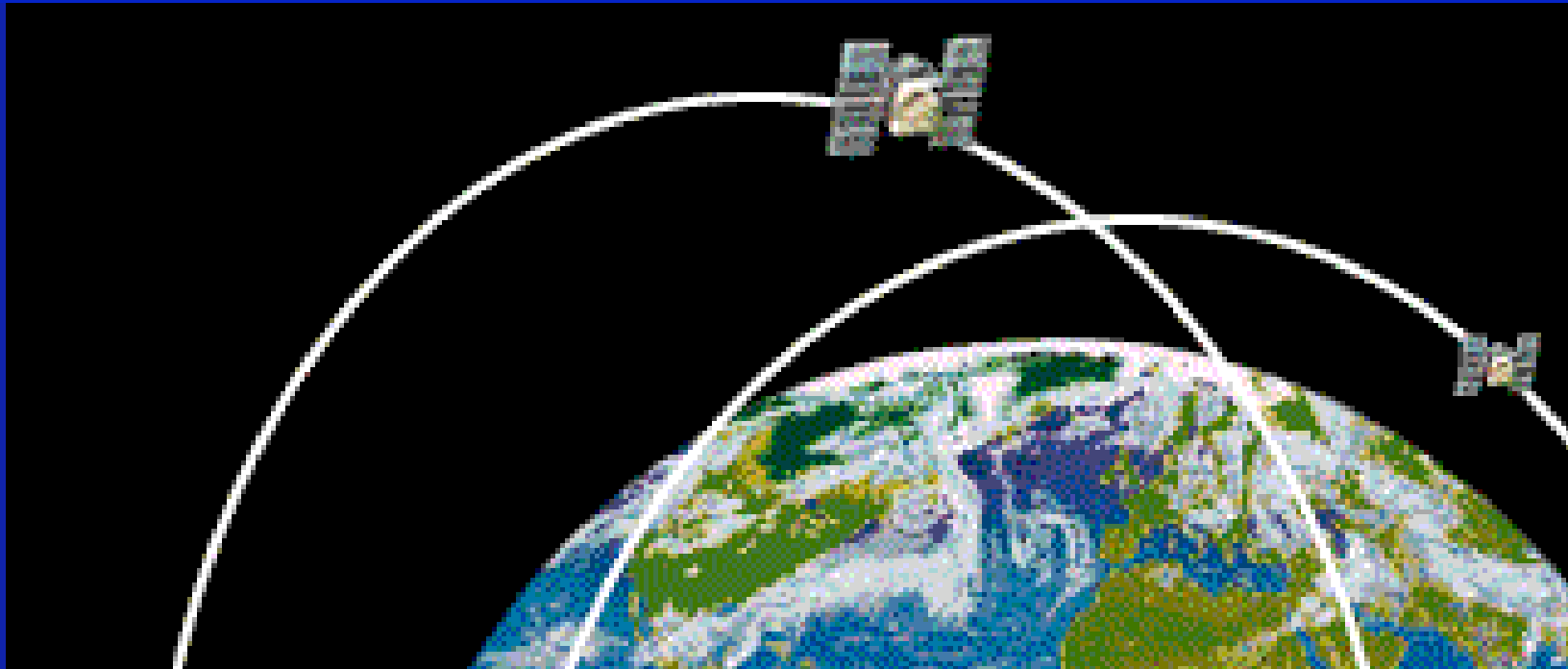
Les satellites ont une horloge atomique:

Césium 133 : 9,192,631,770 cycles/seconde

Mais les récepteurs ont des horloges ordinaires.

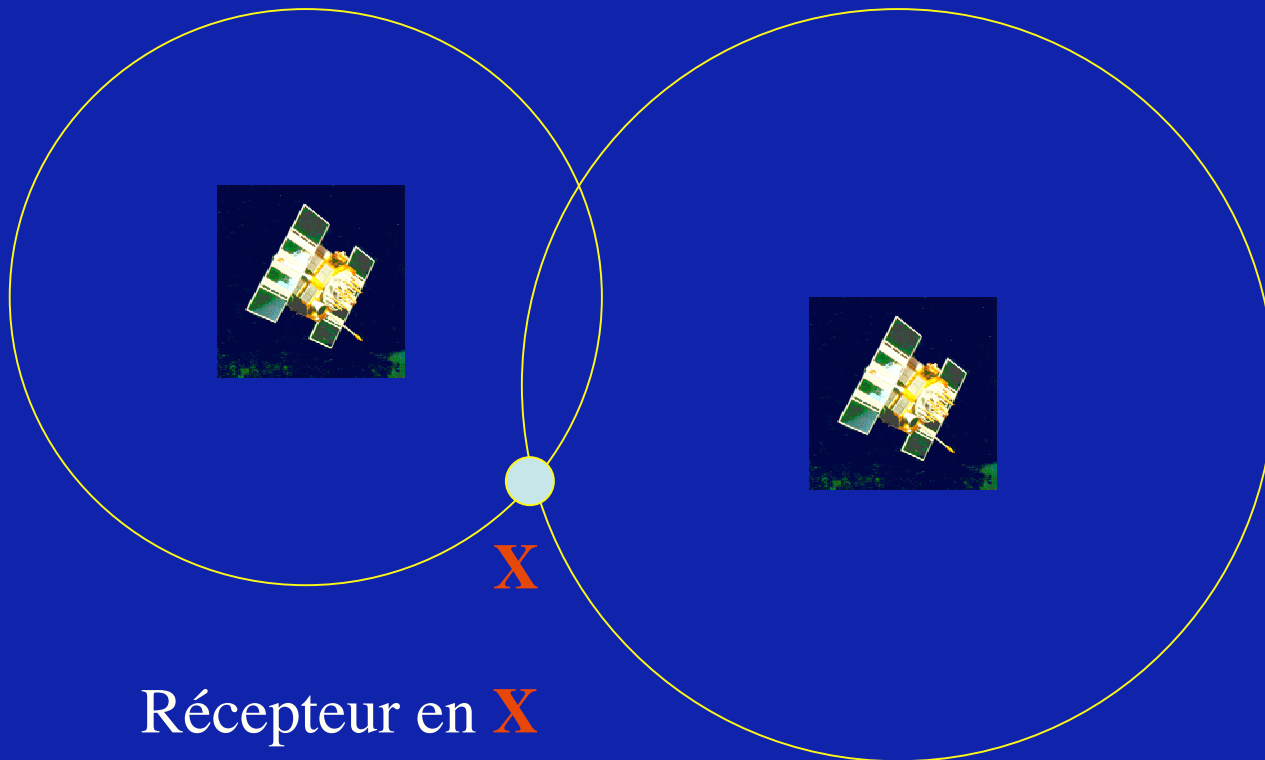
Solution : utiliser 4 satellites

Les orbites des satellites sont très bien connues: il suffit de s'assurer que les mesures sont bien faites au même moment. Le temps est donc la quatrième variable à déterminer.



## Principe: à 2 D (dans le plan)

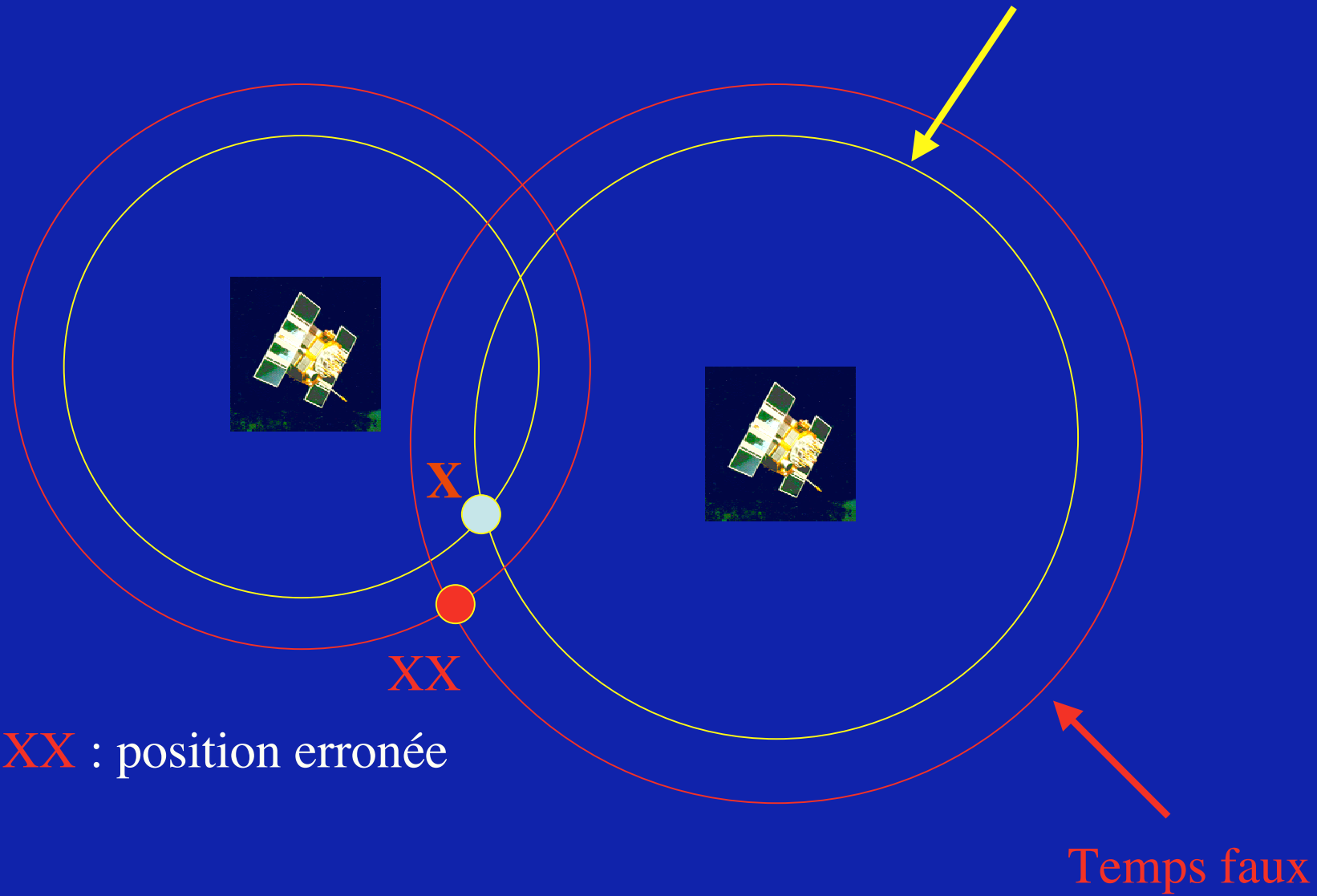
Distances en unités de temps:  
4 et 6 secondes



