

# Introduction aux méthodes de télédéttection des signaux géophysiques

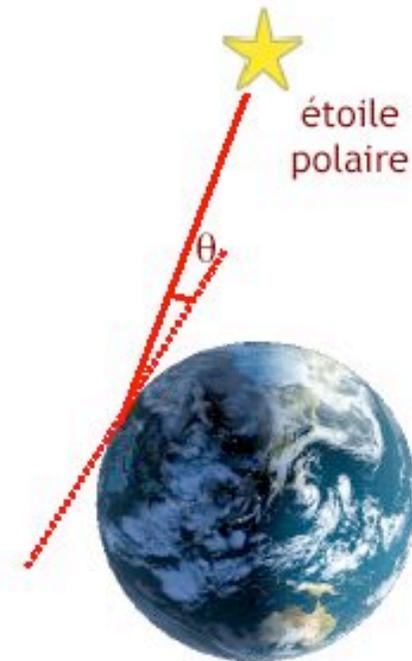
# Quelles signaux

- Position
- Forme de la Terre ( altitude)
- Champs de potentiels
  - Champ magnétique
  - Champ de gravité
- Autres grandeurs
  - Tsunami, Signaux sismiques

## Un peu d'histoire

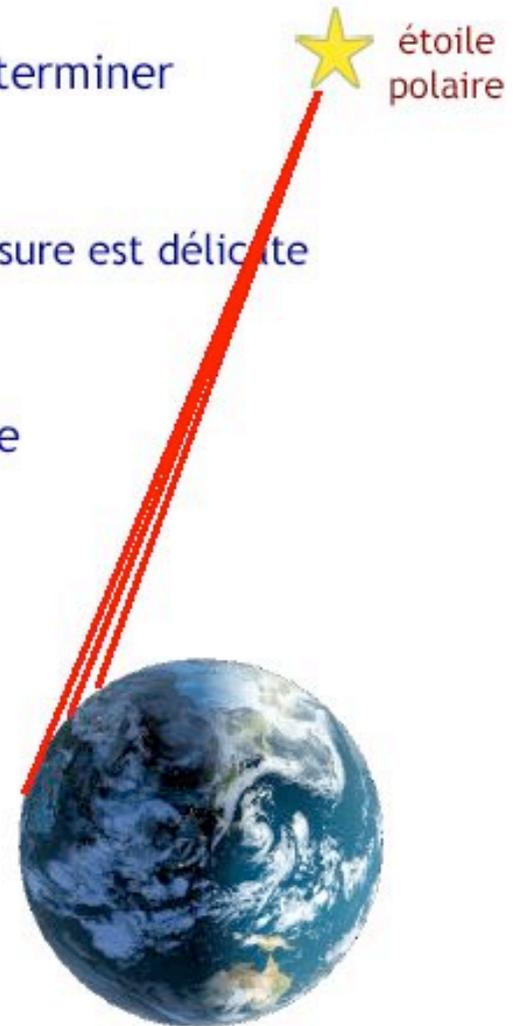
La détermination de la position sur le globe a de tout temps été une préoccupation majeure des navigateurs

- La quantité la plus facile à mesurer est la **latitude**
- Dès le XIII<sup>ème</sup> siècle, les navigateurs se sont servis d'astrolabes pour se situer par rapport à l'étoile polaire



# La latitude

- Mais la latitude n'est pas toujours facile à déterminer
  - l'étoile polaire n'est visible que dans l'hémisphère nord (croix du sud)
  - plus on se rapproche de l'équateur, plus la mesure est délicate
  - il faut le faire de nuit, avec un ciel dégagé...
- Le principe de mesure de la latitude n'a guère évolué depuis



# La longitude

La **longitude** est une quantité plus difficile à estimer

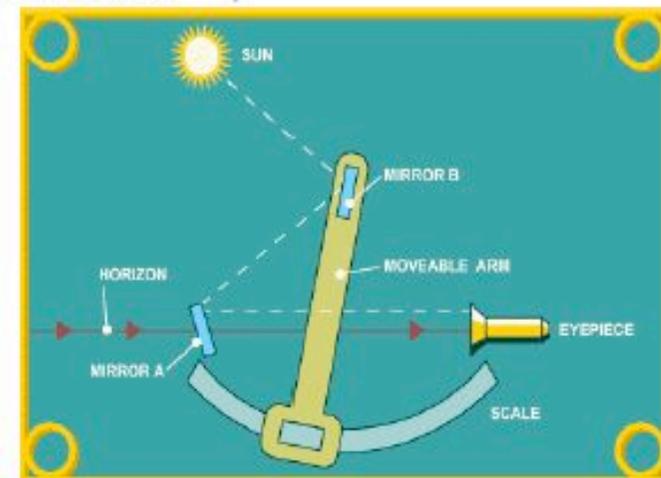
- Au début, on pensa pouvoir la déduire du champ magnétique (XIV<sup>ème</sup>)
- On réalisa ensuite qu'elle pouvait s'obtenir à partir de la hauteur du Soleil (d'astres) sur l'horizon, à condition de connaître l'heure locale exacte
  - développement d'horloges précises (dès le XVII<sup>ème</sup>)
  - développement du sextant



chronomètre  
du XVII<sup>ème</sup> siècle



sextants

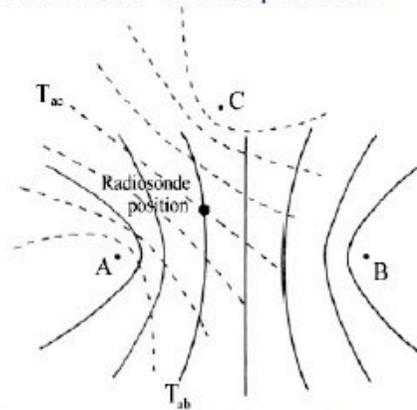


# Principe de positionnement radio

- 3 inconnues (position)
- Chaque noeud transmet sa position et un bip synchronisé pour tous les noeud
- Réception simultanée des 3 signaux:
  - mesure du temps de retard entre bip
- Résolution du système d'inconnue permettant d'expliquer ces temps de retard.
- Difficulté:  $1\text{m} = 3.3\text{ ns}$ 
  - Vitesse de propagation de la lumière
  - Synchronisation des nœuds difficile ( 400 m d'erreur)

## Le système LORAN

Le système LORAN, initialement développé par les USA vers 1950, est constitué d'un réseau de 24 émetteurs radio synchronisés qui émettent des impulsions



# Le système GPS : fonctionnement et applications

Le système **NAVSTAR (NAVigation System by Timing And Ranging) - GPS (Global Positioning System)** est un système de positionnement par satellite qui a été développé et est contrôlé par le département de la défense américain.

Conçu à l'origine pour fournir aux forces armées américaines un système de repérage en tout point du globe avec une très haute précision, le système GPS a depuis lors, trouvé des applications dans le domaine civil.

Le système GPS répond aux questions suivantes :

Quelle est l'heure, quelle est la position, quelle est la vitesse ?

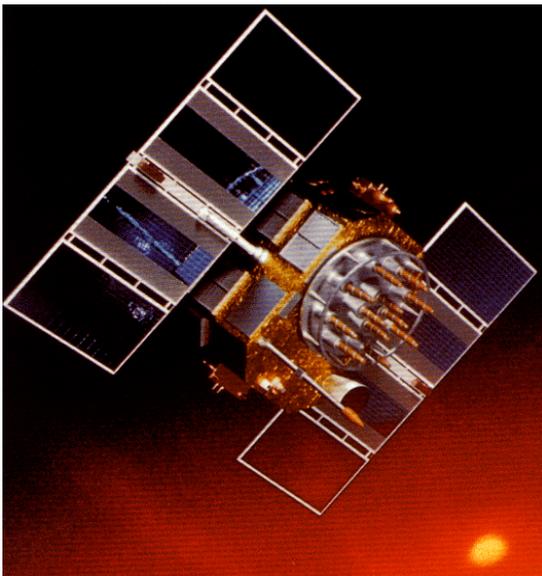
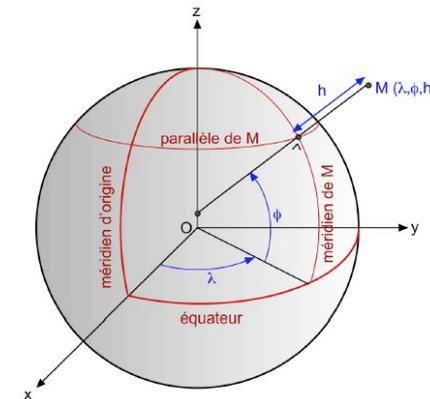
## Coordonnées géographiques

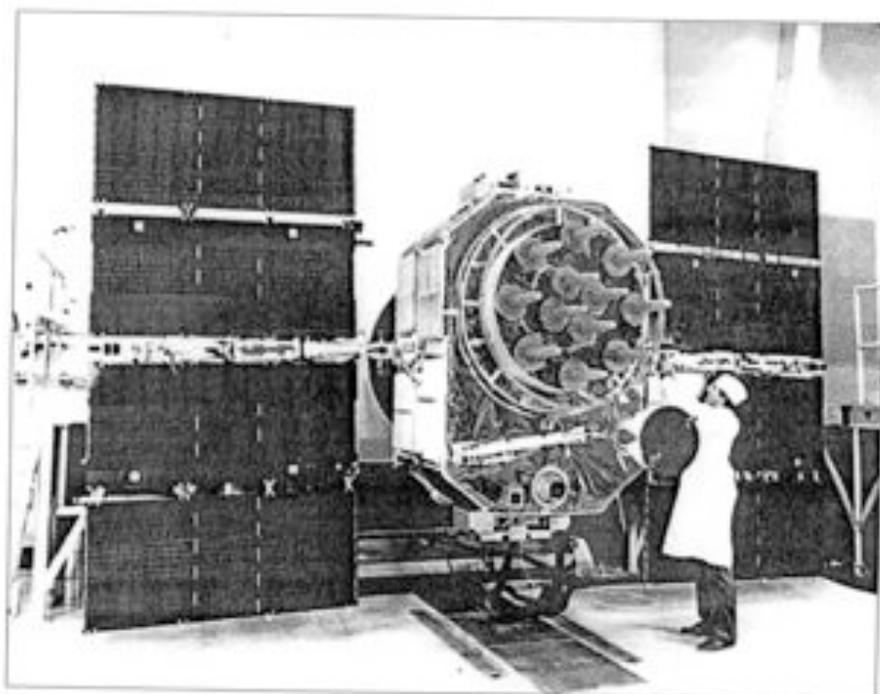
Les coordonnées géographiques d'un point M de la surface de la Terre sont

- La **longitude**  $\lambda$  : angle orienté entre le plan méridien origine et le plan méridien contenant le point M.

Le méridien origine international est celui de Greenwich.

- La **latitude**  $\phi$  : angle orienté entre le plan de l'équateur et la normale à l'ellipsoïde passant par le point M.
- La **hauteur**  $h$  : distance algébrique entre le point M et l'ellipsoïde.

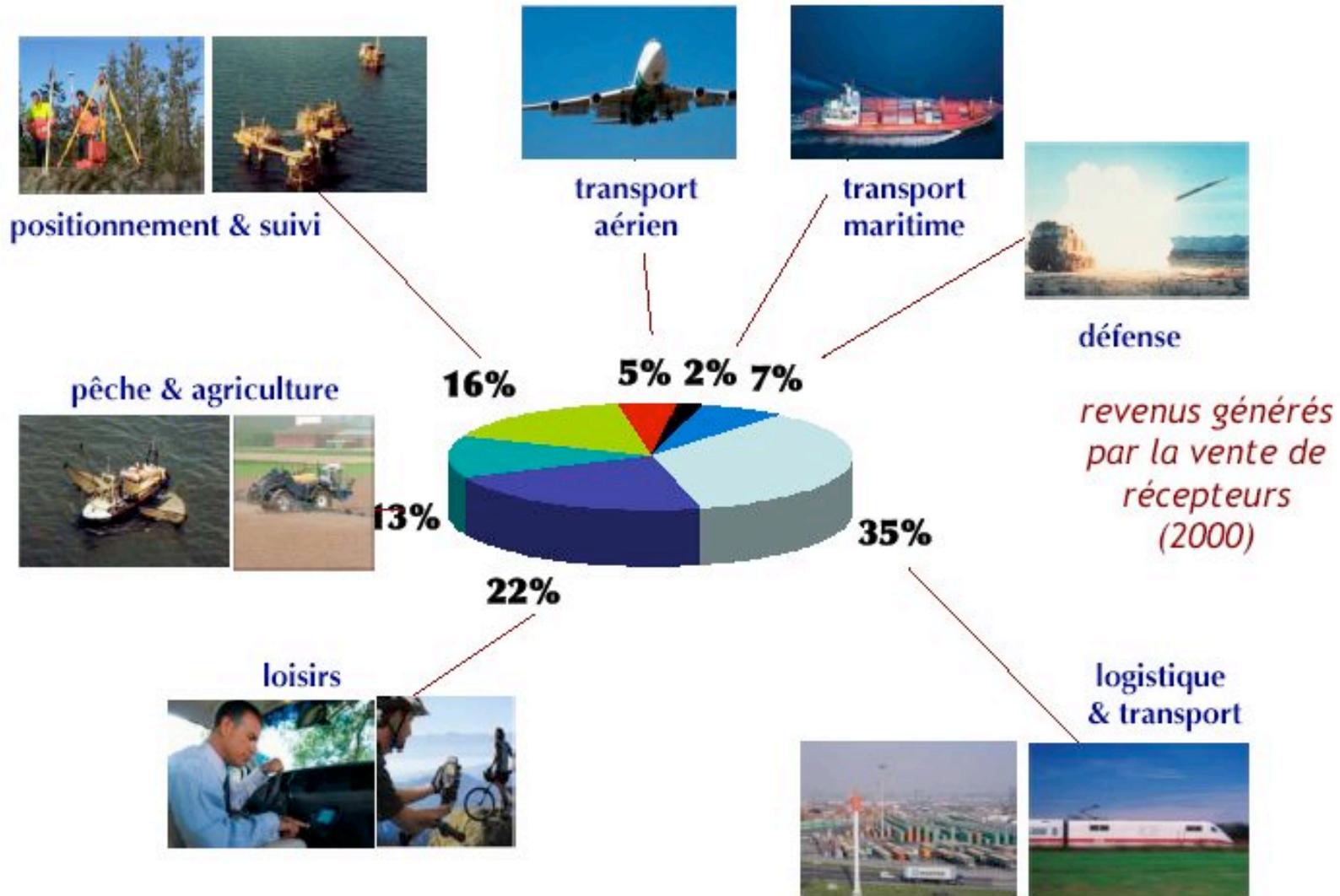




Satellite du « Block 2 »

Fig 3 Photographie d'un satellite GPS. La présence d'une personne à proximité permet de juger de la taille du satellite qui est relativement grande comme le sont ceux de la constellation russe Glonass (voir figure 5) et comme le seront ceux de Galileo. ( par courtoisie du SHOM)

