

Mesures radio spatiales

Antennes, récepteurs, contraintes, goniopolarimétrie

B. Cecconi

LESIA, Observatoire de Paris, France

PLAN

Introduction

Antennes

Récepteurs – Mesures

Goniopolarimétrie

Quelques Résultats

Concours

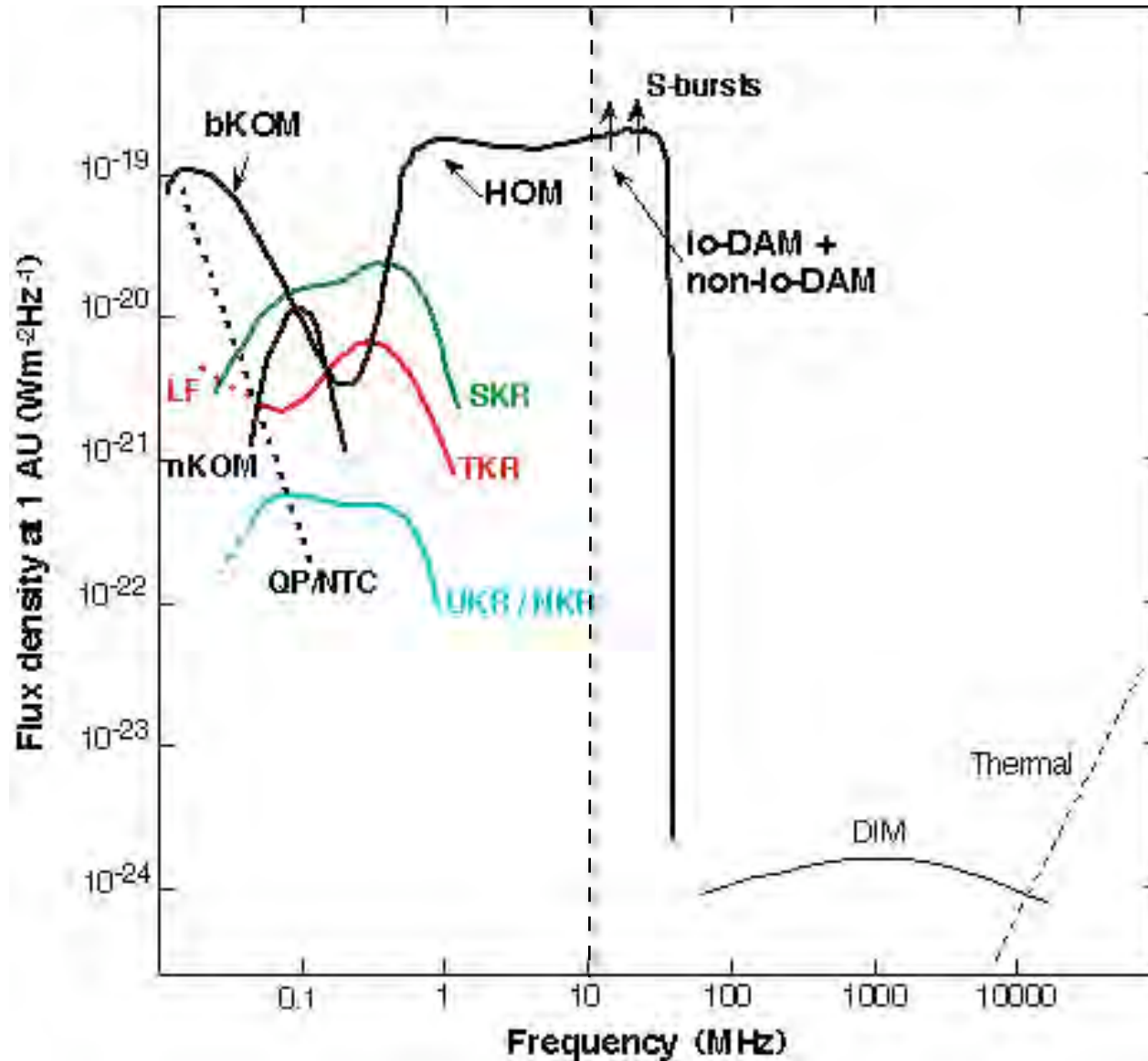
Introduction

Gamme de fréquence de la Radio-Astronomie BF

sub-millimétrique	100 μm	3 THz	
millimétrique	1 mm	300 GHz	EHF
centimétrique	1 cm	30 GHz	SHF
décimétrique	10 cm	3 GHz	UHF
métrique	1 m	300 MHz	VHF
décamétrique	10 m	30 MHz	HF
hectométrique	100 m	3 MHz	MF
kilométrique	1 km	300 kHz	LF
	10 km	30 kHz	VLF
	100 km	3 kHz	ULF
	1000 km	300 Hz	