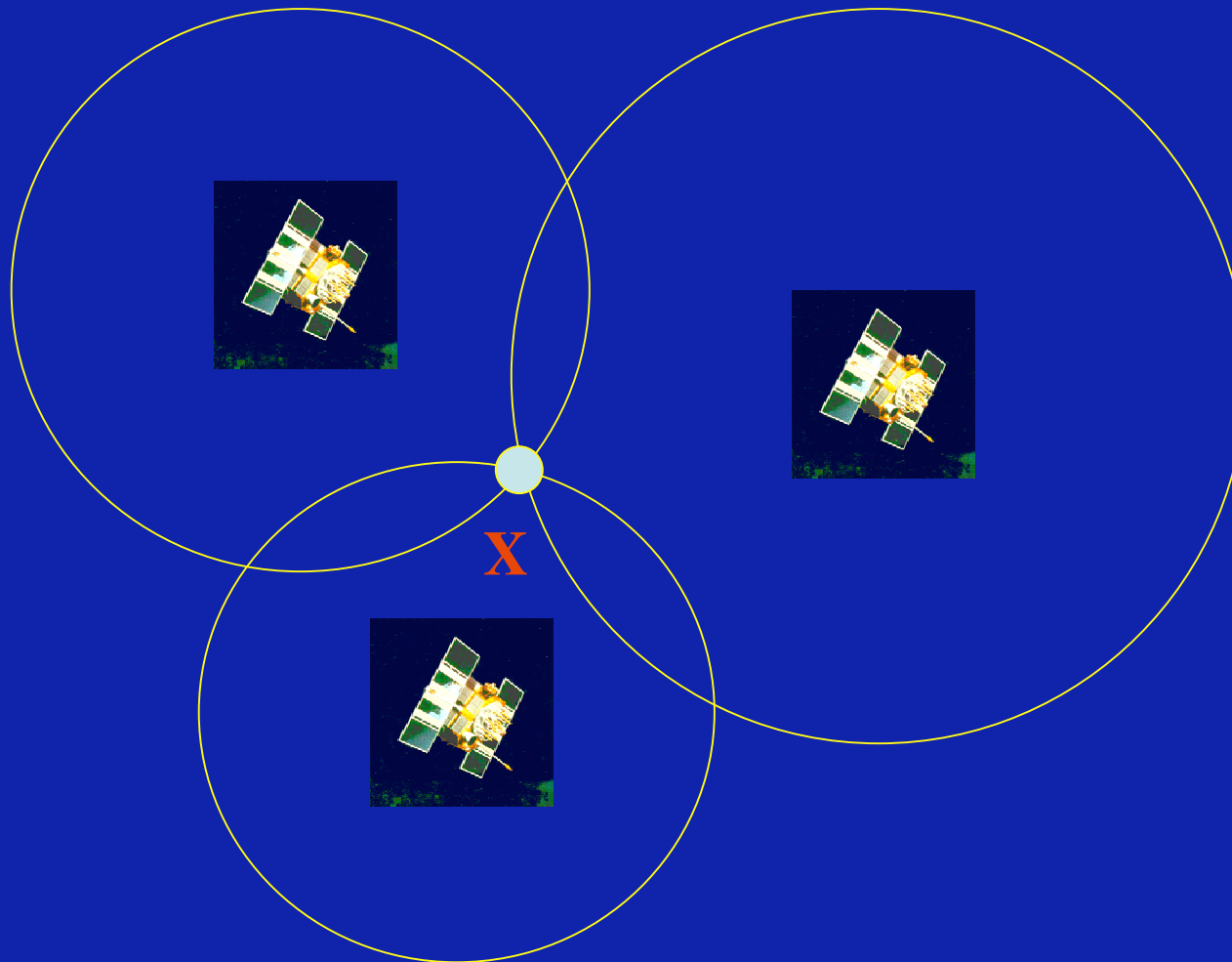


Erreur de 1 seconde

Temps réel

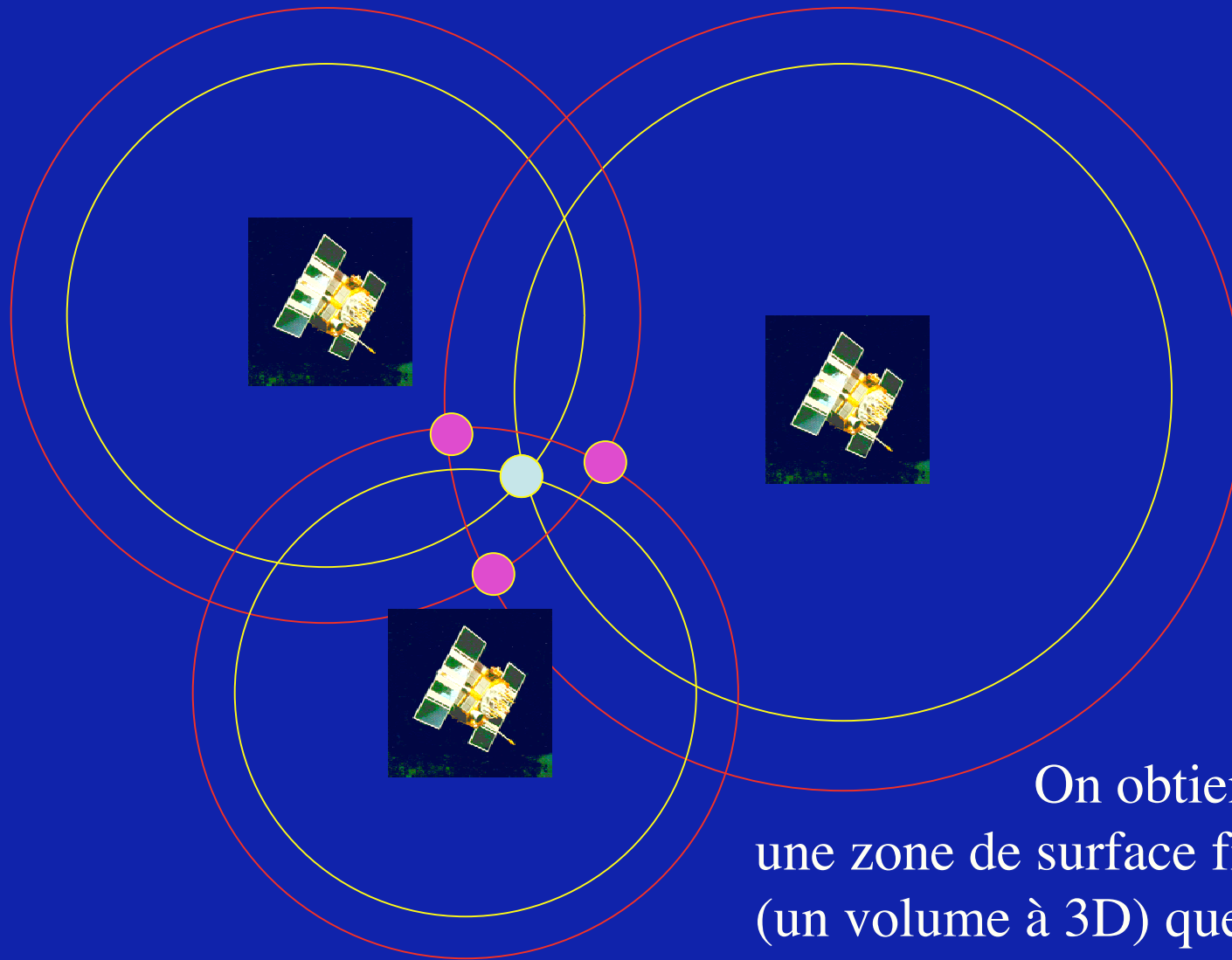


Avec un troisième satellite dans le plan  
(un 4ème à 3D)



Si le temps est bon  
les trois cercles  
se croisent en X

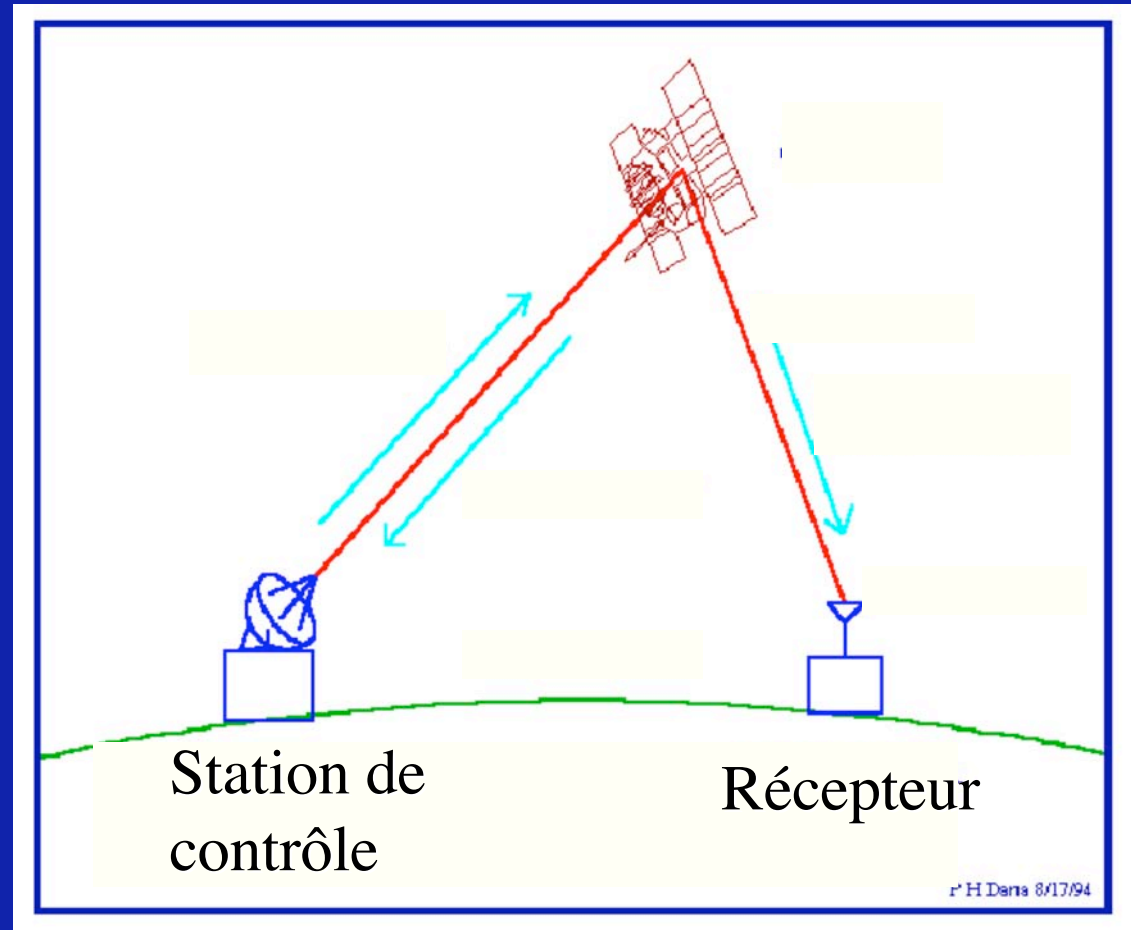
## Avec des temps erronés



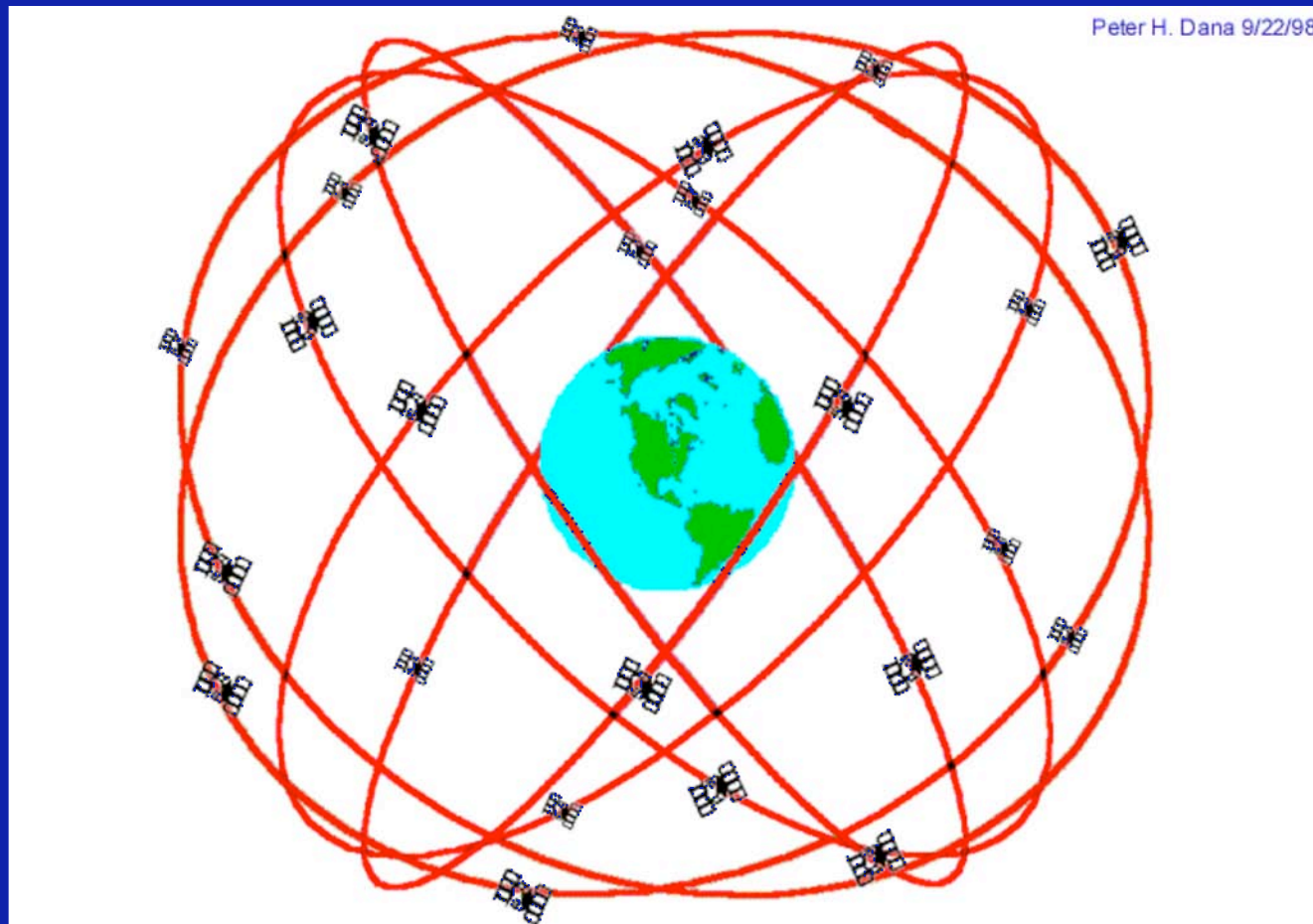
On obtient  
une zone de surface finie  
(un volume à 3D) que l'on rétrécit en  
réajustant les temps.