# Positionnement : les utilisateurs



# Exemple : navigation maritime

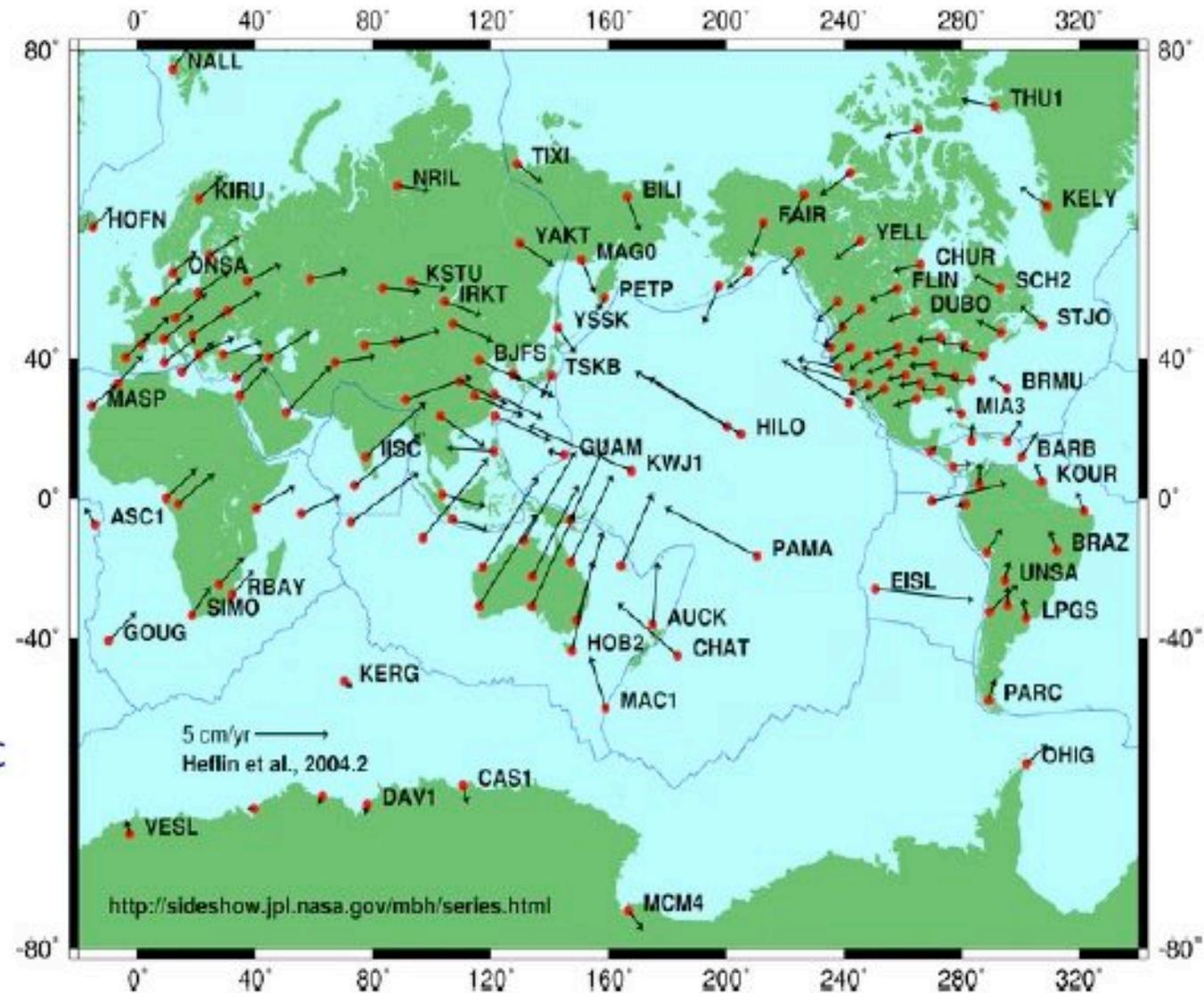


exemples d'écrans

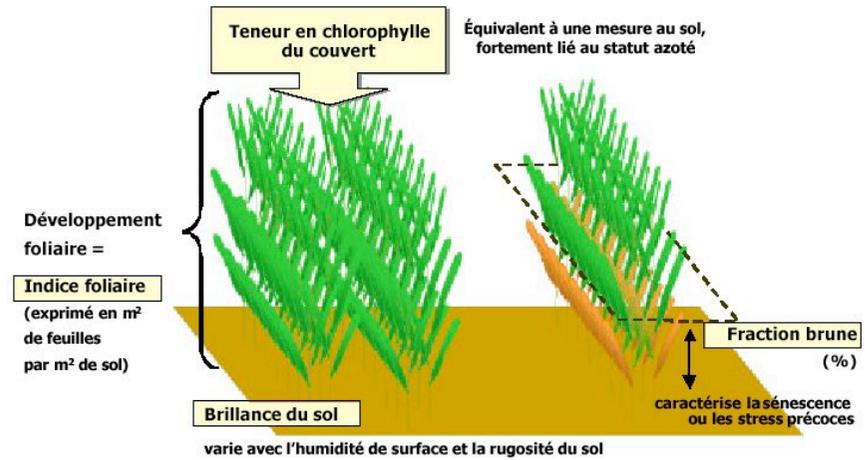
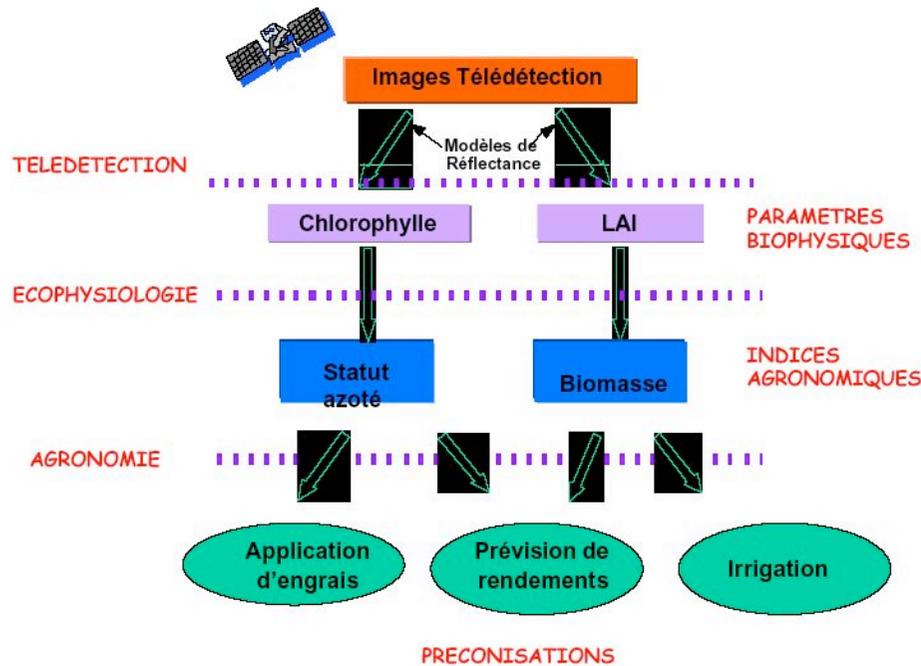
0.2 <sup>m</sup>	Turn right on Shelter Island Dr	00:23 03:57 <sup>m</sup>
0.5 <sup>m</sup>	Take roundabout to 2nd exit	01:17 03:58 <sup>m</sup>
0.6 <sup>m</sup>	Take 2nd exit to Shelter Island Dr(N)	01:28 03:58 <sup>m</sup>
0.7 <sup>m</sup>	Arrive at Shelter Island s Bali Ha' on right	01:40 03:58 <sup>m</sup>



# Exemple : tectonique des plaques

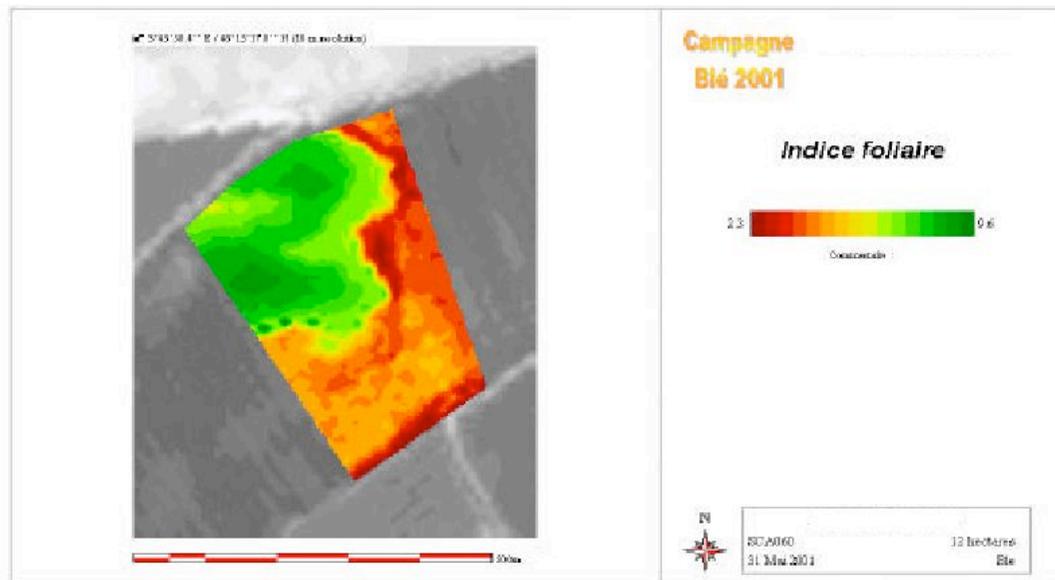


le GPS permet  
de mesurer avec  
précision la  
dérive des  
plaques

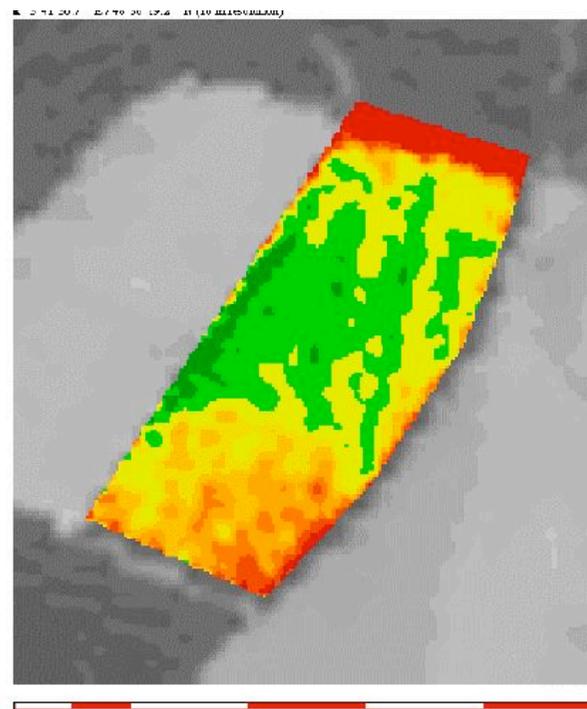


- Agriculture raisonnée

- Détermination du stress des cultures par télédétection
- Cartographie des zones à traiter ( engrais, irrigation)
- Pilotage par GPS des instruments d'épandage



20477-SCA060-076 Au 10e 75020102100\_0\_0-ARJON-077-20020 - (4-0) - 10-0-0-0  
obtenus ouverts par ITCF



**Campagne  
Blé 2001**

**Preconisation azote  
3eme apport**

Couleur	Dose	%	Cumul %
	00	34,2 %	34,2 %
	300	25,1 %	59,3 %
	400	8,6 %	68,0 %
	500	8,9 %	76,9 %
	600	8,0 %	84,9 %
	700	15,1 %	100,0 %

Commentaire :

Sur la base du statut azoté, cette carte fournit les doses d'azote nécessaires pour satisfaire aux besoins du blé jusqu'à maturité.



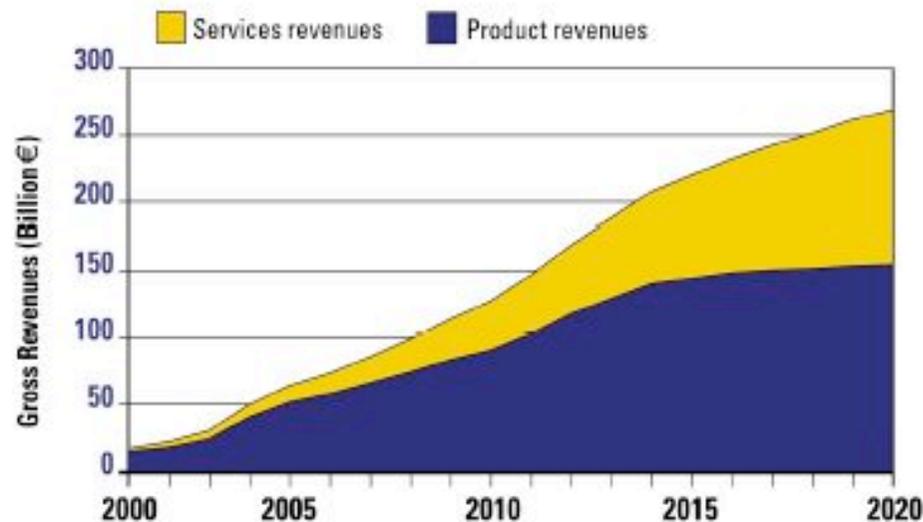
N  
Stade : 2 noeuds + 6 jour(s)  
SCA003 7,85 hectares  
22 Avr 2001 Blé / Isengrain

# Positionnement : le marché

Le marché européen de navigation par satellite possède un fort potentiel

- **produits** : revenus liés à la vente d'infrastructures (récepteurs, systèmes de navigation, composants, ...)
- **services** : revenus liés à la vente de produits dérivés & services (cartes, gestion de trafic, téléphonie mobile, ...)

*Global annual satellite navigation product and services turnovers*



le GPS répond à un besoin,  
mais a aussi crée des besoins  
nouveaux

# Positionnement par satellites

Il existe actuellement trois services mondiaux de positionnement par satellite

## GPS

- dispositif militaire américain
- opérationnel depuis 1980
- graduellement amélioré

## GLONASS

- dispositif militaire russe
- n'est plus entretenu

## GALILEO

- dispositif civil européen
- mise en service prévue en 2007
- coût : 3 G€

# Principe de GPS

- 4 inconnues (temps et position)
- Chaque satellite transmet
  - Sa position, son temps local
- Réception simultanée des 4 signaux avec le temps de retard entre satellites et station
- Résolution du système d'inconnue permettant d'expliquer ces temps de retard.
- Difficulté:  $1\text{m} = 3.3\text{ ns}$ 
  - Vitesse de propagation de la lumière
  - Horloges atomiques de grande stabilité dans les satellites

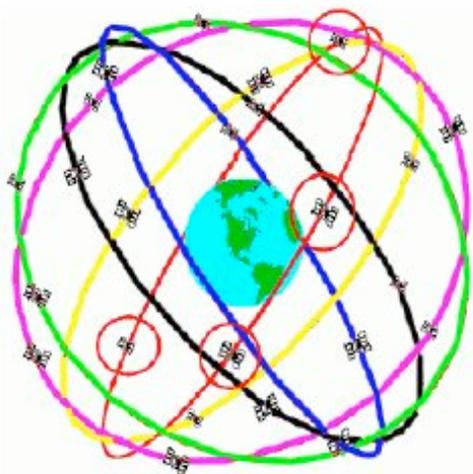
## LES TROIS SEGMENTS DU SYSTEME GPS

**Le segment spatial** comporte plus de 25 satellites répartis de façon à assurer depuis la Terre une visibilité simultanée de 4 à 8 satellites. Les satellites sont répartis selon 6 plans orbitaux, ayant tous une inclinaison d'environ  $55^\circ$  par rapport à l'équateur. Les satellites sont sur des orbites quasi-circulaires, à une altitude d'environ 20184 km et leur période est de douze heures.

Chaque satellite est muni d'un émetteur-récepteur, d'une horloge atomique, d'un ordinateur et d'équipements auxiliaires destinés au fonctionnement du système. L'énergie pour l'équipement est fournie par 7 m<sup>2</sup> de capteurs solaires tandis qu'un système de fusées d'appoint permet de réajuster la position du satellite sur son orbite et de contrôler sa stabilité.

**Le segment de contrôle** est constitué de plusieurs stations au sol qui vérifient en permanence le bon fonctionnement des satellites.

**Le segment utilisateur** est constitué de récepteurs qui permettent de convertir les données provenant des satellites en informations sur la position, la vitesse et la date.



## 1st Generation: Test GPS Satellites (**BLOCK I**) 1978-85

- The first GPS -----> February 22, 1978

## 2nd Generation: Operating GPS Sat. (**BLOCK II, IIA**) 1989-94

- The first GPS -----> February 14, 1989

## 3rd Generation: Improved GPS Sat. (**BLOCK IIR**) 1990s-

- 24 satellites

	<b>GPS Type</b>	<b>Number</b>	<b>Year</b>	<b>Characters</b>
1 <sup>st</sup> Gen	BLOCK I	11	1978-85	Test
2 <sup>nd</sup> Gen	BLOCK II, IIA	28	1989-94	Operating
3 <sup>rd</sup> Gen	BLOCK IIR	20	1990s-	Advanced

# Qu'est-ce que le GPS ?

Chaque satellite GPS possède une horloge atomique et émet sur deux fréquences (1575.42 MHz et 1227.60 MHz)

Trois types de signaux sont émis

- 1) l'almanach du système : état du satellite, identification, position, ...

```
***** Week 267 almanac for PRN-01 *****
ID:                                01
Health:                             000
Eccentricity:                       0.5360126495E-002
Time of Applicability(s):          61440.0000
Orbital Inclination(rad):          0.9810490239
Rate of Right Ascen(r/s):         -0.7577458489E-008
SQRT(A) (m 1/2):                   5152.597656
Right Ascen at Week(rad):          0.6406025110E+000
Argument of Perigee(rad):         -1.689387348
Mean Anom(rad):                    -0.2325692391E+001
Af0(s):                             0.3662109375E-003
Af1(s/s):                           0.3637978807E-011
week:                               267
```

- 2) le code C/A
- 3) le code P

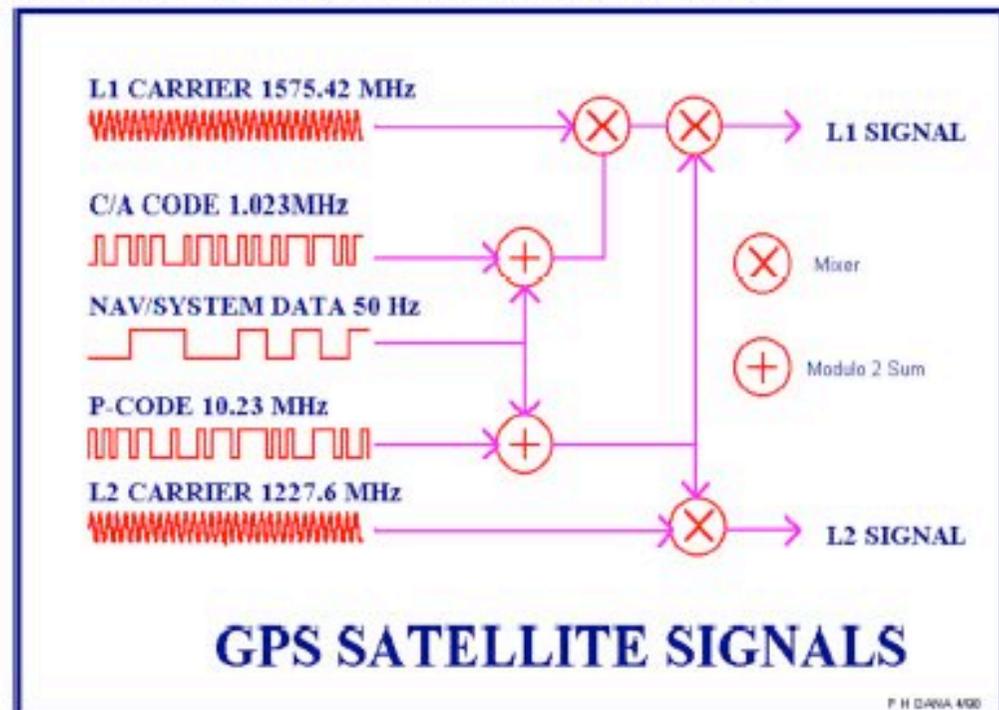
EXO

Trouver la durée de visibilité d'un satellite GPS?

# Qu'est-ce que le GPS ?

Trois types de signaux sont émis

- 1) l'almanach du système
- 2) le **code C/A** (coarse acquisition), émis chaque seconde : il permet aux utilisateurs civils de calculer la position. Le gouvernement américain peut à tout moment le modifier pour dégrader la précision des mesures.
- 3) le **code P** (precise acquisition), crypté et émis 10 fois par seconde : il permet aux utilisateur militaires de calculer la position avec davantage de précision.



