CM2: GNSS

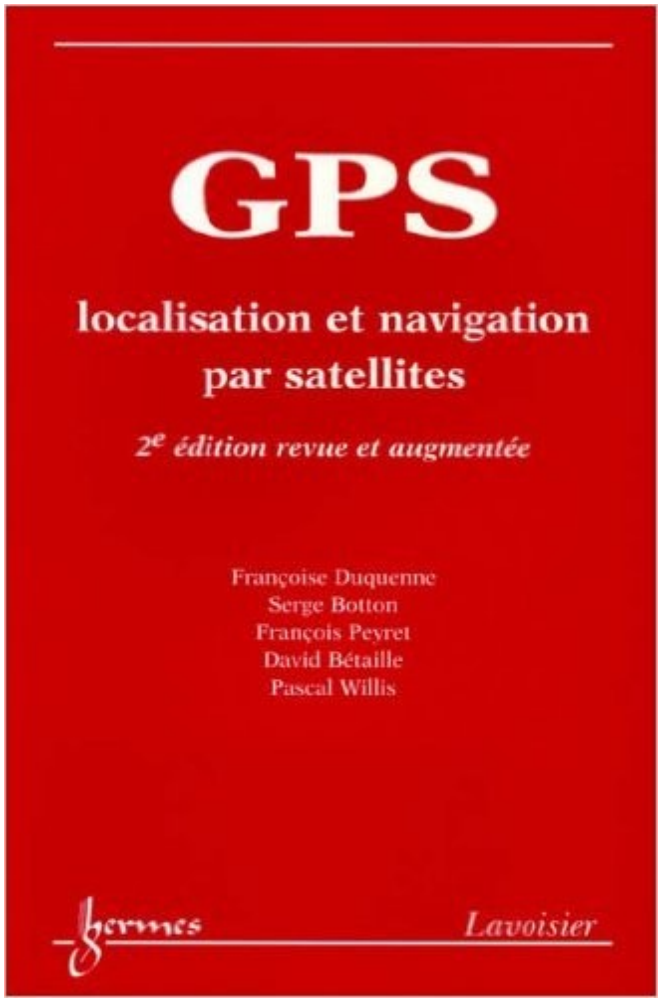
General Knowledge, processing, accuracy, precision, ...

Fundamental ideas

- Code / phase of GNSS raw signal
- Relative / absolute positioning
- Simple and double differences
- Static and kinematic positioning
- Trilateration / triangulation
- Impact of geometry (Vertical / horizontal)

Bibliography

- Online presentation (moodle) of E. Doerflinger (3-4-5)



GNSS (Global Navigation Satellite System)

General name of satellite navigation systems with global coverage of positioning for civil use

Navigation System
(GPS, GLONASS)
+
Augmentation of performance system
=
G N S S (Future GPS ?, Future GLONASS ?, Galileo, Compass, …)

Needed requirements :

- Provide navigation informations continuously and in real tim
- Provide a positioning confidence
- Present guarantees and responsibilities for possible service failure

General Knoledge: GNSS

- GPS: **Military** global postitioning system (USA)
- GLONASS: **Military** global postitioning system (Russia)
- BEIDOU: Chinese positioning system (regional)
- GALILEO: **Civil** global postitioning system (EU)

Augmentation of performances System

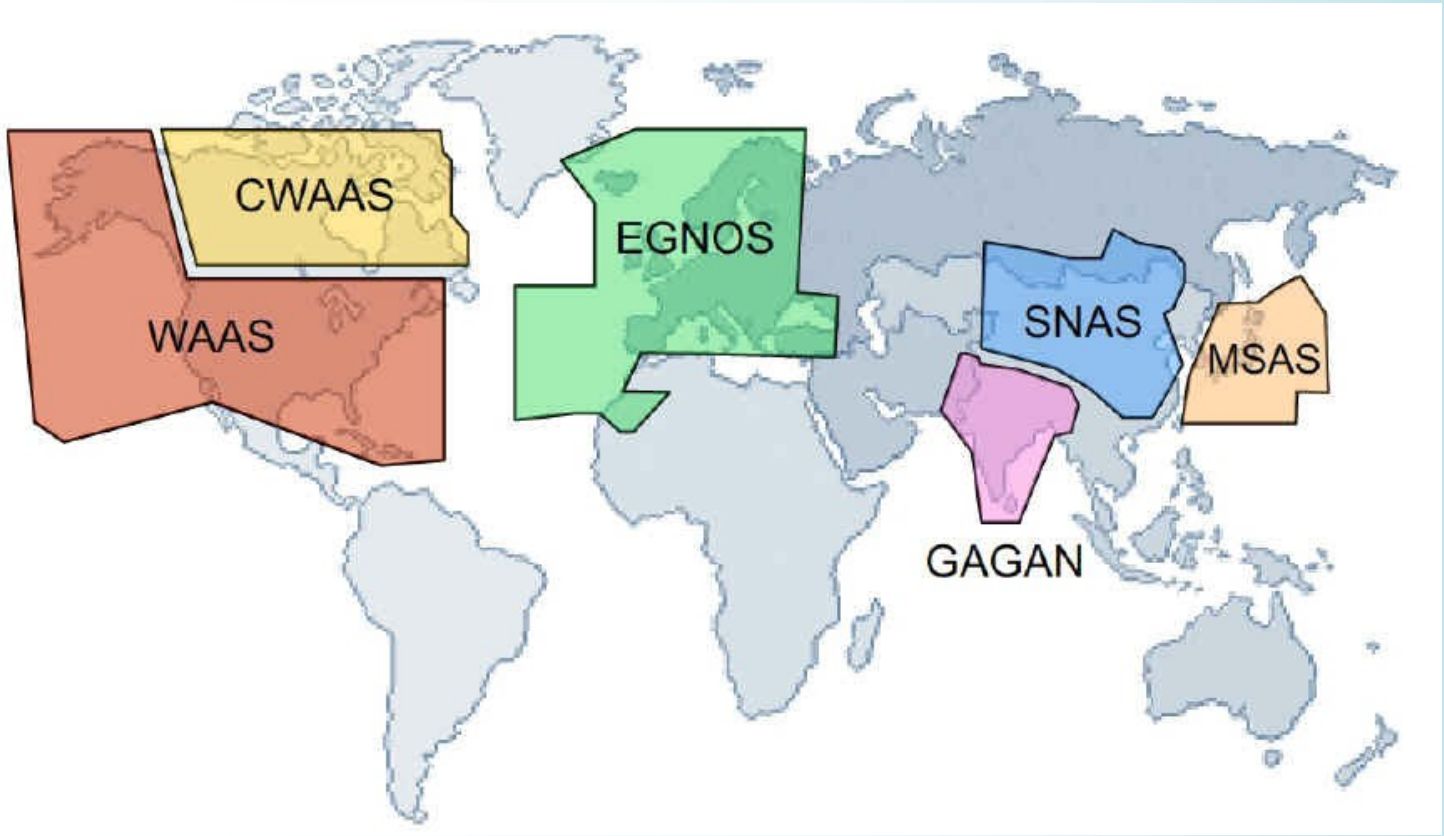
Existing satellite systems can be completed by so-called augmentation or overlay systems which provide in real time correction to increase the accuracy (cm) and also information about the integrity of the corrections.

The overlay systems are classify in three categories, depending on the way of the correction are transmitted:

- Overlay from satellites :
  - SBAS (Satellite-Based Augmentation System)
  - WAAS (Wide Area Augmentation System)
  - EGNOS (European Geostationary Navigation Overlay Service)
  - MSAS (Multi-functional Satellite Augmentation System)
- Overlay from ground-systems : GBAS (Ground-Based Augmentation syst.)
  - DGPS (differential GPS)
  - pseudolites (pseudo-satellites au sol)
- Overlay from on-board system (plane) :
  - ABAS (Aircraft Based Augmentation System)

Systèmes d'augmentation de performances : SBAS

Première étape dans le sens d'établir un système GNSS mondial.



EGNOS est un système de correction du GPS assurant la couverture d'une zone centrée sur l'Europe. Ce système a pour vocation de rendre disponible en **temps réel**, grâce à des satellites géostationnaires de télécommunication, **des corrections différentielles** (troposphère, ionosphère) ainsi qu'une information **d'intégrité**. L'objectif d'EGNOS est donc de permettre l'utilisation du GPS en toute sécurité (guidage d'un avion par GPS en phase finale d'atterrissage).

General knowledge: GNSS

- All the navigation system are technical equivalent
- Almost the same accuracy
- Passive (multi-user)

Specification for the positioning :

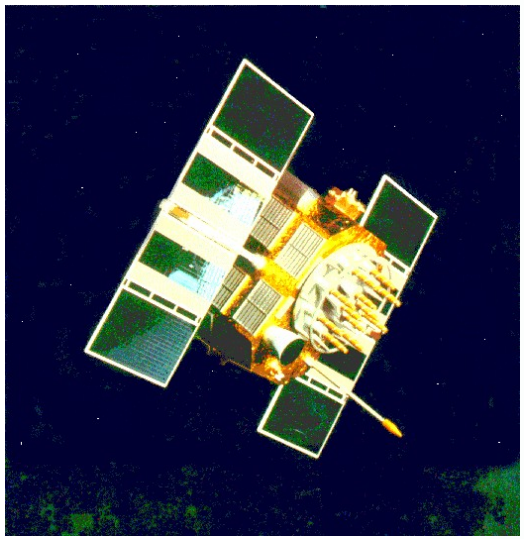
Position and speed of a moving plateform:

- at any moment
- everywhere
- in a global reference frame (WGS84) with an accuracy better than 10 m.

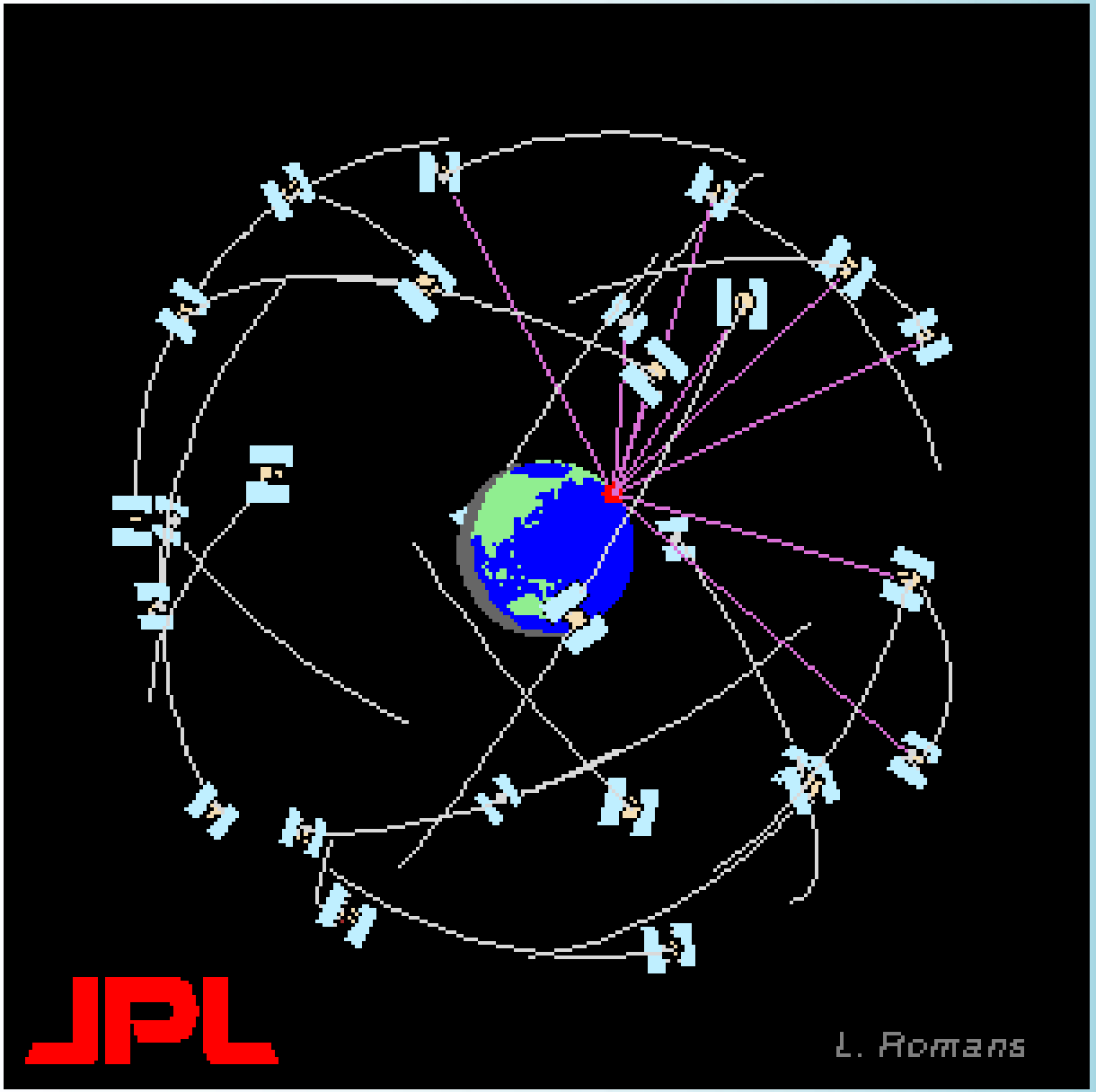
Time with a microsecond accuracy

Spatial segment

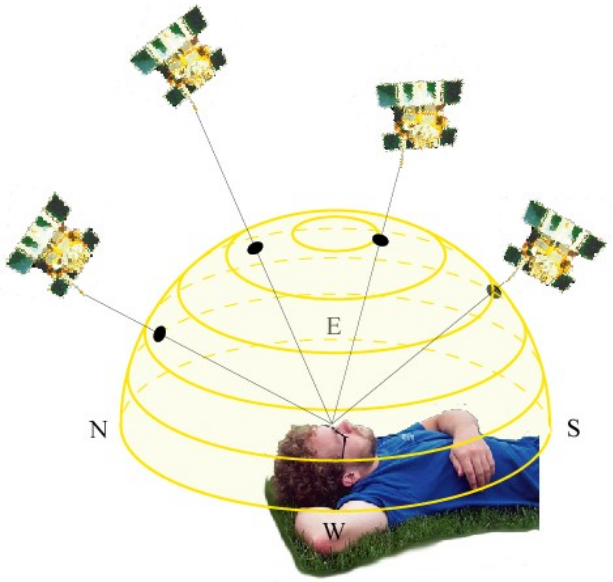
GPS Satellites



Constellation : 28 satellites
Altitude : 20200 km
Période : 11h 58mn
Orbite : almost circular
55° / equator



Skyplot GPS



Plan du ciel

Point: Lacaune

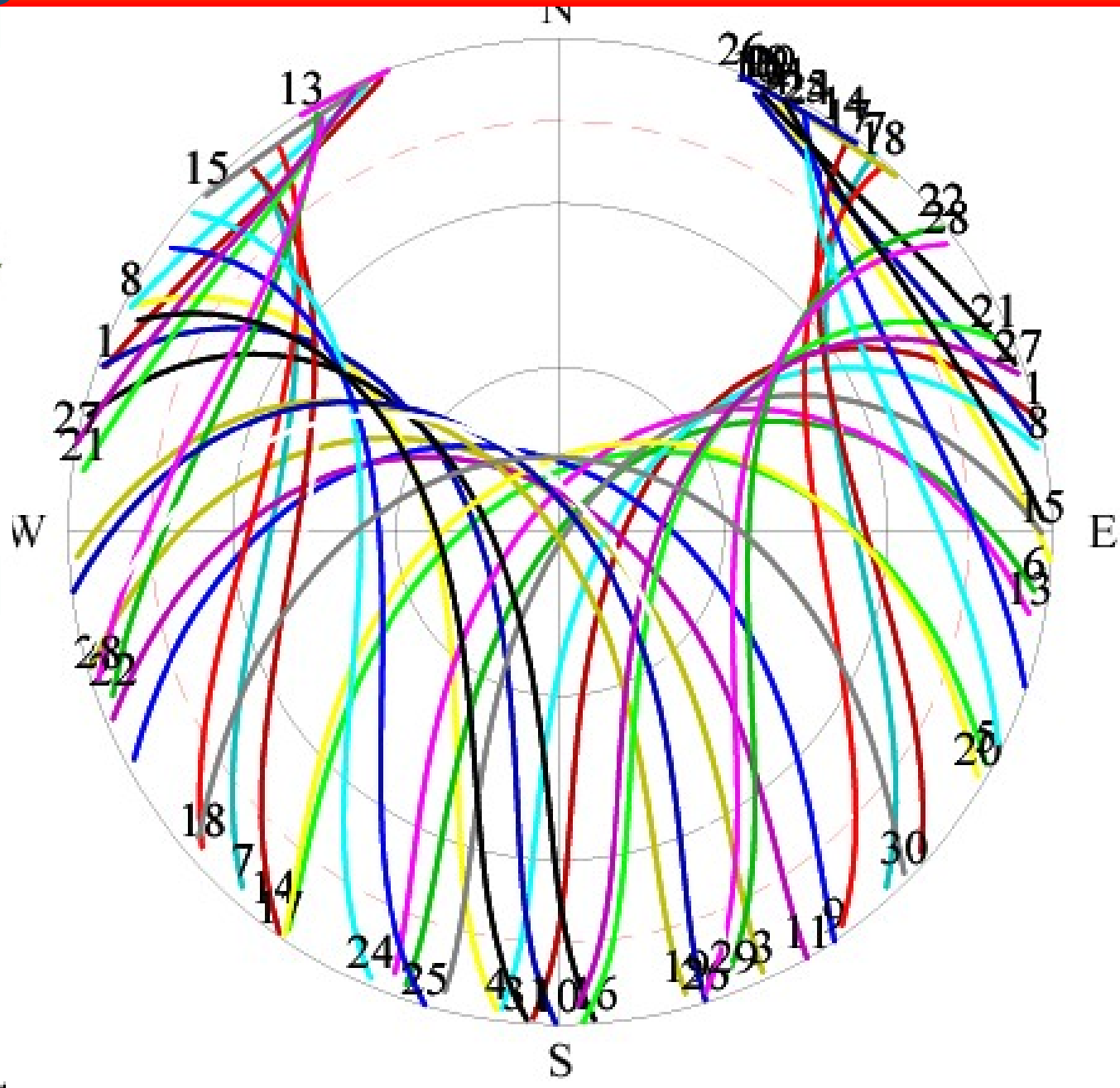
Date: Vendredi 11 Juin 2004

Lat 43:41:0 N Lon 2:44:0 E

Seuil d'élévation 15 (deg)

