



Antennes, variations de centre de phase et multitrajets

Marie-Noelle Bouin
LAREG/IGN

25-29 septembre 2003

Ecole d'été GDR-G2 - Forcalquier

M-N Bouin 1

Plan

- Caractéristiques du signal GPS, propagation, antennes et multitrajets
 - Description des antennes
 - Effets approximatifs des multitrajets
 - Calibration de variations de centres de phase (PCV) pour les antennes GPS sol (réception)
 - Calibration de PCV pour les antennes satellites
 - Les multitrajets, détection et correction

25-29 septembre 2003

Ecole d'été GDR-G2 - Forcalquier

M-N Bouin 2

Base sur les antennes

- La réception et la transmission s'écrivent de la même manière. Seul change le sens du temps t
- Il faut connaître la distribution de courant $\mathbf{J}(\mathbf{x}')$ dans l'antenne et utiliser un potentiel vecteur \mathbf{A}
- On mesure le courant induit dans l'antenne

$$\mathbf{A}(\mathbf{x}) = \frac{1}{c} \iiint \mathbf{J}(\mathbf{x}') \frac{e^{ik|\mathbf{x}-\mathbf{x}'|}}{|\mathbf{x}-\mathbf{x}'|} d^3x'$$

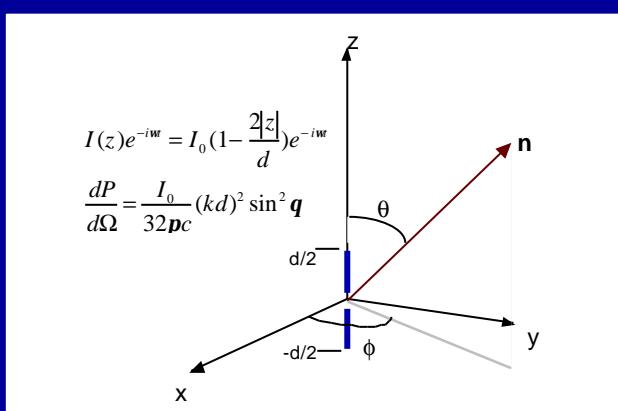
$$\mathbf{B} = \nabla \times \mathbf{A} \quad \mathbf{E} = \frac{i}{k} \nabla \times \mathbf{B}$$

25-29 septembre 2003

Ecole d'été GDR-G2 - Forcalquier

M-N Bouin 3

Antenne dipolaire



P puissance radiative de l'antenne,
courant I_0 au centre de l'antenne
Symétrie cylindrique
Gain maximal $\theta = 90^\circ$

25-29 septembre 2003

Ecole d'été GDR-G2 - Forcalquier

M-N Bouin 4

Antenne dipolaire (2)

- La puissance transmise le long de l'antenne est nulle, la puissance maximale est perpendiculaire à l'antenne
- Pas de dépendance en ϕ de la puissance transmise
- La puissance reçue suit les mêmes lois. Pas de gain le long de l'antenne, gain transverse maximum.
- Les premières antennes GPS civiles étaient des antennes dipolaires. Question : comment les monter ?

25-29 septembre 2003

Ecole d'été GDR-G2 - Forcalquier

M-N Bouin 5

Antennes dipolaires

- Pour le GPS, montage d'antennes horizontalement.
- Un simple dipole monté horizontalement va enregistrer aussi bien les signaux réfléchis venant du sol que les signaux directs venant d'en haut. --> multitrajets ou multipath (MP)
- Comment éviter ces problèmes de réflexion sur le sol ?

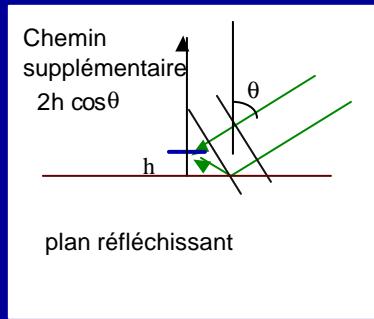
25-29 septembre 2003

Ecole d'été GDR-G2 - Forcalquier

M-N Bouin 6

Dipole au dessus d'un plan réfléchissant

- Pour résoudre les problèmes de réflexions : on ajoute notre propre plan réfléchissant.