Introduction

Emissions radio planétaires observées à l'aide de récepteurs radio spatiaux

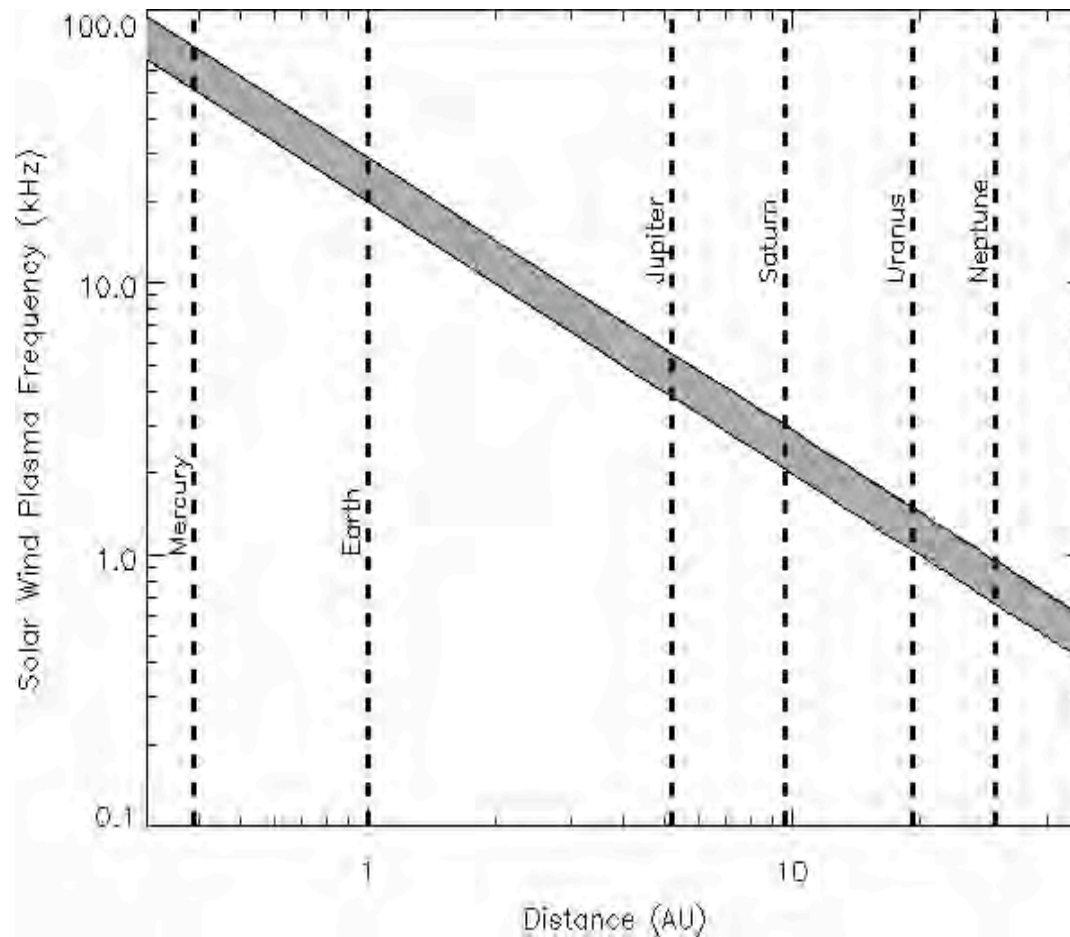


Introduction

Fréquences Limites d'observations

La propagation n'est possible que pour $f \geq f_{pe}/\cos\theta$

- Ionosphère terrestre → réflexion en dessous de $f_{pe-max} \sim 10$ MHz
- Vent Solaire → quelques kHz aux planètes externes (~ 100 kHz for Mercury)



Introduction

Gamme de fréquence de la Radio-Astronomie BF (suite)



limite BF pour observations spatiales = $f_{\text{plasma locale}}$

PLAN

Introduction

Antennes

Récepteurs – Mesures

Goniopolarimétrie

Quelques Résultats

Concours

Observations radio spatiales

contraintes pour les antennes:

faible encombrement au lancement

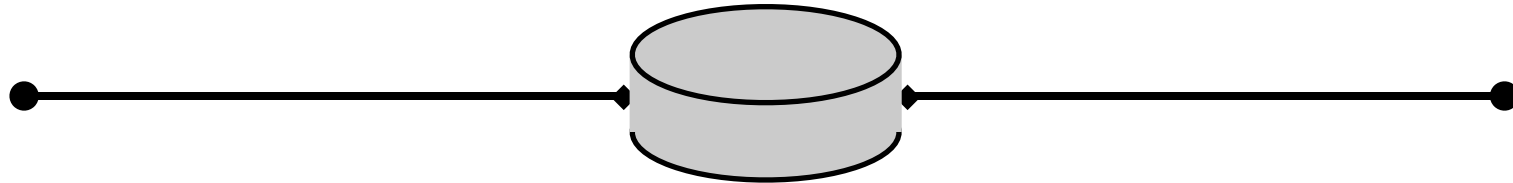
faible masse

déploiement aisé

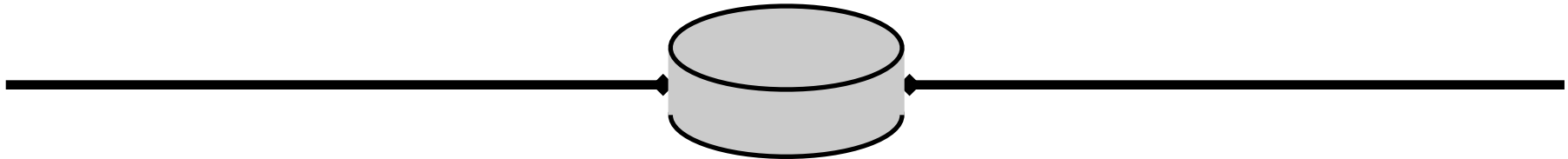
Observations radio spatiales

⇒ *deux types d'antennes utilisés :*

Boules (*Cluster, Geotail...*) pour $f \lesssim 3 \text{ kHz}$



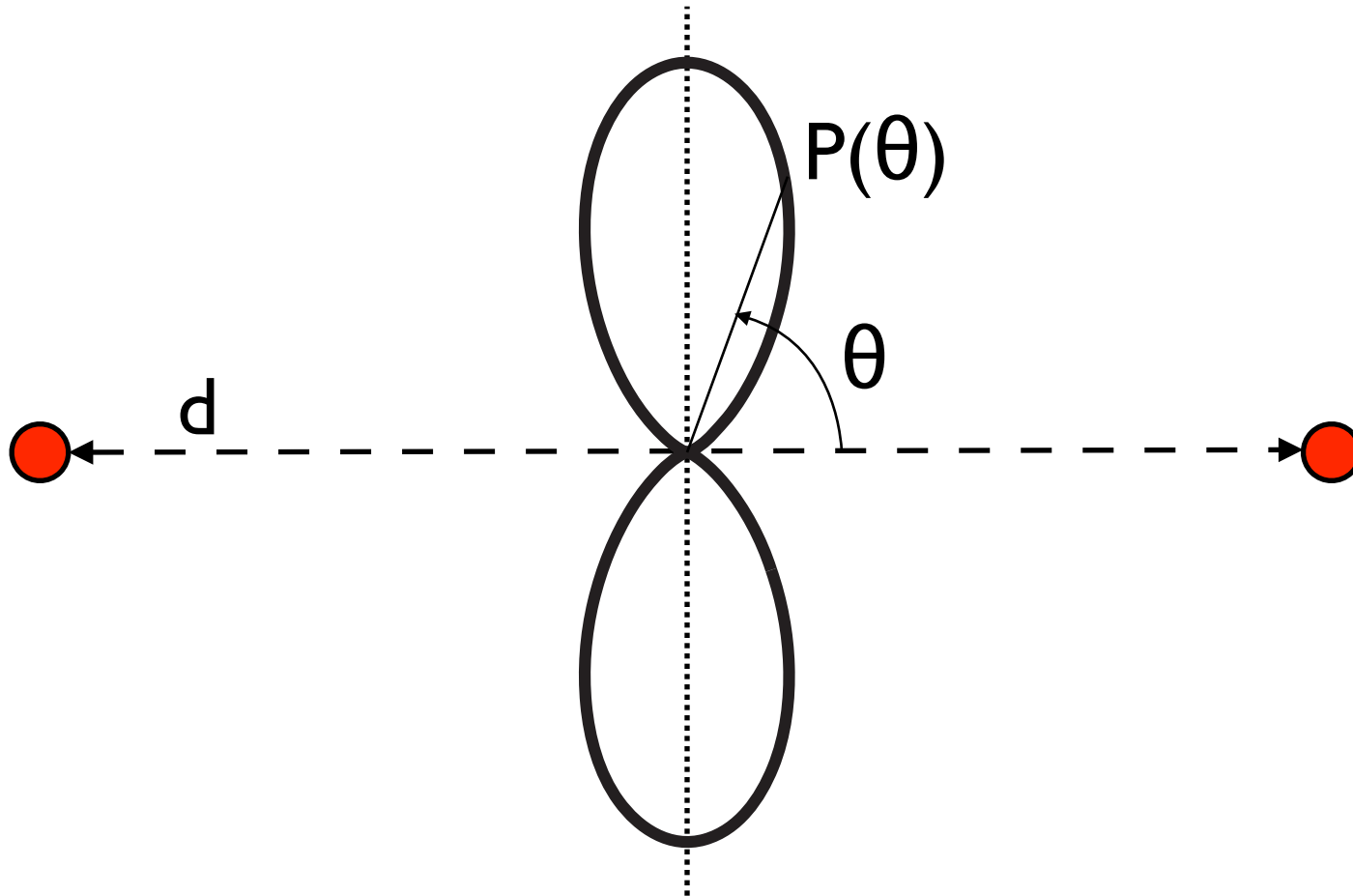
Tubes ou fils (*Wind, Ulysses, Cassini, STEREO...*) $f \gtrsim 3 \text{ kHz}$



Antennes radio Spatiales

diagramme de rayonnement de 2 sphères

(\Leftrightarrow interféromètre à 2 antennes !)