# Détail du codage 1/2

- $f_0 = 10.23$  Mhz (signal horloge atomique)
- $f_1 = 154 f_0 = 1575.42$  Mhz
- $f_2 = 120 f_0 = 1227.60$  Mhz
- P-code ( $f_0$ ) , C/A-code ( $f_0 /10$ ), W-code ( $f_0 /20$ ), D-code (50 Hz)

$$L_1(t) = a_1 P(t) W(t) D(t) \cos(f_1 t) + a_1 CA(t) D(t) \sin(f_1 t)$$

$$L_2(t) = a_1 P(t) W(t) D(t) \cos(f_2 t)$$

Remarque sur  
l'effet Doppler:

Il faut en tenir compte pour corriger la fréquence des ondes émises par les satellites. Ordre de grandeur :

$$v_{sat} = 3800 \text{ m/s} \Rightarrow \frac{f_{obs}}{f_{source}} = \sqrt{\frac{c - v_{sat}}{c + v_{sat}}} = 0.999987$$

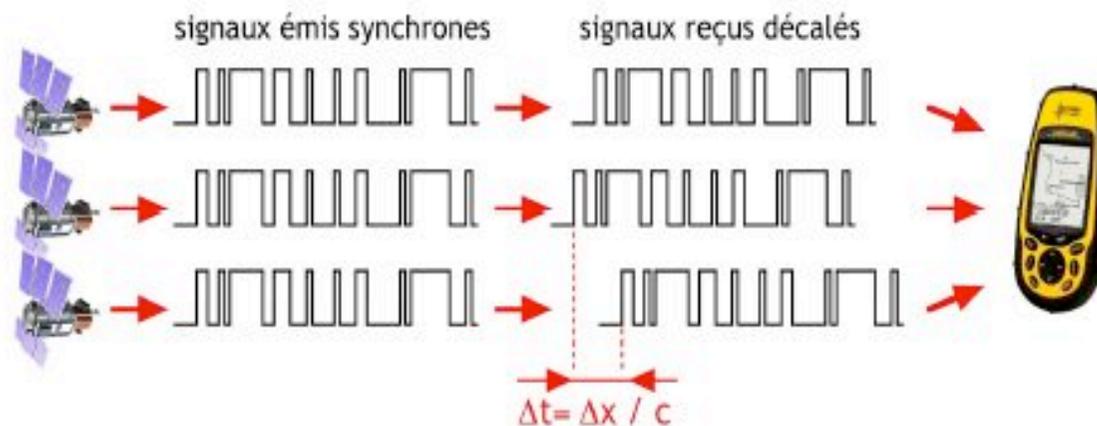
## La Terre, vue par le satellite GPS BIIA-28 (PRN 08), lancé en 1997

- latitude  $47^{\circ} 18'$
- longitude  $17^{\circ} 11'$
- altitude 20126 km
- inclinaison  $55.34^{\circ}$
- excentricité 0.01
- révolutions/jour 2.01
- heure 2004-09-06 10:22:59
- vitesse orbitale 3862 m/s



# Déterminer la position

Le principe consiste à mesurer le temps de propagation d'un signal entre le satellite et le récepteur.



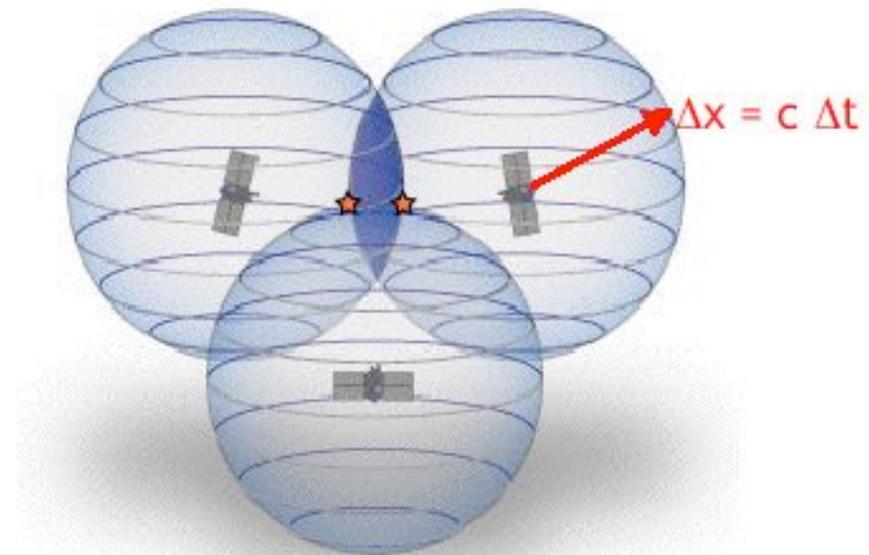
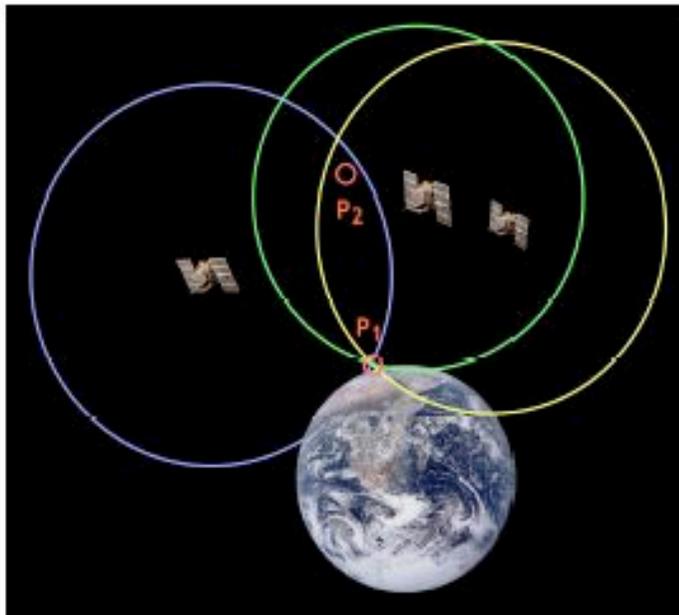
Comme les signaux se propagent à la vitesse de la lumière, on a

$$\text{distance} = \text{durée} \times 2.9979 \cdot 10^8 \text{ m/s}$$

1 $\mu$ s de retard = 300 m de distance → il faut une précision de 1 ns pour atteindre une résolution de l'ordre du mètre

# Déterminer la position

Le récepteur détermine le retard par rapport aux satellites dont il reçoit un signal → il se trouve à l'intersection de sphères centrées sur les satellites



Avec trois satellites, il n'y a que deux positions possibles. L'une d'elle peut être exclue d'emblée

La position de chaque satellite étant connue au cm près (éphémérides), la position absolue du récepteur est en principe connue

# Déterminer la position

Le récepteur ne connaît pas l'heure exacte et ne connaît donc que l'écart relatif par rapport aux 3 satellites

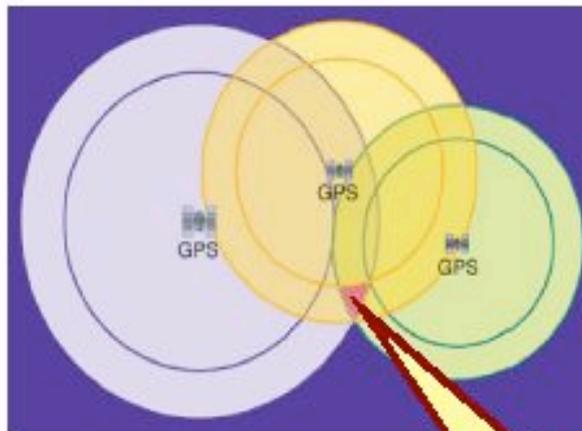
→ il faut un 4<sup>e</sup> satellite pour connaître la position exacte :

4 équations pour 4 inconnues :  $x_0, y_0, z_0, t_0$  (+ plusieurs corrections)

$$\begin{cases} (x_1 - x_0)^2 + (y_1 - y_0)^2 + (z_1 - z_0)^2 = c^2 (t_1 - t_0)^2 \\ (x_2 - x_0)^2 + (y_2 - y_0)^2 + (z_2 - z_0)^2 = c^2 (t_2 - t_0)^2 \\ (x_3 - x_0)^2 + (y_3 - y_0)^2 + (z_3 - z_0)^2 = c^2 (t_3 - t_0)^2 \\ (x_4 - x_0)^2 + (y_4 - y_0)^2 + (z_4 - z_0)^2 = c^2 (t_4 - t_0)^2 \end{cases}$$

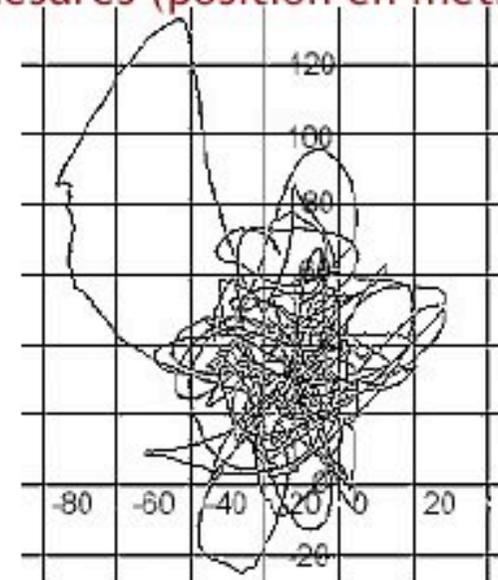
# Quelle précision ?

- De nombreux facteurs peuvent affecter la précision de la position. Cette dernière fluctue au cours du temps.
- Pour un récepteur à usage civil, et dans de bonnes conditions, l'erreur est de l'ordre de 5 m en position horizontale, et 10 m en vertical



lieu géométrique  
du récepteur

Dérive de la position au cours de 5h  
de mesures (position en mètres)



## Il faut des horloges de très haute qualité

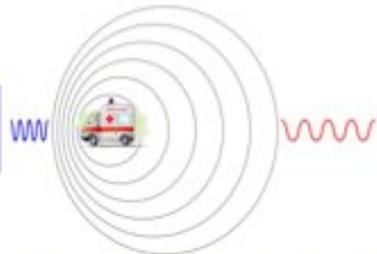
- Une erreur de 1 ns sur la mesure du temps de vol représente une erreur de 30 cm en A/R ou de 15 cm en distance
- Une erreur de 1 ps sur la mesure du temps de vol ( environ 0,1 s) représente une erreur de 1,5 mm en distance, soit une erreur relative de  $10^{-11}$  sur les temps.

# De nombreux effets relativistes

## Effet Doppler

**Effet Doppler-Fizeau :** la fréquence d'une onde n'est pas la même suivant que l'émetteur s'approche ou s'éloigne de l'observateur

la source s'approche :  
la fréquence  $f$  semble  
plus élevée



la source s'éloigne :  
la fréquence  $f$   
semble plus basse

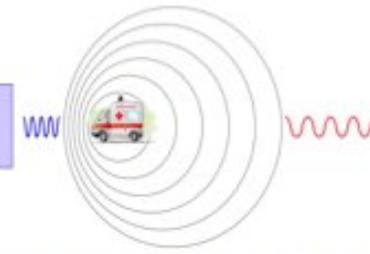
Si  $v$  est la vitesse de la source par rapport à l'observateur ( $v > 0$  si la source s'éloigne) et  $c$  la vitesse de l'onde ( $c = 330$  m/s pour le son), alors

$$\frac{f_{obs}}{f_{source}} = \sqrt{\frac{c_0 - v}{c_0 + v}}$$

## Effet Doppler

**Effet Doppler-Fizeau :** la fréquence d'une onde n'est pas la même suivant que l'émetteur s'approche ou s'éloigne de l'observateur

la source s'approche :  
la fréquence  $f$  semble  
plus élevée



la source s'éloigne :  
la fréquence  $f$   
semble plus basse

Si  $v$  est la vitesse de la source par rapport à l'observateur ( $v > 0$  si la source s'éloigne) et  $c$  la vitesse de l'onde ( $c = 330$  m/s pour le son), alors

$$\frac{f_{obs}}{f_{source}} = \sqrt{\frac{c_0 - v}{c_0 + v}}$$

## EXO

L'effet Doppler explique l'écart observé entre la fréquence  $f_s$  d'une onde émise par une source qui se déplace par rapport à un observateur immobile, et la fréquence  $f_o$  que perçoit ce dernier. Si  $v$  est la vitesse de l'émetteur par rapport à celle du récepteur ( $v > 0$  si l'émetteur s'éloigne) alors

$$\frac{f_o}{f_s} = \sqrt{\frac{c_0 - v}{c_0 + v}}$$

Dans quel cas (pour quelle position du satellite) cet l'écart  $\Delta f = f_o - f_s$  est-il maximal ?

Application numérique : Déterminez l'écart maximal  $\Delta f$  pour un récepteur immobile qui reçoit le signal d'un satellite GPS dont l'émetteur fonctionne à la fréquence  $f = 1575.42$  MHz. La vitesse orbitale du satellite est  $v = 3800$  m/s.

## EXO

Un photon qui se déplace d'un satellite GPS en direction de la Terre voit son énergie augmenter, car il réagit faiblement au potentiel gravifique terrestre. Comme sa vitesse est fixée, ceci se traduit par une légère augmentation de sa fréquence. Pour un observateur terrestre, une source lumineuse blanche embarquée à bord d'un satellite aurait une légère apparence bleutée - on parle de *blueshift* gravitationnel.

Ce changement relatif de fréquence  $\Delta\nu/\nu$  vaut

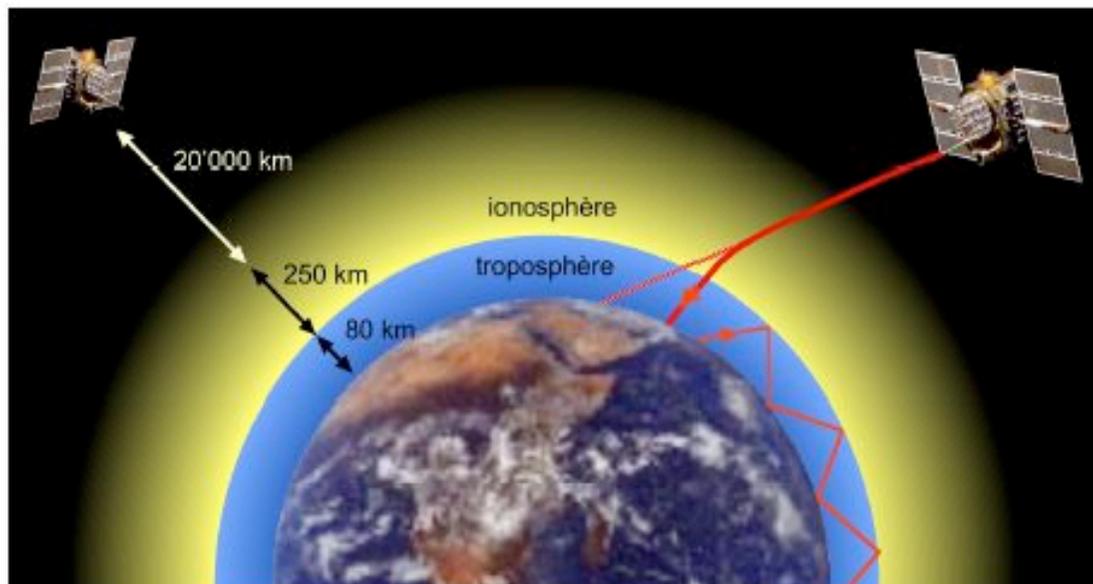
$$\frac{\Delta\nu}{\nu} = \frac{G m_T}{R_T c^2}$$

Si cette correction n'est pas prise en compte, on risque de la confondre avec un effet Doppler dû au mouvement du récepteur ou du satellite. Déterminez la vitesse du récepteur nécessaire pour reproduire un tel décalage de la fréquence par effet Doppler seul. Précisez si cette vitesse doit être verticale ou horizontale, ainsi que son sens.

# Sources d'erreur

Les sources d'erreur sont multiples.

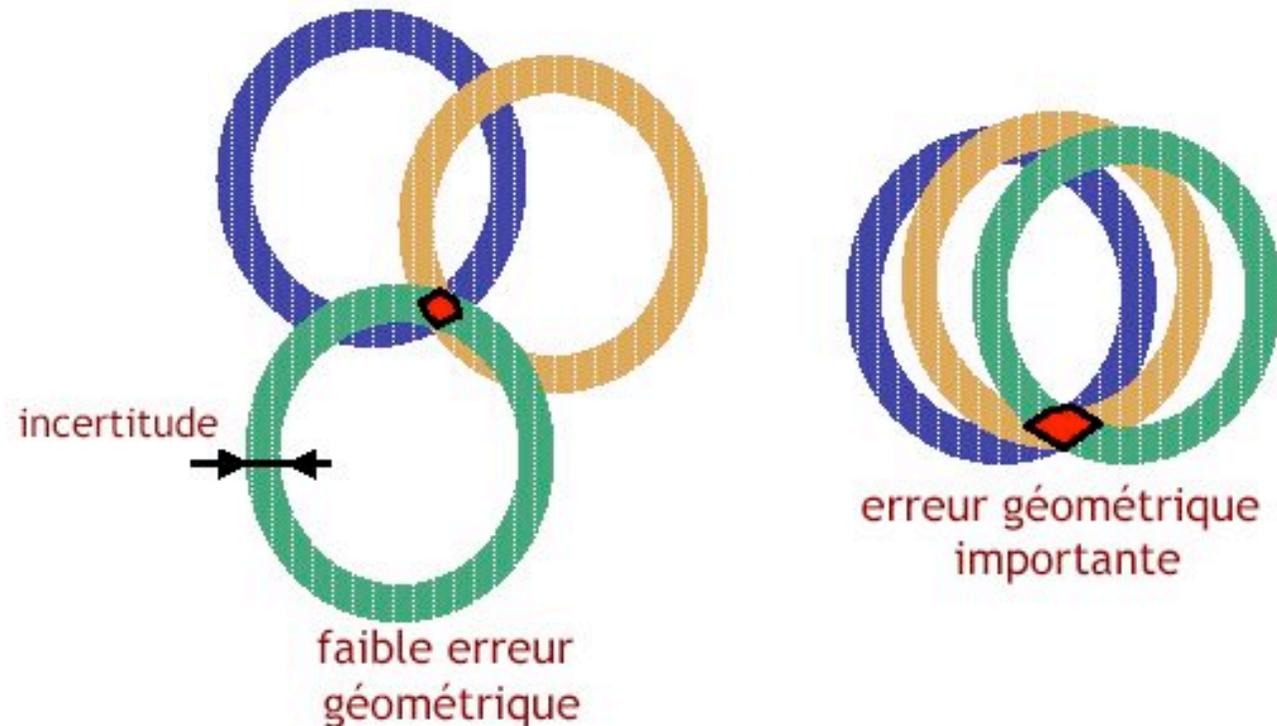
<i>source d'erreur</i>	<i>erreur typique</i>
ionosphère perturbée	4 m
troposphère	0.7 m
réflexions parasites	1.4 m
horloge et précision des satellites	3.0 m
bruit du récepteur	0.5 m
<i>erreur globale</i>	<i>~ 5.5 m</i>