28 Satellites considérés :

1 3 4 5 6 7 8 9 10 11 13 14
15 16 17 18 19 20 21 22 24
25 26 27 28 29 30 31



Temps : 24 heures

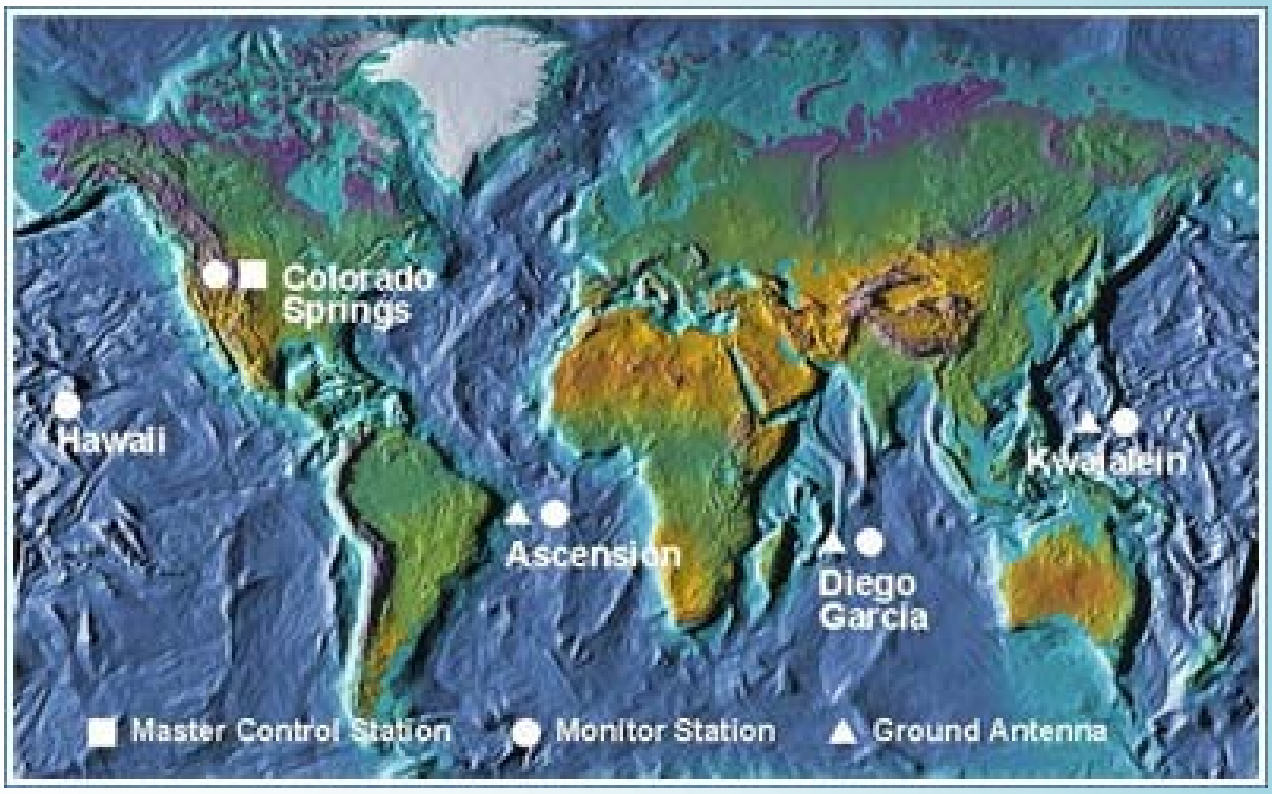
Control segment

The control segment depends on the USA army and have to keep every time the GPS system operating. 5 ground stations follow every time the GPS satellites, control and modify if necessary the orbits and transmit the information for the navigation message (orbits, clock).

The 5 ground stations:

- Colorado Spring
- Ascension
- Diego Garcia
- Kwajalein
- Hawaii

Colorado Spring is the central station, where the GPS time is calculated.



The user segment

The user segment represent all the user of the GPS system.

Numerous different type of GPS are now available depending on the application and the needed accuracy.

The price and bulk can be now as low a few euros and up to a few thousand euros for consuming users.









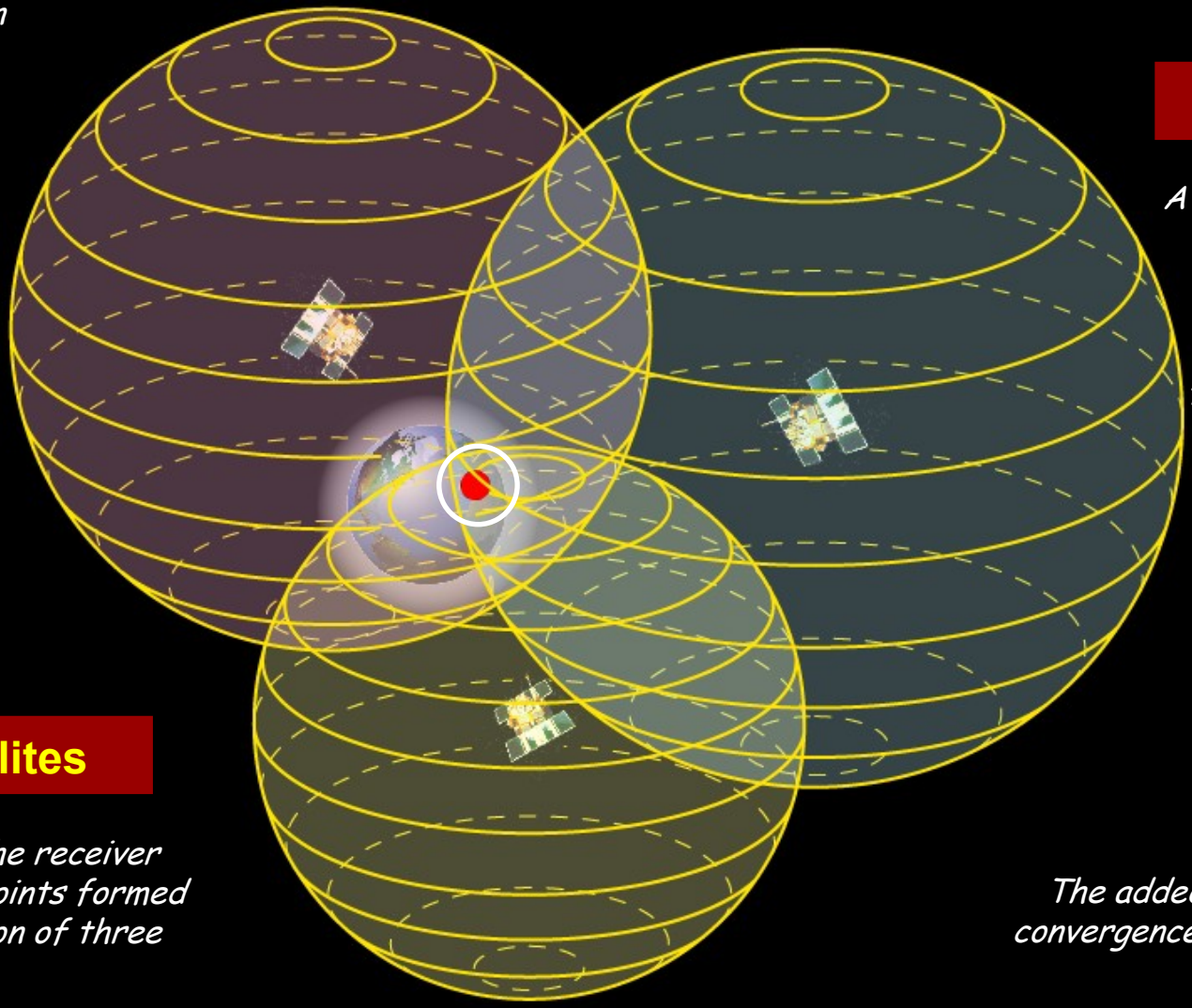
PRINCIPLE OF GPS POSITIONING BY TRILATERATION

With 1 Satellite

The receiver is on a sphere of a diameter D centered on the satellite.

With 2 Satellites

The receiver is on a circle formed by the intersection of the two spheres.



With 3 Satellites

The position of the receiver can be only two points formed by the intersection of three spheres

With 4 Satellites

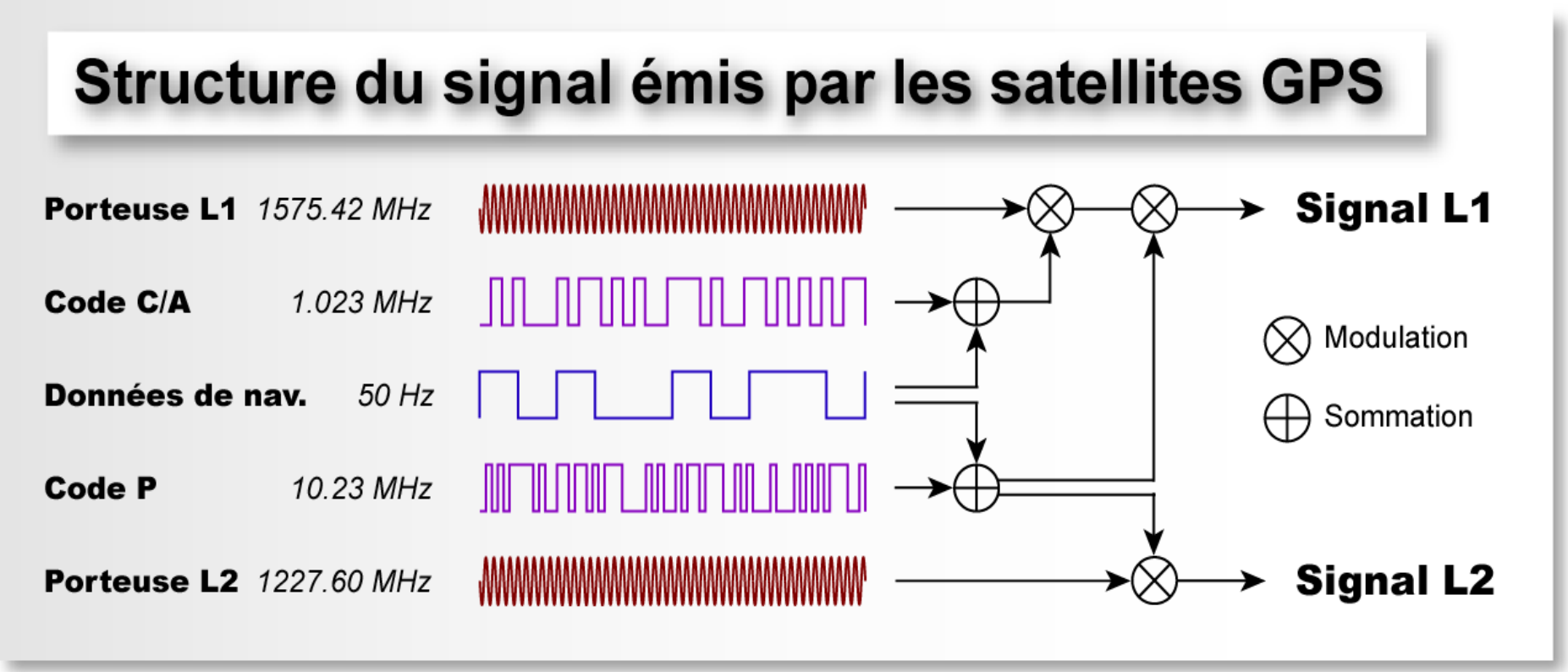
A forth satellite is needed for the sync of the clock (satellite / receiver).

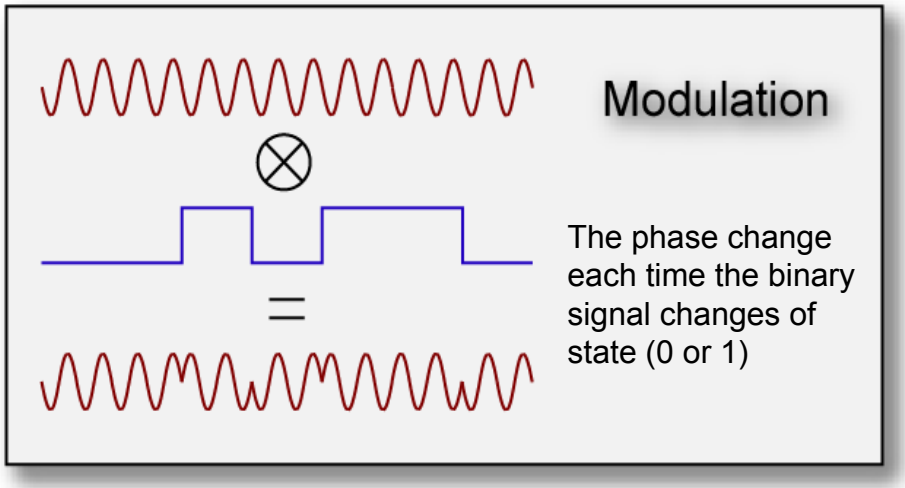
It allow the diffusion of the GPS time and remove outliers

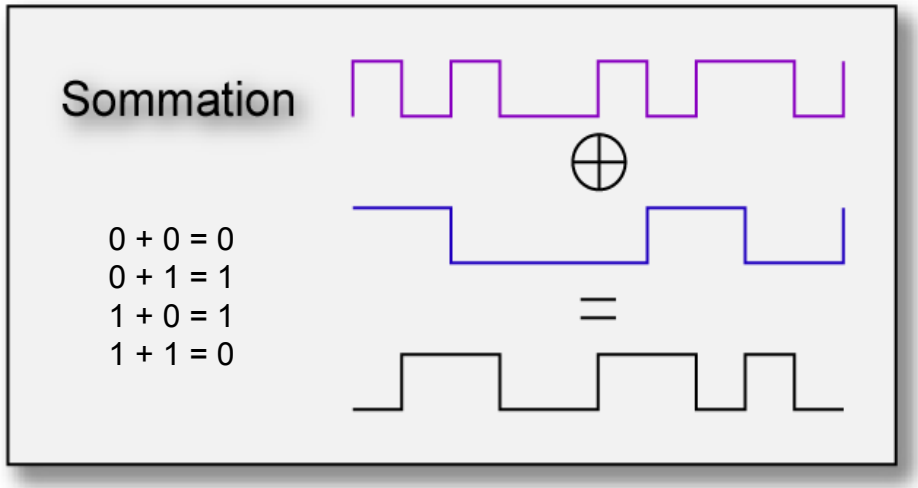
… and more

The added satellites allow a faster convergence to the nominal accuracy.