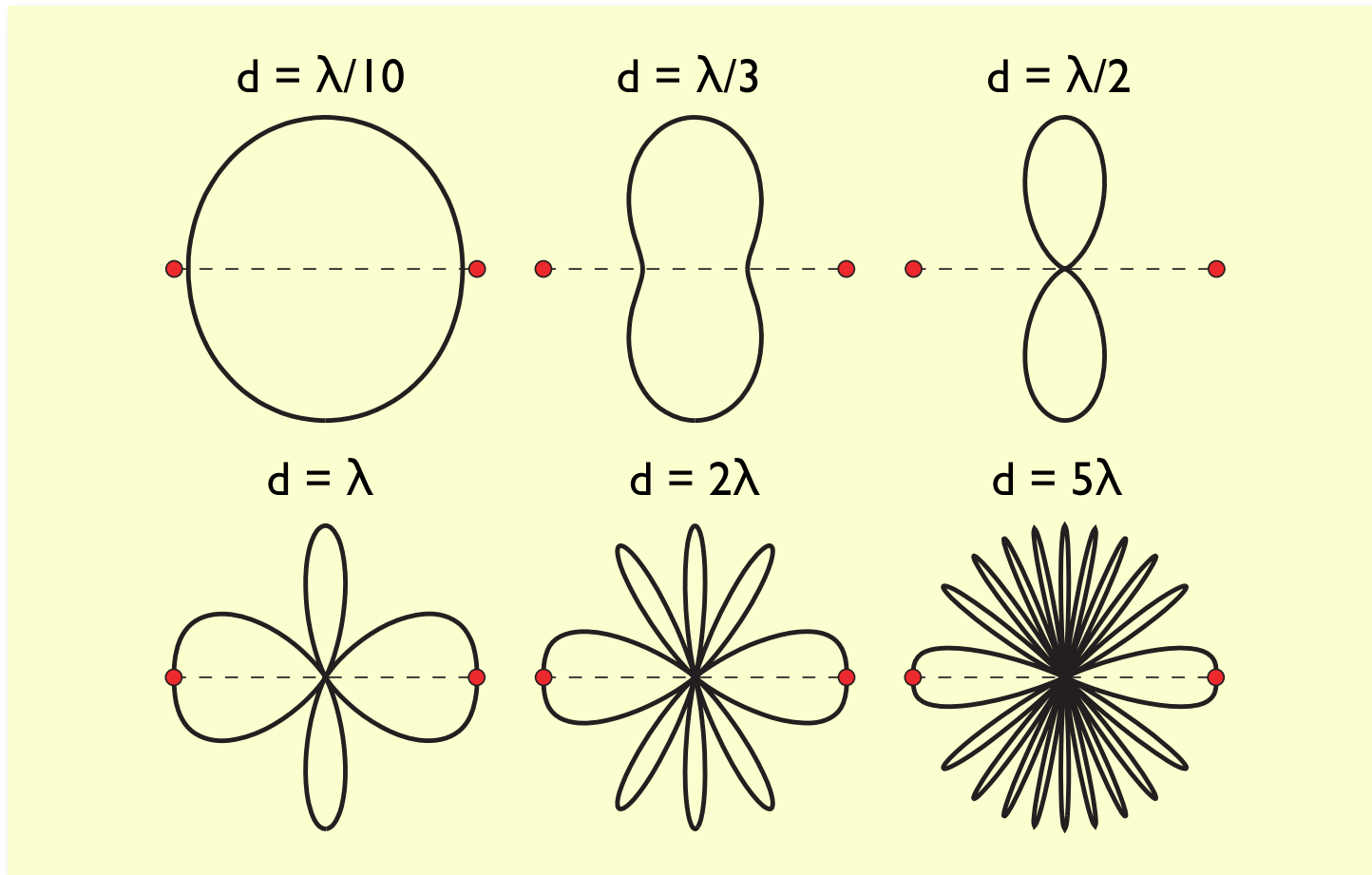


$$P(\theta) \propto \cos^2 \left(\pi d \cos \theta / \lambda \right)$$

Antennes radio Spatiales

diagramme de rayonnement de 2 sphères

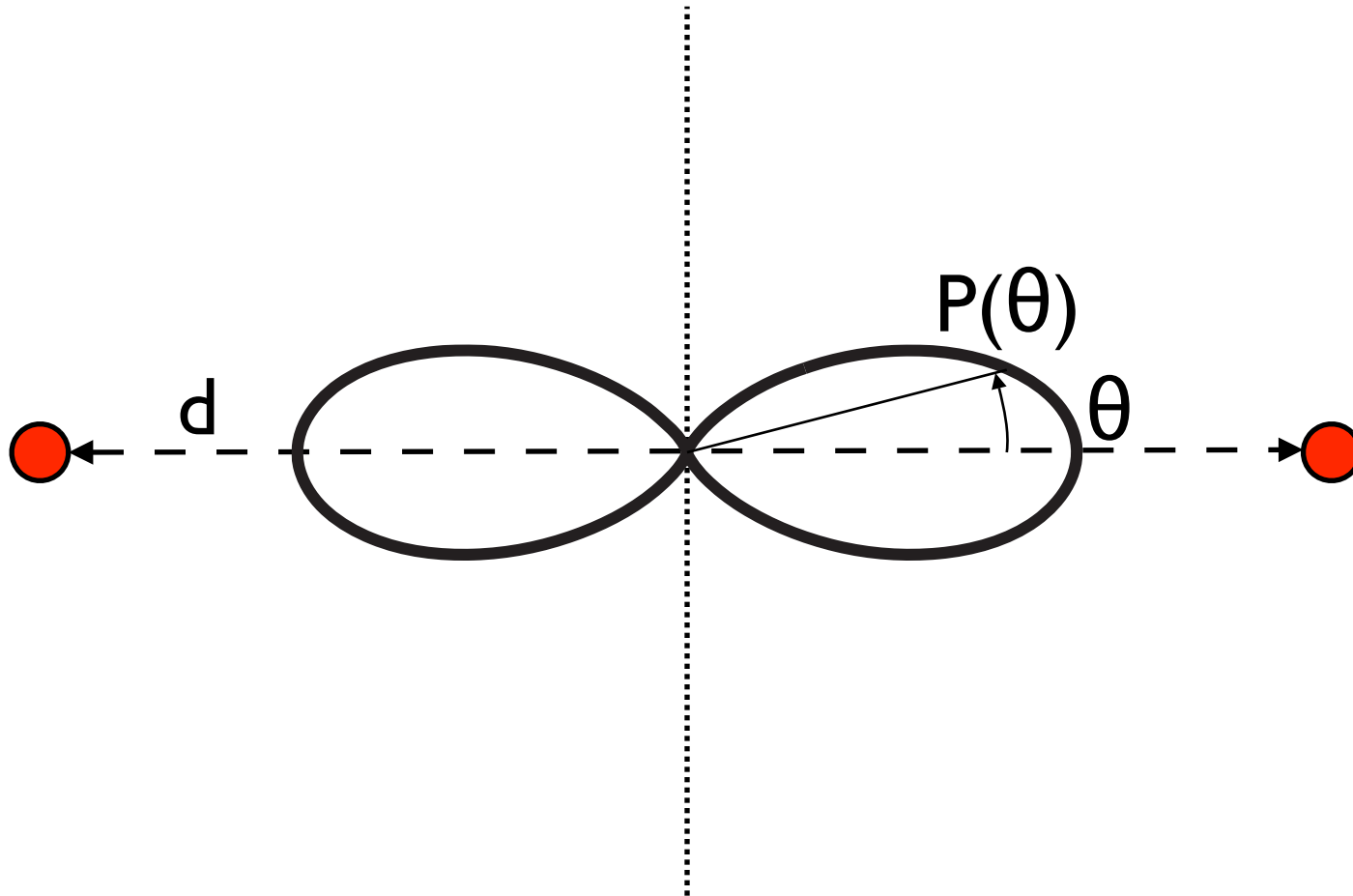
$$P(\theta) \propto \cos^2 \left(\pi d \cos\theta / \lambda \right)$$



$$P(\theta) \propto \cos^2 \left(\pi/2 \cos\theta \right) \text{ pour } d = \lambda/2$$