## Etape 4: localiser les satellites

- Les orbites connues a priori (avant le lancement)
- Les satellites sont suivis et leurs orbites réajustées constamment



# La constellation GPS

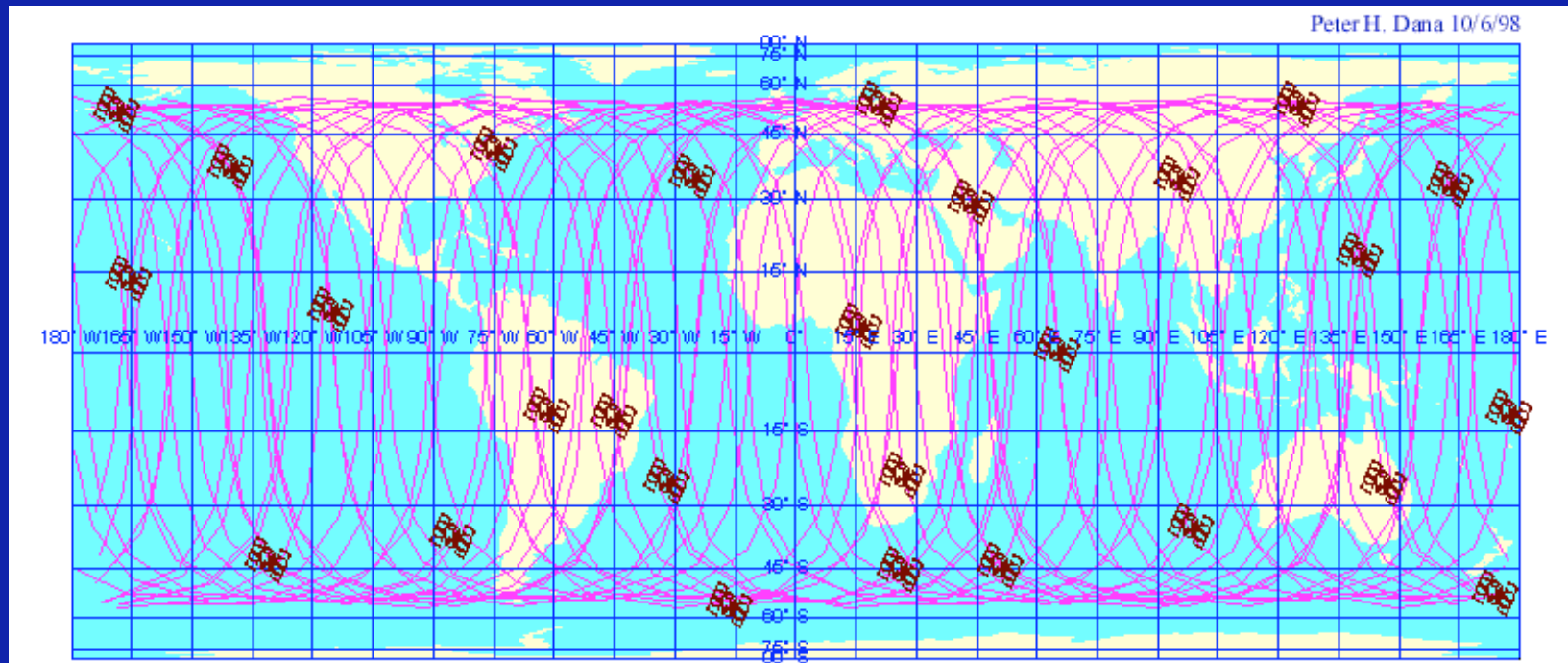


24 satellites

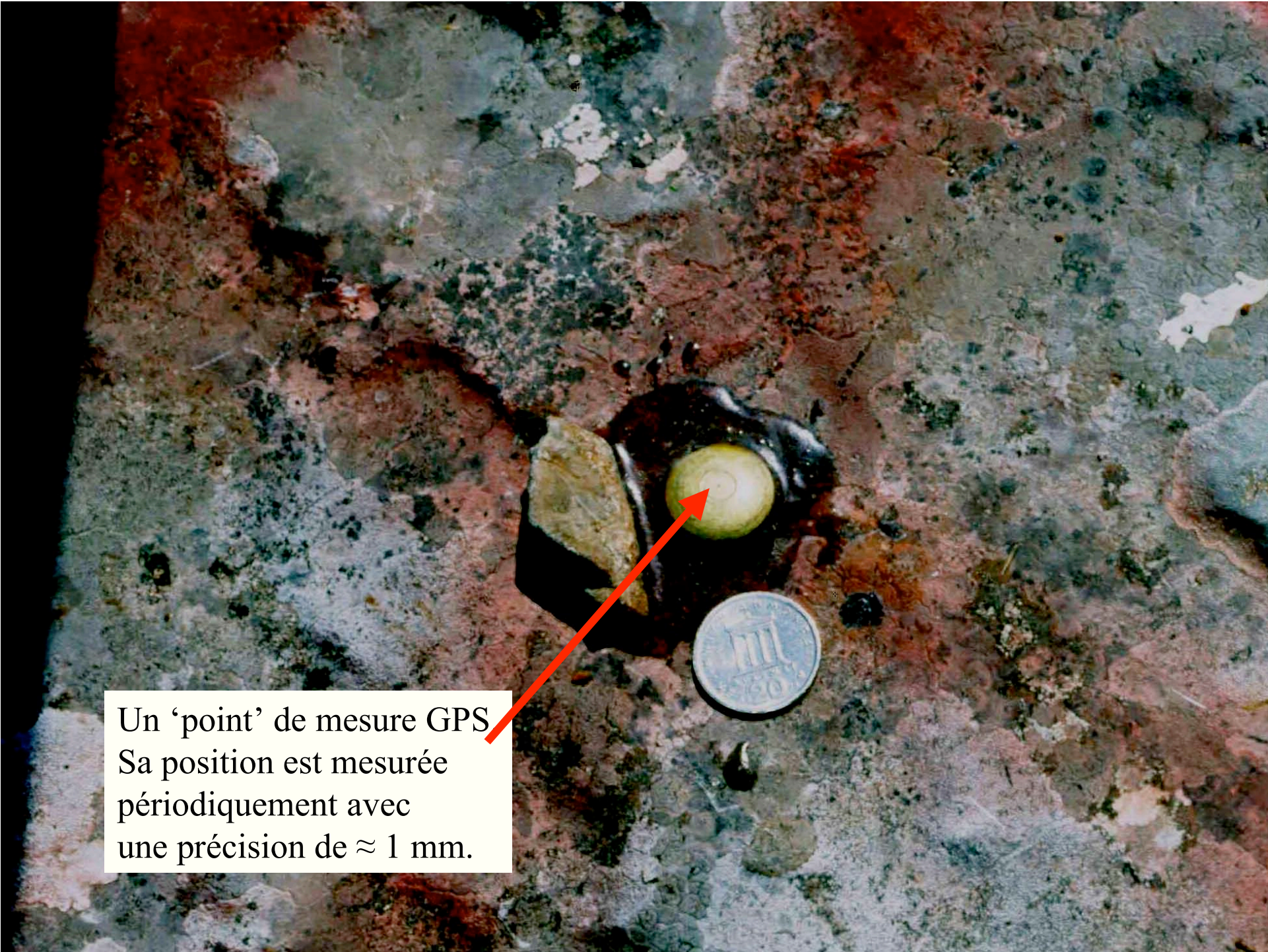
6 plans orbitaux

4 satellites par plan orbital

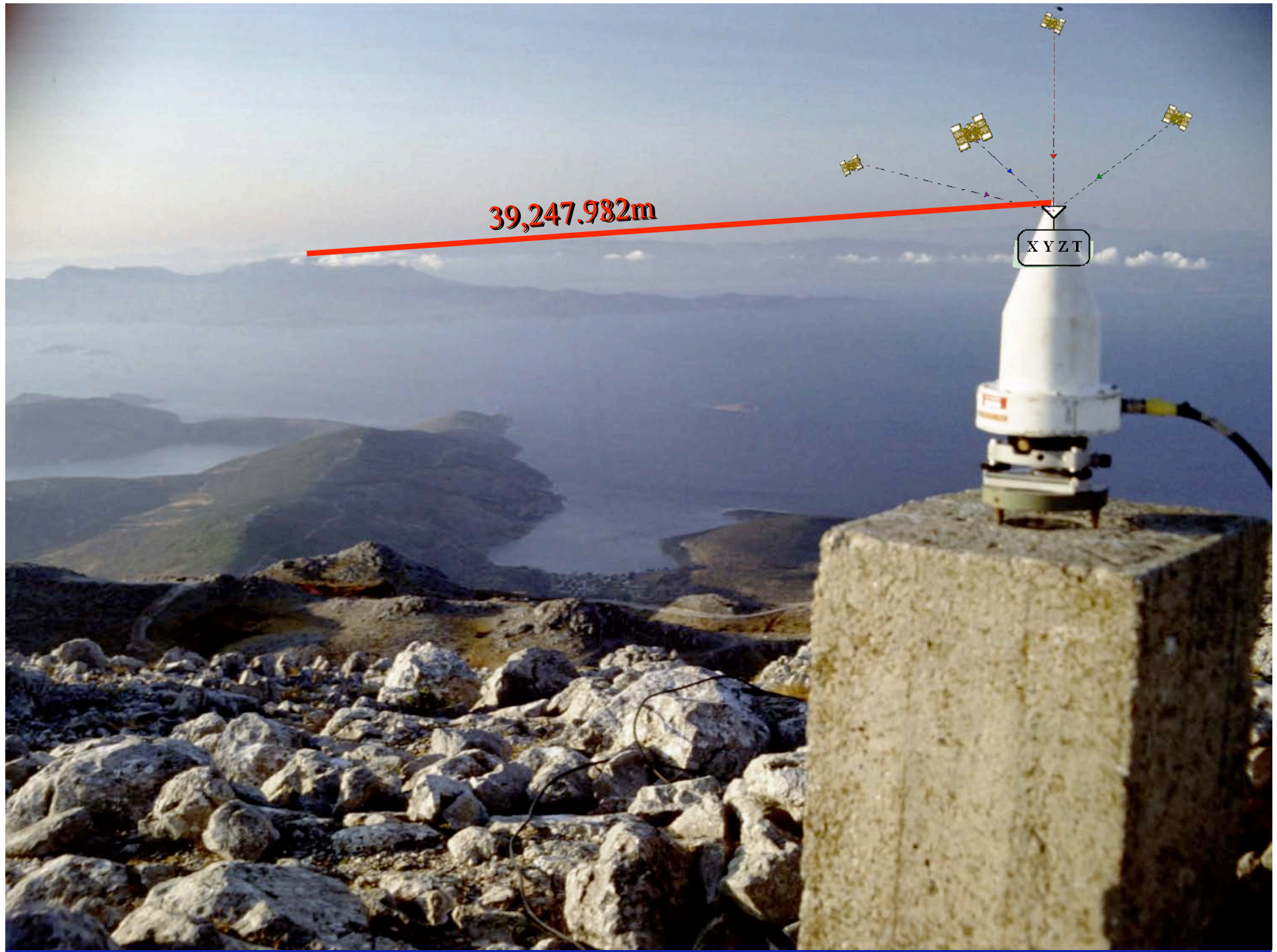
# Couverture du réseau GPS en 24 heures (27 satellites en 1998)



Précision maximum  $\approx 1$  mm

A photograph showing a close-up of a rock surface with a yellow circular marker and a coin for scale. A red arrow points from the text box to the yellow marker. The rock surface is textured and shows signs of weathering and mineralization. The coin is a 20-cent Euro coin, used as a scale reference.

Un 'point' de mesure GPS  
Sa position est mesurée  
périodiquement avec  
une précision de  $\approx 1$  mm.