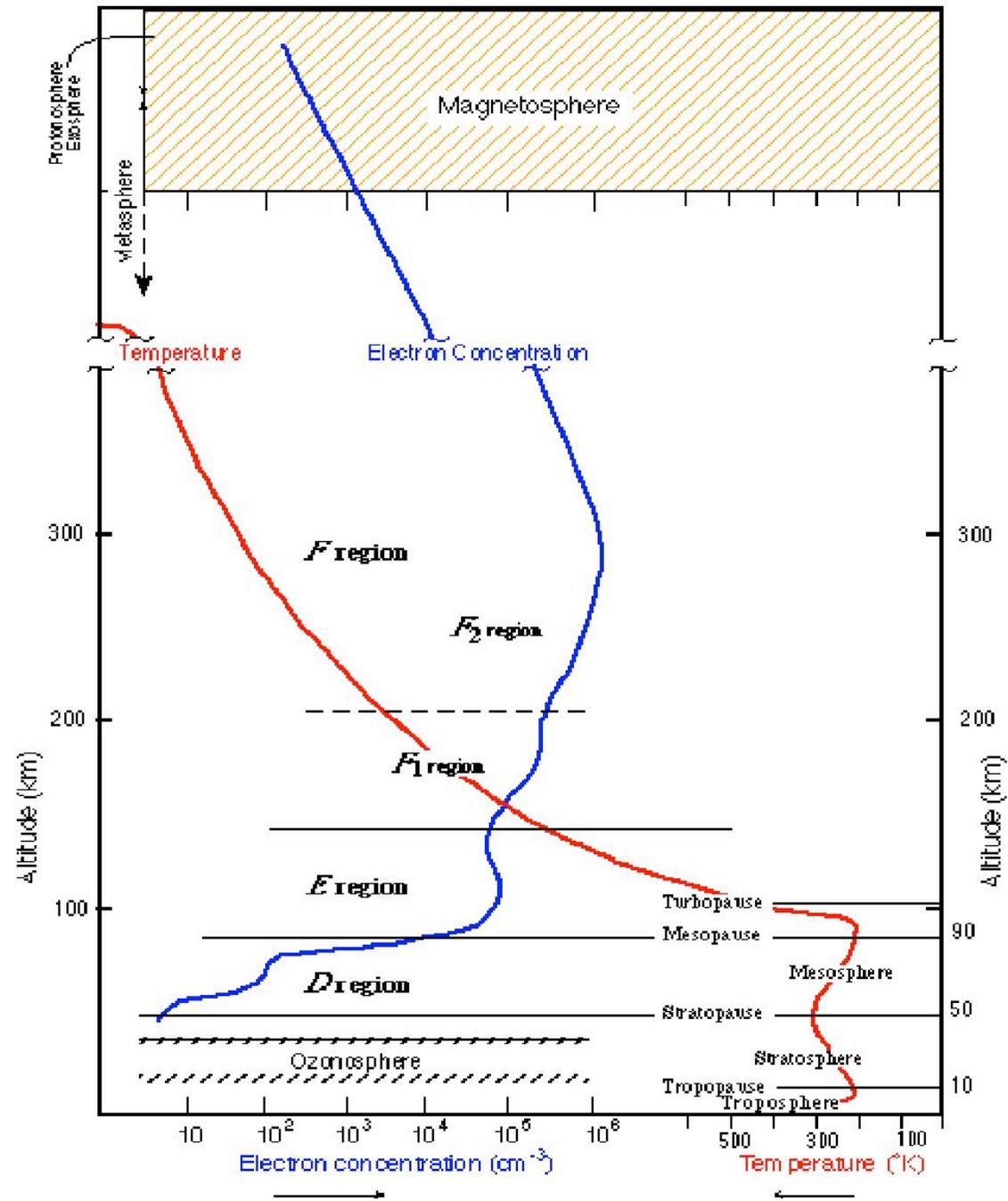




# Sources d'erreur

- L'erreur réelle dépasse souvent les 5 m
  - dans 95% des cas, l'erreur sur l'altitude est  $< 50$  m
  - dans 95% des cas, l'erreur sur la position horizontale est  $< 25$  m
- Cela tient en partie au nombre et à la configuration des satellites vus par le récepteur (facteur géométrique ou GDOP)





# Equations de Maxwell

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0 \qquad \nabla \times \vec{B} = \mu_0 \left( \vec{j} + \varepsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \right)$$

$$\nabla \cdot \vec{E} = \frac{\rho}{\varepsilon_0} \qquad \nabla \times \vec{E} = - \frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$$

- Plasma neutre  $\rho=0$
- Equation du mouvement des électrons

$$m_e \frac{\partial \vec{v}_e}{\partial t} = -e(\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B})$$

$$m_i \frac{\partial \vec{v}_i}{\partial t} = +e(\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B})$$

$$\vec{j} = -N_e e \vec{v}_e + N_e e \vec{v}_i$$

# Equations de Maxwell

$$\begin{aligned}\nabla \cdot \vec{B} &= 0 & \nabla \times \vec{B} &= \mu_0 \left( \vec{j} + \varepsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \right) \\ \nabla \cdot \vec{E} &= 0 & \nabla \times \vec{E} &= -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}\end{aligned}$$

- Plasma neutre  $\rho=0$
- Equation du mouvement des électrons

$$m_e i\omega \vec{v}_e = -e\vec{E}$$

$$v_i \ll v_e$$

$$\vec{j} = -N_e e \vec{v}_e = \frac{N_e e^2}{m_e i\omega} \vec{E} = -\frac{N_e e^2}{m_e \omega^2} \frac{\partial \vec{E}}{\partial t}$$

# Equations de Maxwell

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0 \qquad \nabla \times \vec{B} = \mu_0 \epsilon_r \frac{\partial \vec{E}}{\partial t}$$

$$\nabla \cdot \vec{E} = 0 \qquad \nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$$

$$\epsilon_r = \epsilon_o - \frac{N_e e^2}{m_e \omega^2} = \epsilon_o \left( 1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2} \right)$$

# Propagation dans le plasma

- Propagation dans un plasma
- Masse des électrons  $\ll$  Masse des ions

$$k^2 - \frac{\omega^2}{c^2} \left( 1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2} \right) = 0.$$

$\omega_p$  est la fréquence plasma, définie par :

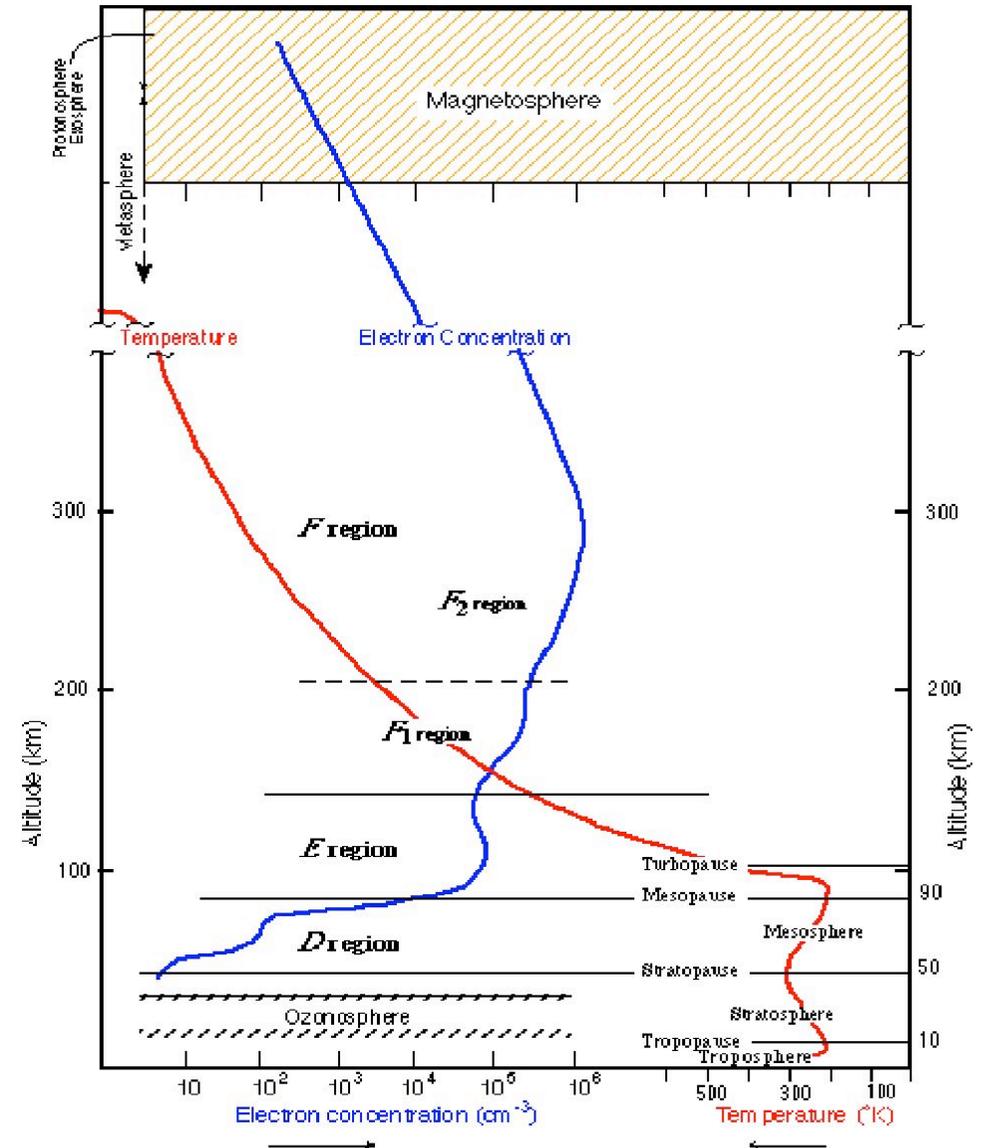
$$\omega_p = \left( \frac{N_e e^2}{m_e \epsilon_0} \right)^{\frac{1}{2}},$$

# Applications

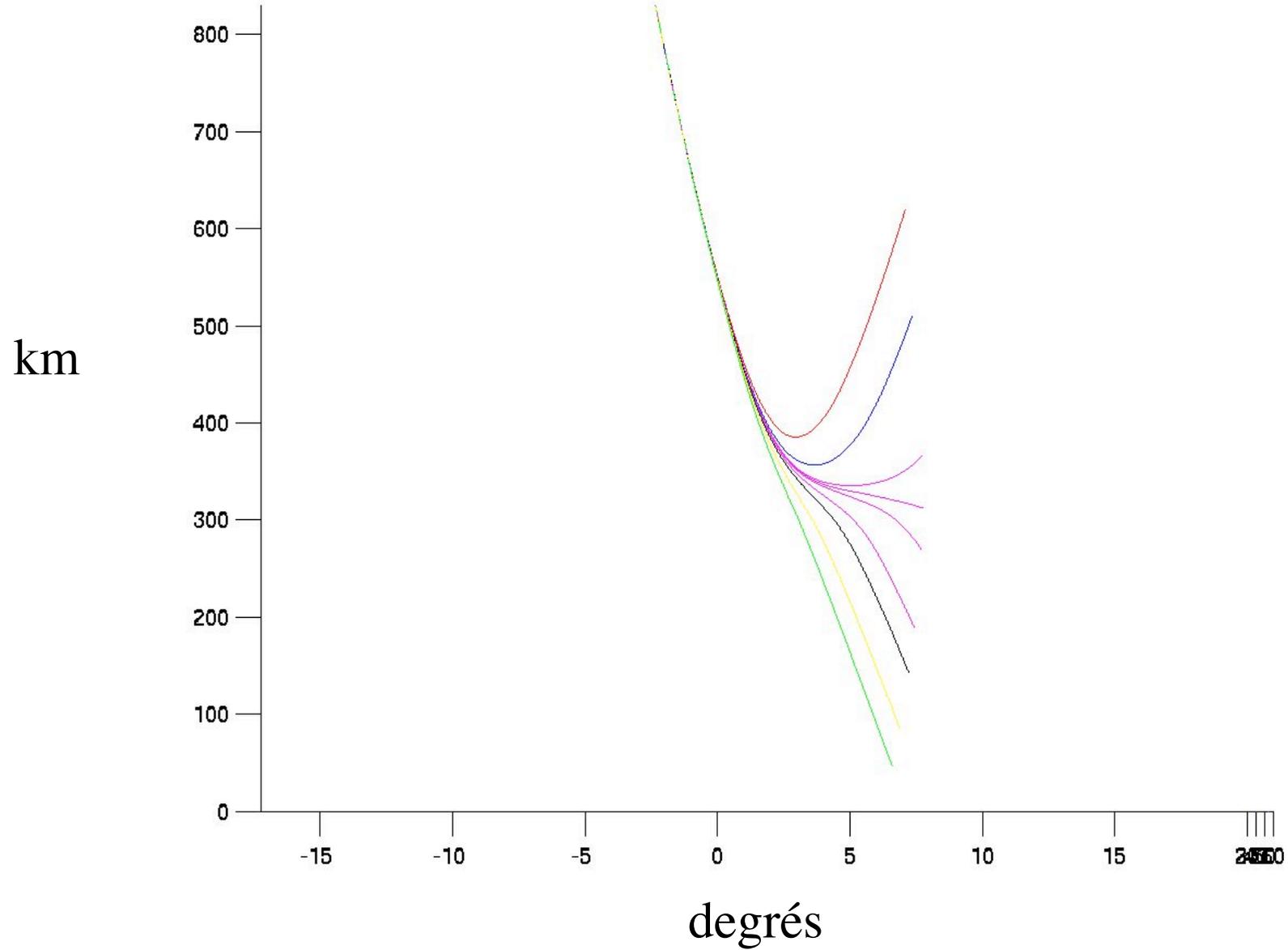
$$e=1.602 \times 10^{-19} \text{ C}$$

$$m=9.91 \times 10^{-31} \text{ kg}$$

$$\omega_p=8.97 N_e^{1/2}$$



# Propagation entre 10 et 15 Mhz



# Termes associés à l'ionosphère

$$\Delta L_{iono} = L_e - L = \int_{s_0}^{s_1} (n(s) - 1) \cdot ds$$
$$N = 40.3 \frac{n_e}{f^2}$$
$$= \int_{s_0}^{s_1} N(s) \cdot ds$$

- Ne est la densité d'électrons ( en e/m<sup>3</sup>)
- En pratique, deux fréquences sont émises par le GPS ( $f_1=1227,60$  et  $f_2=1575,42$  MHz)  
La distance mesurée est différente sur les deux fréquences du fait de la réfraction ionosphérique. On peut ainsi calculer le retard ionosphérique et corriger les signaux

$$\Delta \rho_{gr} = + \frac{40,3}{f^2} \int N_e ds$$

$$\Delta \rho_{ph} = - \frac{40,3}{f^2} \int N_e ds + \textit{ambiguite}$$

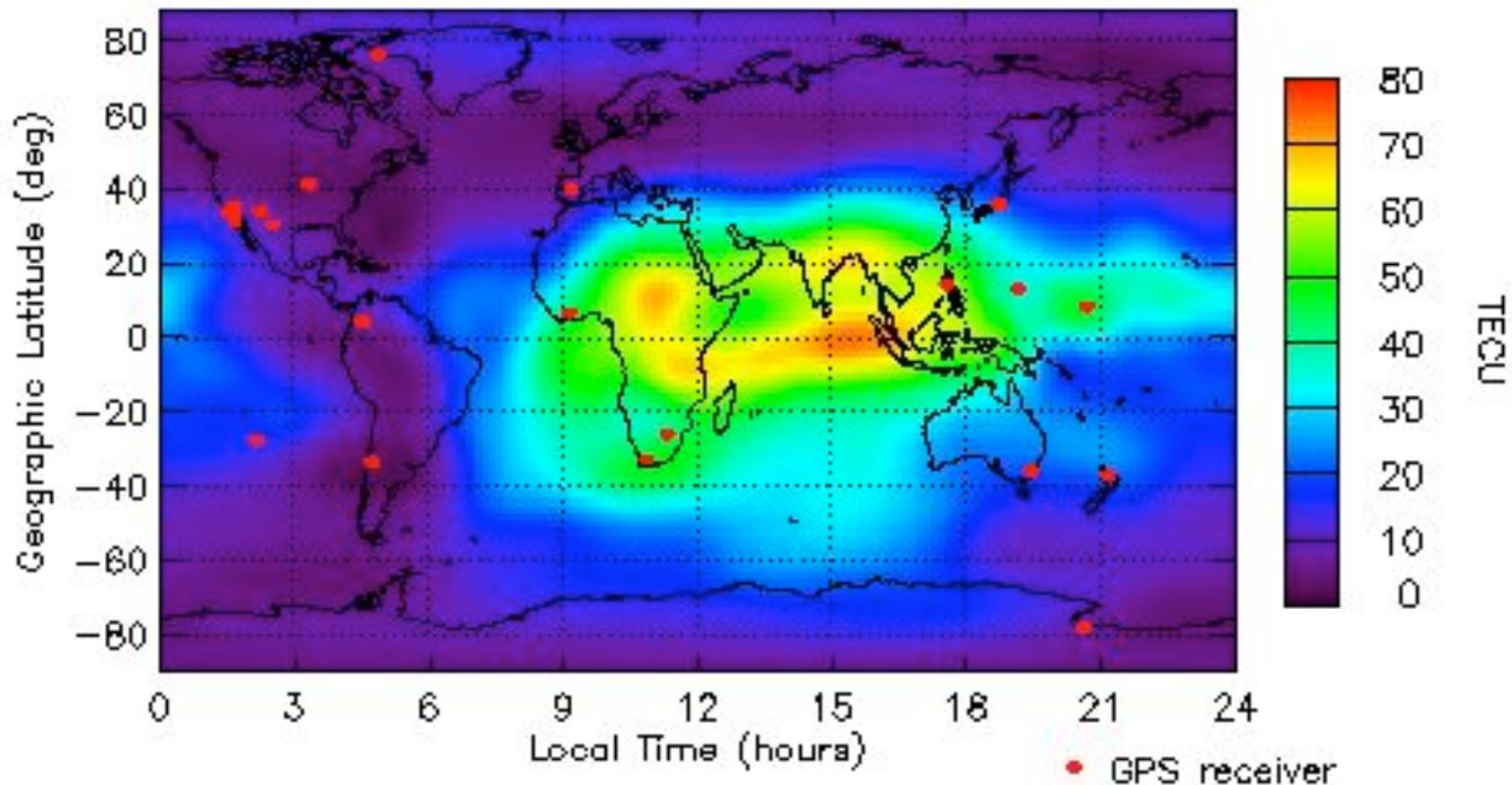
$$\mathbf{TEC} = \int N_e ds = \frac{f_1^2 f_2^2}{40,3(f_2^2 - f_1^2)} \left( \Delta \rho_{gr}^1 - \Delta \rho_{gr}^2 \right)$$