Si le plan est infini, alors l'antenne se comporte comme un récepteur ponctuel dans le demi espace en dessous.

Le gain dépend de h/λ
Au zénith $h=\lambda/4$ donne le gain maximum

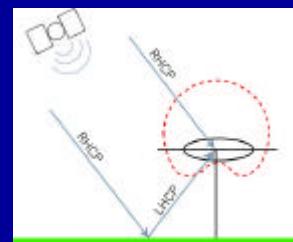
25-29 septembre 2003

Ecole d'été GDR-G2 - Forcalquier

M-N Bouin 7

Utilisation de la polarisation.

- Les signaux GPS sont transmis avec une polarisation circulaire droite, les antennes doivent donc recevoir de tels signaux et uniquement ceux là.



- On le réalise avec deux dipôles horizontaux à 90° l'un de l'autre et ajoutant le décalage de phase adéquat.
- Les antennes "Macrometer" fonctionnent de cette façon. L'ajustement des écarts de dipôles pour avoir $L1$ et $L2$ est assez fin.

25-29 septembre 2003

Ecole d'été GDR-G2 - Forcalquier

M-N Bouin 8

Autres antennes

- Autres types d'antennes couramment utilisées en GPS :
 - Antennes hélicoïdales (spires autour d'un centre hémisphérique isolant (Garmin GPS II/III))
 - Antennes "Microstrip" patch antenna. Un patch est monté sur un plan réfléchissant à l'intérieur d'un diélectrique.
 - Dorne-Margolin (4-parties à l'intérieur d'un dôme, dans des anneaux de garde (choke ring)). Antenne standard pour les réseaux globaux.

25-29 septembre 2003

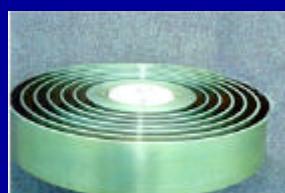
Ecole d'été GDR-G2 - Forcalquier

M-N Bouin 9

Antennes GPS (positionnement précis)

Quasiment toutes sont des patchs conducteurs à l'intérieur d'un contenant en céramique isolante.

- Anneaux de garde = choke ring



25-29 septembre 2003

Ecole d'été GDR-G2 - Forcalquier

M-N Bouin 10

Multitrajet simple

- Approche la plus simple : similitude avec le domaine optique . Valable pour les réflecteurs situés à plus d'une longueur d'onde de l'antenne.
- Les antennes réelles reçoivent toutes des signaux sous l'horizon (< zéro degré d'élévation) et verront donc les réflexions du sol malgré la présence de plan.
- Mise en place d'un filtrage pour éliminer ces signaux-là.

25-29 septembre 2003

Ecole d'été GDR-G2 - Forcalquier

M-N Bouin 11

Réflexion sur un plan

- L'amplitude du signal réfléchi sur une surface dépend de l'angle d'incidence et de l'indice de réfraction du milieu.

pour la composante E perpendiculaire au plan d'incidence

$$\frac{E_r}{E_i} = \frac{n \cos i - \sqrt{n^2 - n^2 \sin^2 i}}{n \cos i + \sqrt{n^2 - n^2 \sin^2 i}}$$

pour la composante parallèle

$$\frac{E_r}{E_i} = \frac{n^2 \cos i - n \sqrt{n^2 - n^2 \sin^2 i}}{n^2 \cos i + n \sqrt{n^2 - n^2 \sin^2 i}} n = \sqrt{\mu}$$

où n' est
l'indice de
réfraction
du milieu
($\mu'=\mu$)

25-29 septembre 2003

Ecole d'été GDR-G2 - Forcalquier

M-N Bouin 12

Réflexion en incidence normale

- Pour l'incidence normale, les deux cas se réduisent à :

Perpendiculaire	$\frac{E_r}{E_i} = \frac{2n}{n'+n}$
Parallèle	$\frac{E_r}{E_i} = \frac{n'-n}{n'+n}$

- La puissance du signal réfléchi va dépendre des constantes diélectriques
- Air $\epsilon=1$; eau 80; sable sec 3-5; sable saturé 20-30; shiste 5-15; argile 5-40; Granit 4-6; glace 3-4
 - signal réfléchi au moins 30% du signal incident