Antennes radio Spatiales

*diagramme de rayonnement de 2 sphères
en opposition de phase*



$$P(\theta) \propto \sin^2 \left(\pi d \cos \theta / \lambda \right)$$

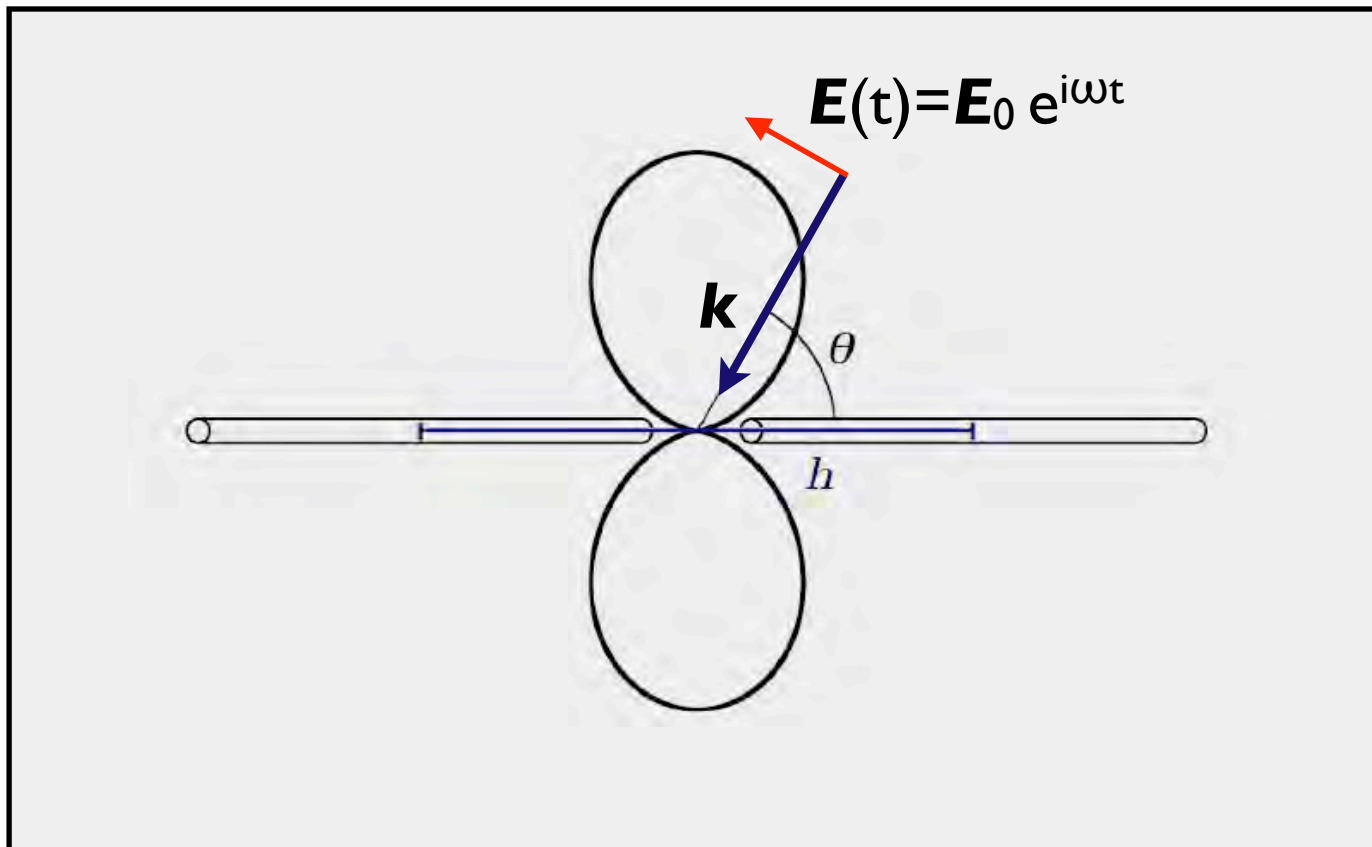
Antennes radio Spatiales

diagramme de rayonnement d'une antenne dipolaire

hypothèse antenne courte ($h \ll \lambda$)

$$V = \langle \mathbf{h} \cdot \mathbf{E}(t) \rangle = \mathbf{h} \cdot \mathbf{E}_0 \sin\theta$$