Structure of GPS signal





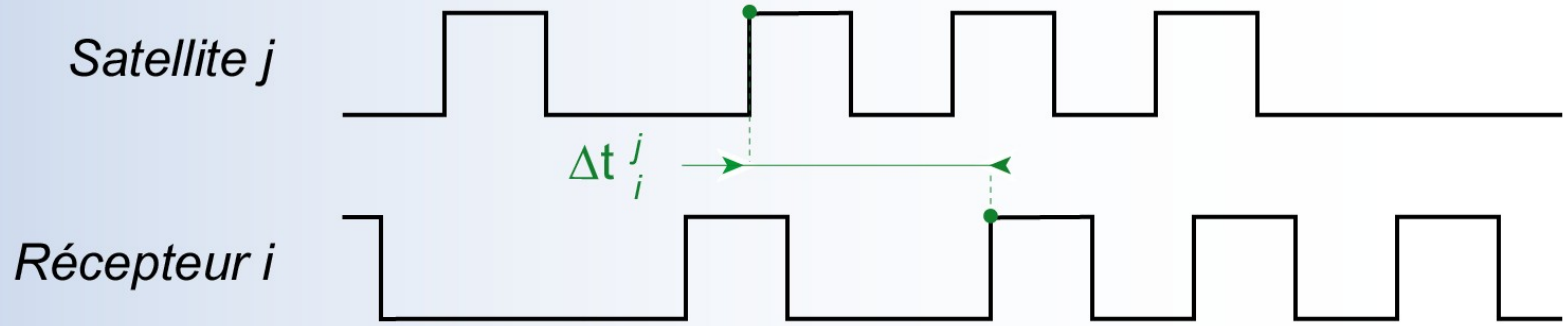


Phase et code

Temps du parcours du signal Δt_i^j

Le récepteur i compare le signal qu'il reçoit du satellite j avec son propre signal qu'il génère, sur les codes C/A ($\lambda_{C/A}$ ~ 300 m) et P (λ_P ~ 30 m)

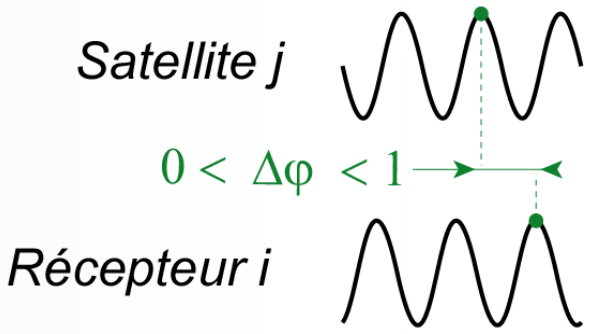
$$\Delta t_i^j = t_i - t^j$$



Déphasage $\Delta\varphi_i^j$

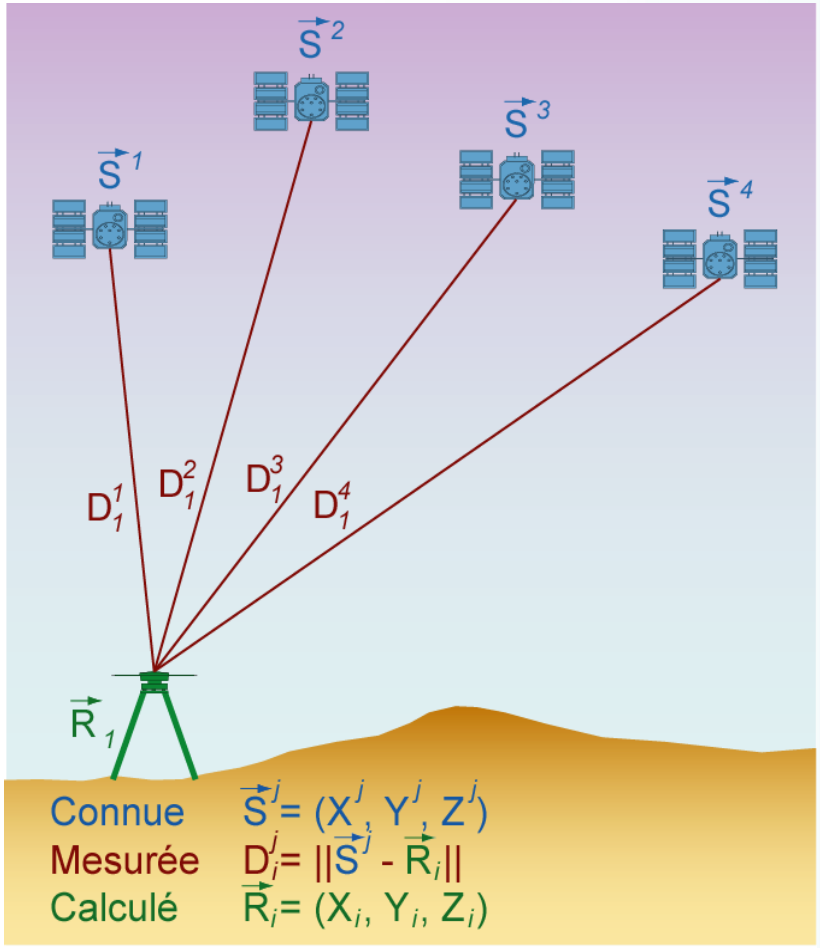
Le récepteur compare (à *tr*) le signal qu'il reçoit du satellite *j* avec son propre signal *i* qu'il génère sur la porteuse

λ_{L1} ~ 19.0 cm et λ_{L2} ~ 24.4 cm



2 POSITIONING MODES

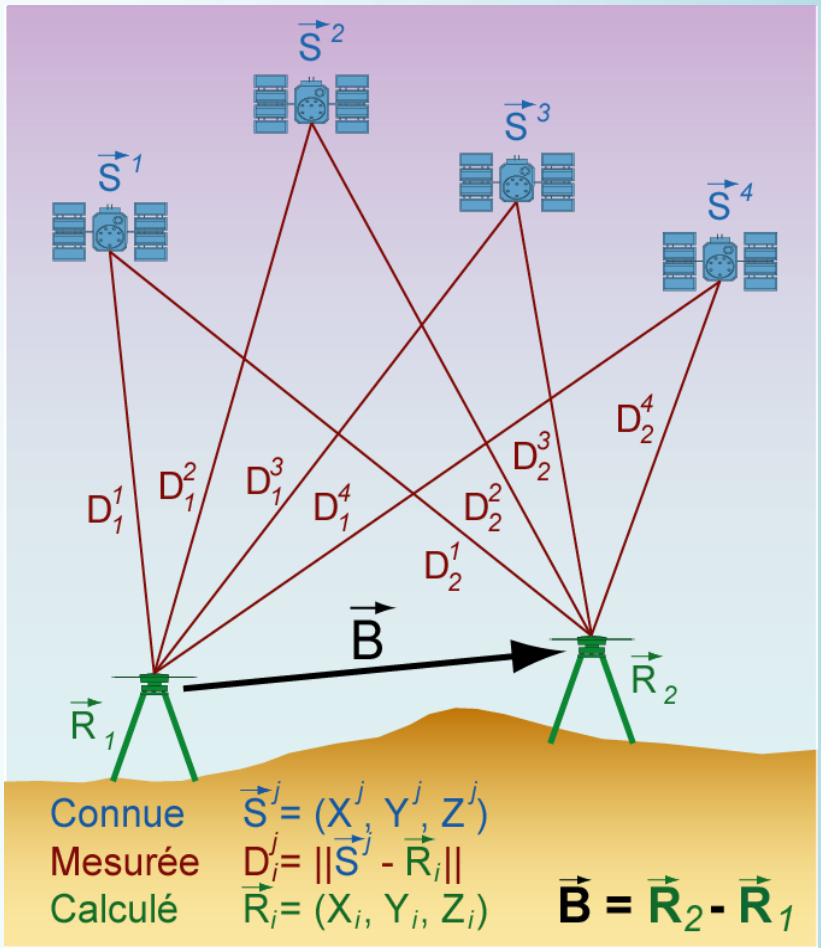
Absolute positioning



Précision $\vec{R}$: 10 à 30 m

2 DIFFERENT PRECISION

Relative positioning



Précision $\vec{R}_i$: 10 à 30 m

$\vec{B}$: 2 à 20 mn

Examples

Absolute positioning







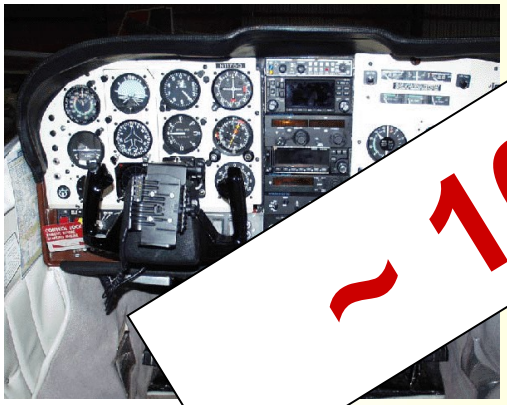
Relative positioning

Examples

Absolute positioning









~ 10 m





Relative positioning





~ mm



Differential measurements

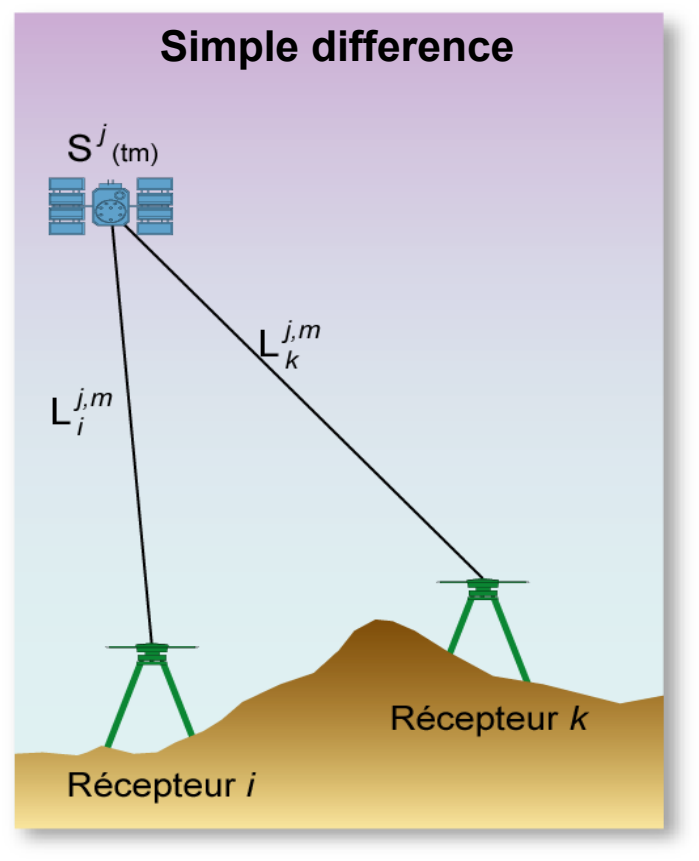
To resolve integer ambiguities and remove clock error, the direct phase measurements are not processed but a simple difference of the phase measurements

Simple difference : Satellite clocks errors are removed

The simple difference is at on time, the difference of phase measurements between one receiver and two satellites. Satellite clock errors are remove

But simple differences have specific requirements:

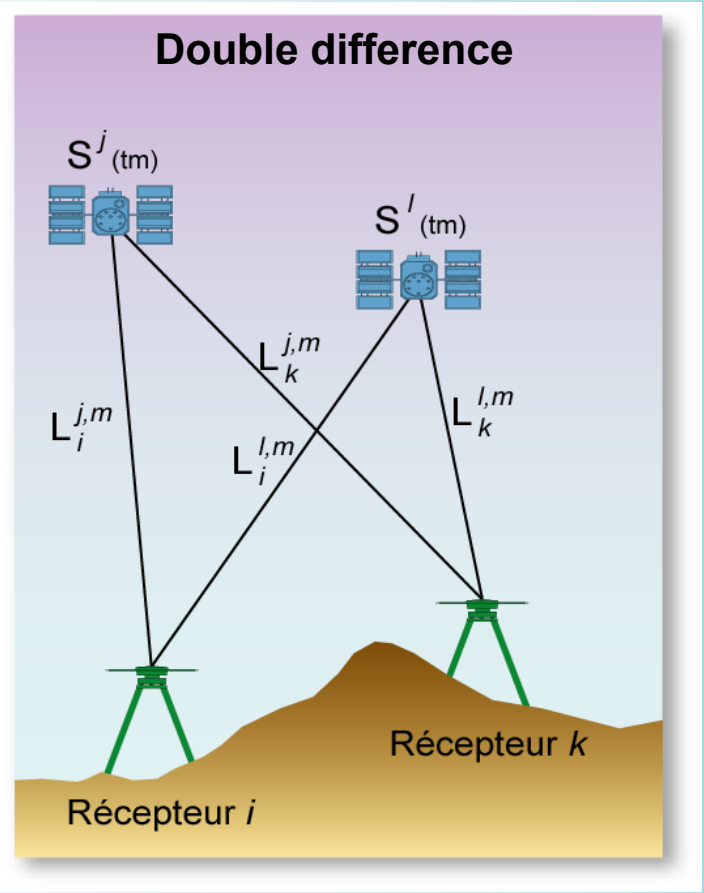
- Two receivers measuring at the same time are needed.
- The results of the GPS processing will not be the the position (coordinates) of the receivers but the distance (base line) between the twi receivers : relative (or differential) positioning.



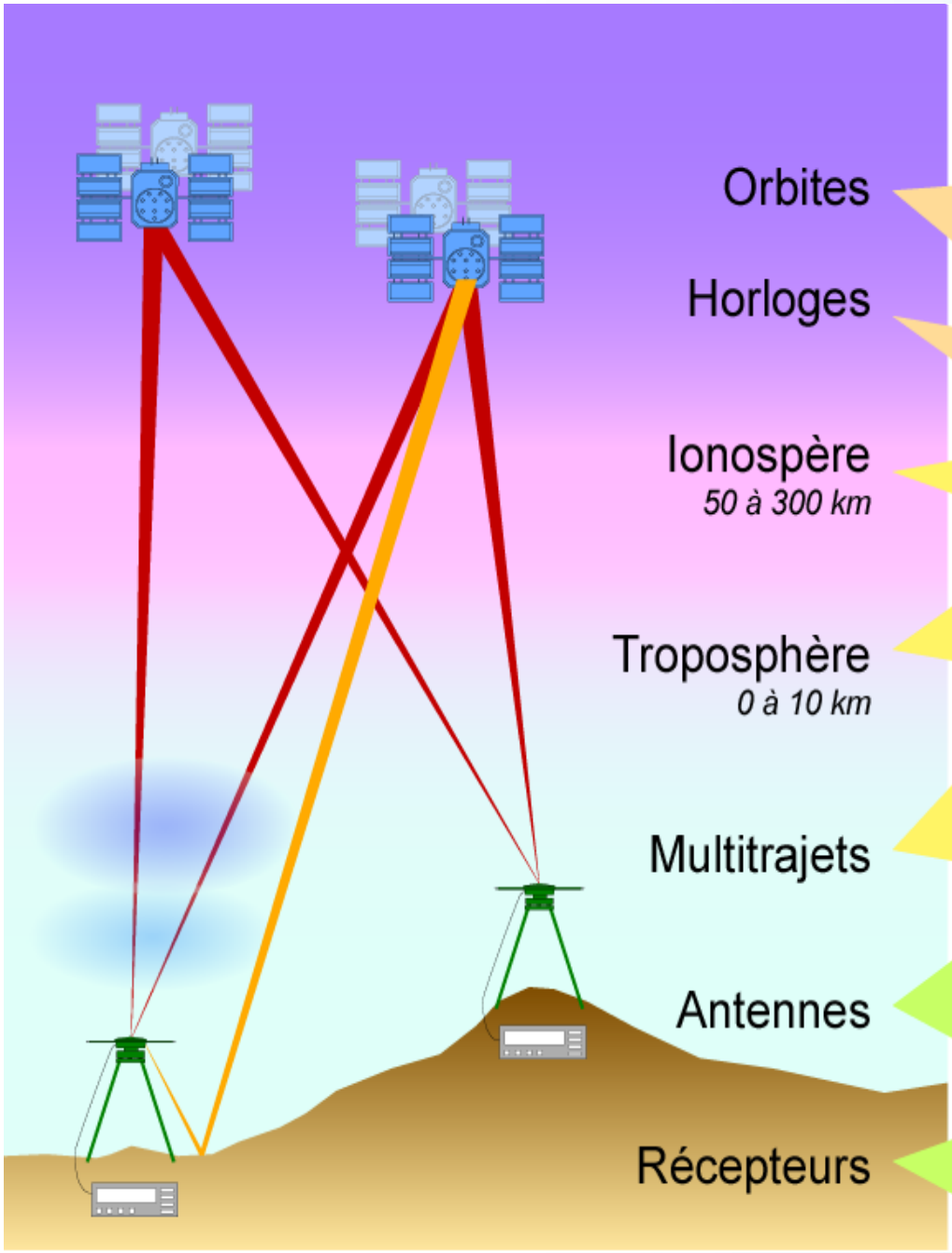
Differential measurements

To resolve integer ambiguities and remove clock error, the direct phase measurements are not processed but a simple difference of the phase measurements

The double differences are the differences of two simple differences at one time between two receivers and two satellites. The combination allows to reduce the clocks errors, the orbit errors and the atmospheric perturbations

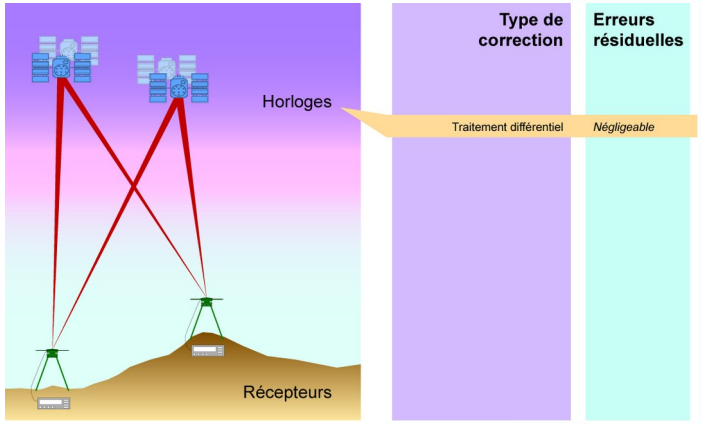


THE DIFFERENT ERROR SOURCES BEFORE AND AFTER DIFFERENTIAL DATA PROCESSING



	Type de correction	Erreurs résiduelles
Orbites	Ephémérides précises (recalculées)	*Négligeable*
Horloges	Traitement différentiel	*Négligeable*
Ionosphère *50 à 300 km*	Récepteurs bi-fréquences	*Négligeable*
Troposphère *0 à 10 km*	Estimation de paramètres troposphériques	*5 à 10 mm (vertical)*
Multitrajets	Choix du site (dégagé) Antenne avec plan absorbant Longues observations (24 h)	*< 1 mm*
Antennes	Migration du centre de phase Excellent centrage de l'antenne Excellente mesure de la hauteur	*< 2 mm* *< 1 mm* *< 1 mm*
Récepteurs	Bruit propre aux récepteurs Erreurs d'horloges	*Négligeable*

Satellites clocks



1 ns ~ 0.3 m

Absolute positioning :

- The **receiver clocks** are not accurate. A forth satellite is needed to be estimate the clock error and drift.
- The atomic **satellite clocks** are accurate and stable with a small drift.