25-29 septembre 2003

Ecole d'été GDR-G2 - Forcalquier

M-N Bouin 13

Caractéristiques des multitrajets

- La différence de chemin entre le chemin direct et le chemin réfléchi permet de détecter les multitrajets
- Quand le réflecteur est proche ($d/\lambda \sim 1$) les multitrajets varient peu dans le temps
- Quand le réflecteur est loin ($d/\lambda \gg 1$), les multitrajets varient rapidement et ont une moyenne nulle
- Une classe particulière de multitrajets concerne les réflecteurs pour lesquels $d/\lambda \ll 1$. Cela concerne un type d'antenne et on parle de modèle de centre de phase (nécessaire pour des utilisations de haute précision ou avec plusieurs types d'antennes).

25-29 septembre 2003

Ecole d'été GDR-G2 - Forcalquier

M-N Bouin 14

Modèles de centre de phase pour les antennes de réception.

- Les caractéristiques spécifiques à un type d'antenne peuvent être calibrées de plusieurs manières :
 - Mesures en chambre anéchoïque (calibration absolue)
 - Mesure relative In-situ (une antenne par rapport à une autre)
 - Calibration absolue in situ en faisant tourner l'antenne.
 - Calibration in situ des multitrajets avec une antenne unidirectionnelle.

25-29 septembre 2003

Ecole d'été GDR-G2 - Forcalquier

M-N Bouin 15

Modèles de centres de phase.

- Les premiers modèles de centres de phase ont été obtenus en chambre anéchoïque avec émission de signaux L1 et L2, et une antenne de réception tournante pour mesurer les différences de phase entre signaux émis et reçus.
- Puissance du signal mesurée de manière à ce que le gain de l'antenne soit obtenu. (comportement en $\sin^2(\theta)$ mais avec un gain pour $\theta < 0$ aussi).

25-29 septembre 2003

Ecole d'été GDR-G2 - Forcalquier

M-N Bouin 16

Modèles relatifs de centres de phase.

- Si on dispose d'une antenne avec PCV nulle, on peut s'en servir comme d'une antenne de référence, et on mesure les déplacements relatifs des autres antennes (sur 2 sites proches et connus)



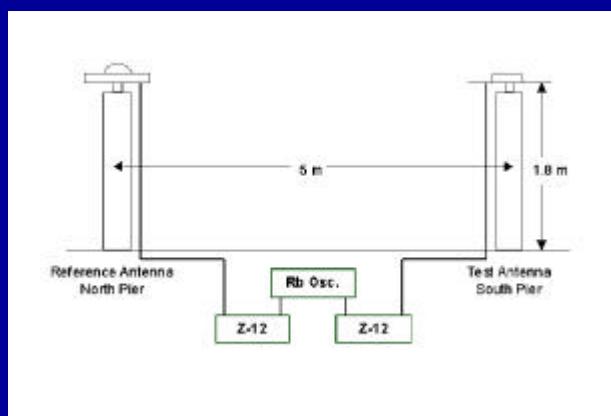
Calibrations effectuées au National Geodetic Survey (NGS) :
[http://www.ngs.noaa.gov:80/
ANTCAL/](http://www.ngs.noaa.gov:80/ANTCAL/)

25-29 septembre 2003

Ecole d'été GDR-G2 - Forcalquier

M-N Bouin 17

Calibrations relatives NGS



Problème :
l'antenne Choke
Ring Dorne
Margolin est
considérée
comme
l'antenne de
référence.

Besoin de
modèles de PCV
absolus...

Problème
d'orientation

25-29 septembre 2003

Ecole d'été GDR-G2 - Forcalquier

M-N Bouin 18

Exemples de résultats de calibration

- Deux types d'informations :
 - "Décalage de centre de Phase" par rapport à une référence physique de l'antenne (ARP-- normalement base du pré-ampli = BPA)



25-29 septembre 2003

Ecole d'été GDR-G2 - Forcalquier

M-N Bouin 19

Exemples de résultats de calibration

- Variations de la phase dépendant de l'élévation (azimuth)
- Résultat typique :