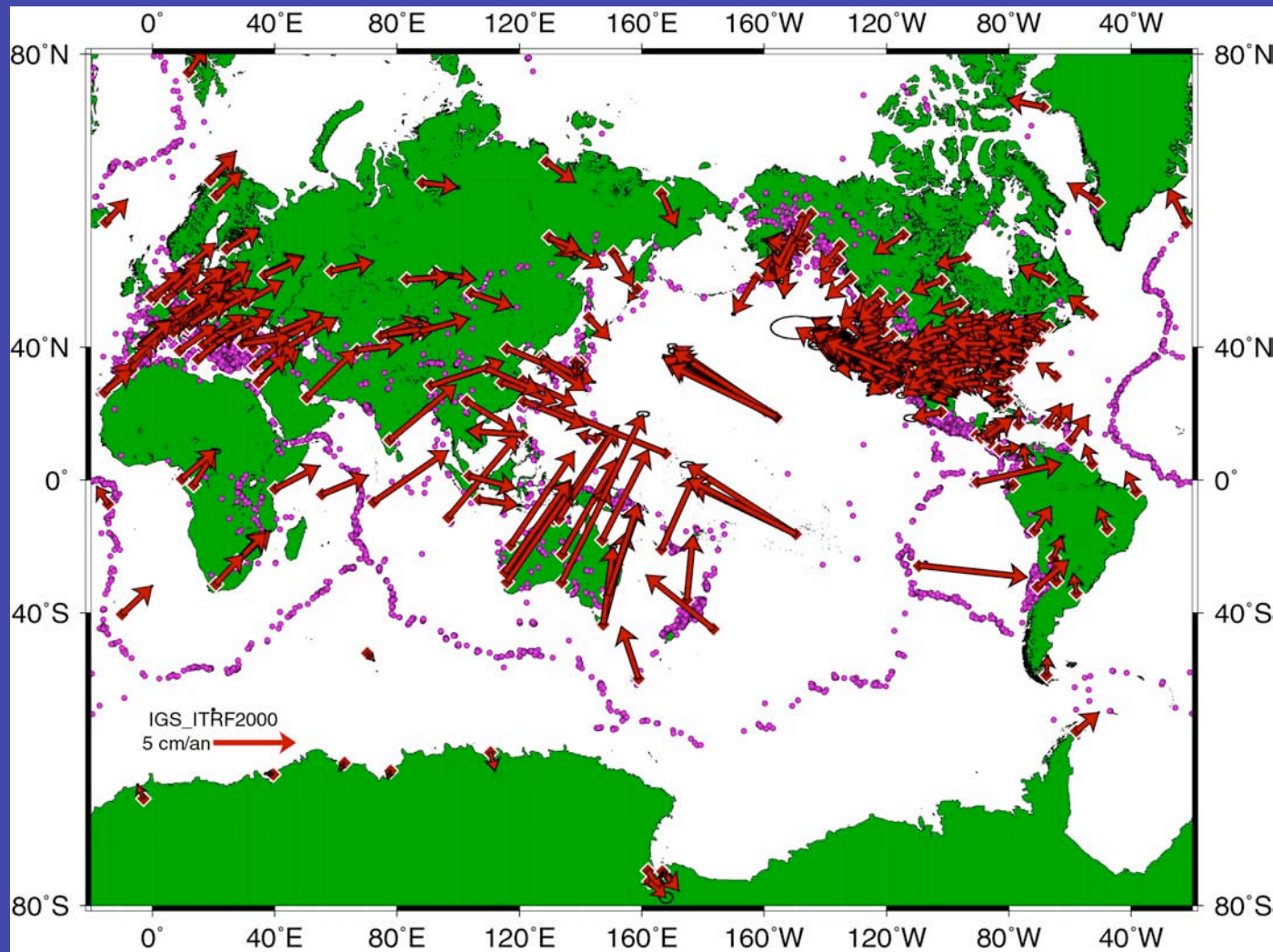
39,247.982m

XYZT

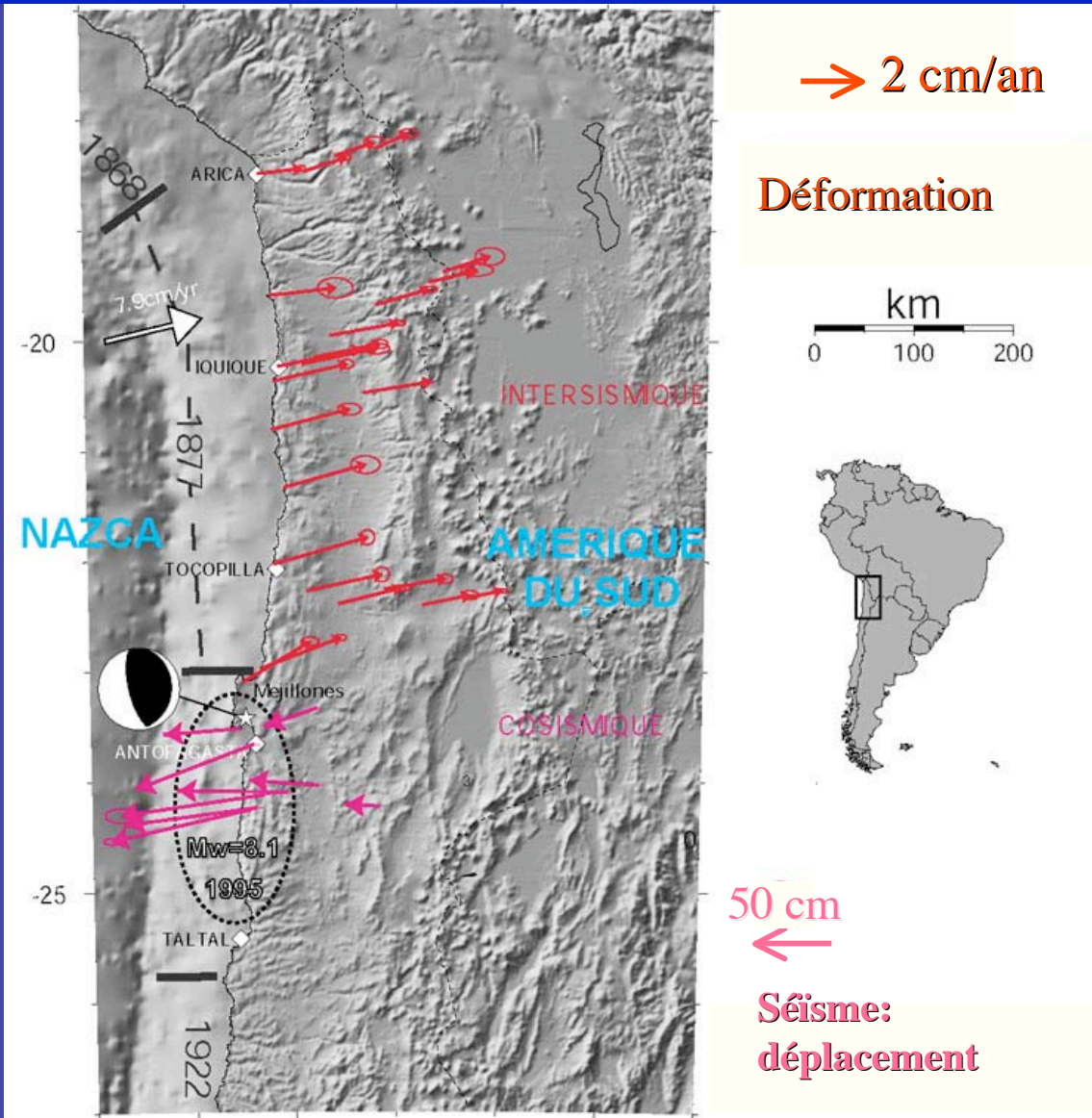


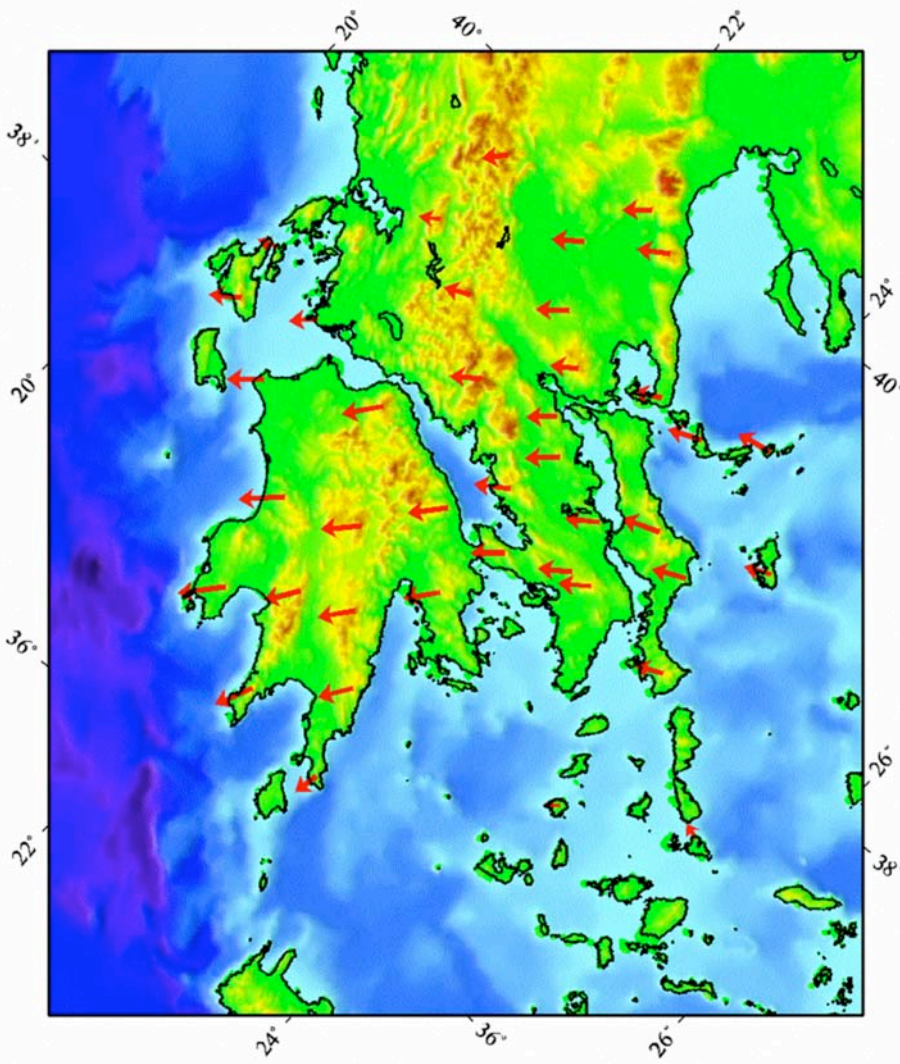
# GPS - résultats

## 1. Echelle globale

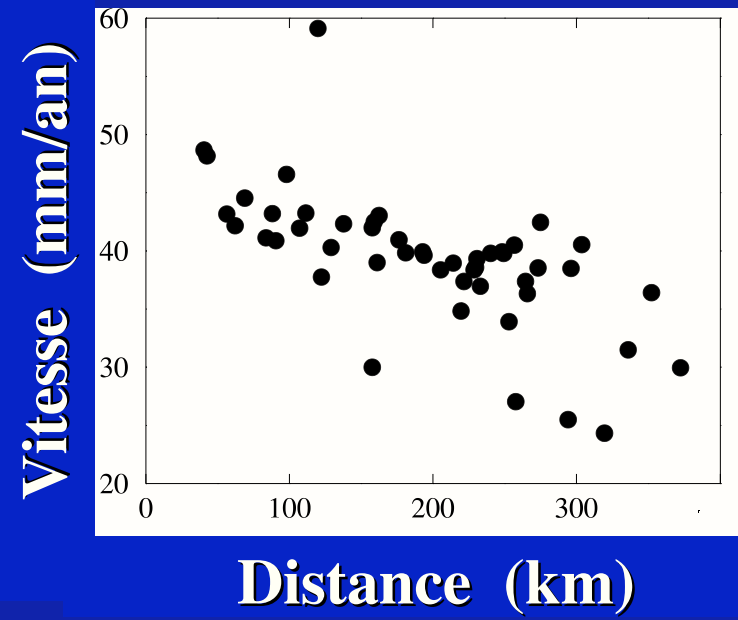


## 2. Echelle locale : le Chili

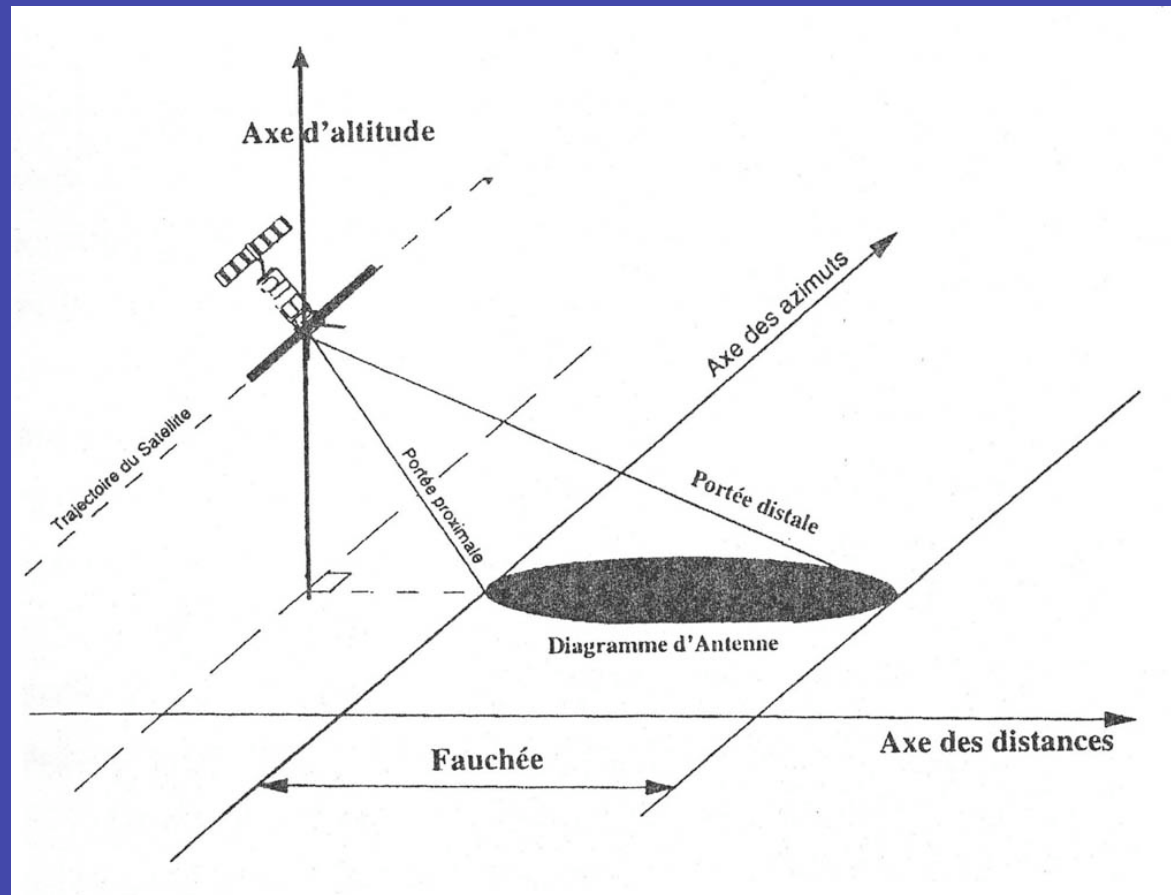




La Grèce se dirige vers la zone de subduction hellénique (mer Egée).  
 La vitesse croît progressivement quand on se rapproche de la fosse.