$$\Rightarrow P(\theta) \propto \sin^2\theta$$



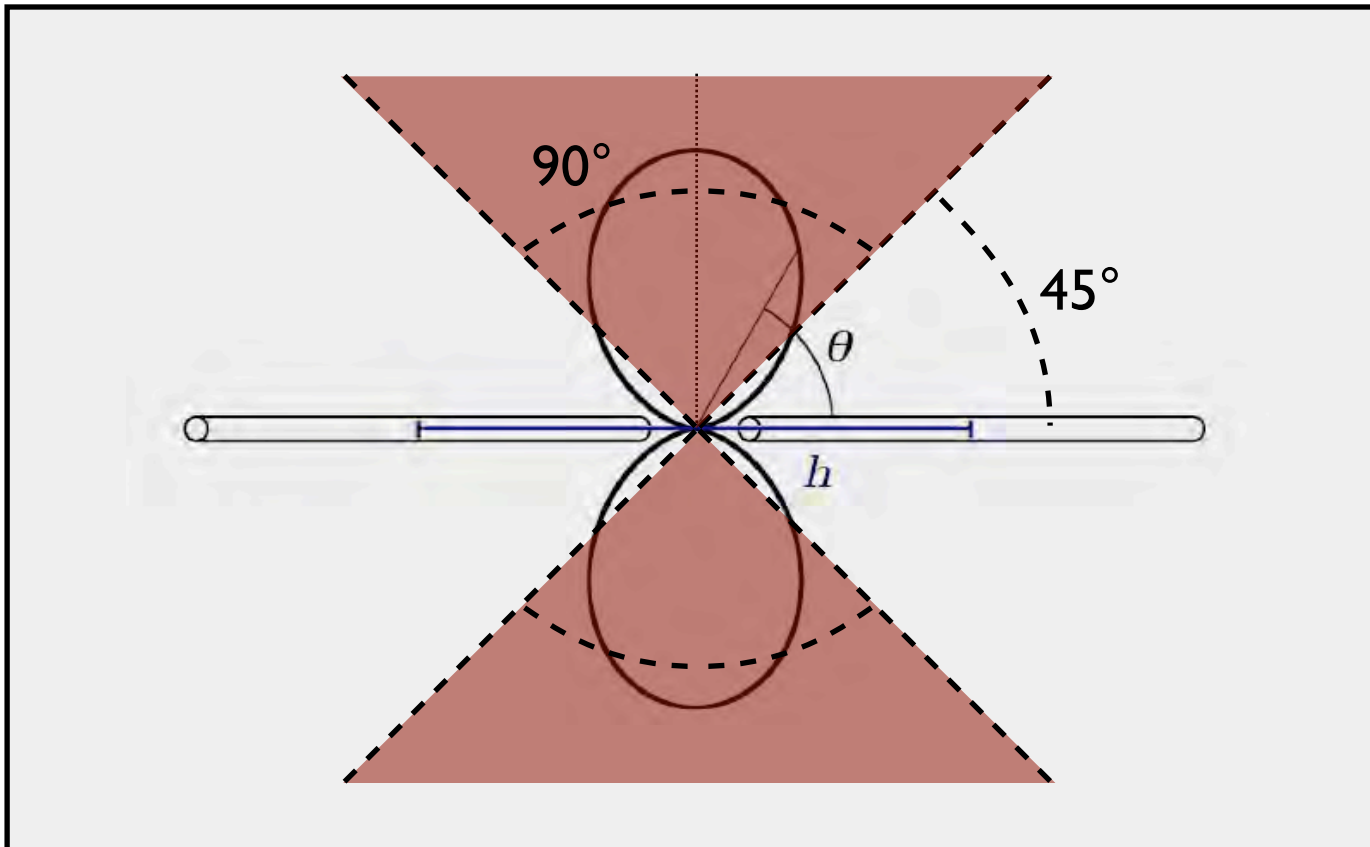
Antennes radio Spatiales

diagramme de rayonnement d'une antenne dipolaire

$$P = P_{\max}/2 \text{ à } \theta = 45^\circ$$

$$\Rightarrow \text{ouverture à 3dB} = 90^\circ$$

$$\text{Lobe principal : } \Omega = 8\pi/3 \text{ sr}$$

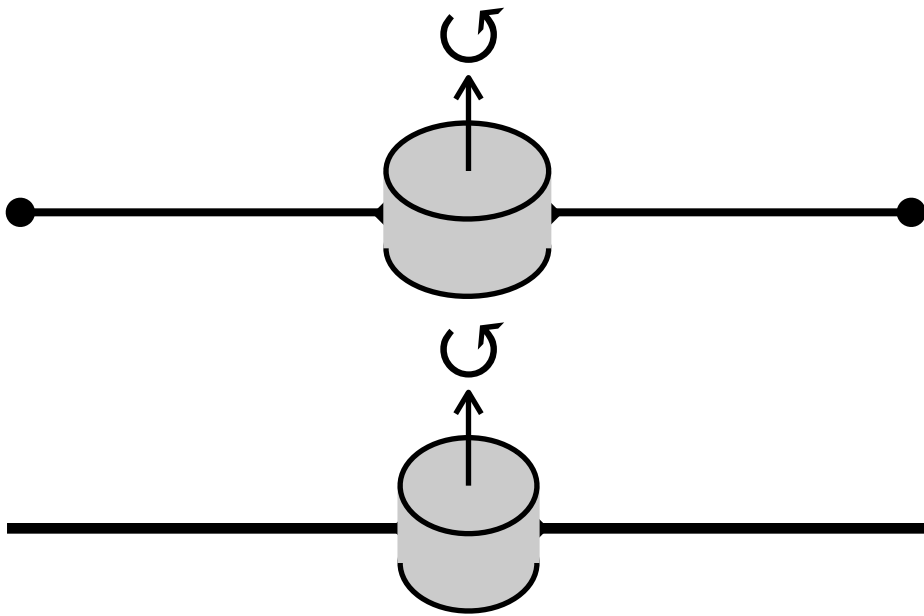


Antennes radio Spatiales

Configurations d'antennes

Satellites tournants
(boules ou fils)
 $h=20$ à 50 m

dipoles

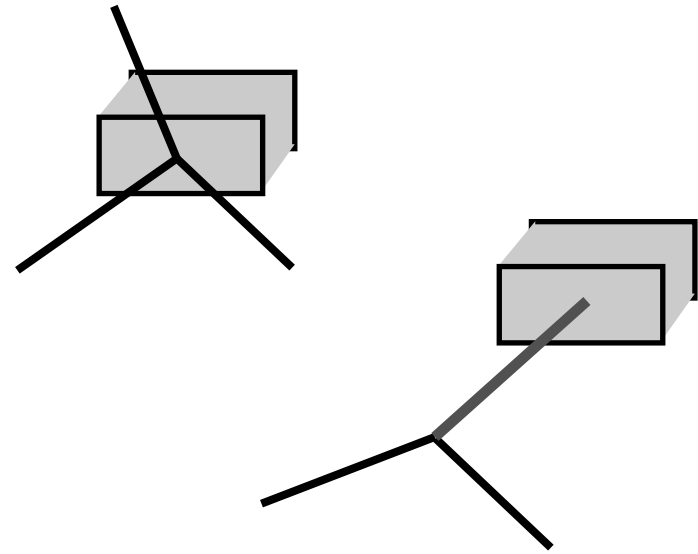


[Wind, Ulysses, Cluster...]