Geodetic III "Whopper", REV. D											NGS {
5) 97/07/27											
-.6 .2 83.9											
.0 1.3 2.9 4.7 6.5 8.1 9.4 10.4 10.9 10.9											
10.5 -9.6 8.4 6.8 5.6 3.0 1.1 .0 .0											
1.1 -1.6 62.3											
.0 -2.4 -4.1 -5.2 -5.9 -6.4 -6.6 -6.7 -6.8 -6.8											
-6.6 -6.4 -6.0 -5.3 -4.1 -2.5 .0 .0 .0											

25-29 septembre 2003

Ecole d'été GDR-G2 - Forcalquier

M-N Bouin 20

Résultats généraux

- Les PCV typiques sont assez différentes sur L1 et L2 et sont importantes même sur la combinaison linéaire iono - free.
- Les positions peuvent changer jusqu'à 10 cm quand on utilise un modèle de PCV (approprié).
- Les résidus de phase montrent des systématismes si le mauvais type d'antenne est utilisé, mais le RMS est souvent inférieur à 10 mm (~5 mm en temps normal).
- Problème : comment avoir l'antenne "zéro PCV" ?
- Calibration absolue

25-29 septembre 2003

Ecole d'été GDR-G2 - Forcalquier

M-N Bouin 21

Calibration absolue

- Système de Hanovre :



<http://www.ife.uni-hannover.de/aoa-kalibration/summary.html>

25-29 septembre 2003

Ecole d'été GDR-G2 - Forcalquier

M-N Bouin 22

Rappel : modèle IGS de la Dorne Margolin Choke Ring

antenne2										
Dorne Margolin T, chokerings (TurboRogue)NGS (0) 97/10/27										
AOAD/M_T	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

Résultats en élévation obtenus par le groupe d 'Hanovre

AOA	AOAD/M_T	RF_E/Geo++ abs PCV SN404 Geo++(42) 00/06/05
+0.6	-0.5	+91.2
0.0	-0.2	-2.0 -3.3 -4.7 -6.0 -7.2 -8.0 -8.3
-8.1	-7.5 -6.3 -4.6 -2.2 0.8 4.8 9.5 14.8	0.1 -0.6 +120.1
0.0	-0.1 -0.5 -1.1 -1.8 -2.6 -3.4 -4.2 -4.8 -5.2	-5.2 -4.8 -4.0 -2.8 -1.2 0.6 2.8 5.8 9.7