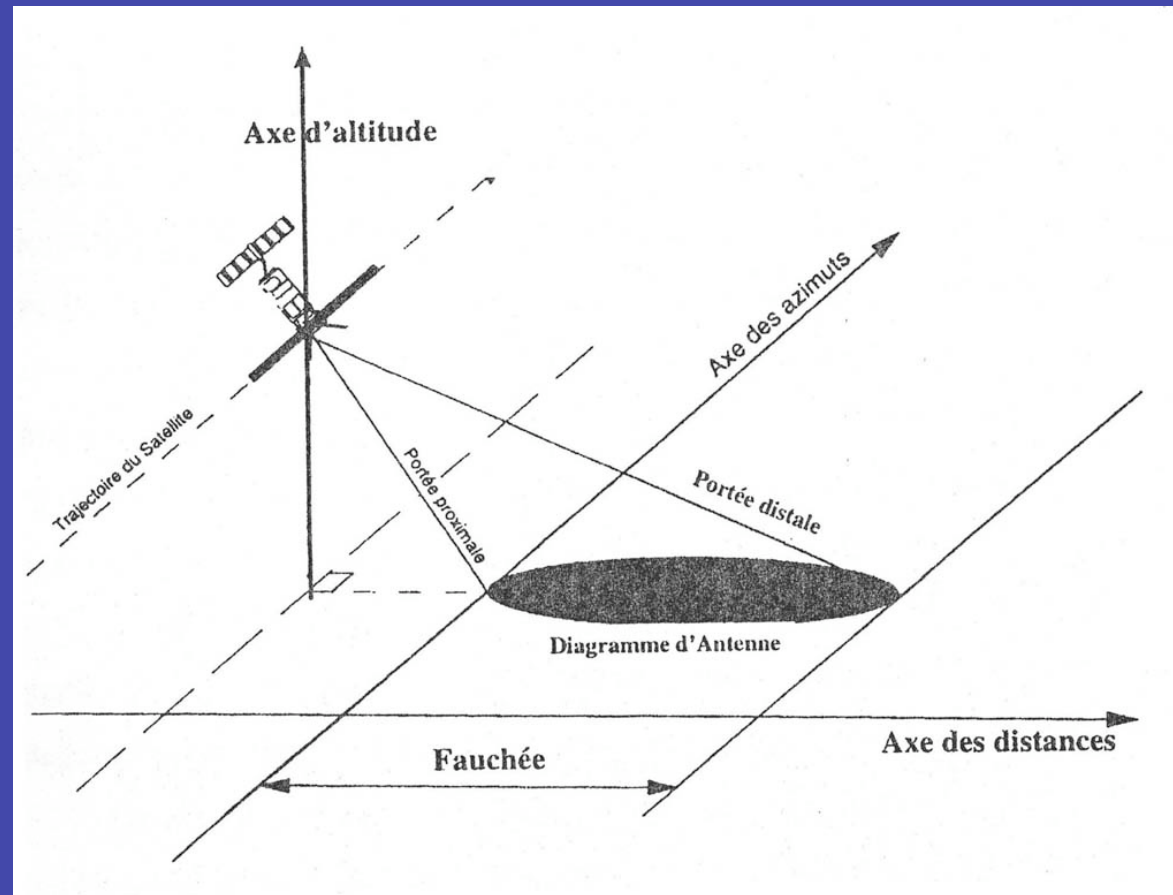


# Interférométrie Radar (SAR)



Le satellite envoie vers la surface terrestre un faisceau d'ondes radar de longueur d'onde  $\sim 3-6$  cm. Pendant l'acquisition d'une image, le satellite balaie une région de  $100 \times 100$  km.

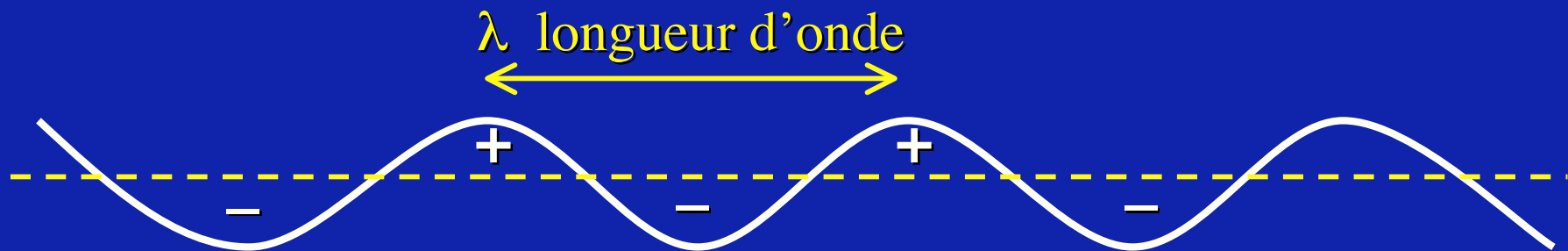
# Avantages



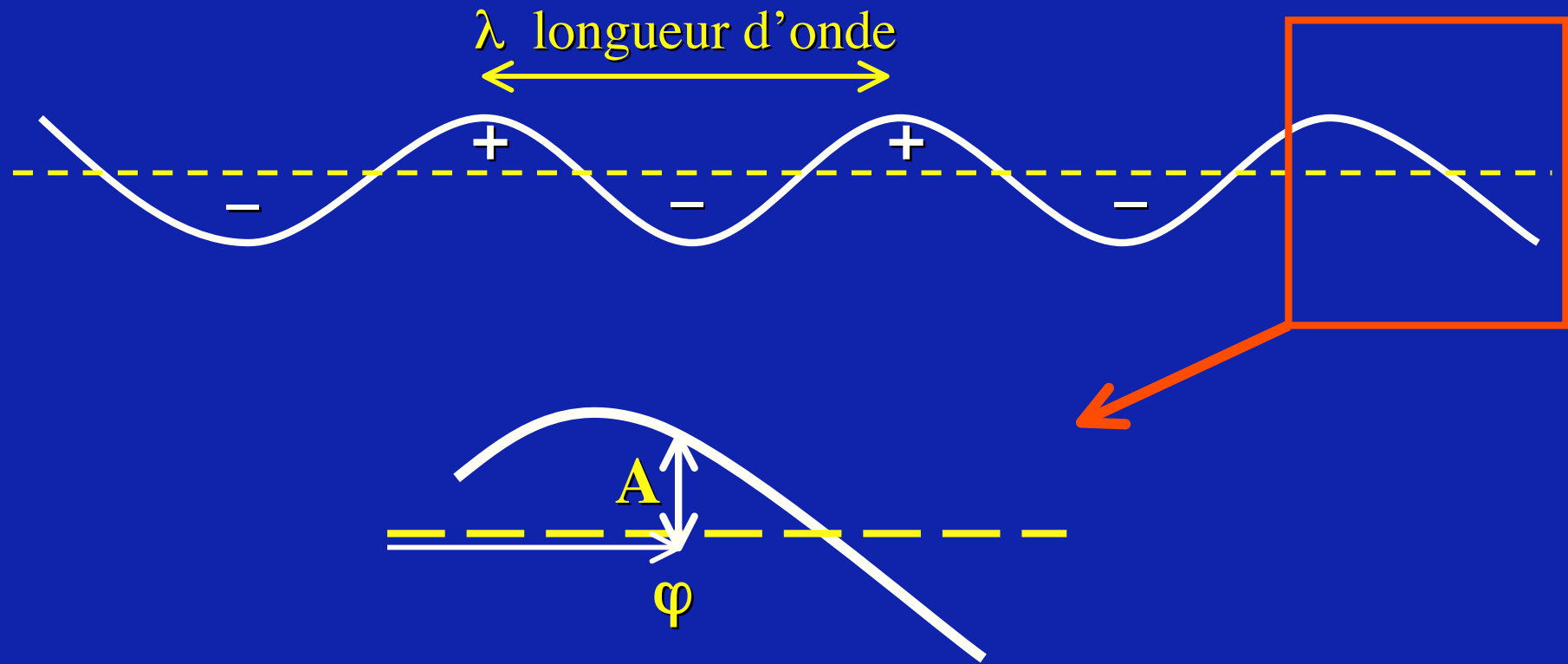
- (1) détermine le champ de déformation sur une surface.
- (2) mesure avec précision ( $\approx$ cm).
- (3) mesure des régions difficiles d'accès.
- (4) assure la même qualité et précision sur tout le globe

# Interférométrie

Une onde (électromagnétique, lumière) est une oscillation avec des noeuds ( $>0$ ) et des nœuds ( $<0$ ).



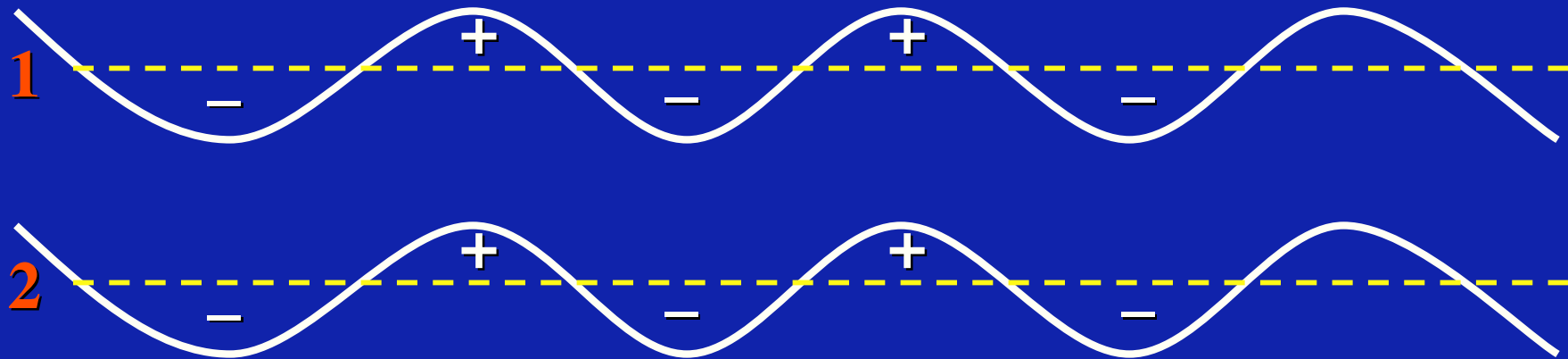
En point et à un temps donné, l'onde se caractérise par deux paramètres : l'amplitude et la phase.



En point et à un temps donné, l'onde se caractérise par deux paramètres : l'amplitude  $A$  et la phase  $\varphi$ .

On superpose (additionne) deux ondes.  
Deux cas limites en fonction des phases des deux ondes.