Relative Positioning :

- The remaining **receiver clocks** errors are reduced by the double difference combination.
- The remaining **satellite clocks** errors are reduced by the simple differences combination.

IGS Product Table [GPS Broadcast values included for comparison]

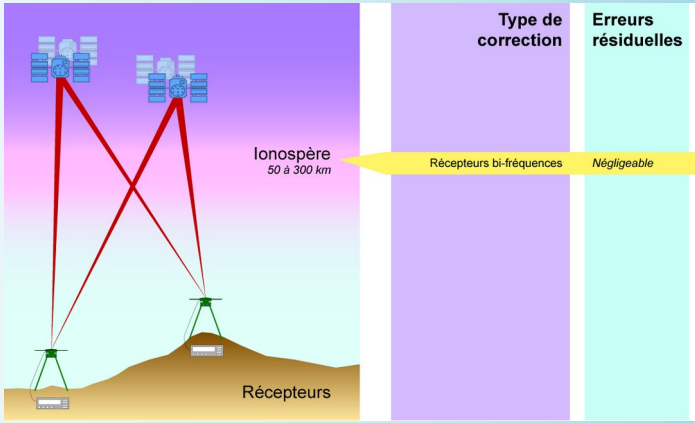
	Accuracy	Latency	Updates	Sample Interval
GPS Satellite Ephemerides				
Broadcast	~7 ns	real time	--	daily
Ultra-Rapid (predicted half)	~5 ns	real time	four times daily	15 min
Ultra-Rapid (observed half)	~0.2 ns	3 hours	four times daily	15 min
Rapid	0.1 ns	17 hours	daily	15 min
Final	<0.1 ns	~13 days	weekly	15 min

The ionosphere

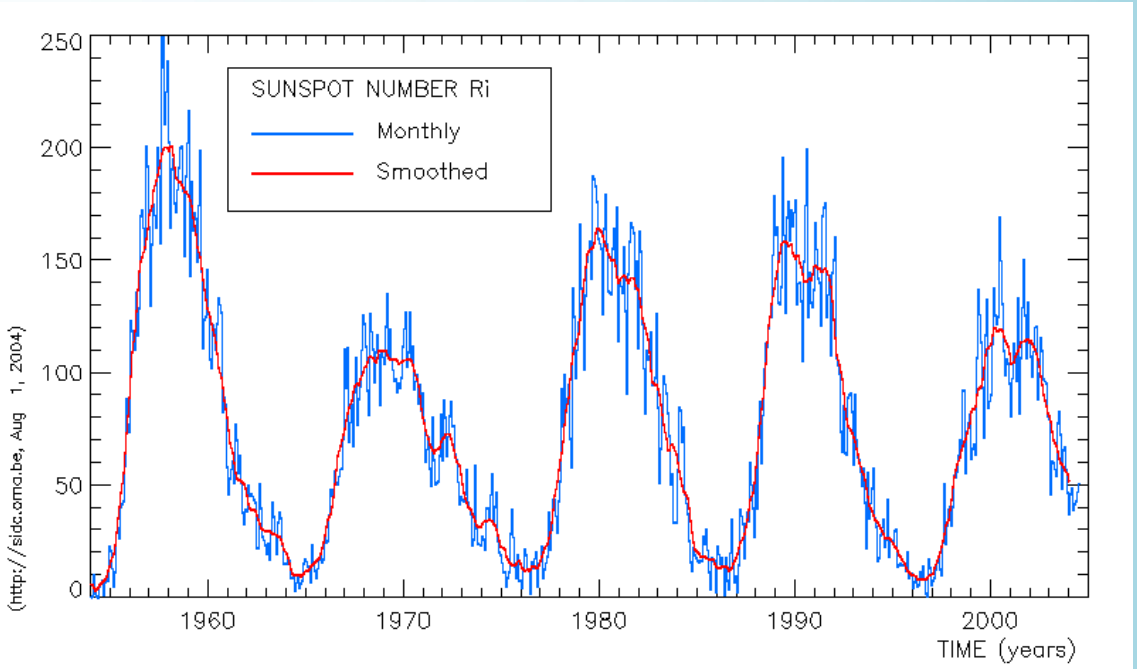
The ionosphere is a high layer of the atmosphere between 50 and a few hundred kilometers. The ionosphere is plenty of charged electrical particulates which interact (dispersive effect) with the EM radio waves send by the GPS satellites by lengthen the travel time.

The composition of the ionosphere is not constant and changes because of :

- **The latitude**: the ionosphere delay is larger near the pole and the equator.
- The **solar activity**: every ~ 11 ans, the sun has a enhanced activity with a large emissions of solar wind (carrying charged particulates).
- The **season:** more ionospheric delay in summer.
- The **day or the night**: less ionospheric delay during the night.



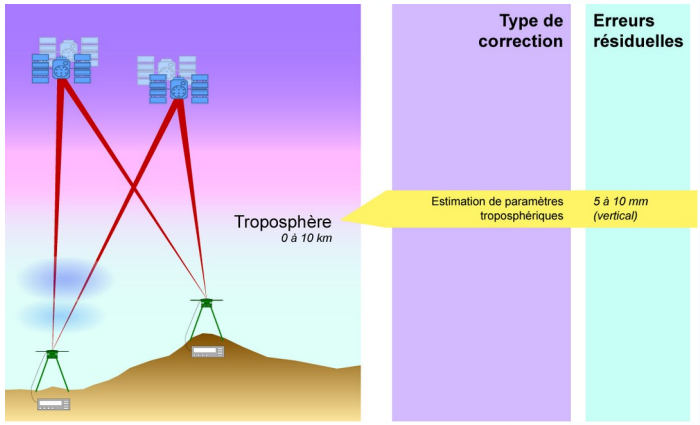


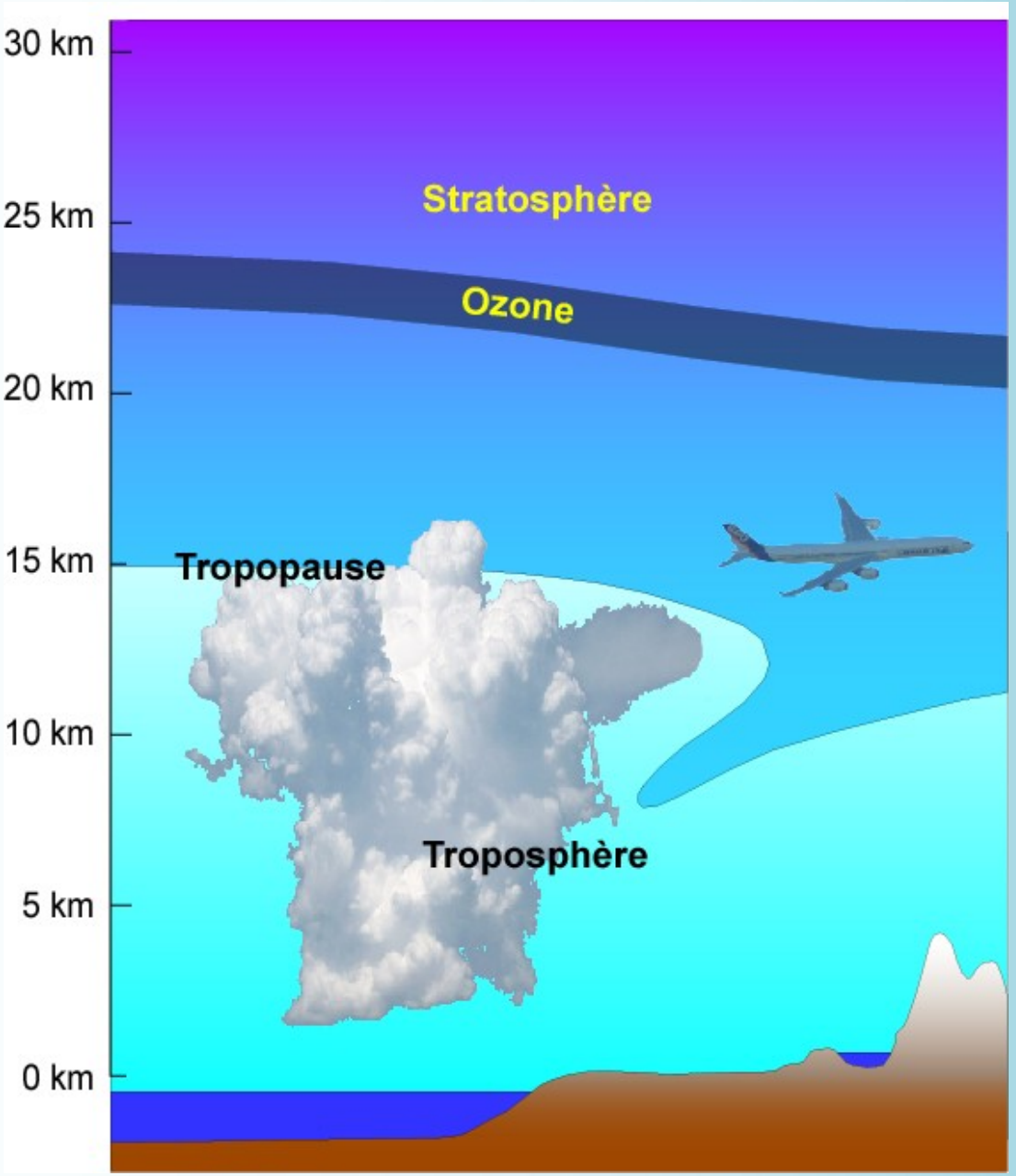


The troposphere

The troposphere is the lowest layer of the atmosphere between the ground level and ~ 10 km of altitude.

The troposphere is not dispersive. The tropospheric delay does not vary with the frequency of the wave: in opposite the the ionospheric delay, the dual frequency measurements can not be used to reduce or remove the tropospheric delay.

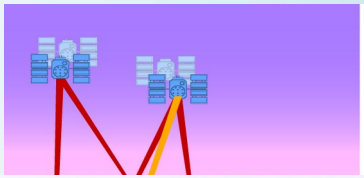




The multipath

The multipaths are additional indirect GPS signals reflected by nearby the ground, walls or trees.

- With code processing, the error can reach tens of meters.
- With the phase processing, the error reach tens of centimeters with numerous cycle slip.



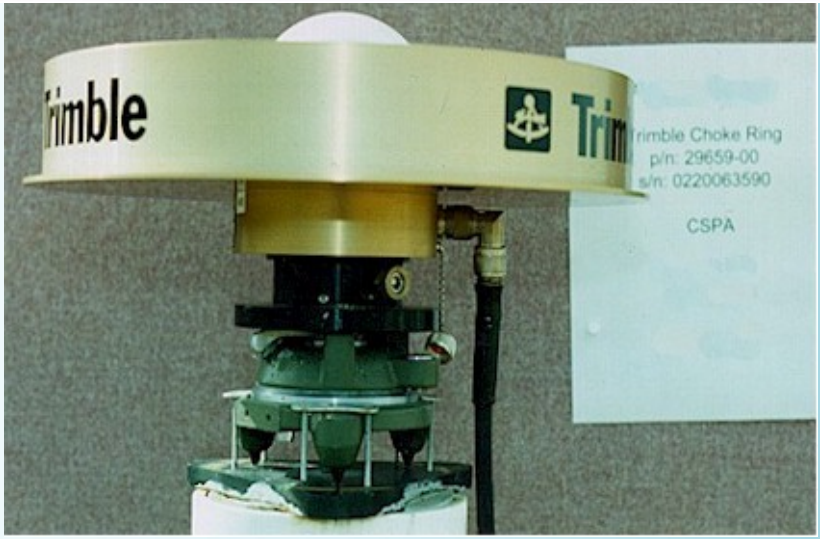
Type de correction	Erreurs résiduelles



Almost no direct simulation of the impact of the multipath can be done as it depend for each site of the local geometry of the surface.

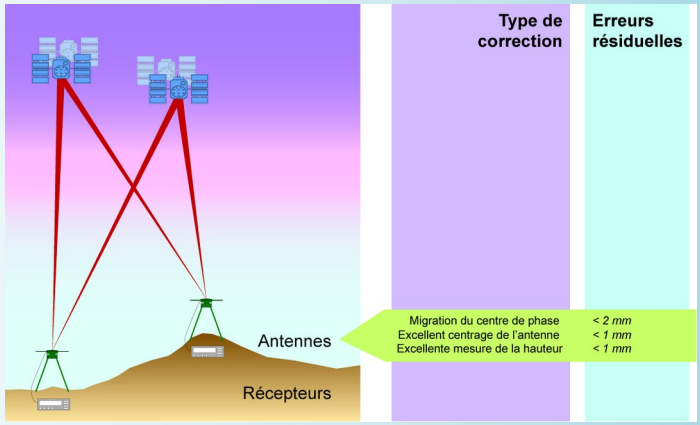
To reduce the multipath effect, one can :

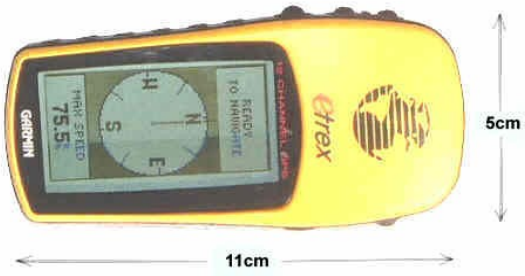
- Choose a site without reflecting (wall, rocks) nearby surfaces.
- Choose an antenna with an absorbing plate and some signal processing (on the polarization) included in the receiver.
- Remove observations at low elevation angle to remove low satellites observations highly sensitive to multipaths.
- Increase the duration of the observation to partially average the multipath effects as the geometry of the satellite is changing.



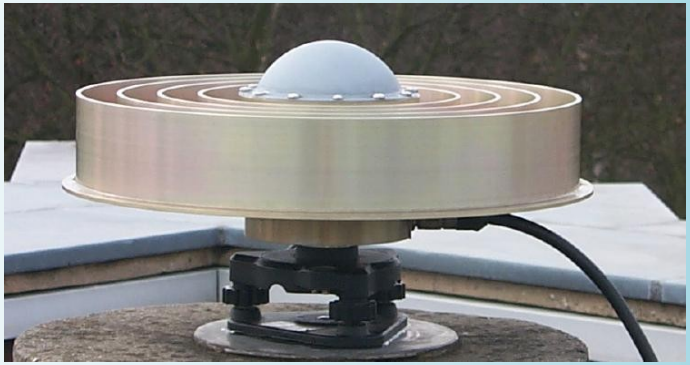
Antenna bias

The center of phase of the antenna must be know. High accuracy antenna have a well characterized center of phase.