09/16/99

09:00 - 10:00 UT

# Global Ionospheric TEC Map

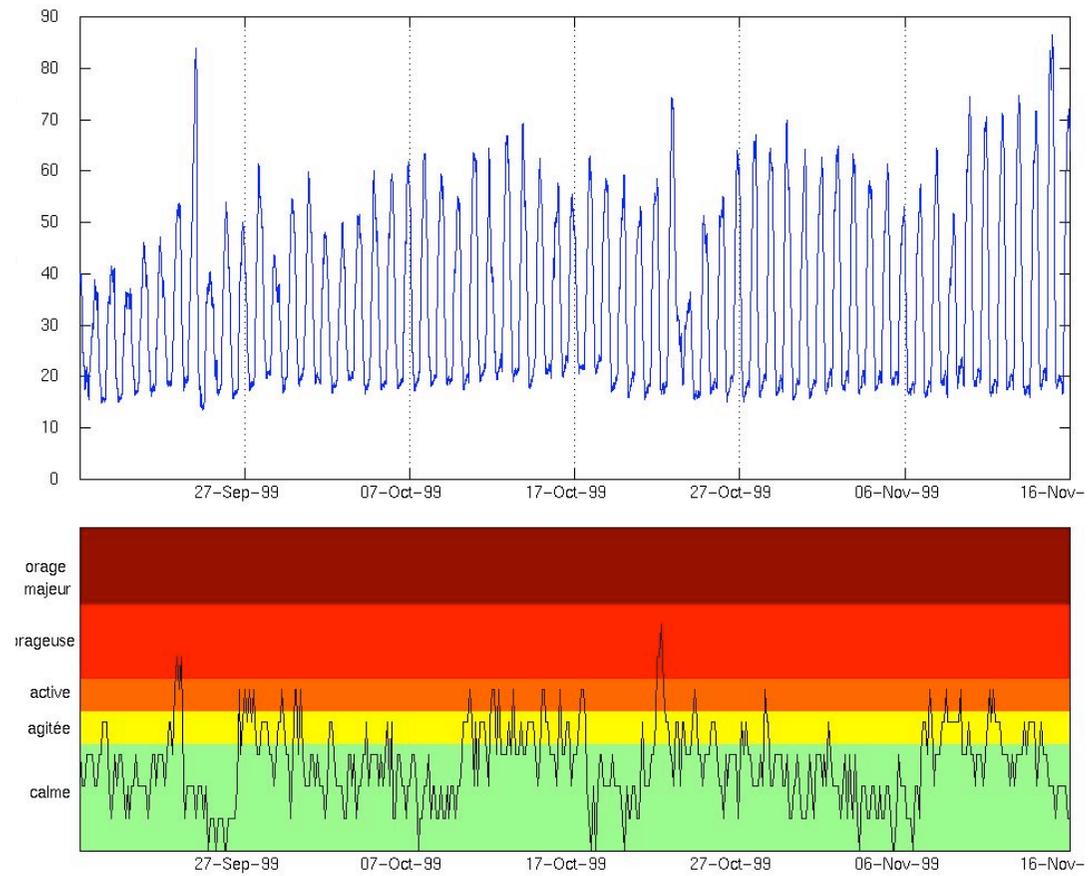
JPL



# Evolution diurne et long terme du TEC

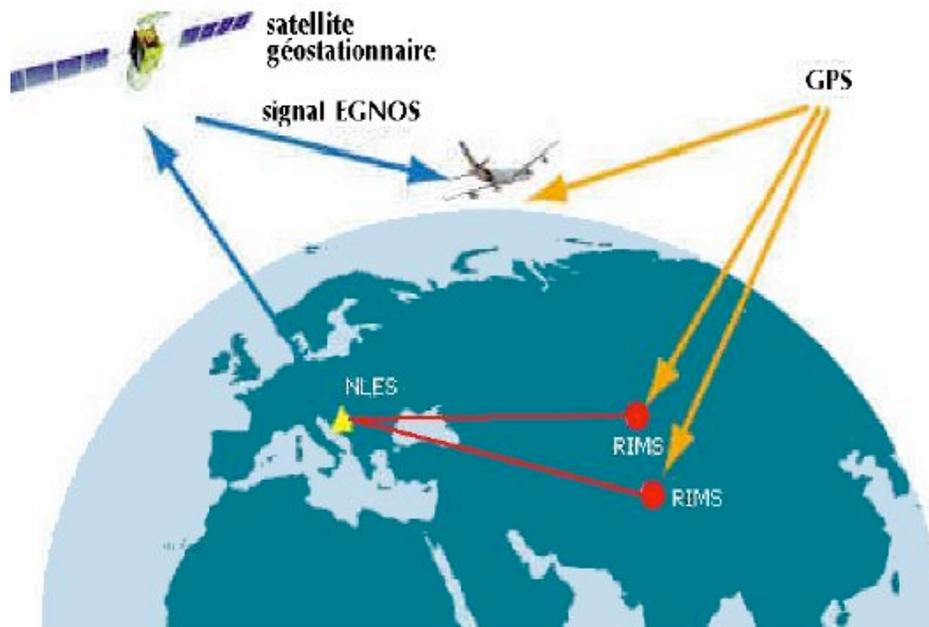
- Sur 2 mois:
  - Variabilité d'un jour sur l'autre du maximum d'ionisation
  - Corrélation avec l'activité magnétique

TEC sur 2 mois en Californie



# Correction ionosphérique

- Correction en temps réel en utilisant les deux fréquences ( récepteur bi-fréquence)
- Correction en temps quasi-réel en utilisant un modèle ionosphérique + meilleurs éphémérides

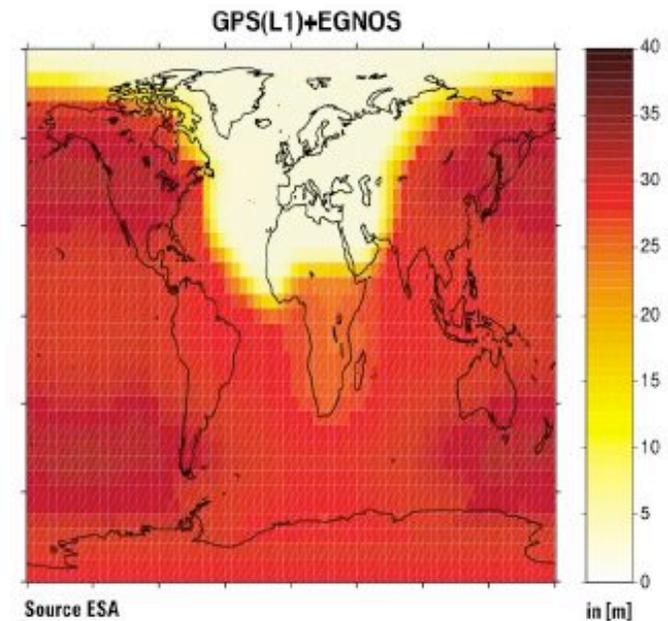
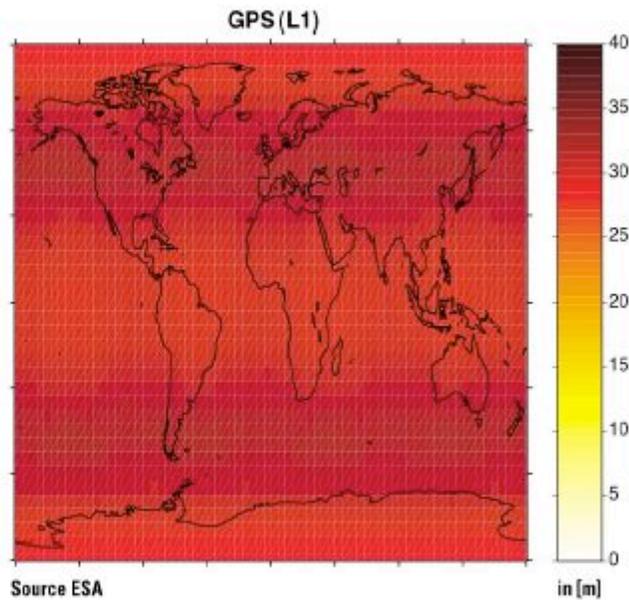


Source d'erreur	Valeurs absolues (m)	Remarques
Orbite	5-10 5 cm (IGS)	Connaissance de la position du satellite et autres
Horloge Satellite (c.dt)	10	Stabilité en fréquence du satellite par rapport au temps GPS, variations d'accélération et autres
Horloge récepteur (c.dT)	10	Décalage d'horloge du récepteur par rapport au temps GPS
Ionosphère	2-50	Dépend de l'angle d'élévation du satellite et de l'activité solaire
Troposphère	2-30	Dépend surtout du contenu en vapeur d'eau de la basse atmosphère
Multitrajet (code) ( $\epsilon_p$ )	0.2-3	Les signaux GPS peuvent être réfléchis par des objets situés à proximité
Bruit récepteur (code) ( $\epsilon_p$ )	0.1-3	Dépend de l'électronique du récepteur et de son environnement
Multitrajet (phase) ( $\epsilon_\phi$ )	0.001-0.03	Les signaux GPS peuvent être réfléchis par des objets situés à proximité
Bruit récepteur (phase) ( $\epsilon_\phi$ )	0.0002-0.002	Dépend de l'électronique du récepteur et de son environnement
S.A (Selective Availability)	5-80	Dégradations volontaires des éléments d'orbite et d'horloge dans les messages de navigation et des performances des oscillateurs. S.A a été éliminée à partir de mai 2000.

# EGNOS

***Mean horizontal positioning accuracy (95%) achieved through the GPS constellation alone***

***Mean horizontal positioning accuracy (95%) achieved through the GPS constellation augmented by EGNOS***



# Termes associés à la troposphère

$$\begin{aligned}\Delta L_{trop} &= L_e - L = \int_{s_0}^{s_1} (n(s) - 1).ds \\ &= 10^{-6} \int_{s_0}^{s_1} N(s).ds\end{aligned}$$

$$N = 77.6 \frac{P}{T} + 3.73 \cdot 10^5 \frac{e}{T^2}$$

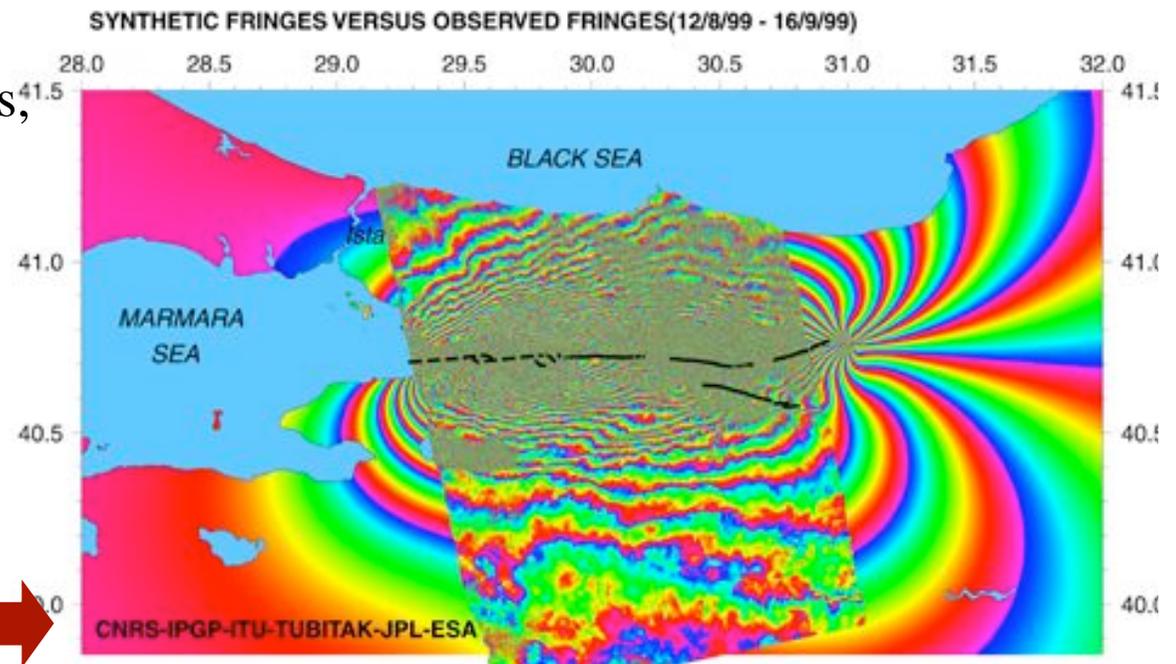
- où P est la pression de l'air (hPa), T la température de l'air (K) et e la pression partielle de la vapeur d'eau (hPa).
- Le délai  $\Delta L$  est donc la somme de deux termes : le premier, appelé composante hydrostatique, représente la contribution de l'atmosphère totale et retarde le signal zénithal GPS de plus de 2 mètres ; le second, appelé composante humide, représente la contribution de la vapeur d'eau et retarde le signal zénithal GPS d'une dizaine de centimètres.



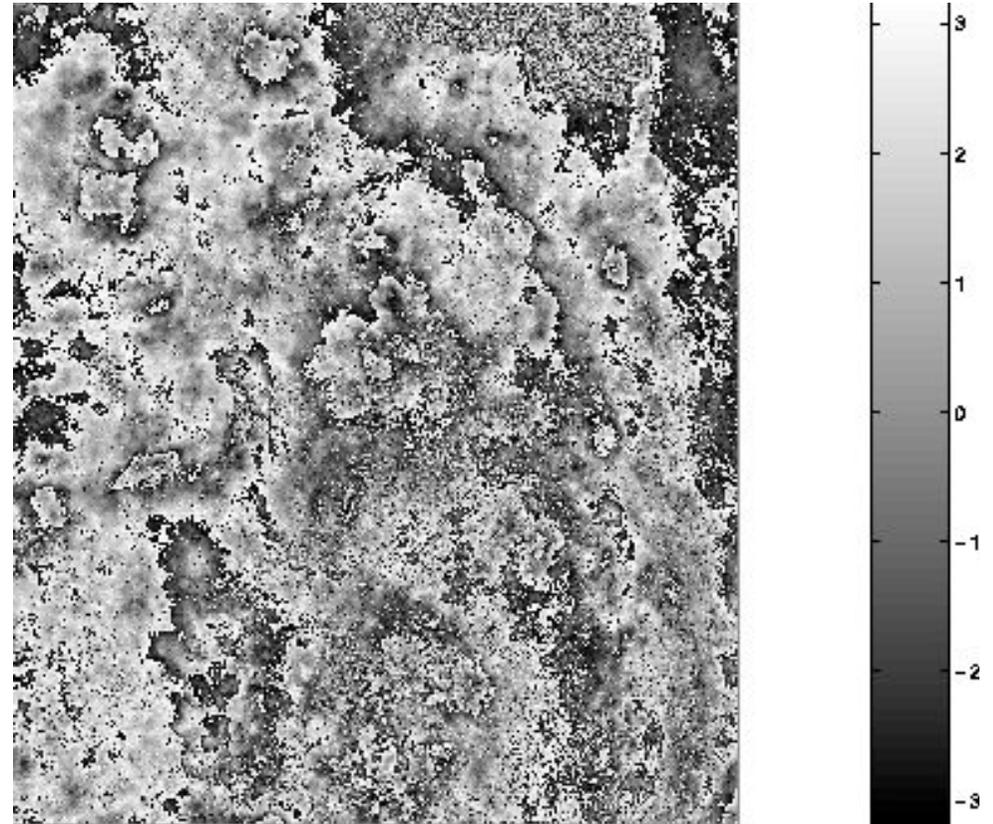
# Effet de la troposphère

- La présence de **divers gaz** et de la **vapeur d'eau**, ainsi que la **variation de la pression et de la température avec l'altitude**, entraînent un écart de l'indice de réfraction de la troposphère par rapport à l'unité.
- Cette source d'erreur est en particulier critique pour l'étude des petites déformations, associées à des petits séismes par exemple, ou à des déformations lentes, volcaniques ou tectoniques.

Izmit, août 1999



- Des données météorologiques brutes, prises sur le terrain ou par imagerie satellitaire peuvent en revanche être utilisées pour identifier la partie du signal SAR cohérente avec ces données environnementales, et donc *a priori* associée à la troposphère.
- Un autre effet indirect est associé à la topographie du terrain, en particulier à un effet de baromètre inversé.



Effet de cellules convectives sur la mesure interférométrique de la phase. Jusqu'à deux franges sont visibles. D'après Hanssen et Feijt, 1996.



## Qu'est ce que Galileo?

### Le programme européen de radionavigation par satellite



Galileo permettra à chacun, muni d'un récepteur, par exemple intégré dans son GSM, de capter des signaux émis par plusieurs satellites pour déterminer à tout instant sa **position dans le temps et dans l'espace**.

Galileo est basé sur une constellation de **30 satellites** placés sur orbite et couvrant en permanence l'ensemble du globe.

### Où en est Galileo?

La phase de définition est achevée.