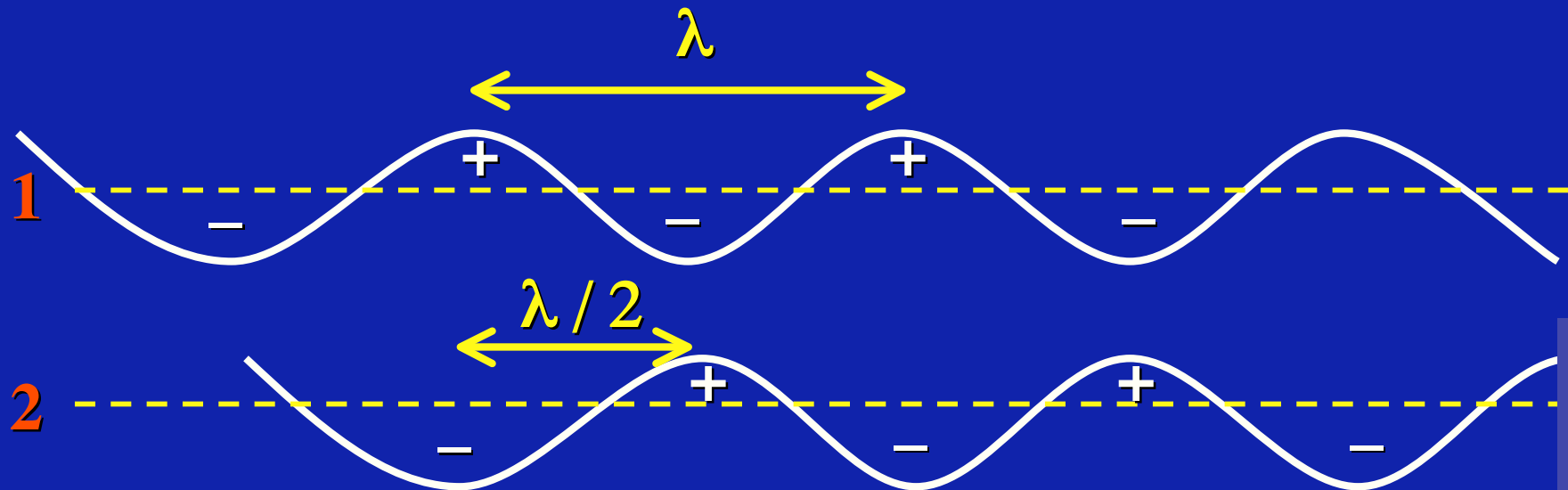
1. Interférence constructive : même phase.



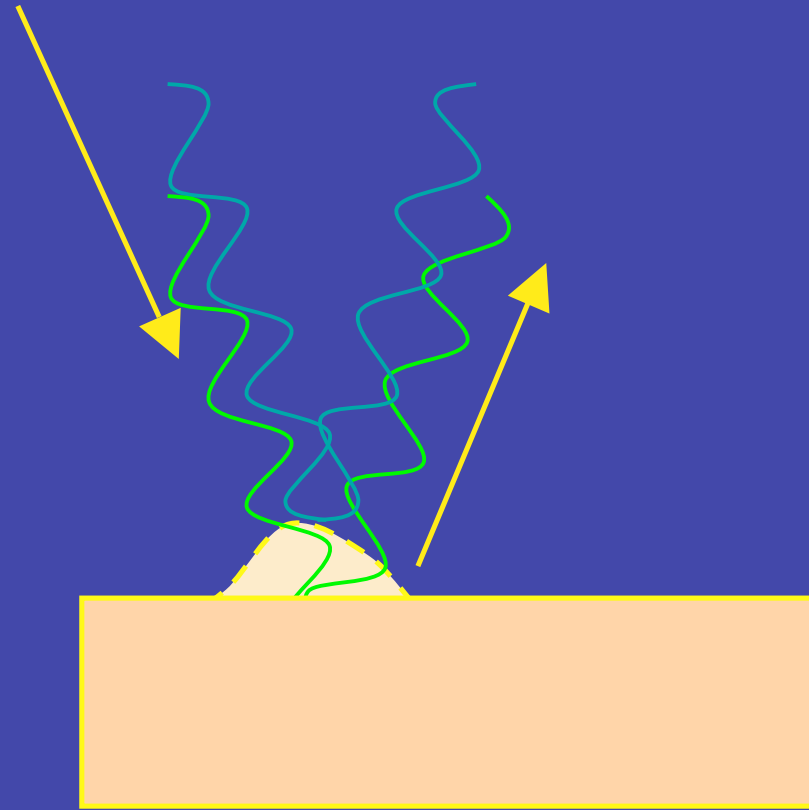
Résultat : renforcement du signal.



**2. Interférence destructive** : phases décalées de  $1/2$  longueur d'onde.

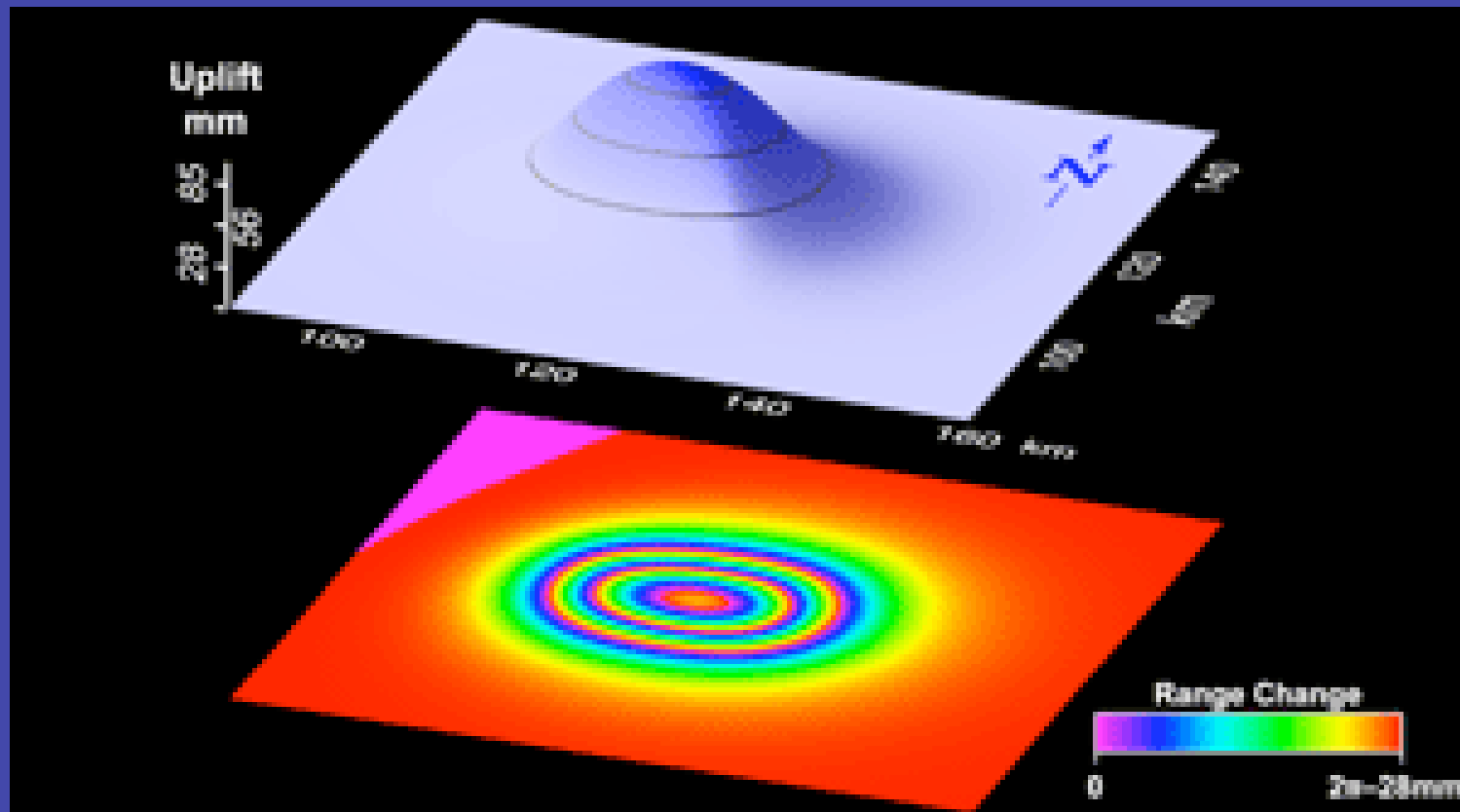


Résultat : extinction du signal.