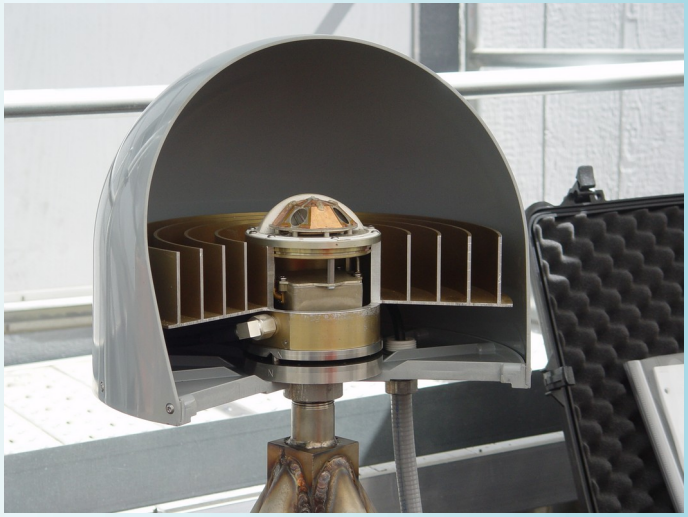










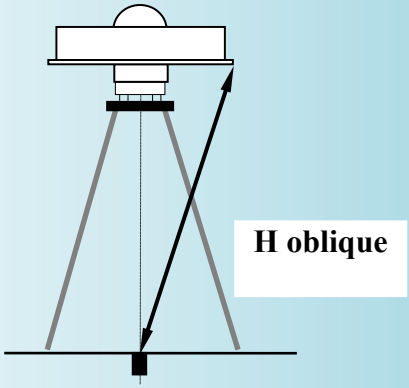


Height of the antenna bias

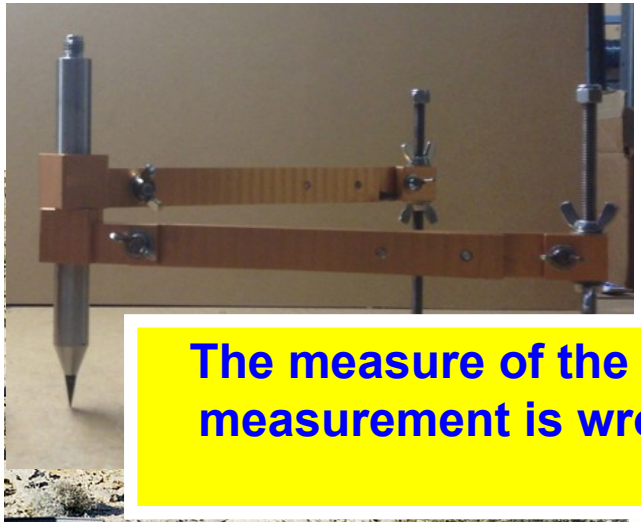




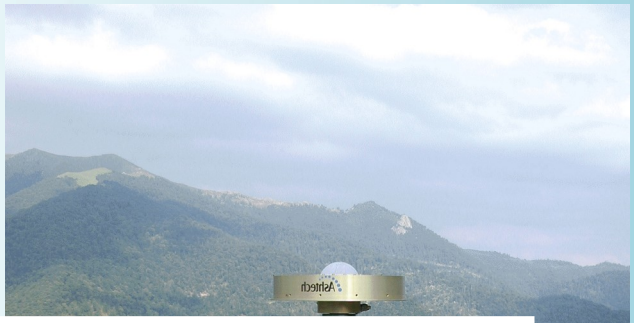
Tripod



Height of the antenna bias





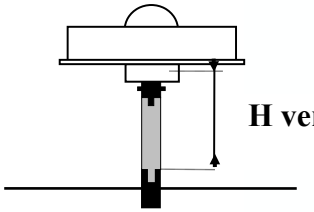


The measure of the height of the antenna is fundamental. If the height measurement is wrong, there is no way to correct the error afterward during the data processing.

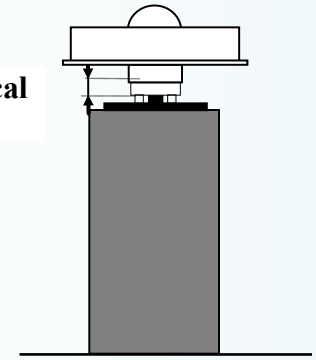




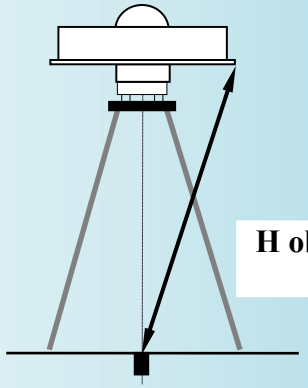




Pilar



Tripod



Les effets relativistes

Etant donné la précision des mesures et l'utilisation conjointe d'horloges situées à la fois sur le sol terrestre et à bord de satellites orbitant autour de la terre, une modélisation de l'effet relativiste est nécessaire.

Les principaux effets sont :

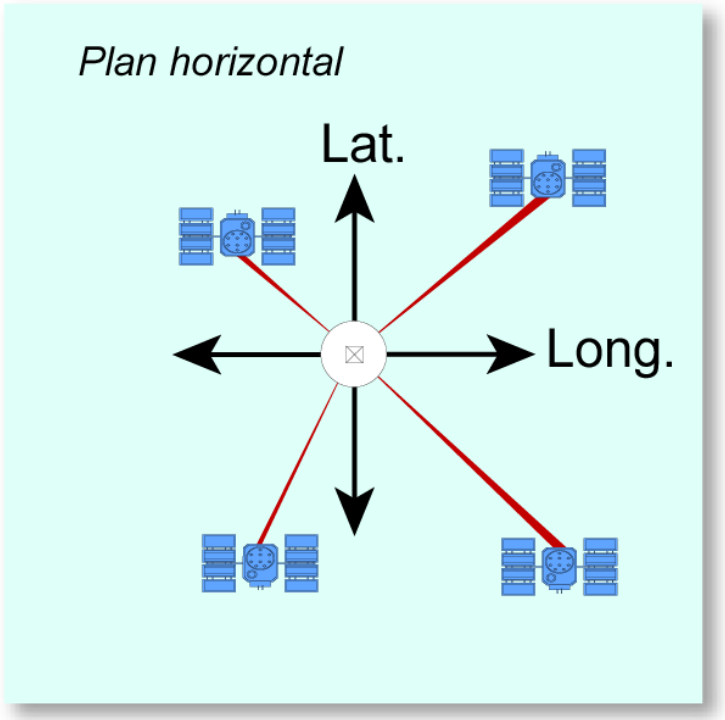
- Sur la conversion des temps propres des horloges à bord en temps GPS
- Sur la conversion pour les horloges des récepteurs au sol
- Sur la propagation des signaux entre satellites et le sol (courbures et retard dus à la gravitation terrestre)
- Sur le modèle dynamique de forces s'appliquant sur les satellites GPS
- Sur l'expression des positions dans un système géocentrique tournant

Ces effets sont pris en compte à différents niveaux :

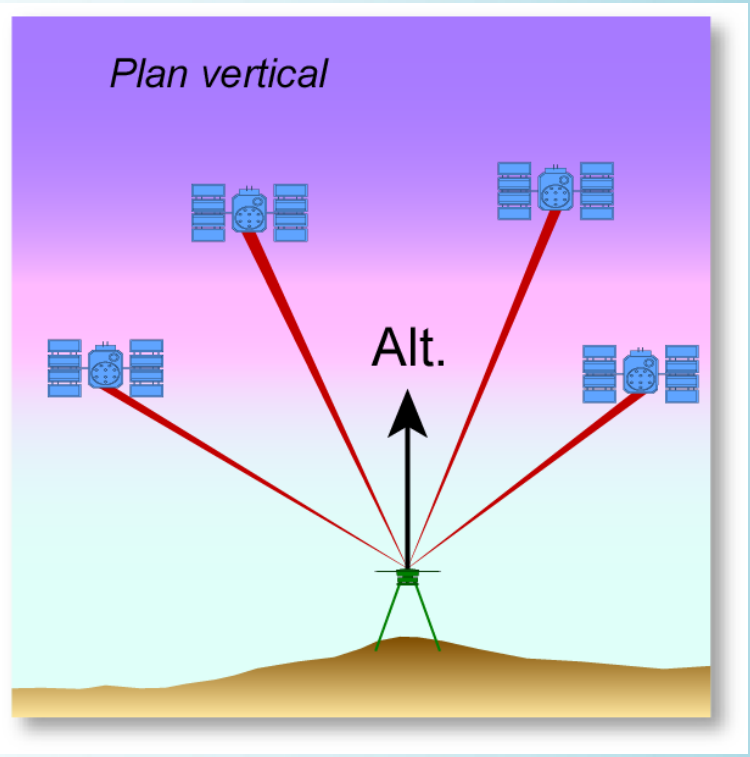
- Dans les éphémérides des satellites
- Dans les récepteurs (logiciel ou fréquence d'émission corrigée)
- Dans les paramètres d'horloge radiodiffusés
- Comme correction dans les relations d'observations

LE CAS PARTICULIER DE LA COMPOSANTE GPS VERTICALE

Projection des signaux satellites/récepteur dans les plans des composantes GPS qui les contient



Les composantes planimétriques sont contraintes suivant toutes les directions du plan



La composante altimétrique est uniquement contrainte par le demi-plan supérieur

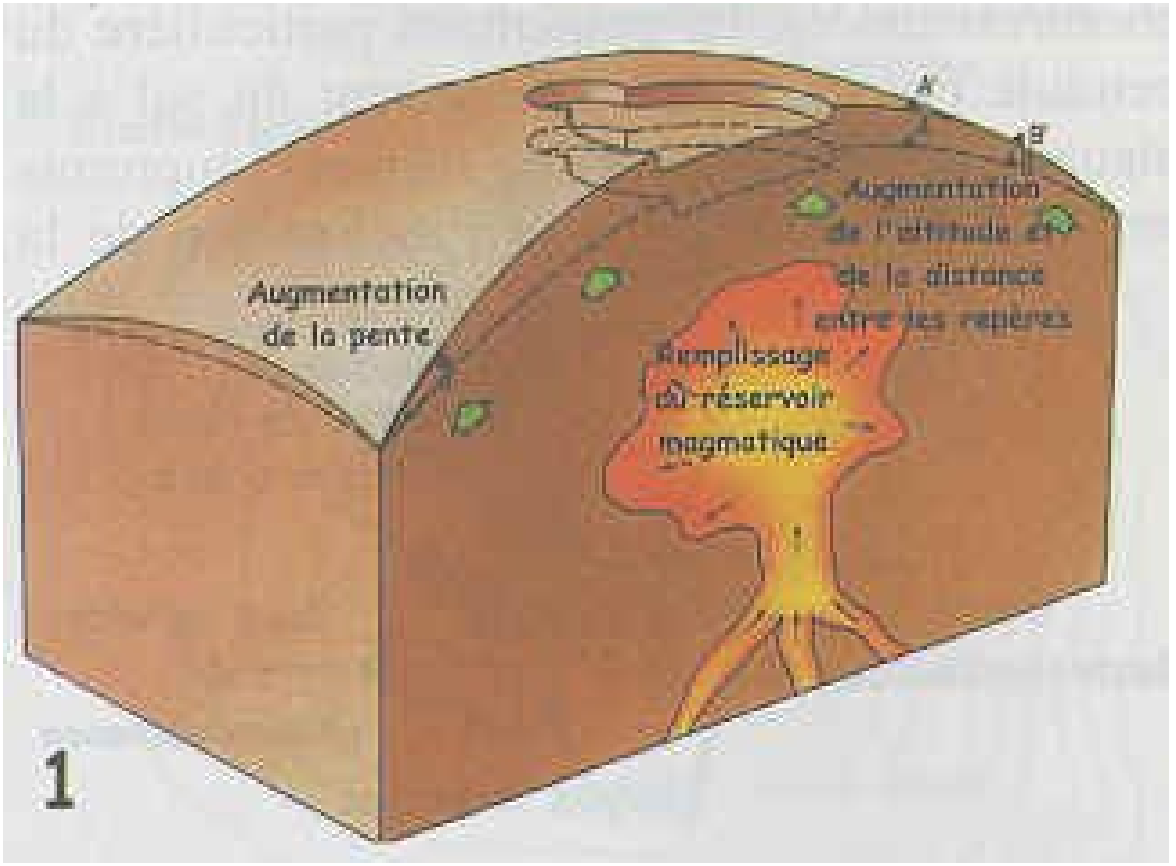
L'erreur sur la Composante verticale est de 3 fois (de 2 à 10 fois) supérieure à celle des composantes planimétriques

Aide à la prévision d'une éruption volcanique

Lorsqu'une éruption se prépare :

- En profondeur, un magma riche en gaz dissous a rempli une cavité appelée chambre magmatique, où la pression des gaz est énorme.

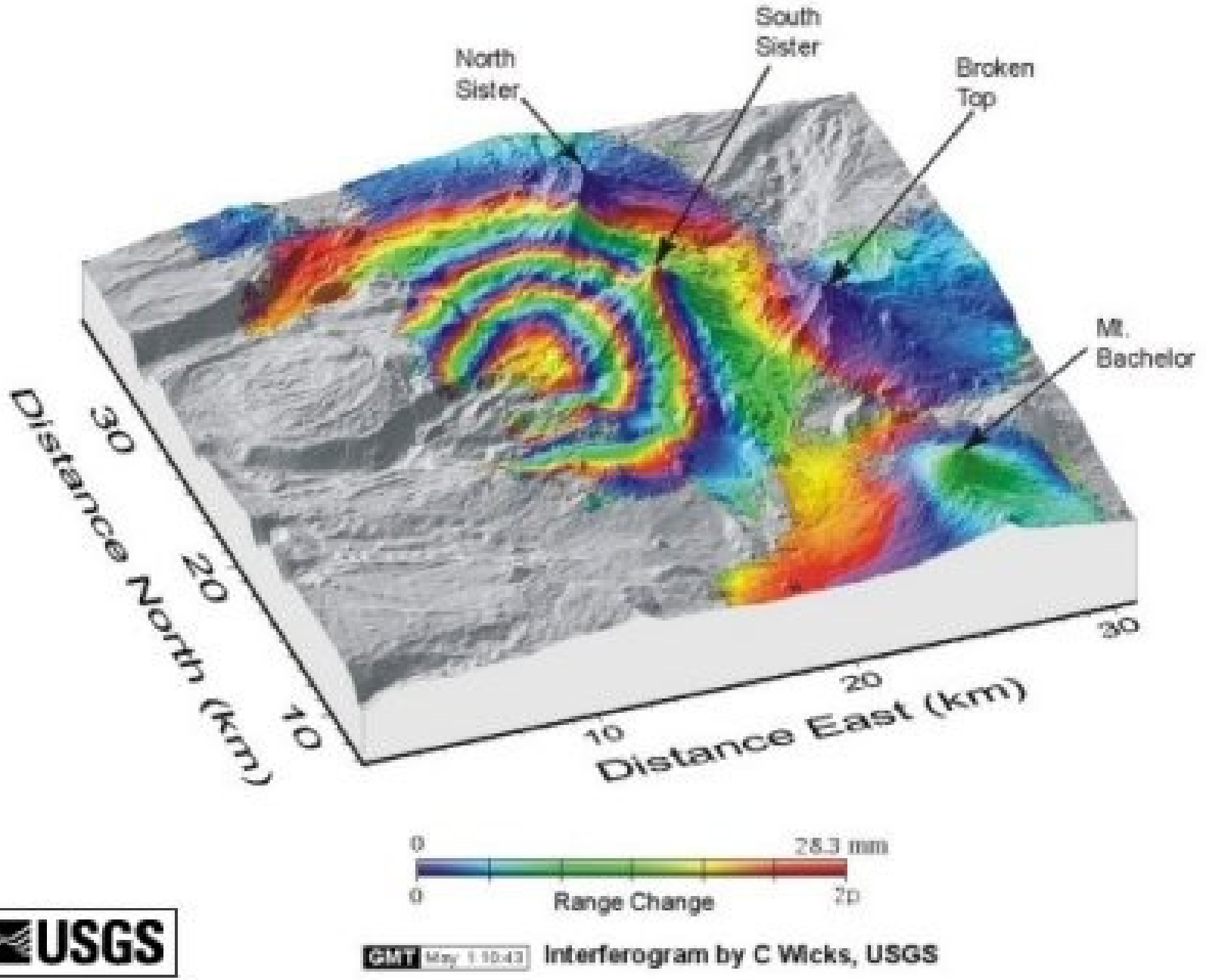
- En surface, ces modifications se traduisent par de nombreuses secousses de plus en plus rapprochées et par un **« gonflement » du volcan**.



Les volcans des trois sœurs -

L'**InSAR** et les observations **GPS** or montré un soulèvem atteignant **13 cm** au de la zone entre 199 2001.

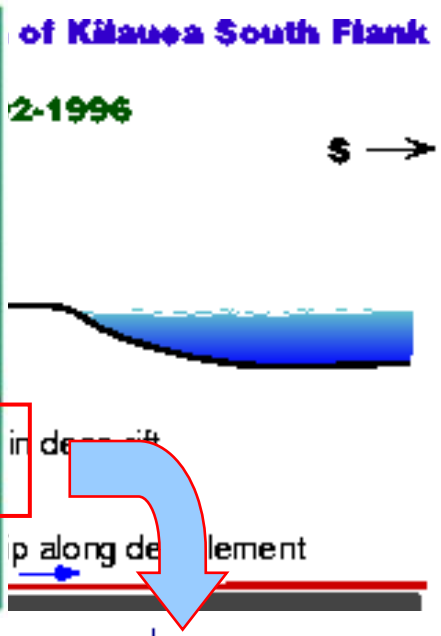
Soit un soulèvement d'envir ou 3 cm par an.