2002-2005

Phase de développement et de validation

2006-2007

Phase de déploiement

Dès 2008

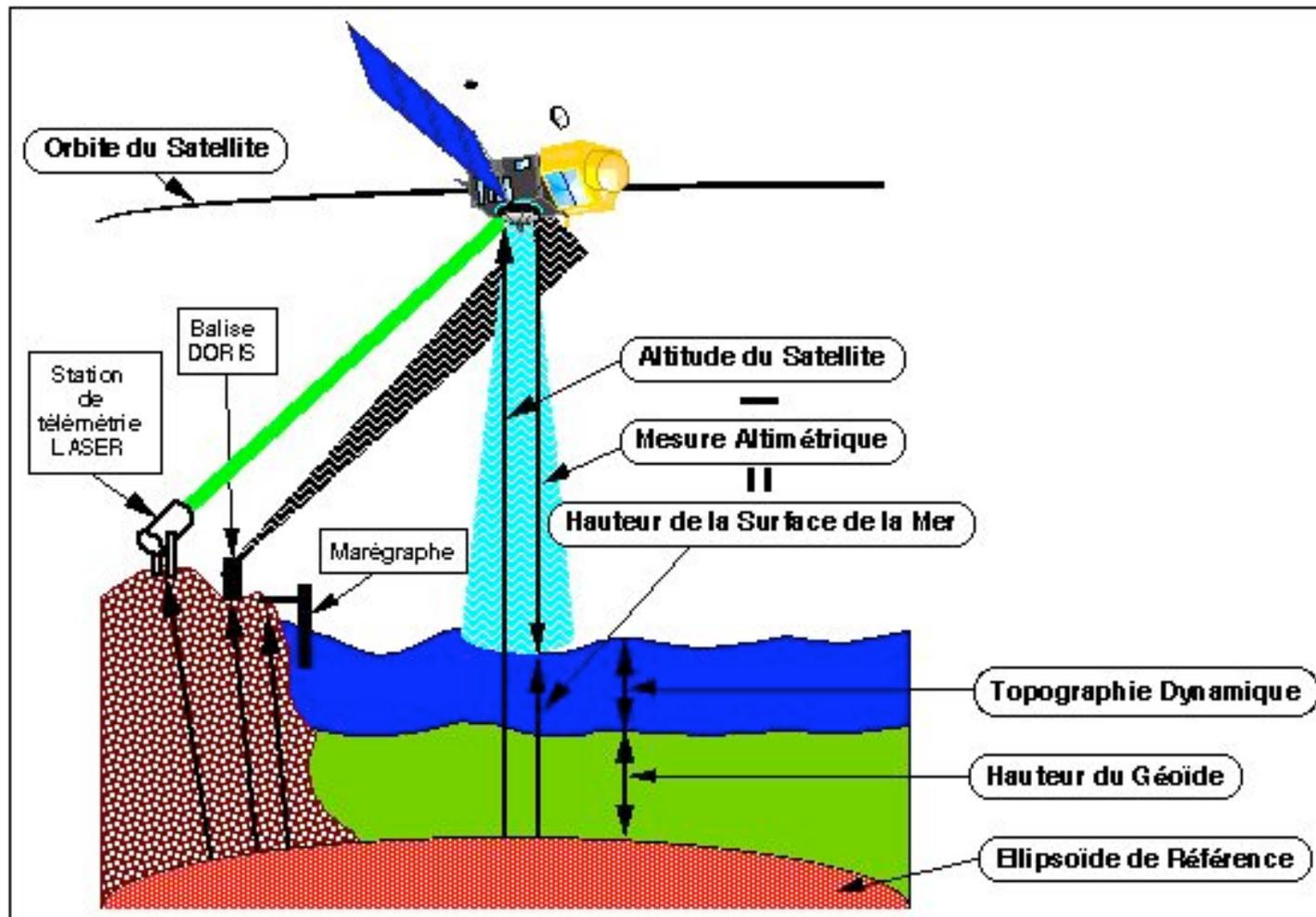
Phase d'exploitation commerciale



EXO Dès 2011, Galileo fournira un service équivalent à celui du GPS. Ses satellites se déplaceront sur des orbites circulaires, à une altitude moyenne de 23616 km. Comparez leur période orbitale à celle des satellites du système GPS, *sans faire appel à la masse de la Terre*.

# Altimétrie

# Principe de l'altimétrie

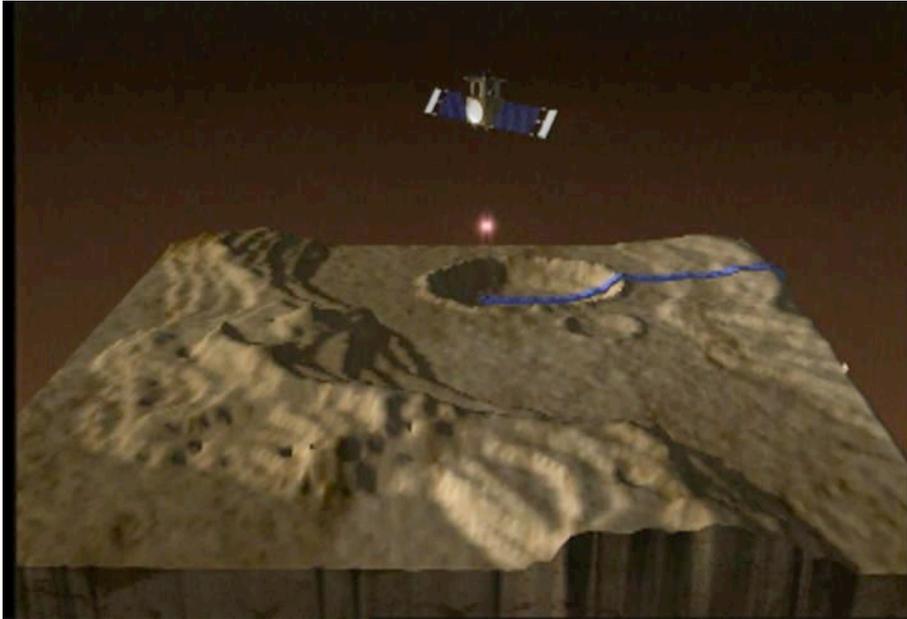


- Fréquences de l'altimètre Jason
  - 13.5 GHz (Bande K) et 5.3 GHz (Bande C)
  - GPS ( $f_1=1227,60$  et  $f_2=1575,42$  MHz, bande L)
  - Quel est l'effet de l'ionosphère ?

Bandes de fréquence micro-ondes		
Désignation	Gamme de fréquences	Gamme de longueur d'onde
Bande L	de 1 à 2 GHz	15 à 30cm
Bande S	de 2 à 4 GHz	7.5 à 15 cm
Bande C	de 4 à 8 GHz	3.75 à 7.5 cm
Bande X	de 8 à 12 GHz	2.5 à 3.75 cm
Bande Ku	de 12 à 18 GHz	
Bande K	de 18 à 26 GHz	
Bande Ka	de 26 à 40 GHz	
Bande Q	de 30 à 50 GHz	
Bande U	de 40 à 60 GHz	
Bande V	de 46 à 56 GHz	
Bande W	de 56 à 100 GHz	

# Autres méthodes d'altimétrie

# Altimétrie et planétologie:

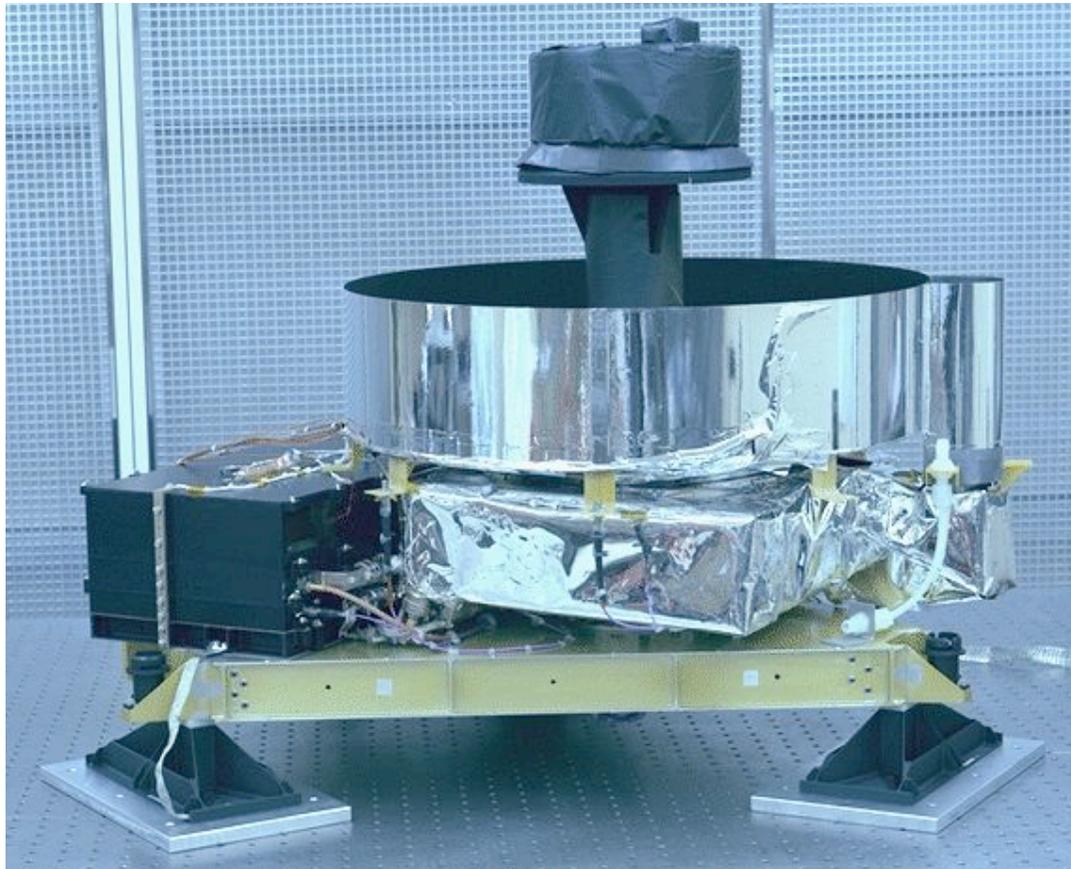


- Première mesure radar depuis la Terre (Goldstone, Aricebo, etc) 200 m de précision
- Mesure d'occultation radio des sondes Mariner 9 et Viking
  - Structure de grande échelle  $s < 8$

- MGS: expérience MOLA ( Zuber et al.)
  - Résolution latérale (taille du spot): 130-330 m
  - Résolution absolue: 10 m
  - Résolution relative: 35 cm



# MOLA: Mars Orbiter Laser Altimeter



Range Precision:  $\sim 37$  cm

Absolute Vertical Resolution:  $<10$  m

Surface Spot Size: 130 m

Along Track Shot Spacing:  $\sim 330$  m

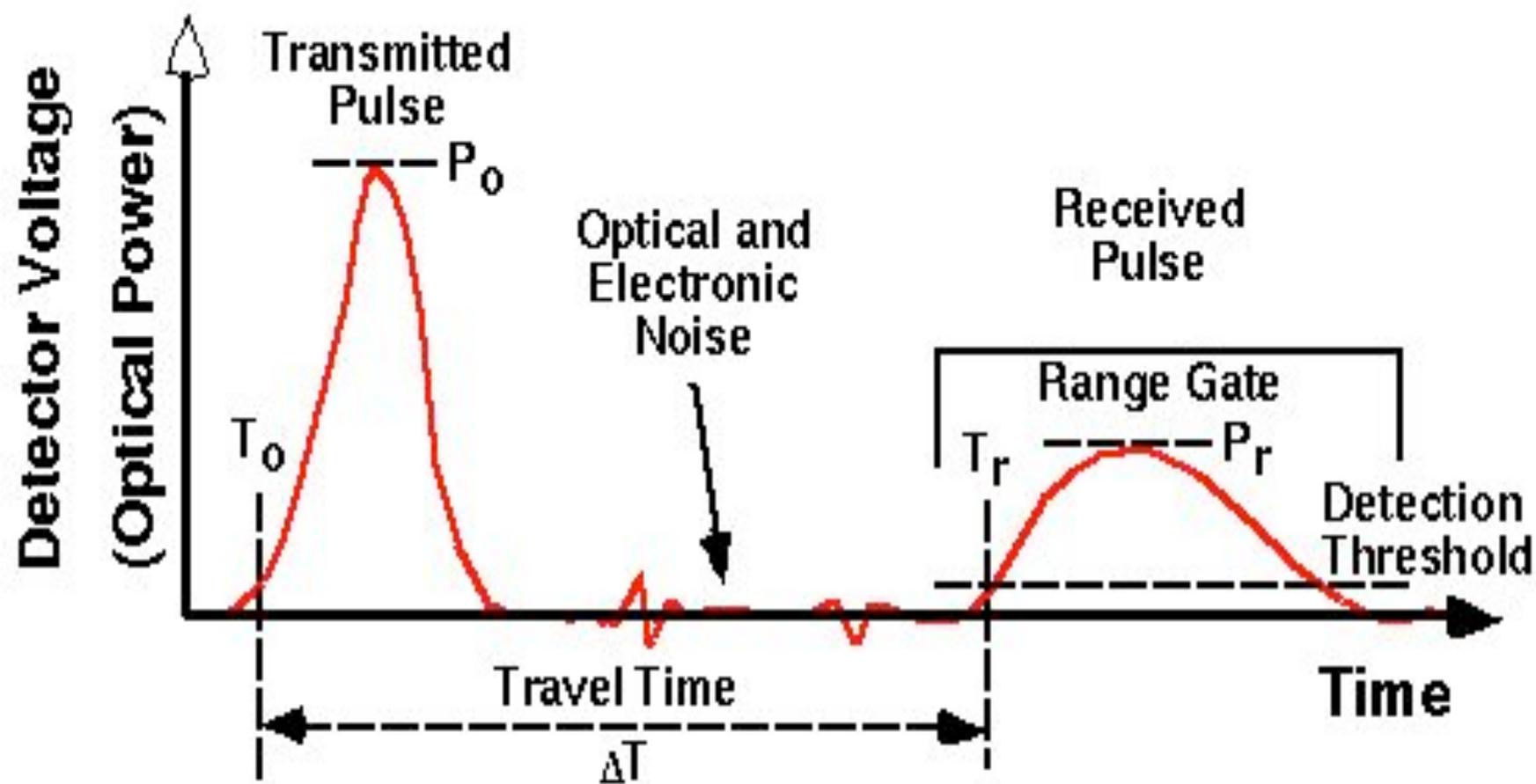
Cross-Track Spacing:  $\sim 1$ -30 km (equator)