25-29 septembre 2003

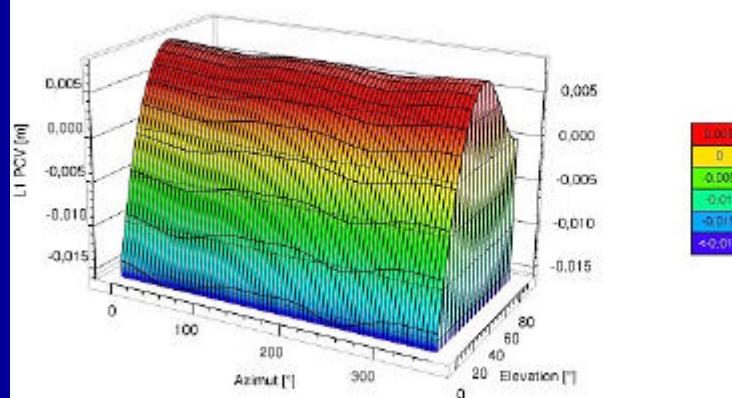
Ecole d'été GDR-G2 - Forcalquier

M-N Bouin 23

AOAD/M_T

SN 00404

L1 Results

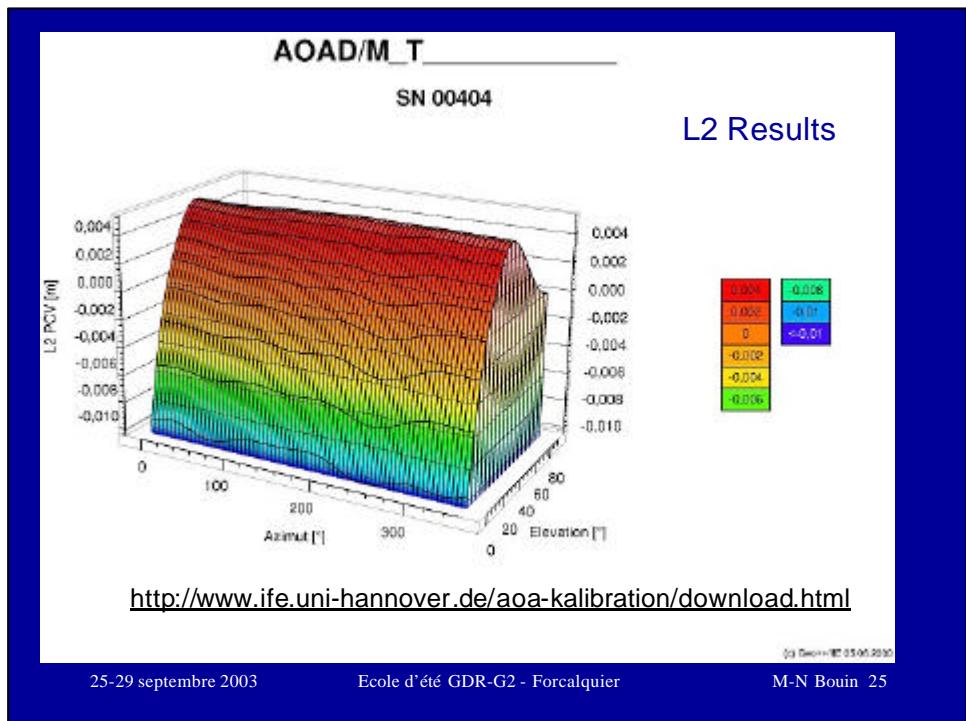


En 3D (azimuth) sur L1

25-29 septembre 2003

Ecole d'été GDR-G2 - Forcalquier

M-N Bouin 24



Calibrations absolues

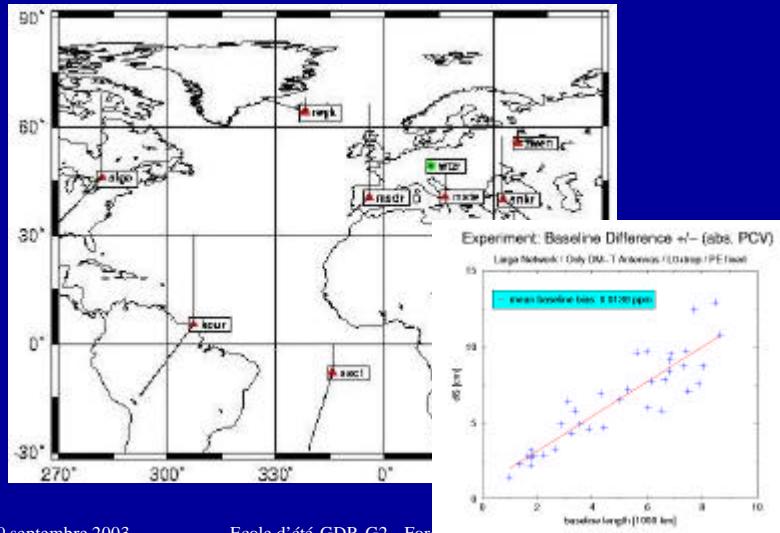
- Les multitrajets se répétant sur la durée des orbites des satellites, il suffit de différencier des fichiers de 24h consécutifs pour les éliminer
- Résultats similaires à ceux obtenus en chambres anéchoïques.
- Problème : quand l'antenne tourne (non horizontale), le gain des réflexions du sol augmente
- Comparaison de calculs avec et sans modèles absolus de PCV sur un réseau global
- Problème : variations de hauteur de 10-cm (et facteur d'échelle de 14-ppb) sur un réseau global GPS quand on utilise les modèles absolus.
- Lien avec les antennes des satellites ?

25-29 septembre 2003

Ecole d'été GDR-G2 - Forcalquier

M-N Bouin 26

Calibrations absolues : comparaisons



25-29 septembre 2003

Ecole d'été GDR-G2 - Forcalquier

M-N Bouin 27

Calibrations absolues : comparaisons

Calcul en simulation : que se passe-t-il si une antenne n'est pas horizontale, et si elle n'est pas orientée au Nord (parallèle à une autre) ?