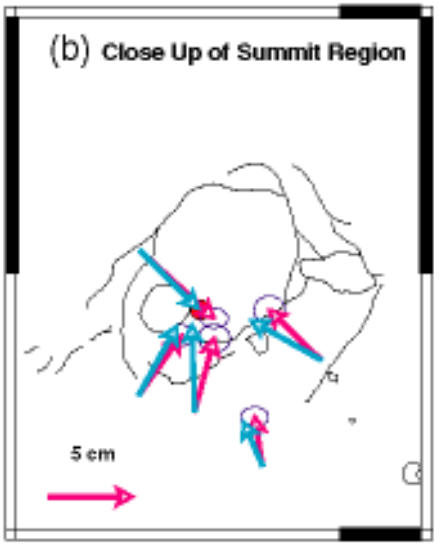




Volcan Kilauea - Hawaii







Episode 54
January 30, 1997

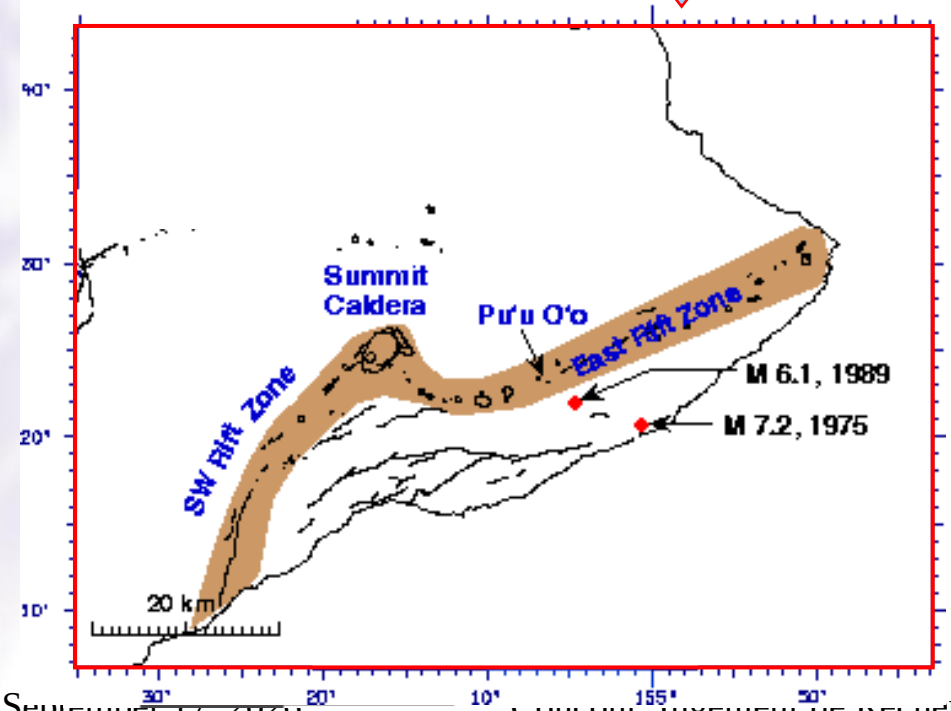
Summit = -1.5×10^6 m^3

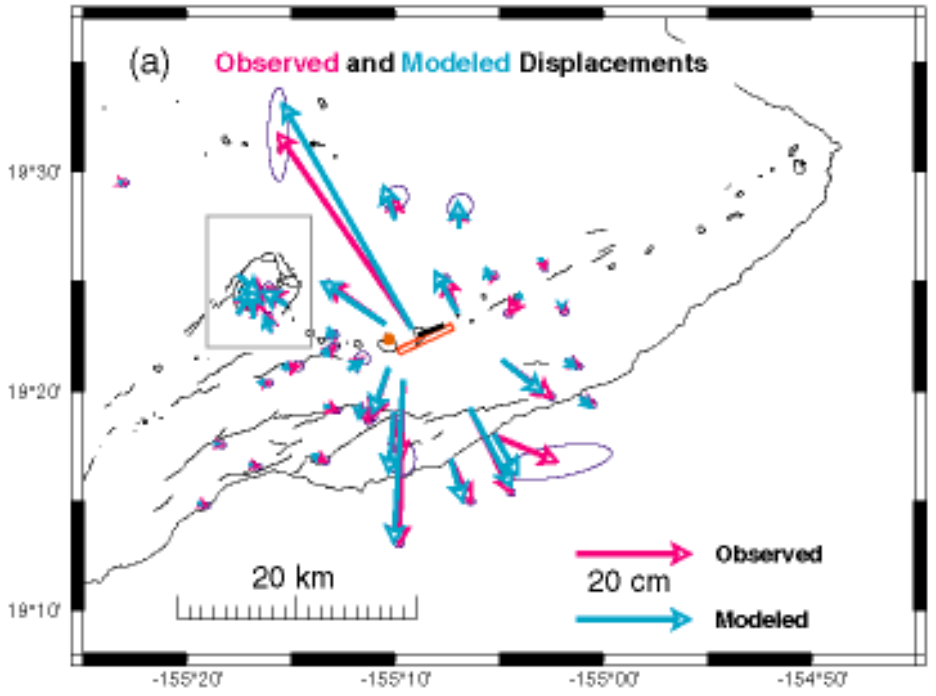
Makaopuhi = -1.2×10^6 m^3

Pu`u `O`o = -9×10^6 m^3

Napau Dike = $+22 \times 10^6$ m^3

Length = 5.15 km
Width = 2.2 km
Opening = 1.96 m

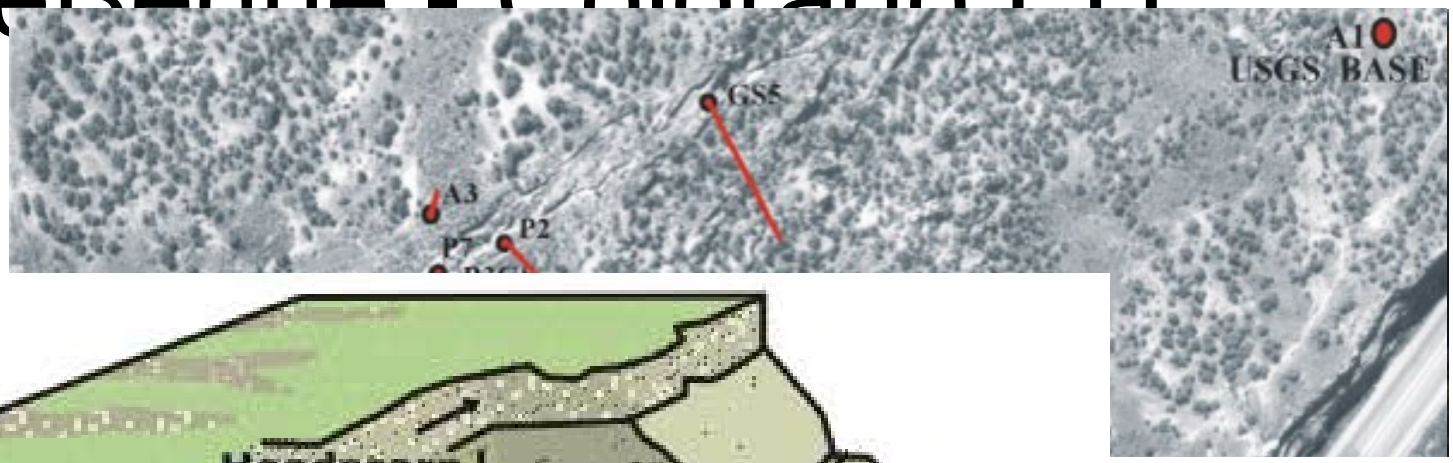


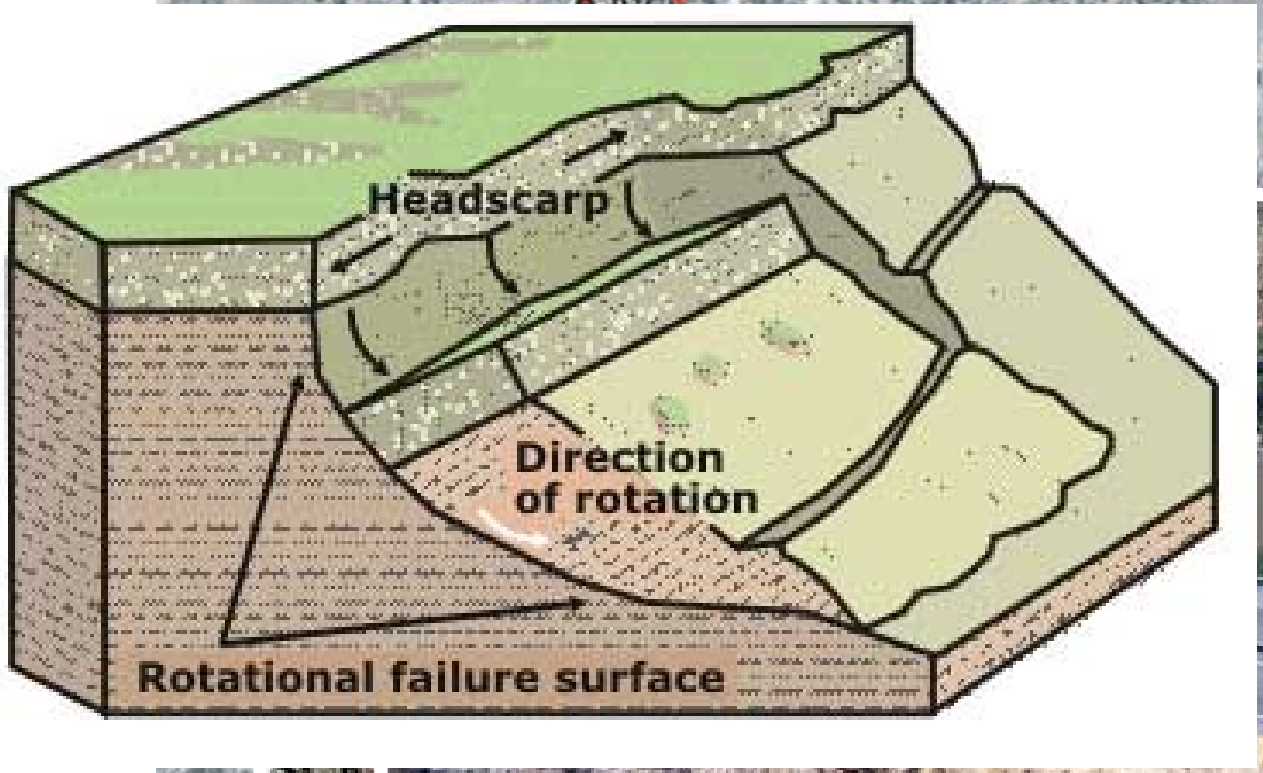


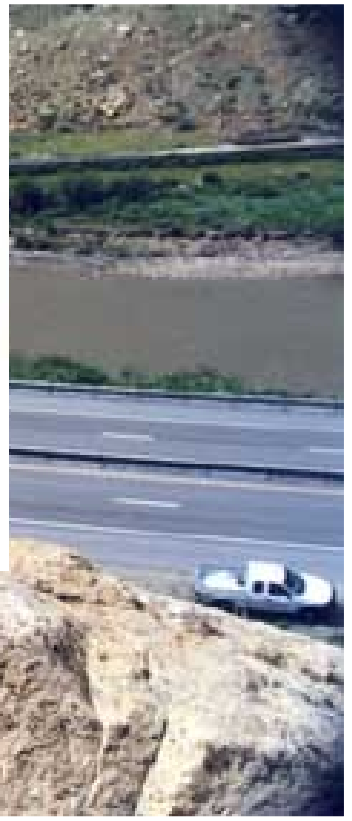
Glissement de terrain du Canyon DeBegue - Colorado EU

L'étude du site à débuté après l'important glissement de terrain d'avril 1998 qui a occasionné de nomb dégâts

- **Inclinomètre**
- **Piézomètre**
- **Prisme**
- **Câble extensomèt**
- **GPS**









Subsidence mesurée par GPS et InSar



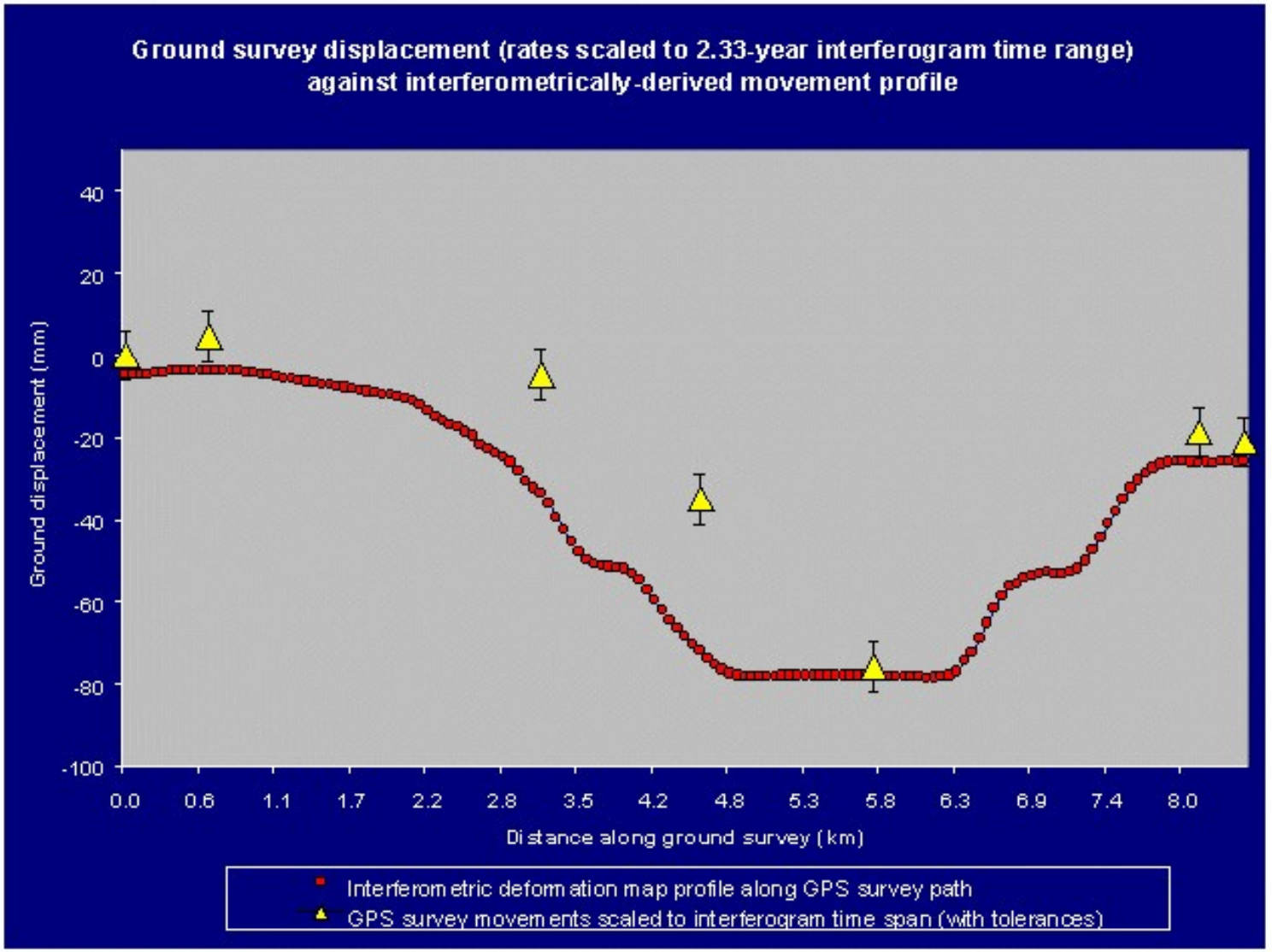
S.R. Anderson/U.S. Geological Survey

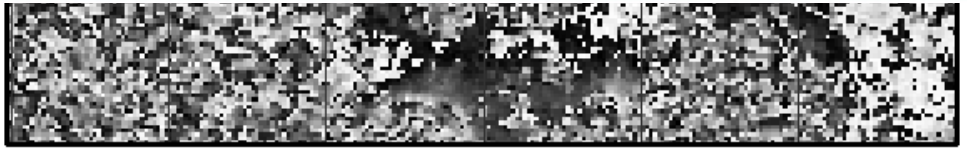
Sign warning motorists of subsidence hazard was erected after an earth fissure damaged Snyder Hill Road in Pima County, Arizona, 1981.