Satellites stabilisé 3 axes
(tubes)
 $h=6$ à 10 m

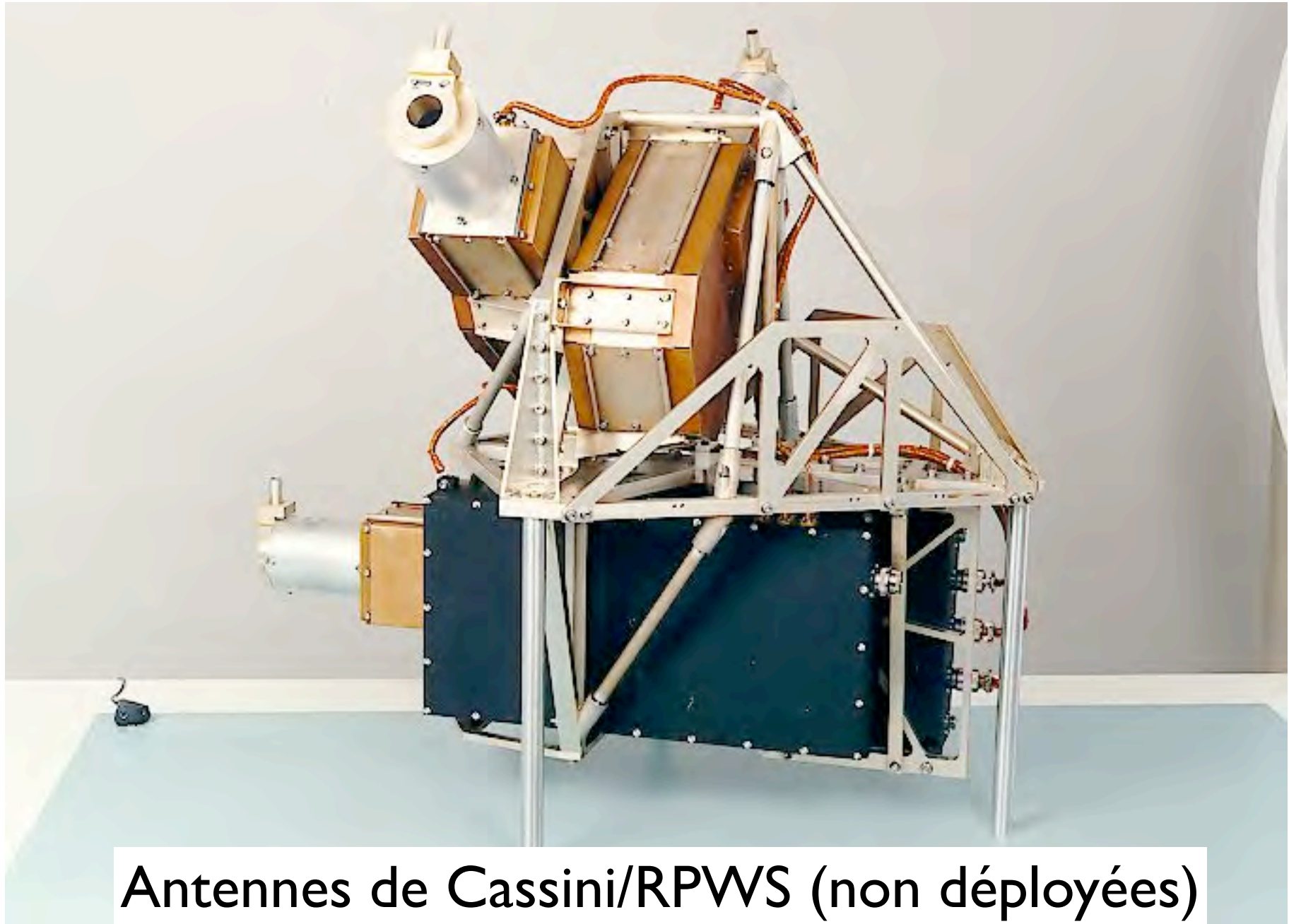
monopoles

(monopole+satellite ~ dipole)