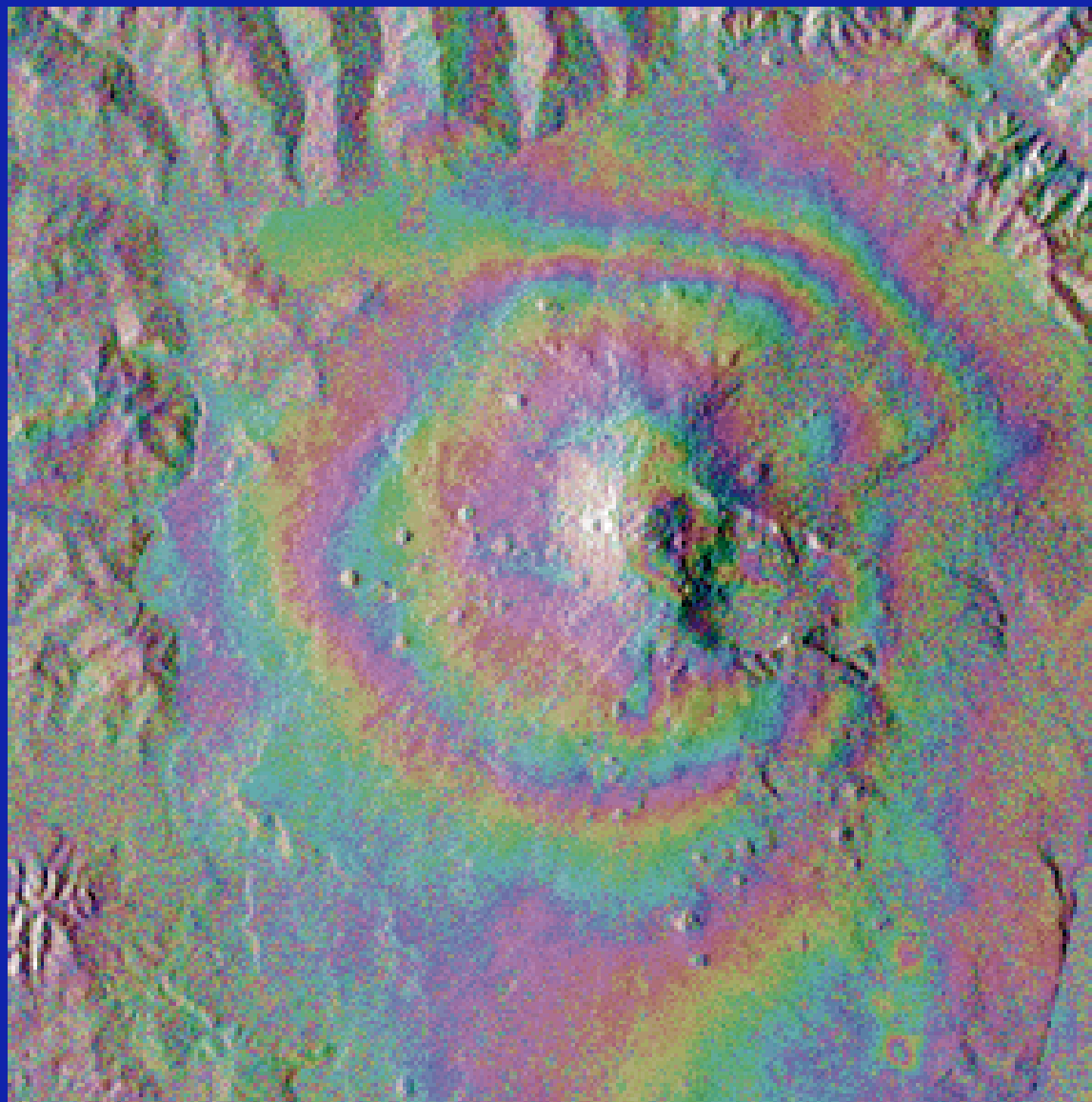


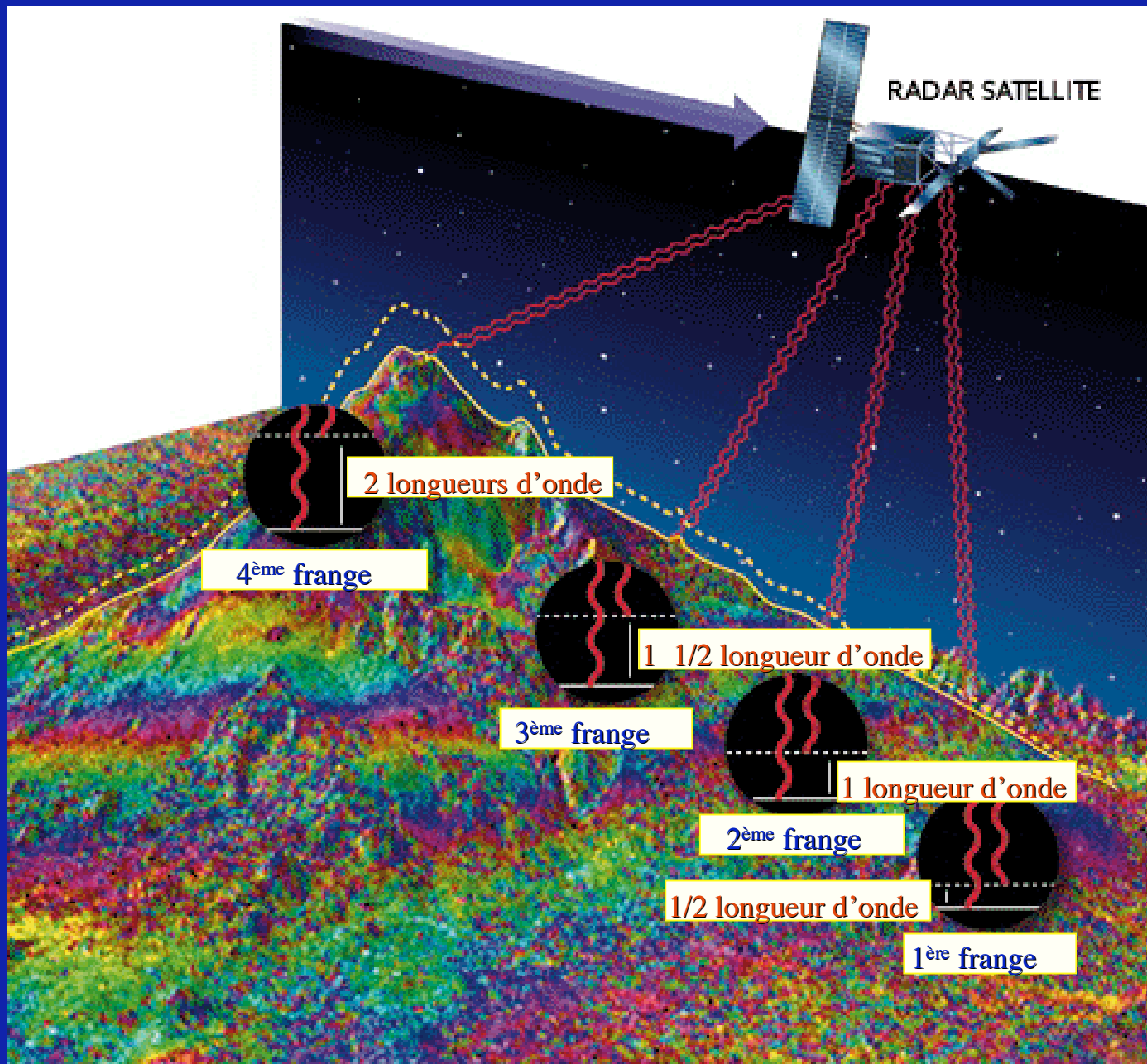
Si, entre deux passages, la forme de la terre a changé,  
la phase des ondes enregistrée dans la nouvelle image change aussi.  
En soustrayant cette image de l'originale,  
on détecte de très petits changements.

10 cm de soulèvement  $\approx 3$  systèmes de franges d'interférence



# Volcan Etna (Sicile)

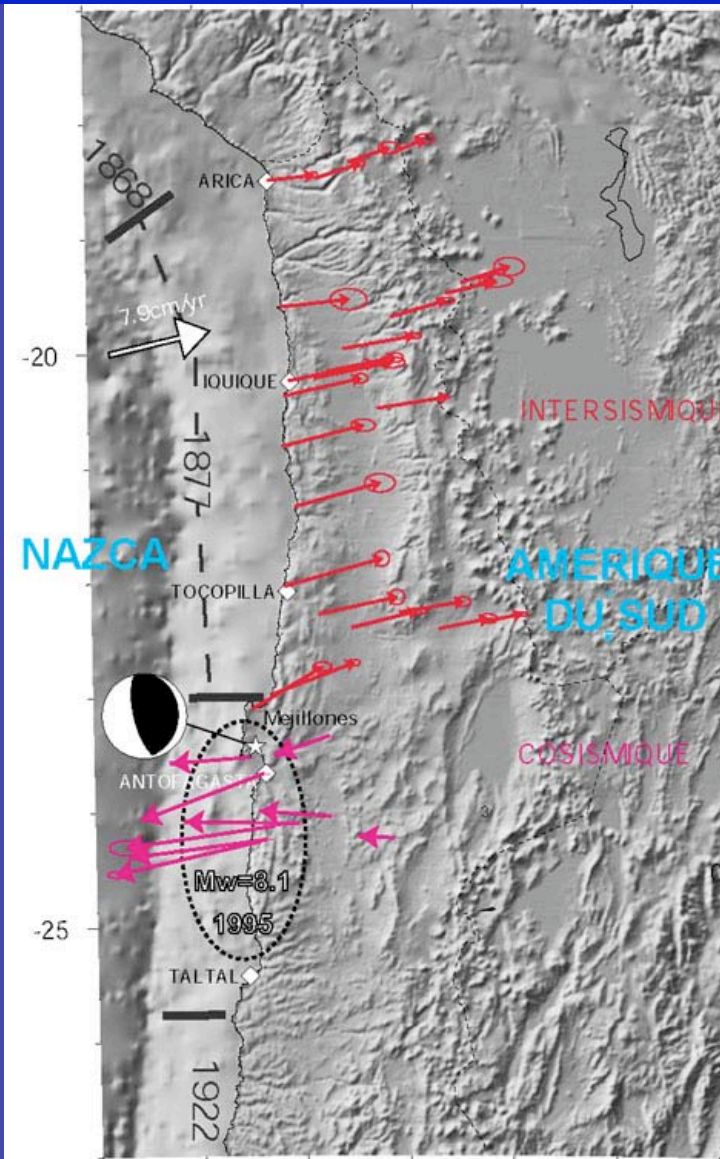




Les franges d'interférence sont séparées de  $1/2$  longueur d'onde ( $\approx 2\text{cm}$ )

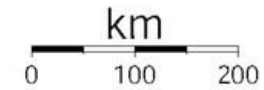
## 2. Echelle locale : le Chili

Séisme  
d'Antofagasta  
(Juillet 1995)