Subsidence mesurée par GPS et InSar

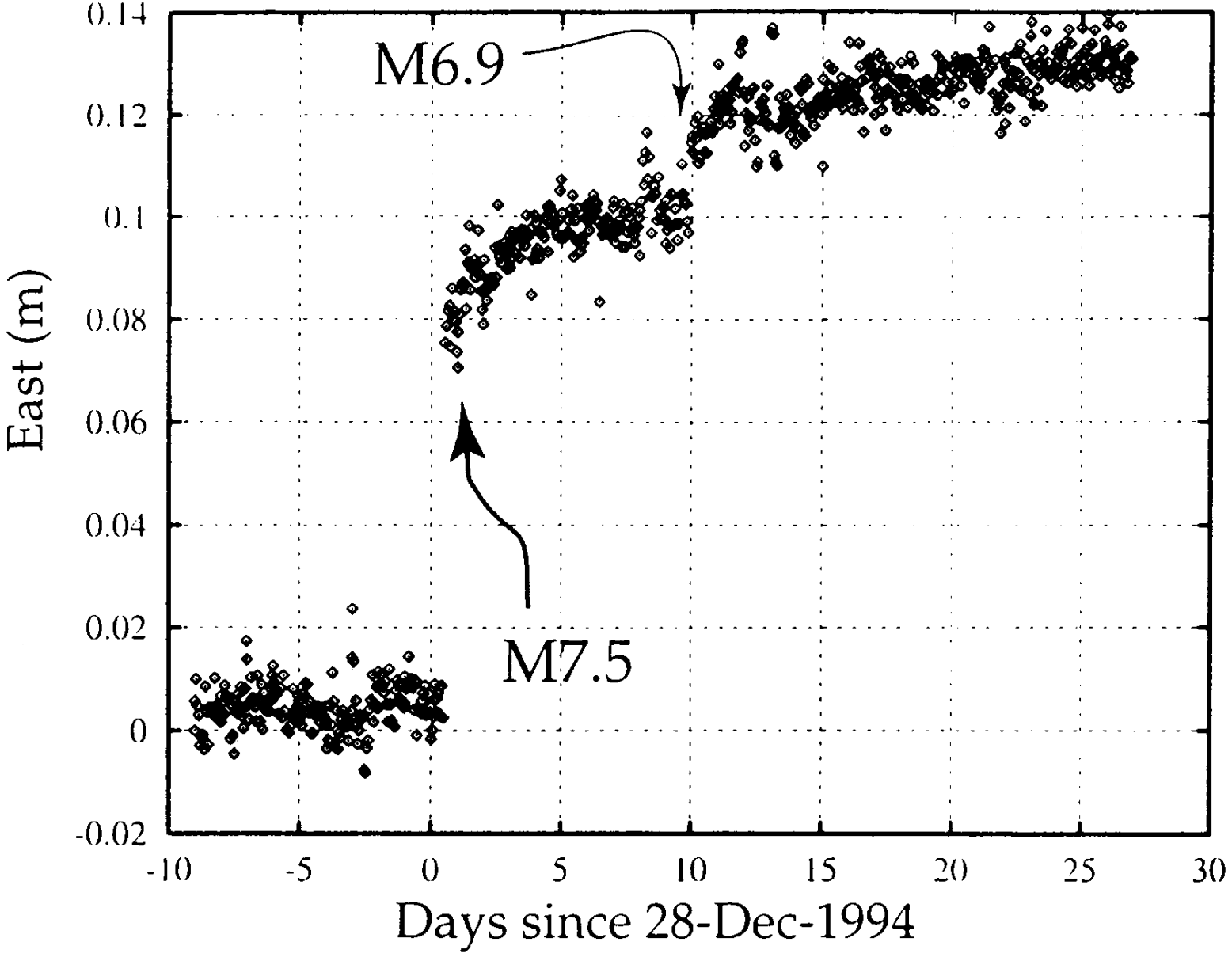
Surveillance de l'affaissement d'extraction dans la région de STOKE-ON-TRENT (EU) par GPS et InSar





Subsidence mesurée par GPS et InSar

Mesure GPS (composante Est) des mouvements co-sismiques et post-sismiques du séisme de Sanriku-Haruka-Oki M 7.5 (Japon) 1 mesure toute les 75 mn



OBSERVATION PAR GPS DE GLISSEMENTS COSEISMIC ET ASEISMIC ASSOCIES AU SEISME Mw=8.4 DE 2001 DU SUD PEROU

Carte du Sud du Pérou, montrant le séisme principal Mw=8.4 du 23 juin 2001 (étoile rouge à l'intérieur d'un cercle blanc), et de la réplique Mw=7.6 du 7 juillet 2001 (points rouges). Le déplacement Co-sismique observé par GPS (choc principal) est représenté par une flèche bleue et le vecteur issu du modèle par une flèche rose. Tout les vecteurs déplacement (Co-sismique + post-sismique) des 9 mois après le choc sont en vert (65 centimètres). Les vitesses inter-sismiques des stations régional GPS sont représentées par les fines flèches de couleur (jaune, vert, bleu et rouge). Le vecteur de convergence des plaques de 1A de Nuvel est en brun. La zone utilisée dans le modèle est en jaune (J. C. Ruegg et al., 2002).

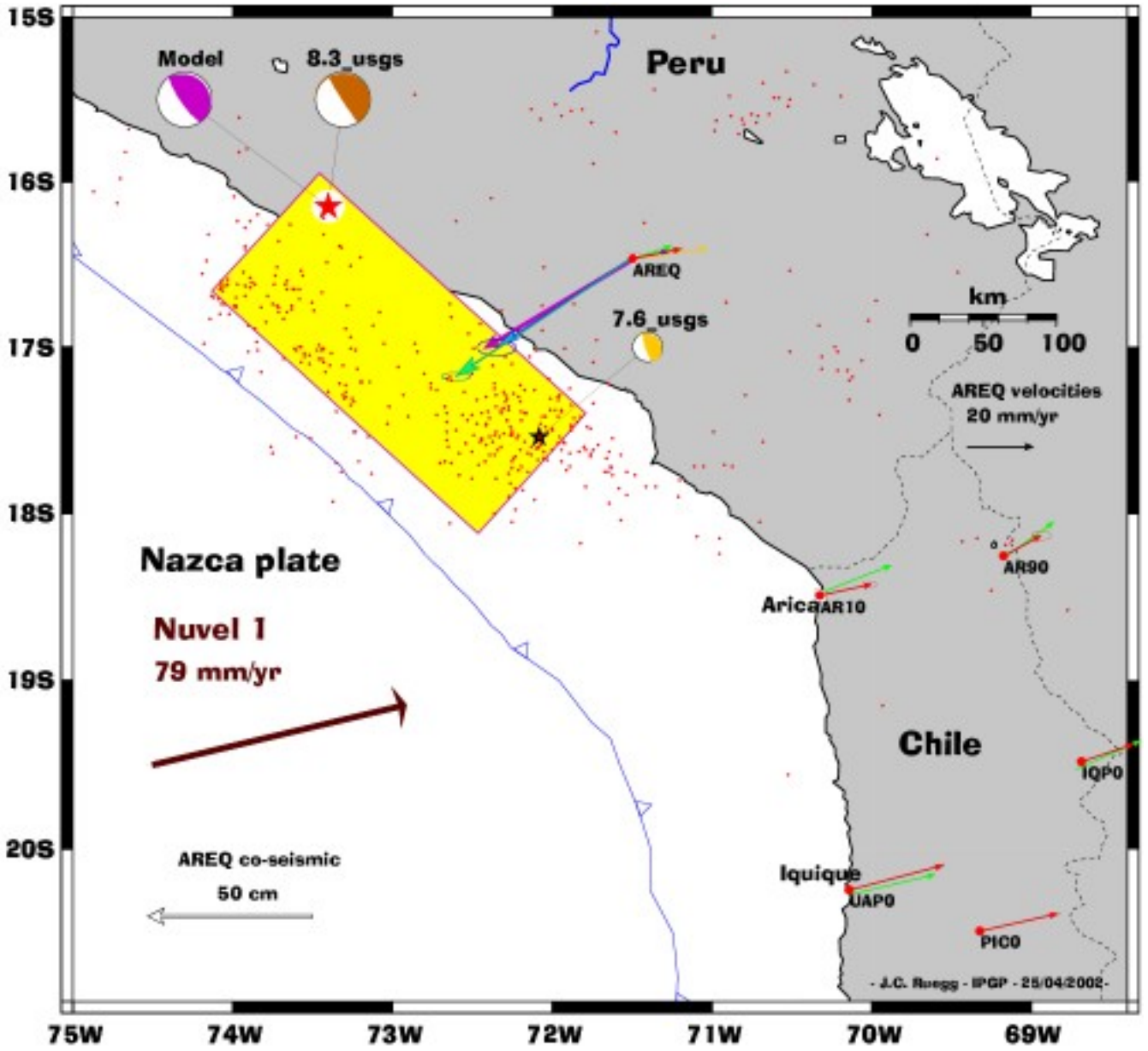
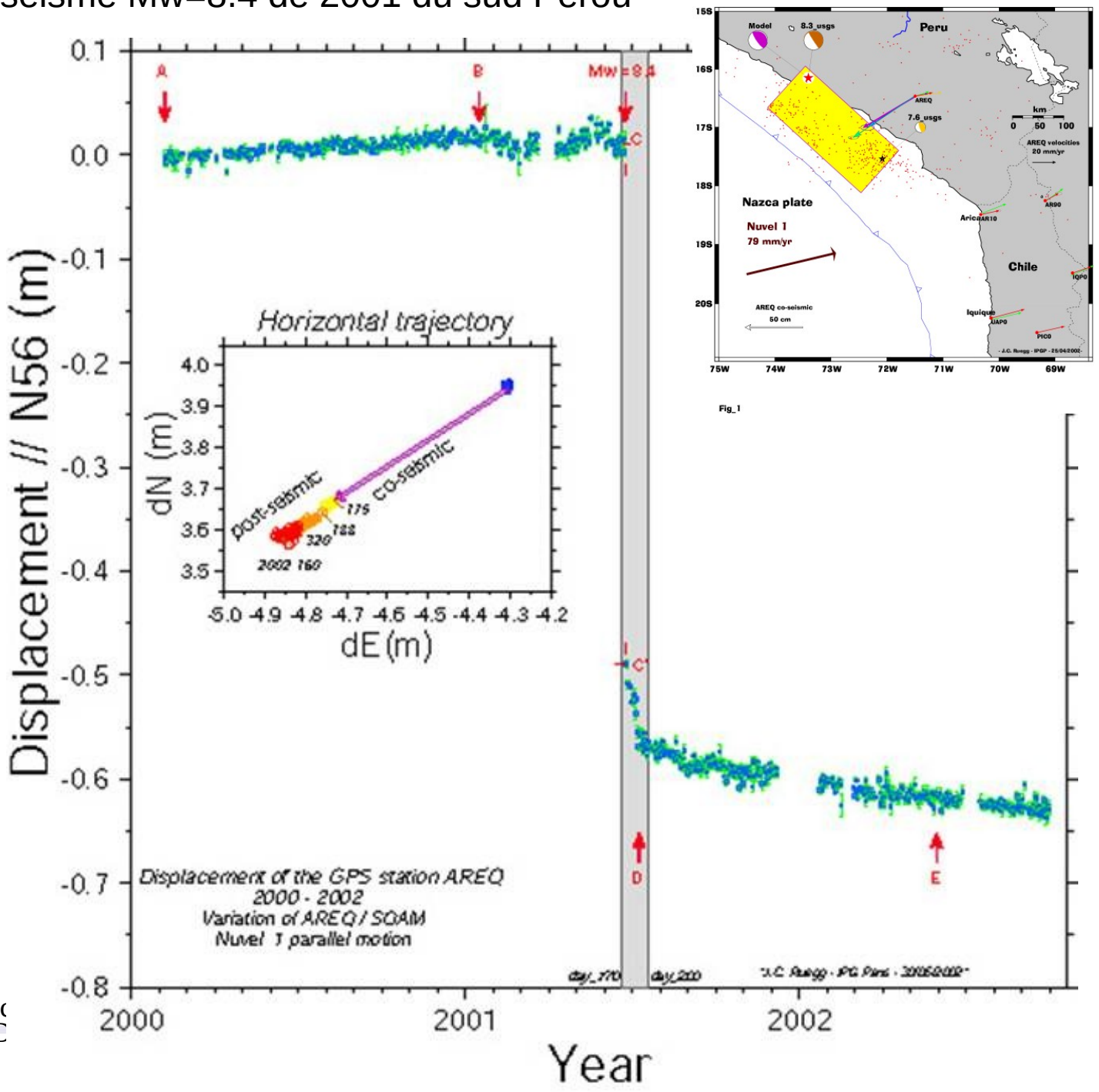


Fig_1

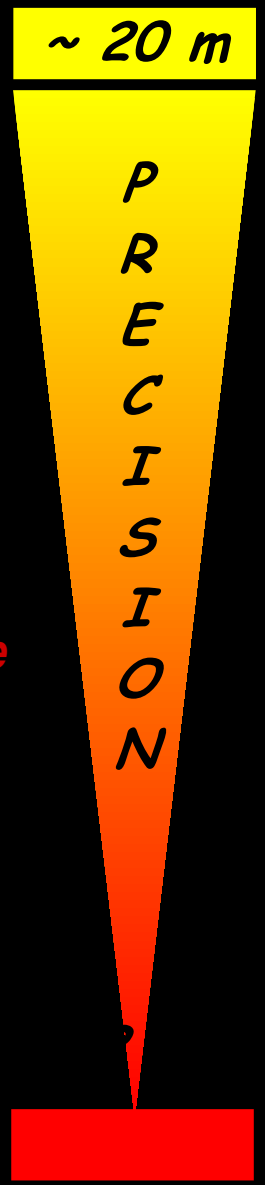
Obsrervation par GPS des glissements co-sismiques et post-siqmiques associés au séisme Mw=8.4 de 2001 du sud Pérou

Variations du vecteur déplacement de la station AREQ (Arequipa) par rapport à la station SGAM (Iquique) de janvier 2000 à avril 2002. Le séisme principale (Mw=8.4) s'est produit le 23 juin 2001. Pendant les 6 mois précédant le choc principal un signal d'environ 2 ou 3 centimètres est vu sur le série de temporelle. Pendant les 2 semaines suivant le séisme principale on observe un glissement avec une vitesse moyenne de 4 mm/j qui est en partie associé à la réplique du 7 juillet 2001 (Mw=7.6). Ce glissement continue avec une vitesse moyenne de 0.3 mm/j pendant les 9 mois suivants (J. C. Ruegg et al., 2002).



Précision et application

- Positionnement de points de mesures tectoniques, sismologiques, gravimétriques …
- Réalisation de Models Numériques de Terrain (MNT)
- Détermination de géoïdes de grande précision (informations sur les structures profondes)
- Quantification des rebonds post-glaciaires
- Surveillance des risques naturels (volcanisme, glissement de terrain, ...)
- Quantification des déformations tectoniques
- Quantification des déformations sismiques