- Antenne inclinée de 5° /horizontale et désorientée
 - az = 30°, zenith = 85° - pcv (différence/référence) 15 mm
 - + pcv 3 mm
- az = 345°, zenith = 95° - pcv 19 mm
- + pcv 4 mm



25-29 septembre 2003

Ecole d'été GDR-G2 - Forcalquier

M-N Bouin 28

Centres de phase des satellites

- Groupe d'antennes de transmission
- On a besoin de connaître la position du PC à qq cm près
- Voir le site NGS ANTCAL pour la procédure de calibration
- Les positions actuelles de PC données par l'IGS peuvent être fausses jusqu'à 1m (c'est le cas pour les satellites du Block IIR)
- Procédure de calibration relative

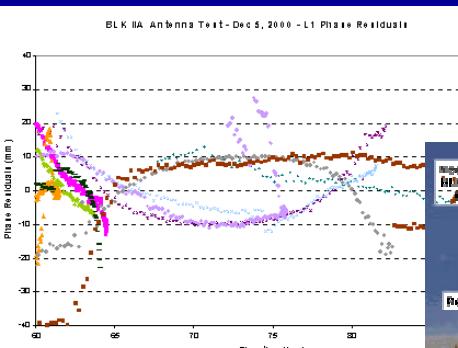


25-29 septembre 2003

Ecole d'été GDR-G2 - Forcalquier

M-N Bouin 29

Centres de phase des satellites

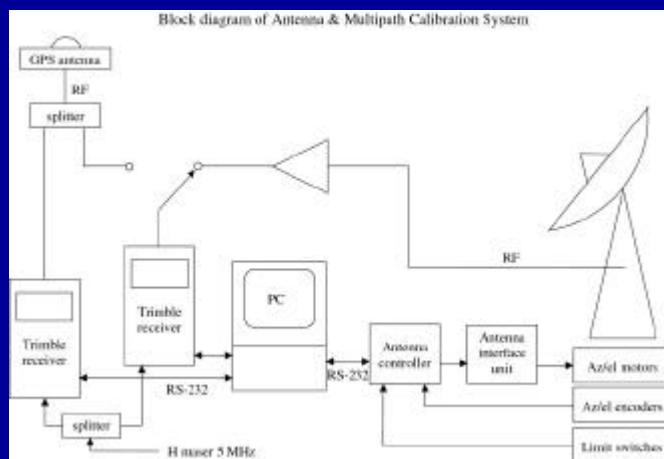


25-29 septembre 2003

Ecole d'été GDR-G2 - Forcalquier

M-N Bouin 30

Calibration et détection de multitrajets



Utilisation
d'une
antenne uni
directionnelle

25-29 septembre 2003

Ecole d'été GDR-G2 - Forcalquier

M-N Bouin 31

Calibration et détection de multitrajets

« Harvard-Smithsonian group »

- L'antenne parabolique est re-pointable avec un système de suivi (toutes les 10s). Précision du pointé : 0.1° en élévation, 0.5° en azimuth
- Travail en « zéro différence » : 2 antennes, un récepteur