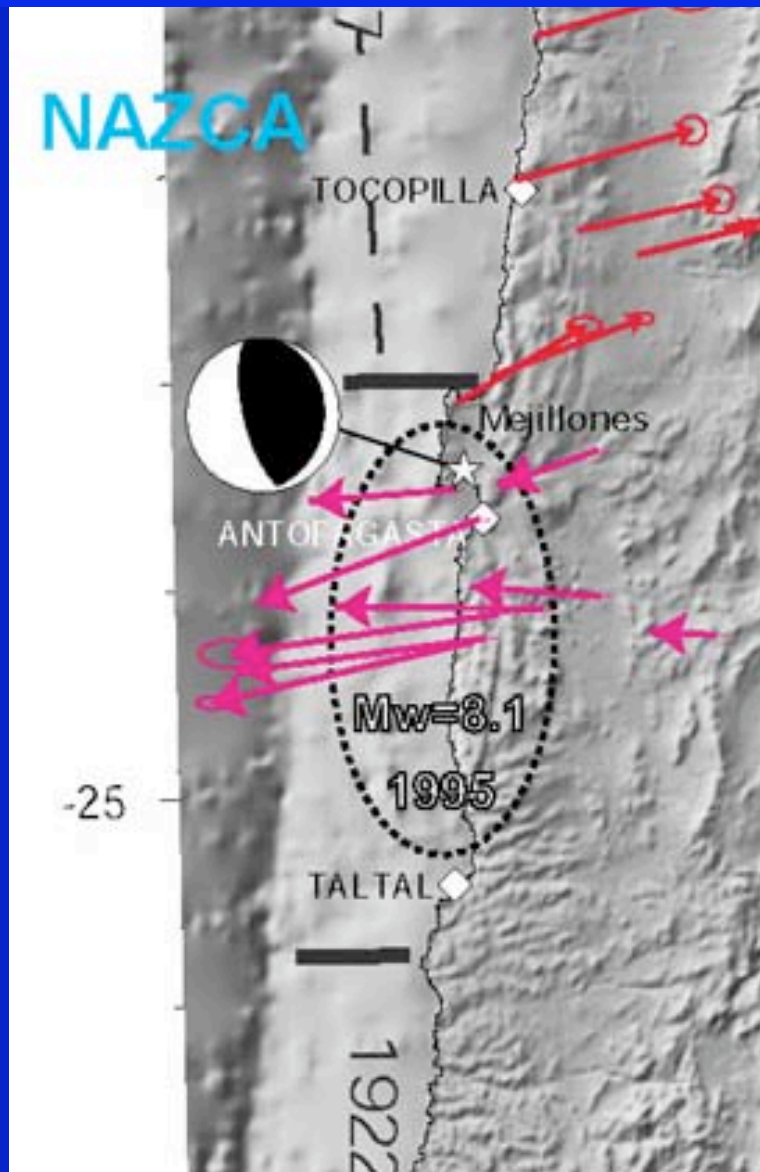
→ 2 cm/an

Déformation

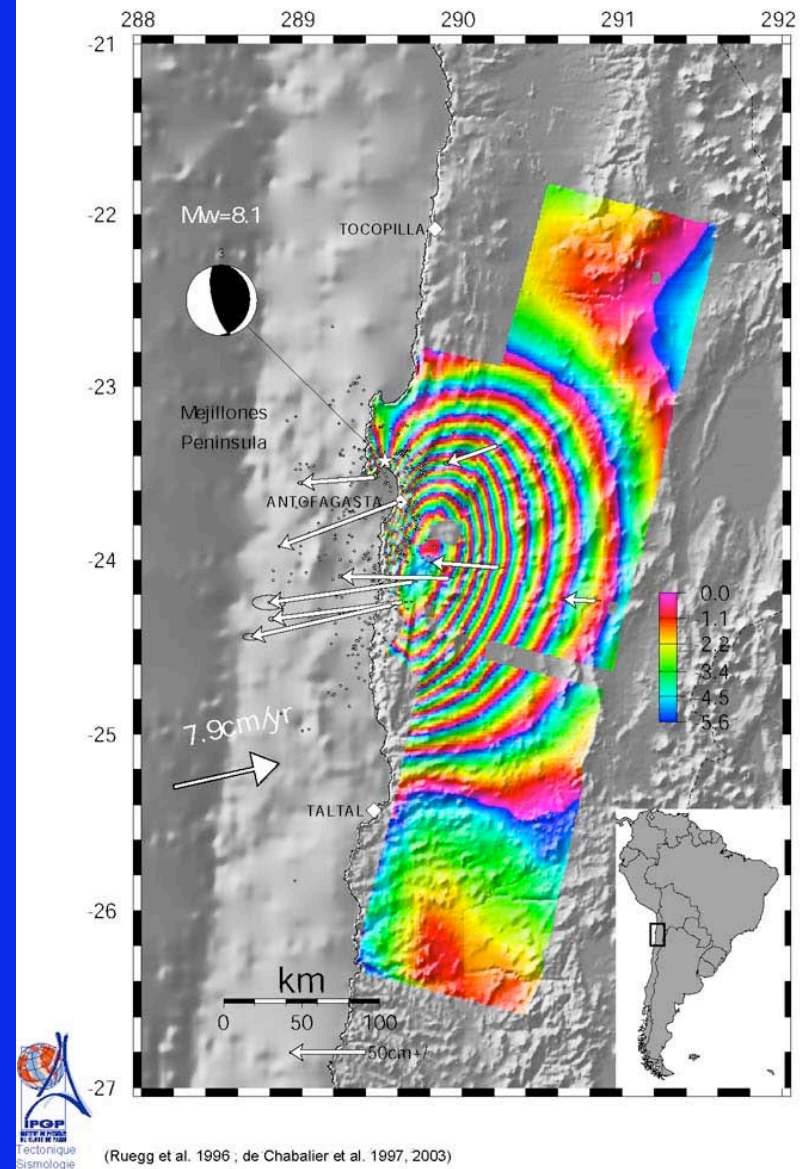


50 cm  
←

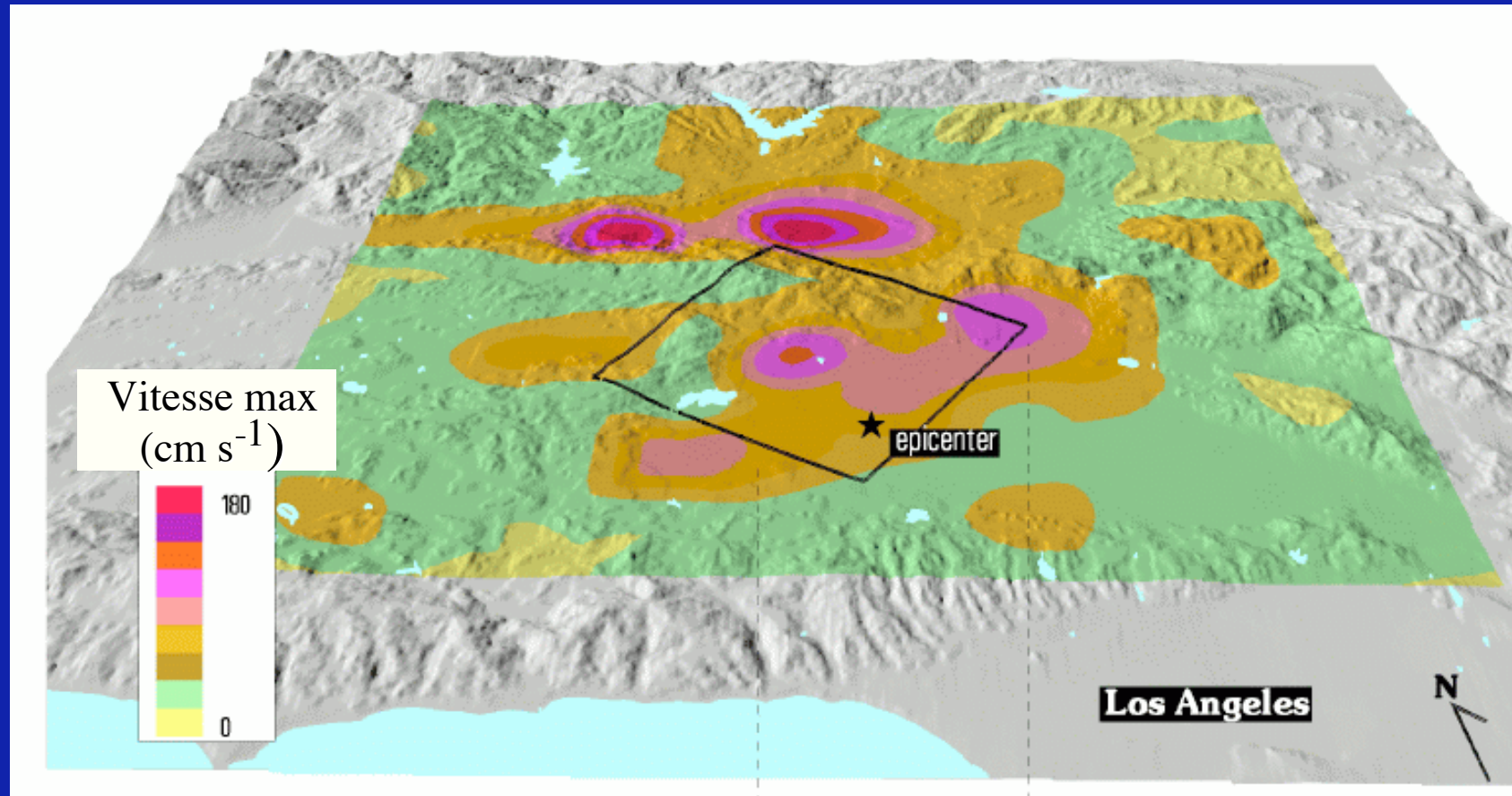
Séisme:  
déplacement



### LE SEISME D'ANTOFAGASTA DU 30 JUILLET 1995



# Tremblement de terre de Northridge (36 km Los Angeles) 17/01/94





# Autoroute I-5 près de Magic Mountain

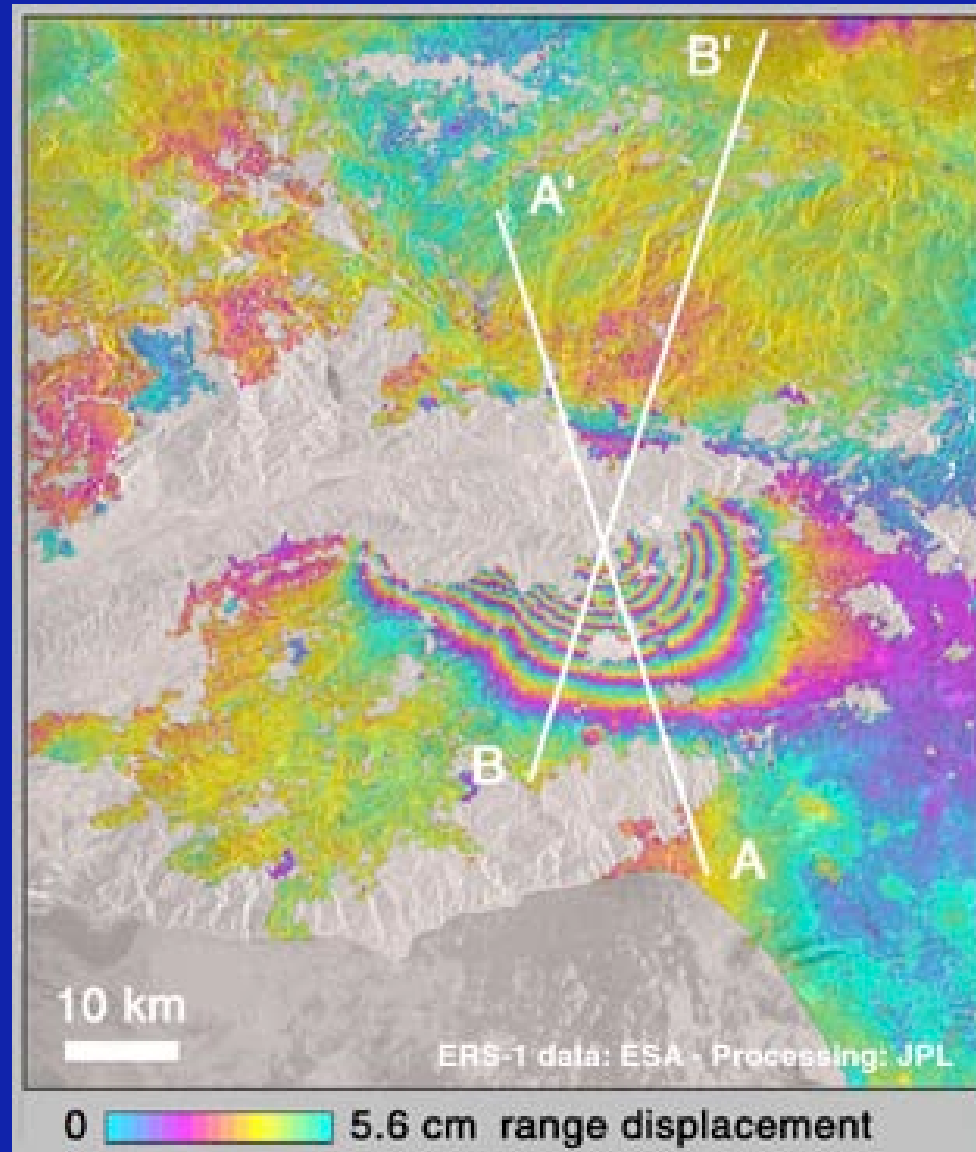


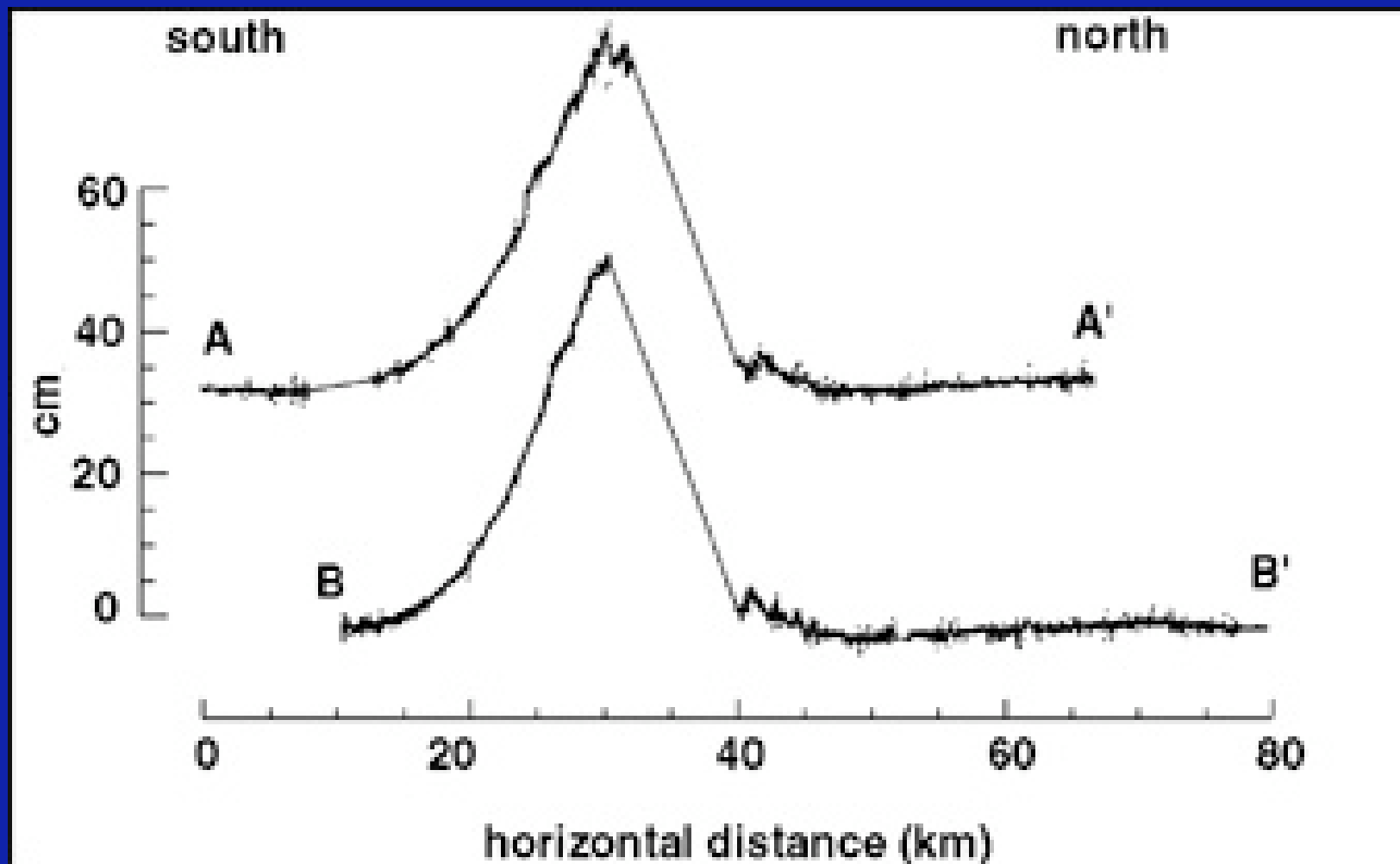
# Northridge



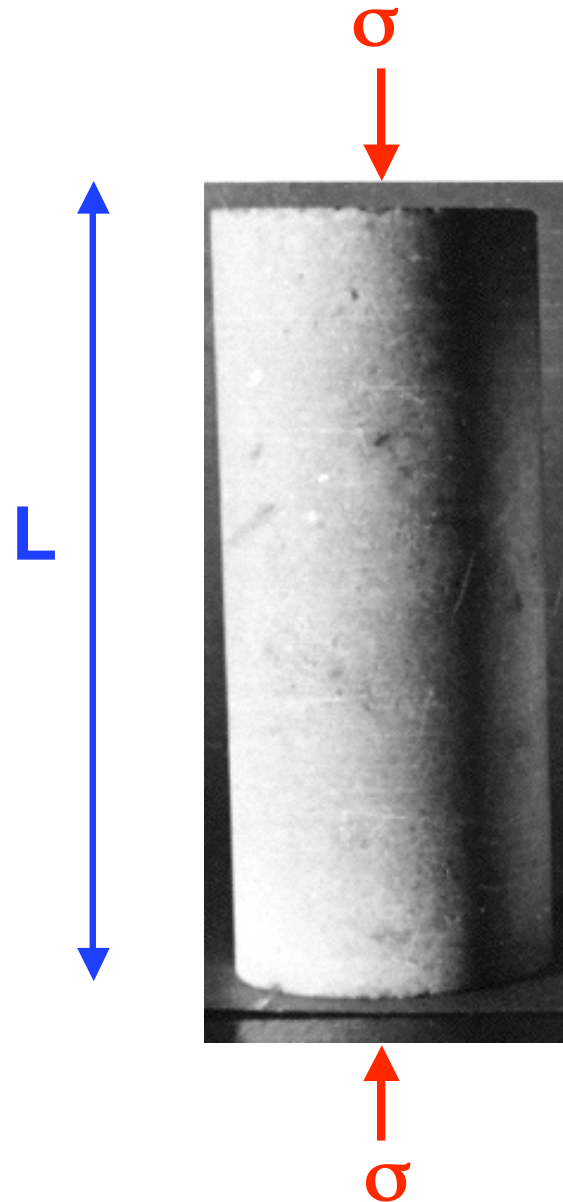
## Maison près de Northridge







# Déformation



$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L}$$

Relation  
entre  $\sigma$  et  $\varepsilon$

## Contraintes ?

$$\varepsilon \approx 1 \text{ m} / 10 \text{ km} \approx 10^{-4}$$

$$\sigma = \lambda \varepsilon$$

$$\lambda \approx 10^{10} \text{ Pa}$$

$$\sigma \approx 10^6 \text{ Pa}$$

(10 bars)

# Tremblement de terre de Landers ( $\approx 50$ km Las Vegas) 28/06/92