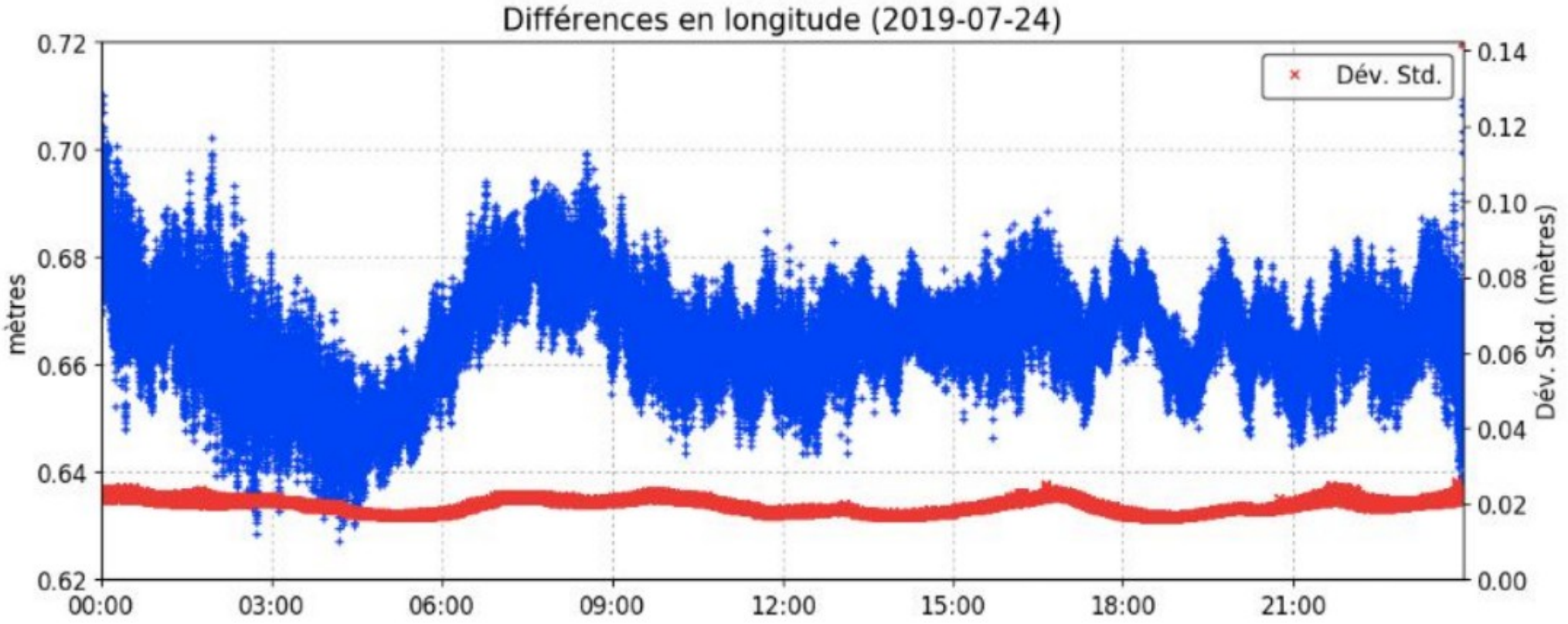
Les notions fondamentales

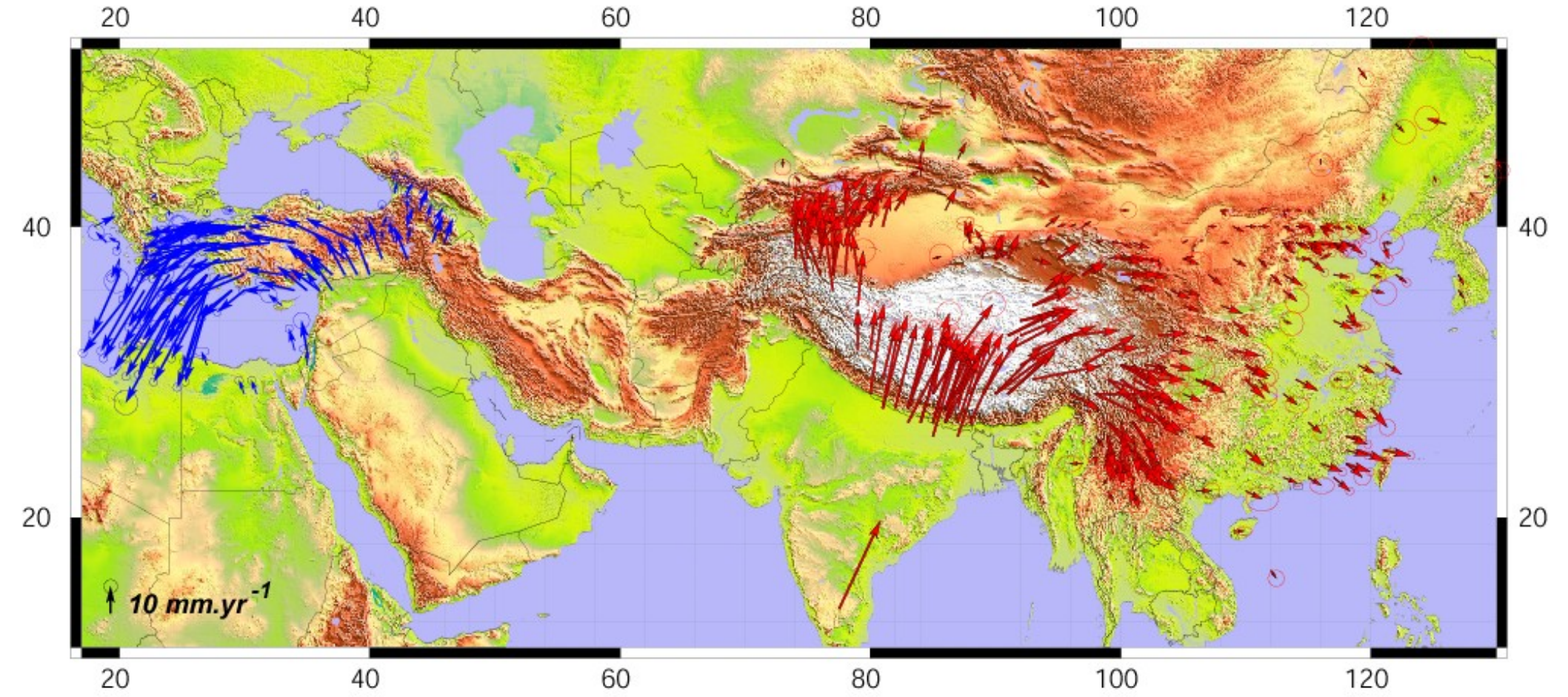
- Code / phase des données GPS
- Positionnement relatif / absolu
- Simple et double différence
- Positionnement statique et cinématique
- Trilatération / triangulation
- Impact géométrie (Vertical / horizontal par ex)

Les notions maquantes

- La mise en référentiel (PV)
- Les applications (PV)
- Les différents types d’erreur (X)
- Une serie temporelle ?
- ...

Une série temporelle GNSS





Blue arrows : McClusky et al. (2000)
Red arrows : Wang et al. (2001)

Géodésie terrestre

Composante planimétrique

Triangulation : - Loi des sinus

- Pythagore généralisé

Composante Altimétrique

Nivellement - leveling

2 mesures totalement indépendantes

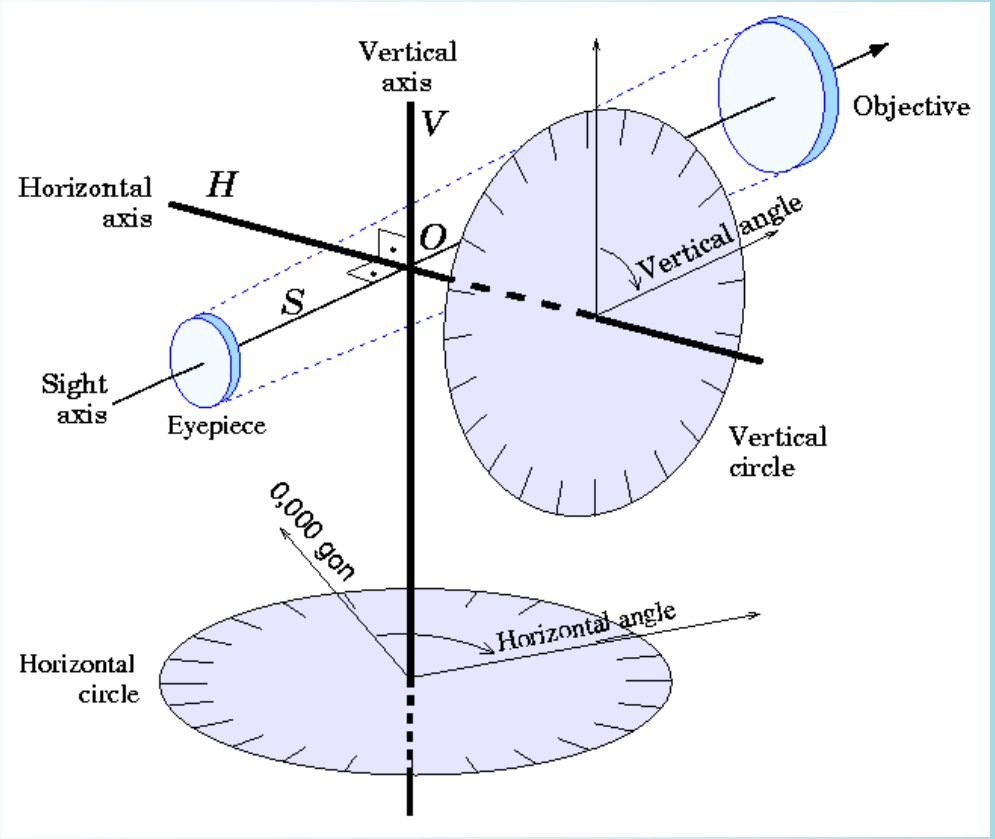
Erik Doerflinger

Triangulation : Mesures d'angles

Un théodolite est une **lunette** montée sur les **deux axes; vertical** et **horizontal**. Chacun des axes est équipé d'un cercle gradué permettant les lectures des angles.



Théodolite



Axes et cercles gradués d'un théodolite

Le théodolite se pose sur un support et doit se caler sur le plan horizontal ; il est souvent placé sur un trépied, et à la verticale exacte d'un point connu en coordonnées, à l'aide d'un fil à plomb et d'un niveau à bulle sphérique, et sa base doit être parfaitement horizontale. L'ensemble de cette phase d'utilisation se nomme la « mise en station ».

Erik Doerflinger

Les mesures électro-optiques de distances

Le Chainage

Autrefois les arpenteurs utilisaient une véritable chaîne composée de maillons pour mesurer une distance entre deux points. C'est pourquoi cette opération s'appelle un chaînage. Aujourd'hui la chaîne a été remplacée par un ruban à mesurer, généralement fabriqué en acier.

Appareils Electroniques de Mesures de Distances (EDM) **:**



Distancemètre Laser

L'appareil émet une onde (infra rouge, laser, …) qui se réfléchit et revient vers l'appareil. La vitesse de propagation de l'onde est connue. Le temps mis par le rayon pour revenir est mesuré et la distance séparant l'utilisateur de la cible est calculée.



Tachéomètre = théodolite + EDM.

Erik Doerflinger

Mesures de dénivelées, ou nivellement

Le nivellement est l'ensemble des opérations consistant à mesurer des différences de niveaux, pour déterminer des altitudes.

Le nivellement permet de mesurer des dénivelées puis de déduire l'altitude de repères ou de points caractéristiques. Les altitudes peuvent être rapportées à une référence locale, ou à un système de référence plus général. Le système utilisé en France rapporte toutes les altitudes à celle du niveau moyen de la mer dans le vieux port de Marseille, qui est l'altitude zéro, généralement dite "niveau de la mer".



Principe du nivellement directe

Erik Doerflinger

Mesures de dénivelées, ou nivellement

Le principal problème à résoudre par le nivellement est celui des **écoulements d'eaux**

Une source d'imprécision est **la réfractivité de l'atmosphère** qui rend courbe les rayon lumineux.

- La mesure **altimétrique** Obtenue par nivellement est totalement **indépendante** des composantes **planimétriques**.





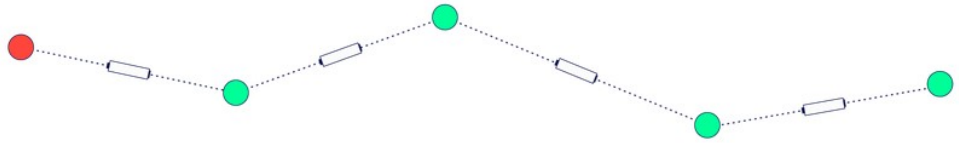


Niveau, mire et trépied

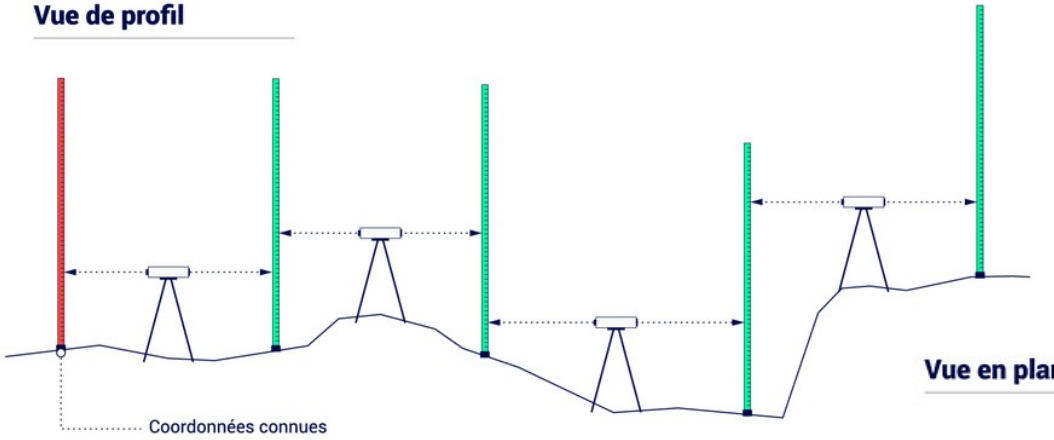
Erik Doerflinger

Mesures de dénivelées, ou nivellement

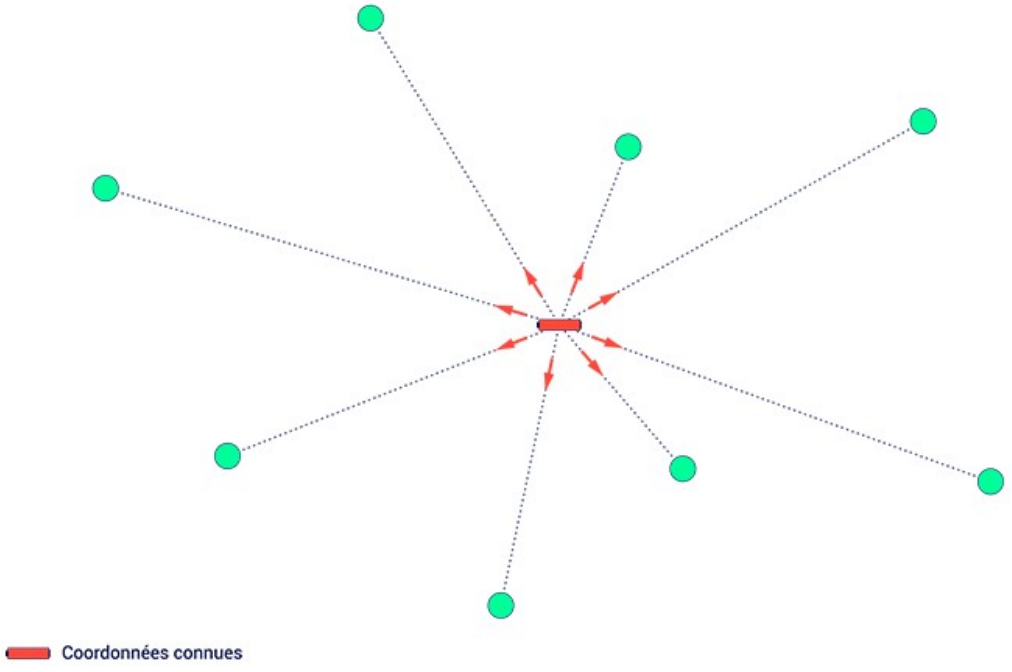
Vue en plan



Vue de profil



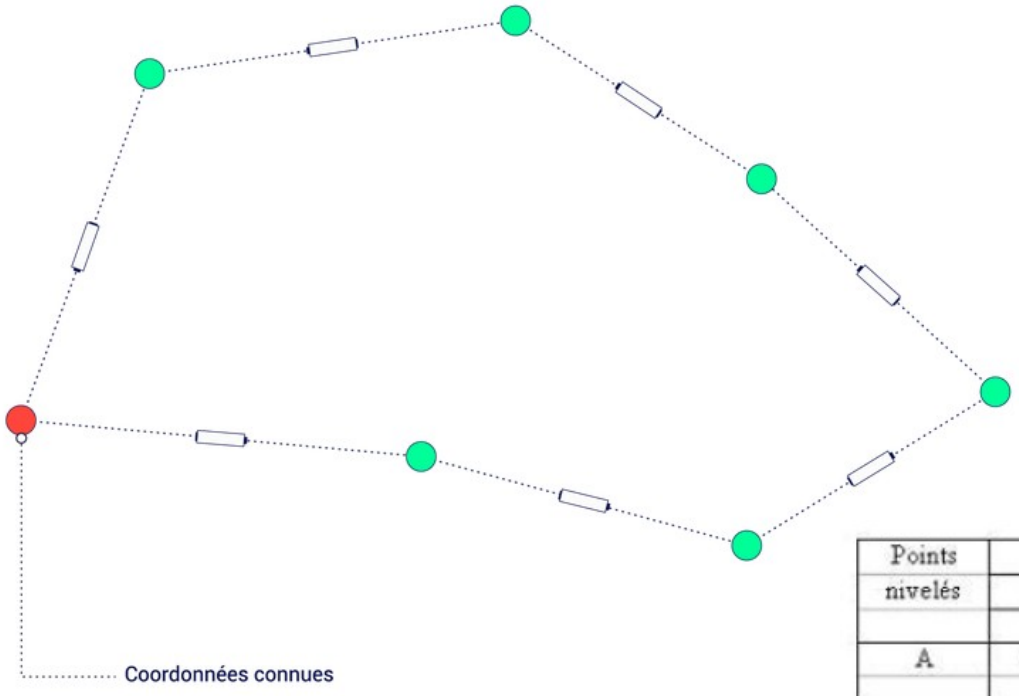
Vue en plan



Erik Doerfinger

Mesures de dénivelées, ou nivellement

Loop strategy in levelling



Points nivelés	Lectures AR	Lectures AV	$\Delta H_i = LAR_i - LAV_i$ +	$\Delta H_i = LAR_i - LAV_i$ -	Altitudes brutes	Comp C_i	Comp ΣC_i	Altitudes compensées
	m	m	m	m	m	mm		m
A	1,976				1000,000			1000,000
			1,096			-1	-1	
P_1	0,448	0,880			1001,096			1001,095
				-3,097		-2	-3	
P_2	1,098	3,545			997,999			997,996
				-2,833		-1	-4	
P_3	2,614	3,931			995,166			995,162
			0,584			0	-4	
P_4	1,977	2,030			995,750			995,746
			0,918			0	-4	
P_5	3,501	1,059			996,668			996,664
			3,338			-2	-6	
A		0,163			1000,006			1000,000
	Σ LAR	Σ LAV	5,936	-5,930		-6 mm		
	11,614	11,608	e = +0,006			fermeture		
	Contrôle	+0,006						

Erik Doerflinger

Mesures de dénivelées, ou nivellement

Le principal problème à résoudre par le nivellement est celui des **écoulements d'eaux**

Une source d'imprécision est **la réfractivité de l'atmosphère** qui rend courbe les rayon lumineux.

- La mesure **altimétrique** Obtenue par nivellement est totalement **indépendante** des composantes **planimétriques**.







Niveau, mire et trépied

Erik Doerflinger

Mesures de dénivelées, ou nivellement

Le principal problème à résoudre par le nivellement est celui des **écoulements d'eaux**

Une source d'imprécision est **la réfractivité de l'atmosphère** qui rend courbe les rayon lumineux.

- La mesure **altimétrique** Obtenue par nivellement est totalement **indépendante** des composantes **planimétriques**.







Niveau, mire et trépied

Erik Doerflinger