Mass: 25 kg

Total number of Shots:  $\sim 640$  Million

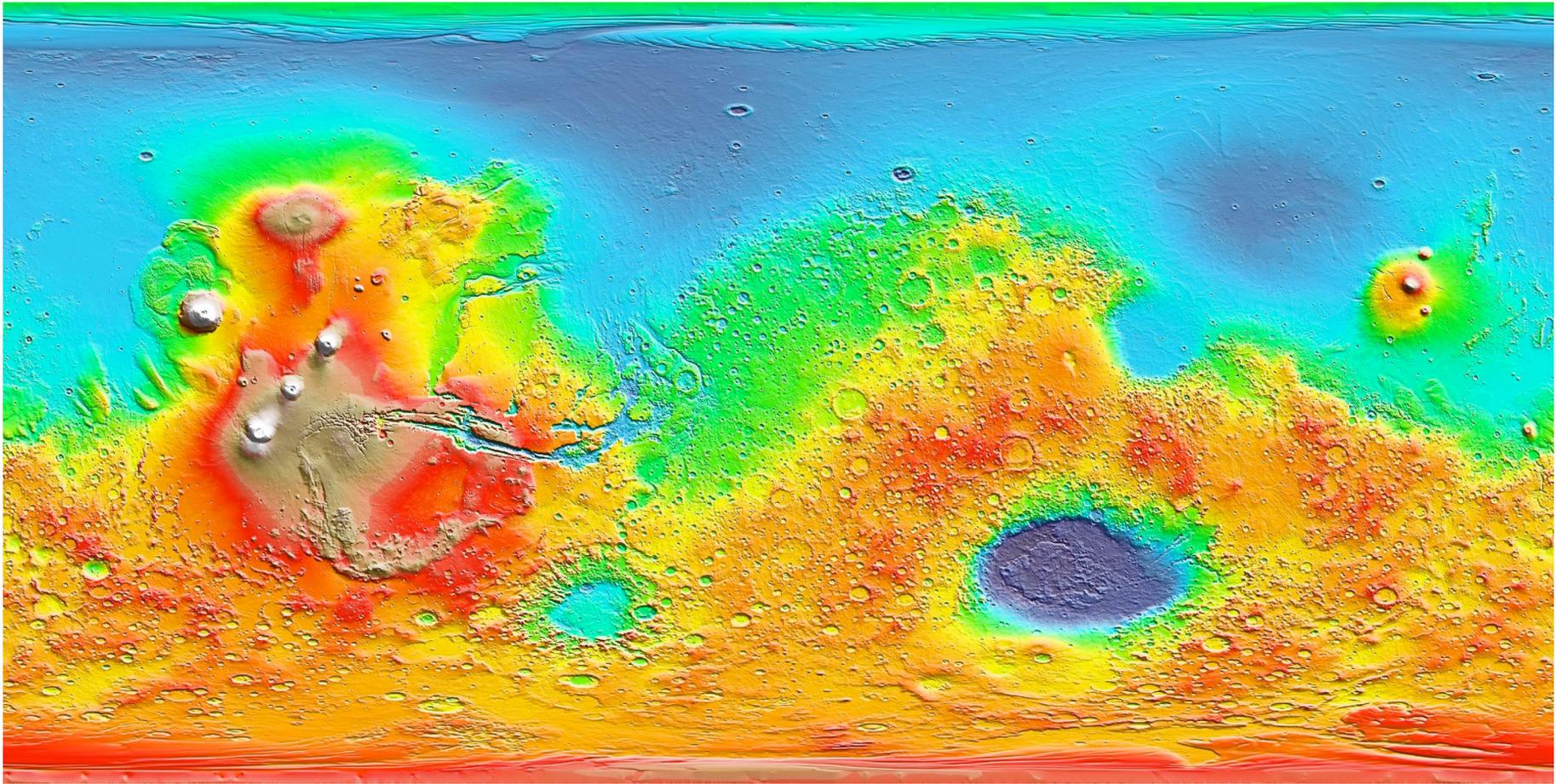
Currently acting as a radiometer

# LASER RANGING SCHEMATIC

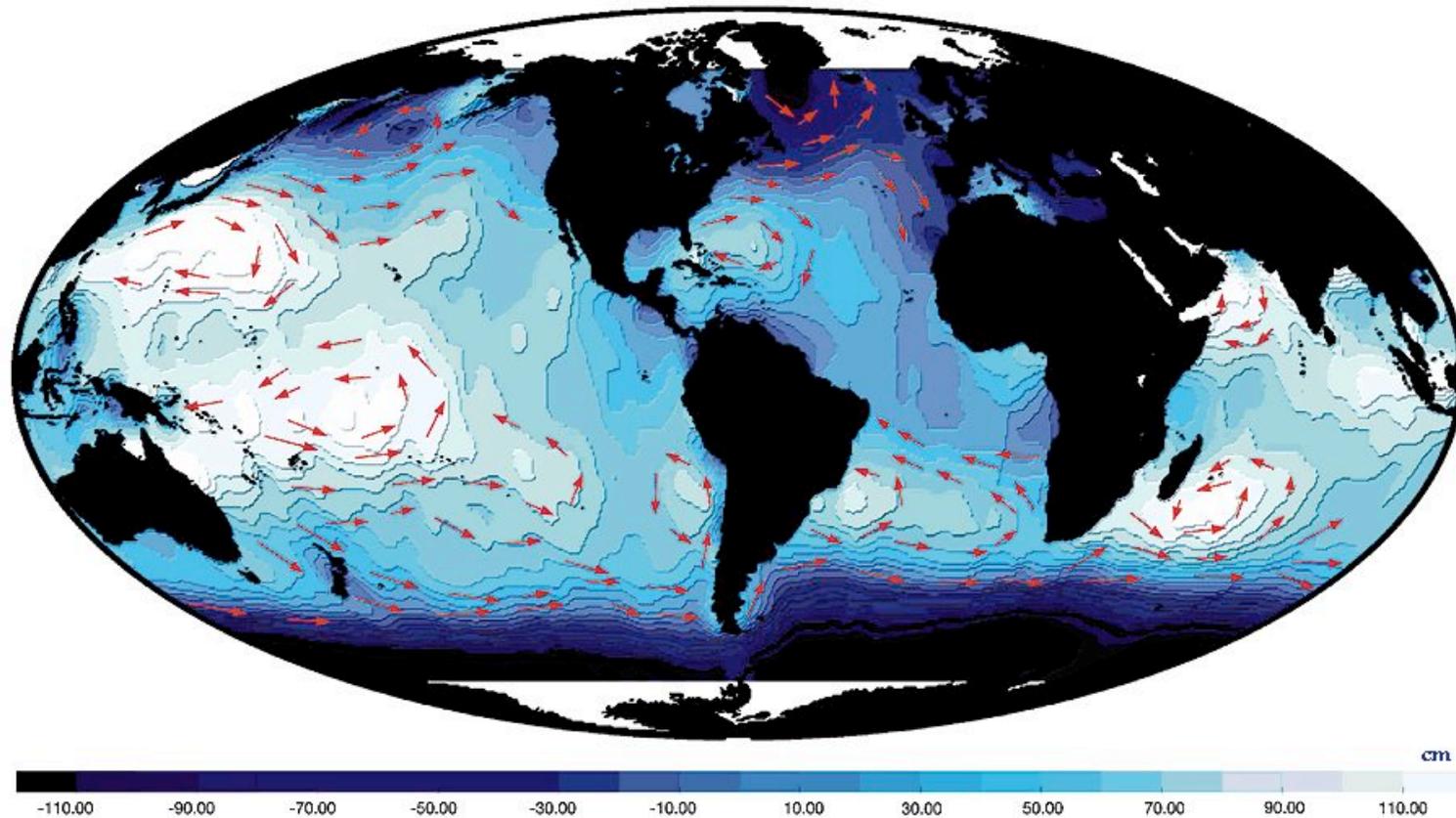


$$\text{Range } z = c \frac{\Delta T}{2}$$

- $T_0$  = Transmitted pulse time
- $P_0$  = Transmitted pulse power
- $T_r$  = Received pulse time
- $P_r$  = Received pulse power



*Topographie dynamique de la surface de la mer observée par TOPEX/POSEIDON*



- La topographie dynamique est l'analogie du champ de pression en météorologie: les courants océaniques de surface (flèches rouges) suivent les courbes de niveau avec une vitesse proportionnelle à sa pente locale. Dans l'hémisphère Nord, les courants tournent dans le sens des aiguilles d'une montre autour des bosses et en sens inverse autour des creux, à l'opposé de ce qui se passe dans l'hémisphère Sud. La topographie dynamique cartographiée a été obtenue à partir des observations du satellite altimétrique Topex/Poséidon. L'échelle va de -110 cm (bleu foncé) à +110 cm (bleu clair). Elle permet d'identifier la circulation océanique globale avec ses gyres et les courants de bord Ouest (Gulf Stream dans l'Atlantique, Kuroshio au large du Japon). Notez aussi les deux niveaux entre le Pacifique et l'Atlantique dus aux différences de salinité.

Moyens d'observations et  
systèmes d'alertes  
tsunami: moyens spatiaux

# Les moyens d'observation

---



## Moyens au sol:

- les sismomètres (mouvement du sol)
- les marégraphes (mouvement de la surface de l'eau)
- les capteurs de pression (mouvement de la hauteur d'eau)
- les mesures sur le terrain

## Outils satellitaires:

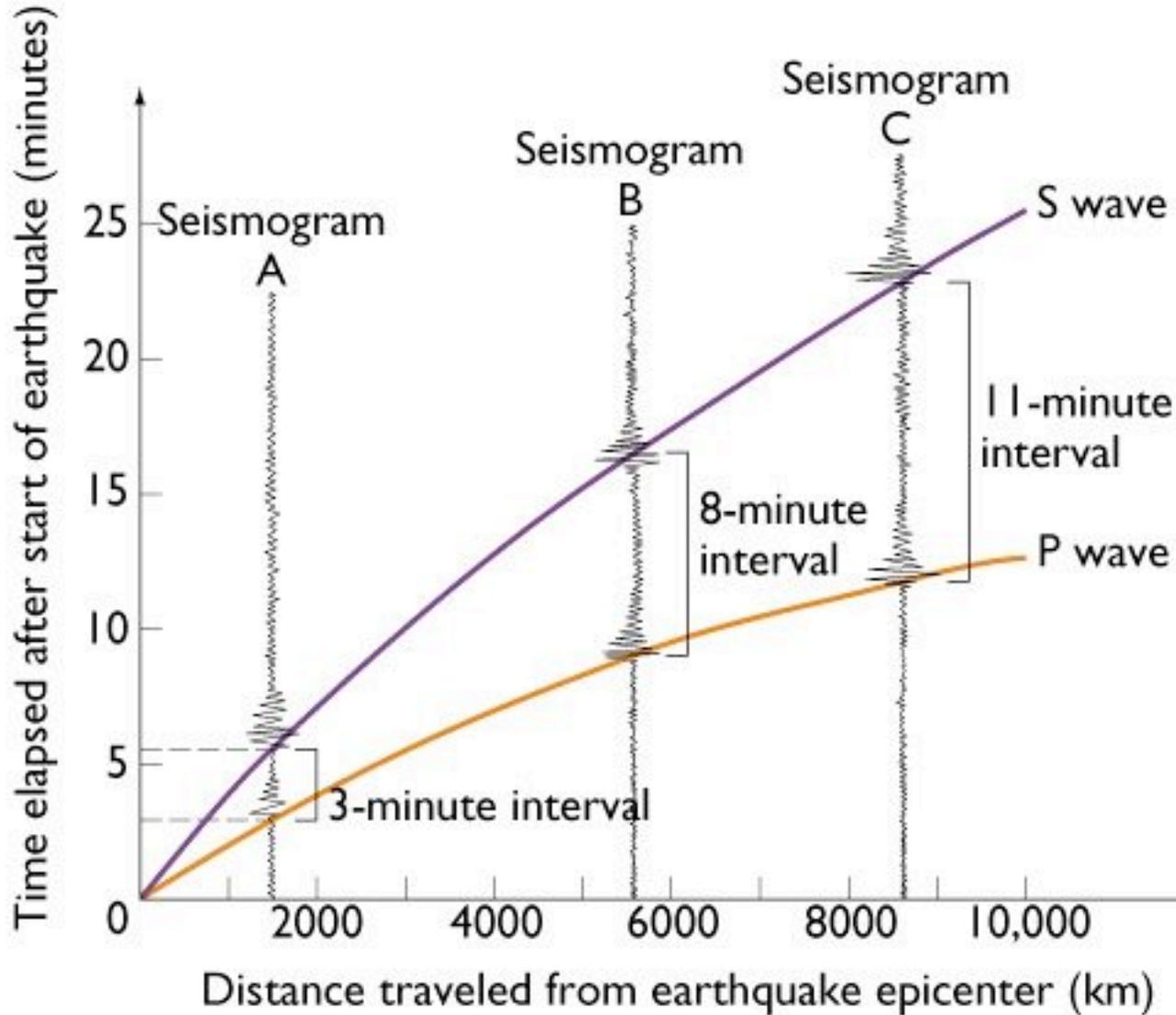
- les satellites imageurs (photos avant/après)
- les satellites altimétriques (mesure de la hauteur d'eau de l'océan)

## Outils de demain:

- télédétection spatiale et radars

# Courbes de temps de parcours des ondes P et S

Temps



Distance

# Marégraphes et capteurs de pression

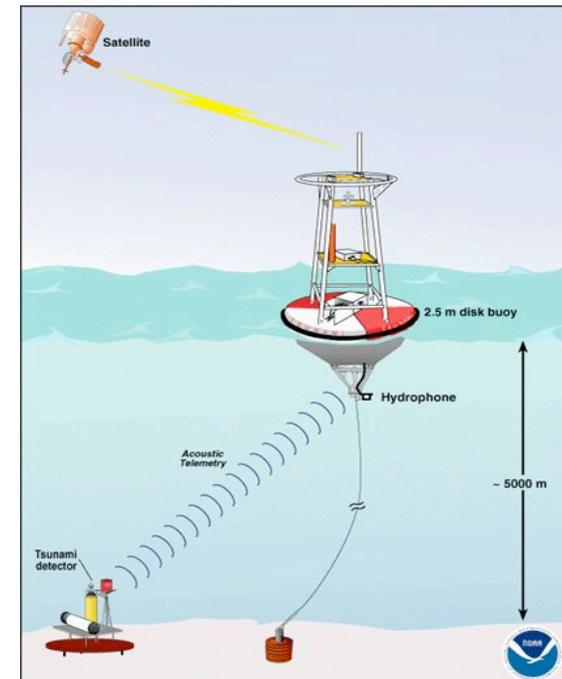


Enregistrement de la hauteur d'eau:  
Mesure des marées et des tsunamis

Marégraphe sur l'île de Kerguelen



Capteur de pression en fond de mer et système de communication

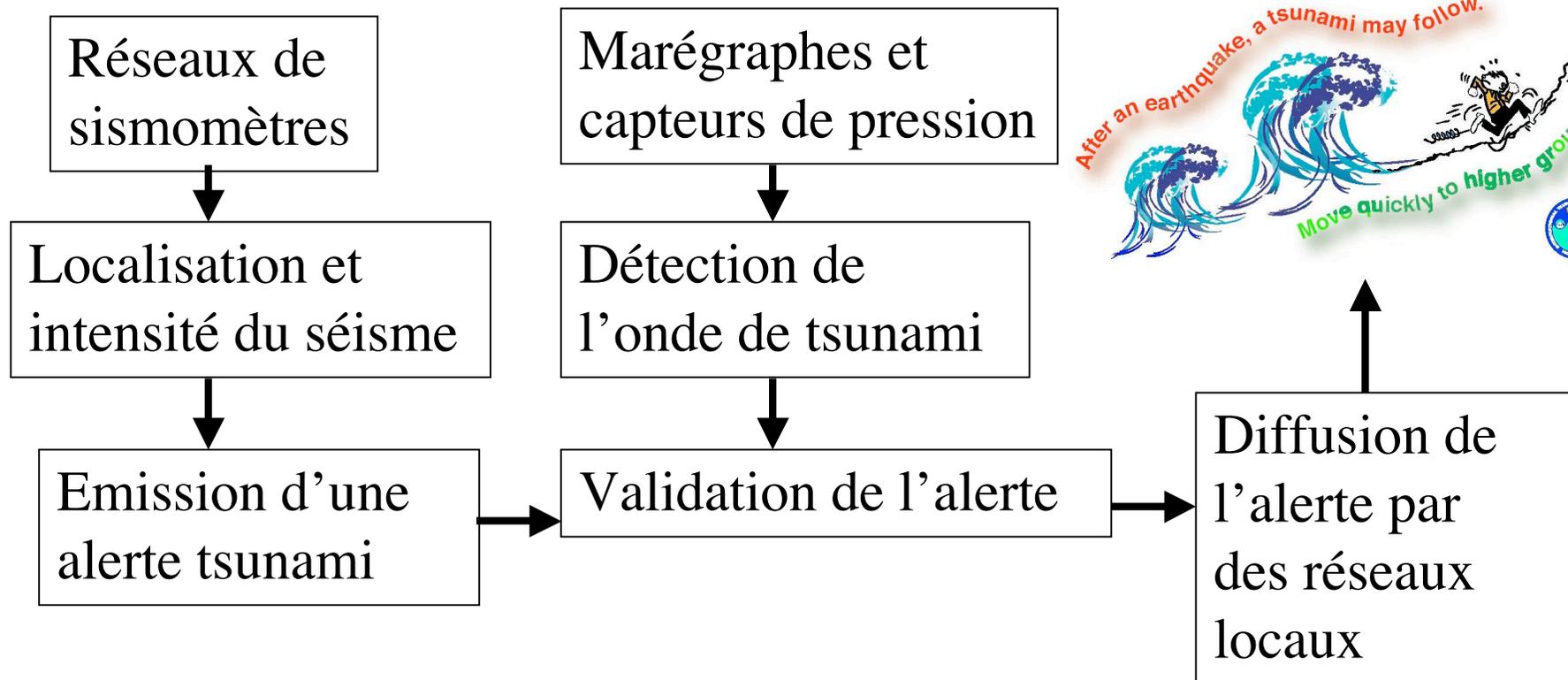


- ⇒ Amélioration des modèles de prédiction de la marée
- ⇒ Localisation des sources de tsunami
- ⇒ Détermination de l'intensité des tsunamis

# Les systèmes d'alerte

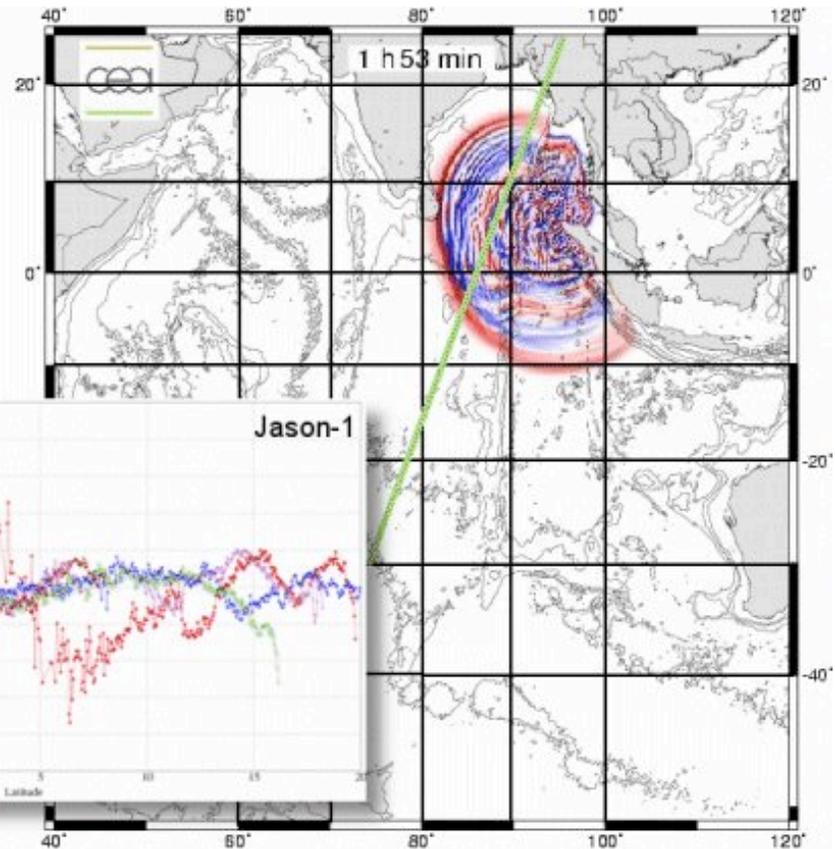
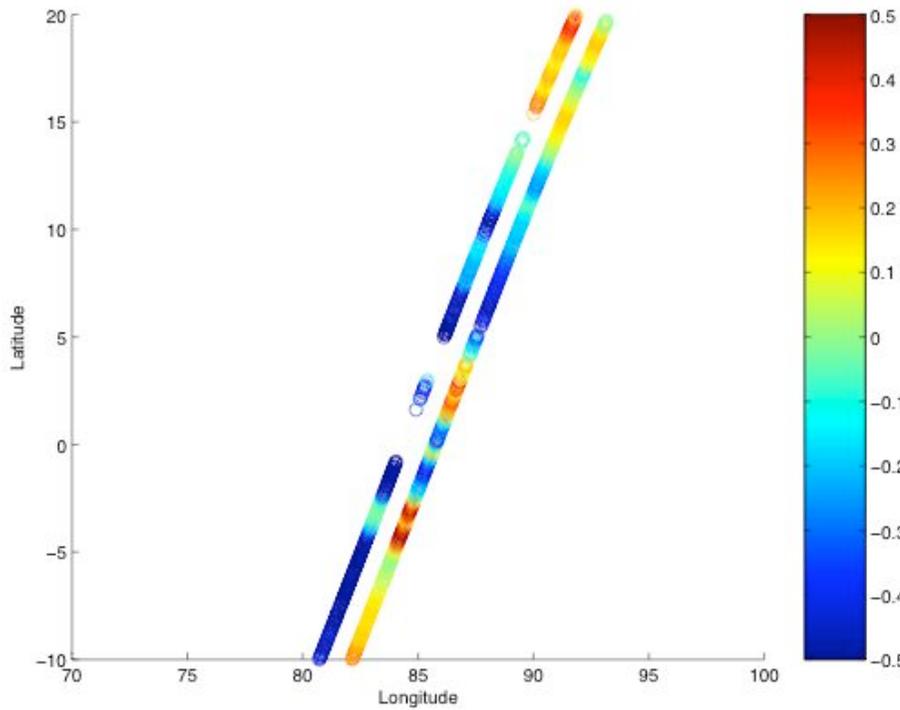


- Un seul système opérationnel avant décembre 2004:  
Le système d'alerte du Pacifique
- 40 nations contribuent dont la France pour la Polynésie Française
- Schéma de principe du dispositif d'alerte:

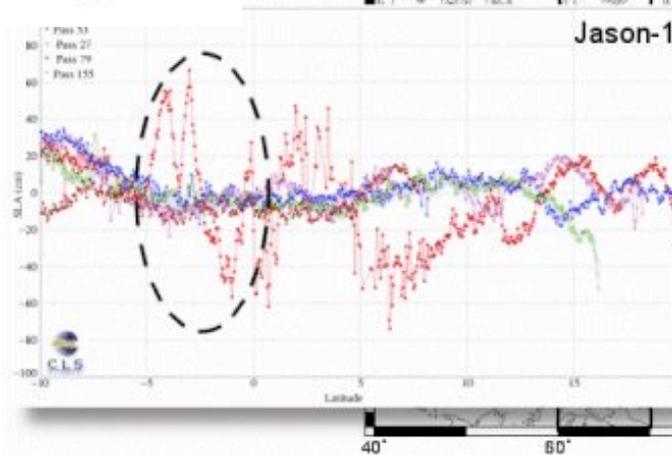


# La dimension spatiale

# Tsunami en Mer vu par Topex et Jason



Elévation de l'océan  
(m)



# Satellites imageurs : Quickbird

---



Enregistrement d'images de l'inondation:  
Carte des longueurs d'inondation

Plage de Kalutara au Sri Lanka

Juste avant l'arrivée du tsunami



Juste après le tsunami: retrait la mer



⇒ Estimation des dégâts et des longueurs d'inondation

# Satellites imageurs : Quickbird

---

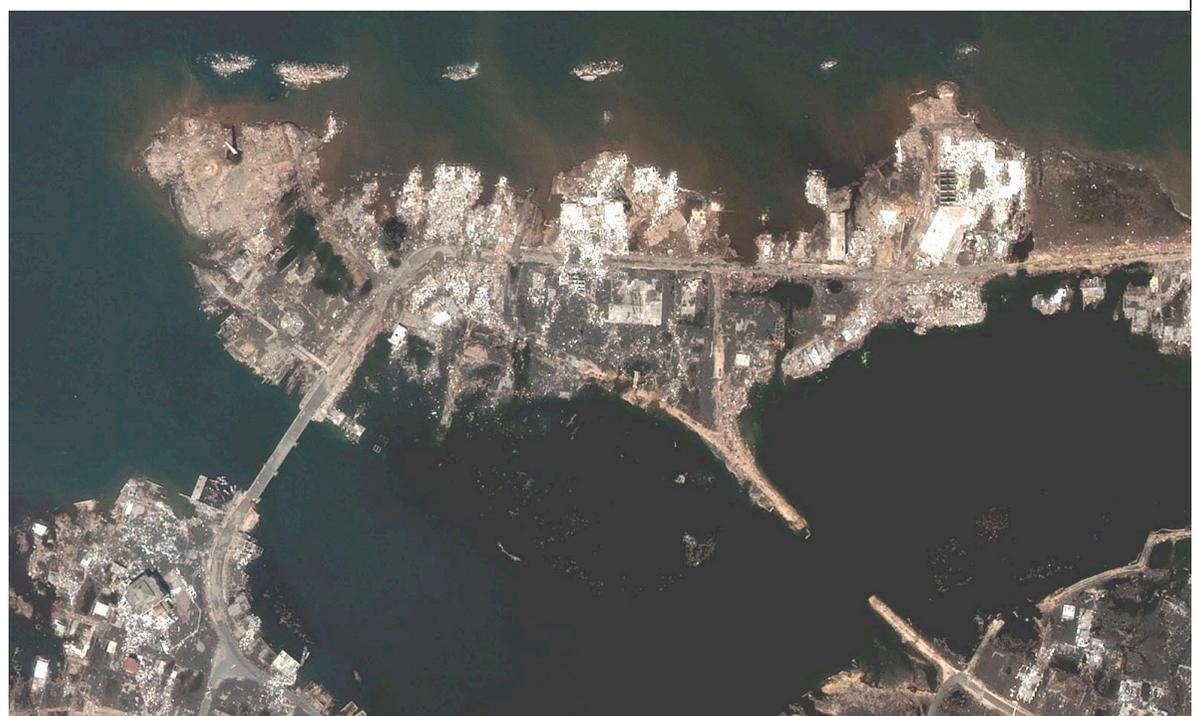


Juste avant l'arrivée de la première vague:  
la mer se retire sur 400 mètres

Plage de Kalutara au Sri Lanka



Banda Aceh avant  
et après le passage  
du tsunami



DIGITALGLOBE™

## Banda Aceh: Grand Mosque (Before)



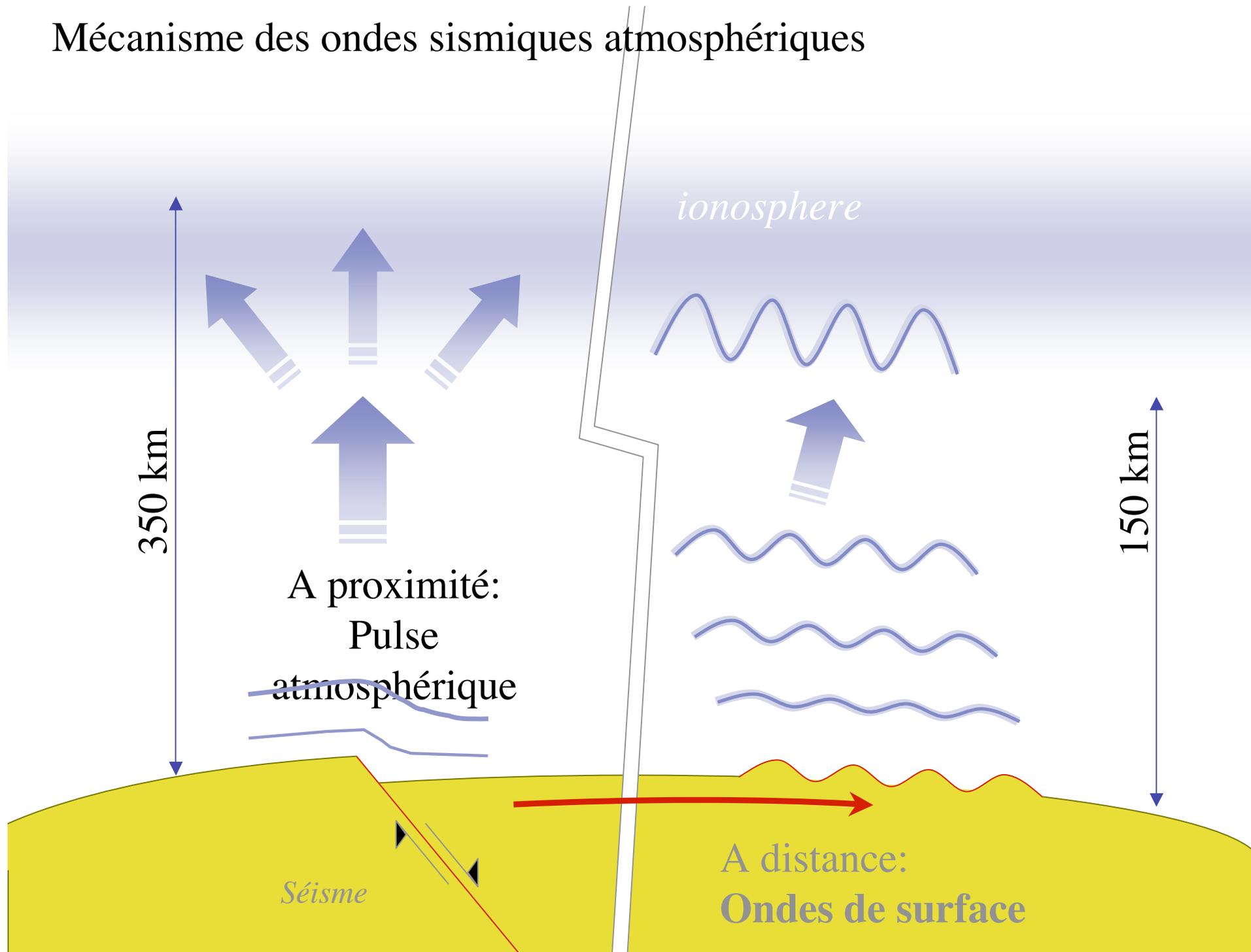
QuickBird Natural Color Image  
23 June 2004

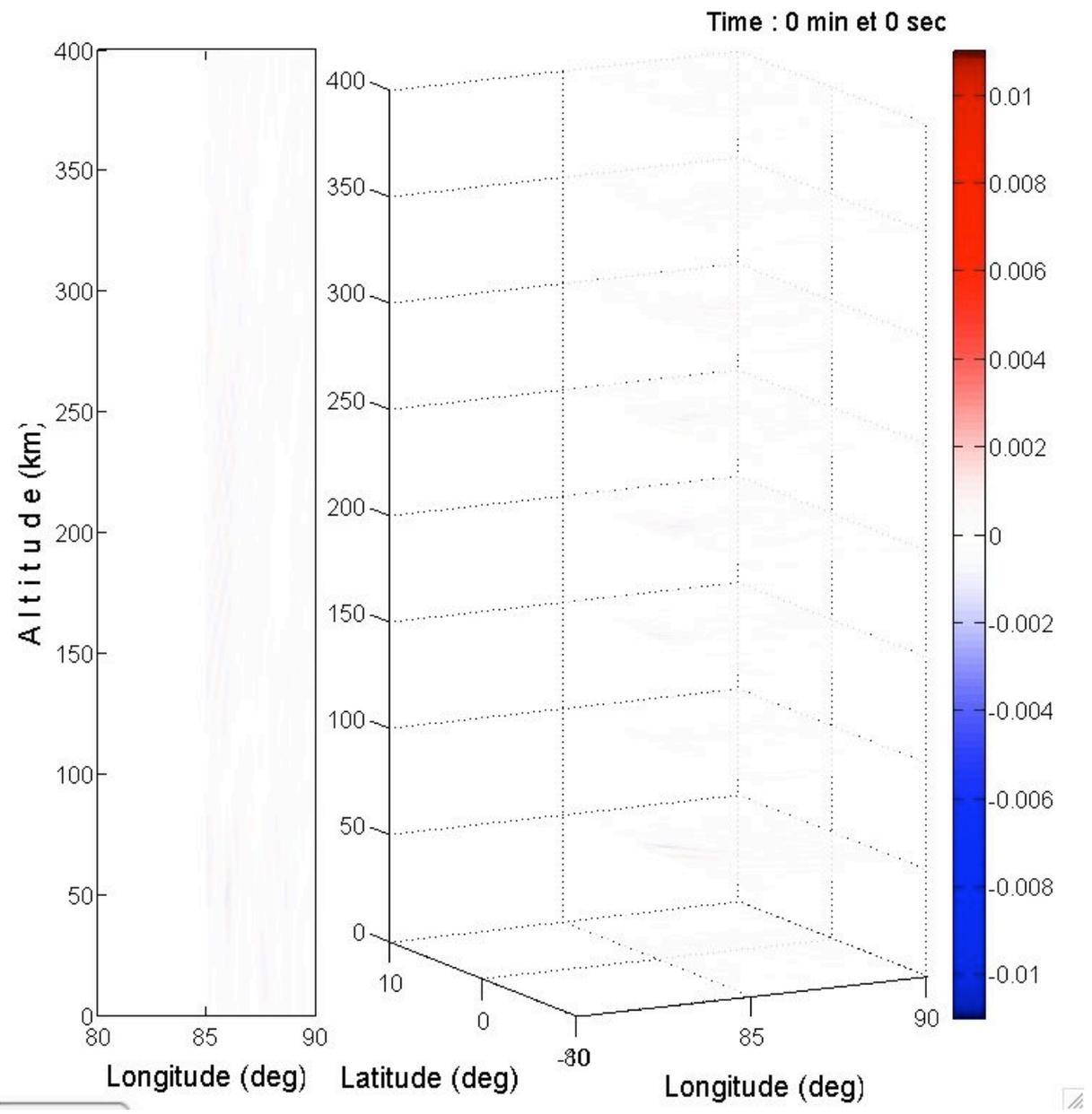
DIGITALGLOBE™

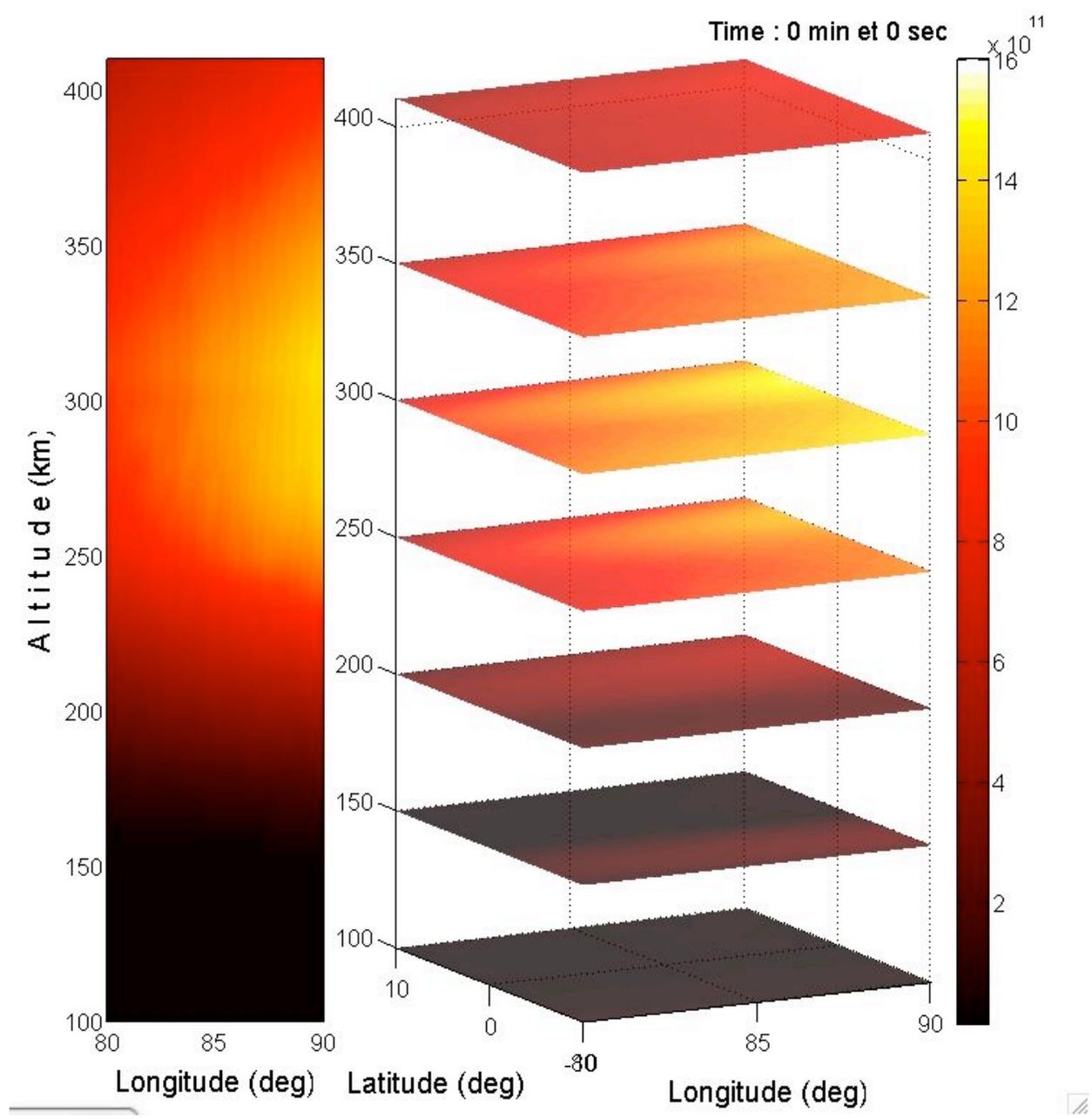
## Banda Aceh: Grand Mosque

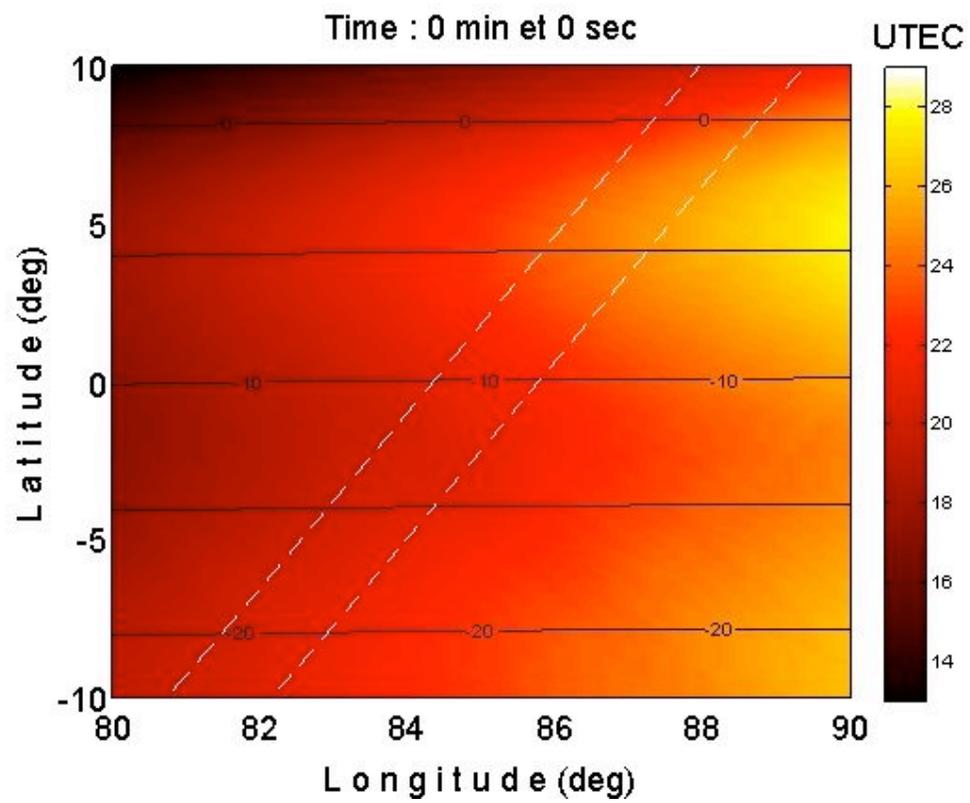


# Mécanisme des ondes sismiques atmosphériques









# TEC... Et Jason Topex