http://www.unavco.ucar.edu/science_tech/dev_test/antennas/amcs.html

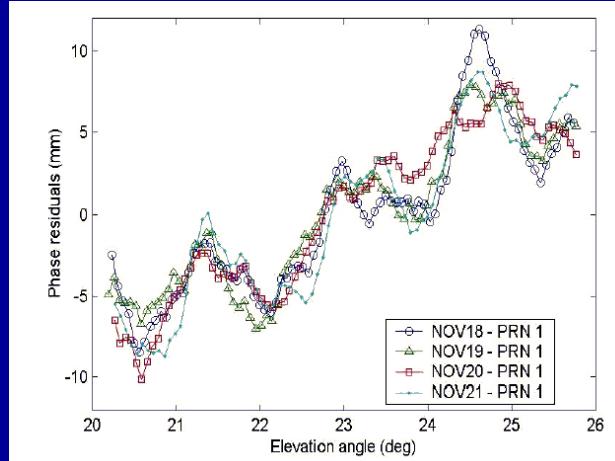
25-29 septembre 2003

Ecole d'été GDR-G2 - Forcalquier

M-N Bouin 32

Calibration et détection de multitrajets

Mise en évidence de systématismes liés à un satellite : multitrajets



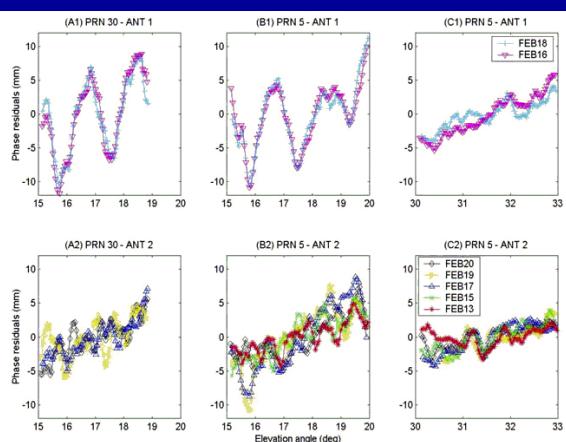
http://www.unavco.ucar.edu/science_tech/dev_test/antennas/amcs.html

25-29 septembre 2003

Ecole d'été GDR-G2 - Forcalquier

M-N Bouin 33

Calibration et détection de multitrajets



Comparaison d'une antenne normale et d'une antenne en environnement « sans multitrajets »

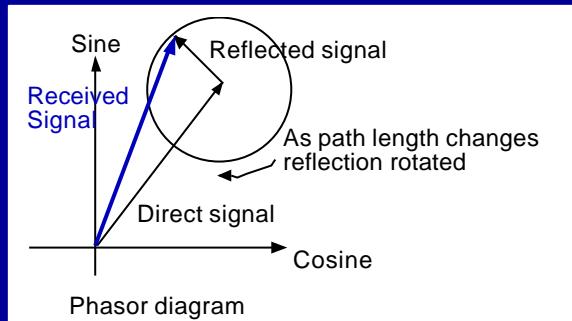
25-29 septembre 2003

Ecole d'été GDR-G2 - Forcalquier

M-N Bouin 34

Utilisation du rapport signal sur bruit (SNR)

- Méthode T.A. Herring/K. Larson (Scripps/U Colorado)
- <http://www.colorado.edu/engineering/ASEN/asen4519/asen4519.html>



25-29 septembre 2003

Ecole d'été GDR-G2 - Forcalquier

M-N Bouin 35

Analyse du SNR

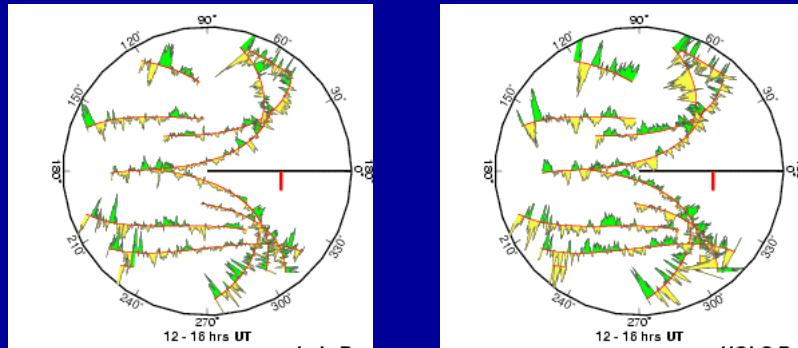
- La différence de chemin entre le signal direct et le signal réfléchi provoque des changements de phase et d'amplitude (déphasage de 90°)
- Logiciel d'analyse du SNR disponible sur <http://bowie.mit.edu/~tah/snrprog/>

25-29 septembre 2003

Ecole d'été GDR-G2 - Forcalquier

M-N Bouin 36

Exemple HOLC California (LC)



Résidus de phase
théoriques d'après
l'analyse SNR

Résidus de phase
mesurés

25-29 septembre 2003

Ecole d'été GDR-G2 - Forcalquier

M-N Bouin 37

Résumé

- Des mesures au millimètre requièrent une évaluation précise des multitrajets et de la dispersion proche des antennes.
- Les variations de centre de phase peuvent atteindre plusieurs cm --> calibrations absolues.
- Problème important venant de la végétation proche des sites permanents : effet changeant et très difficile à contrôler / modéliser

25-29 septembre 2003

Ecole d'été GDR-G2 - Forcalquier

M-N Bouin 38