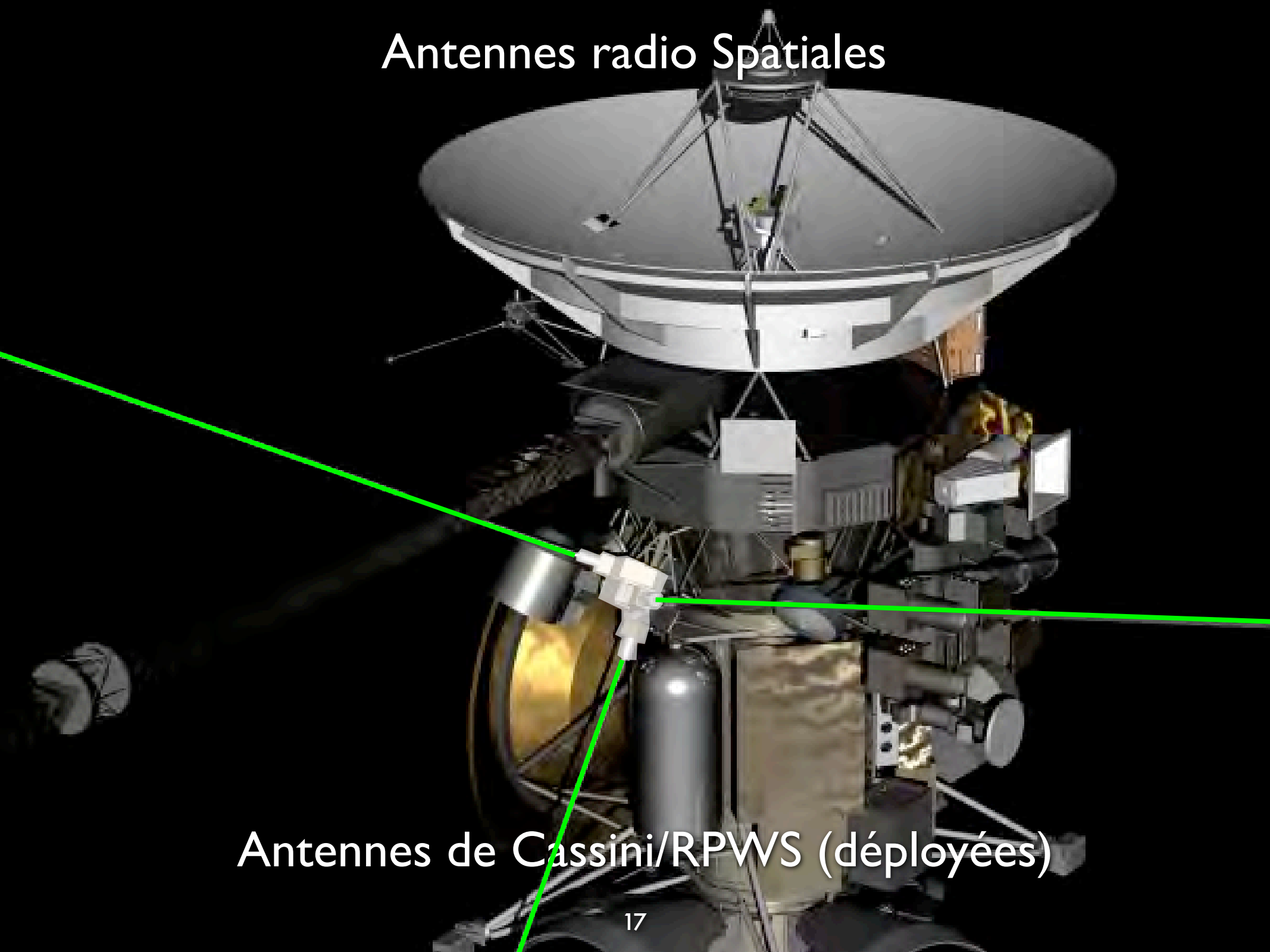
[Voyager, Galileo, Cassini, STEREO...]

Antennes radio Spatiales



Antennes de Cassini/RPWS (non déployées)

Antennes radio Spatiales



Antennes de Cassini/RPWS (déployées)

PLAN

Introduction

Antennes

Récepteurs – Mesures

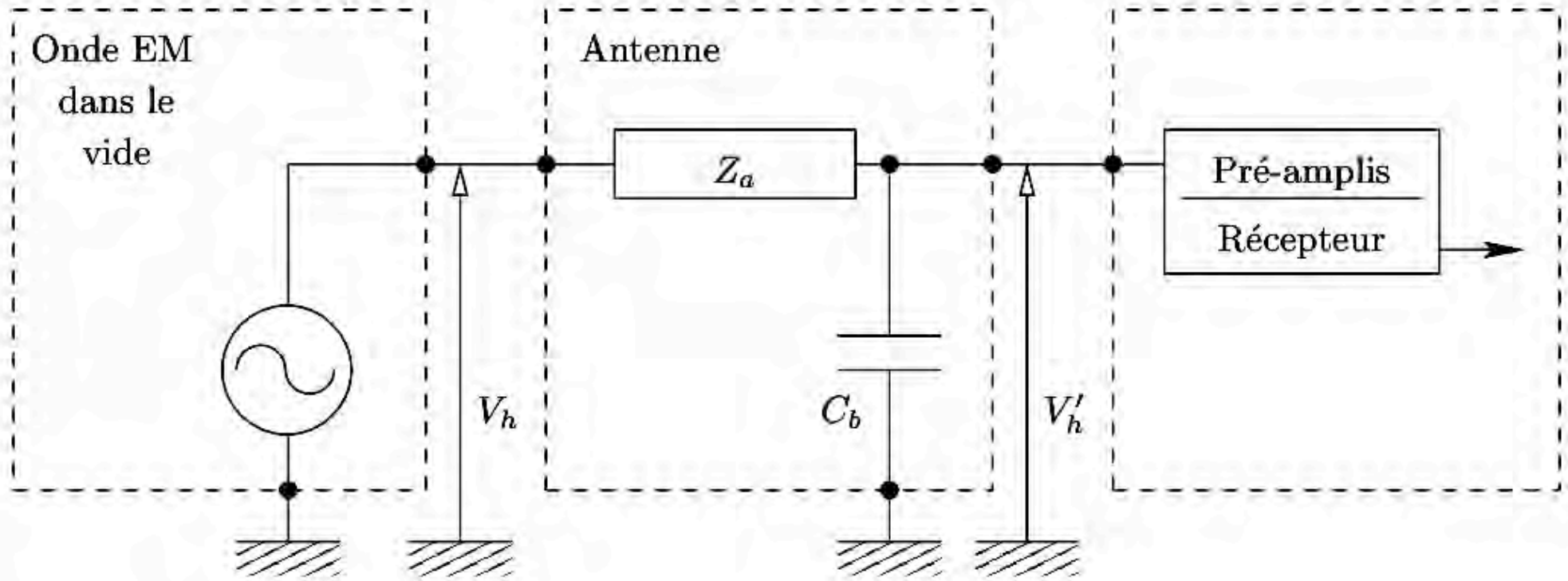
Goniopolarimétrie

Quelques Résultats

Concours

Récepteurs – Mesures

Schéma équivalent d'une antenne électrique dans le vide

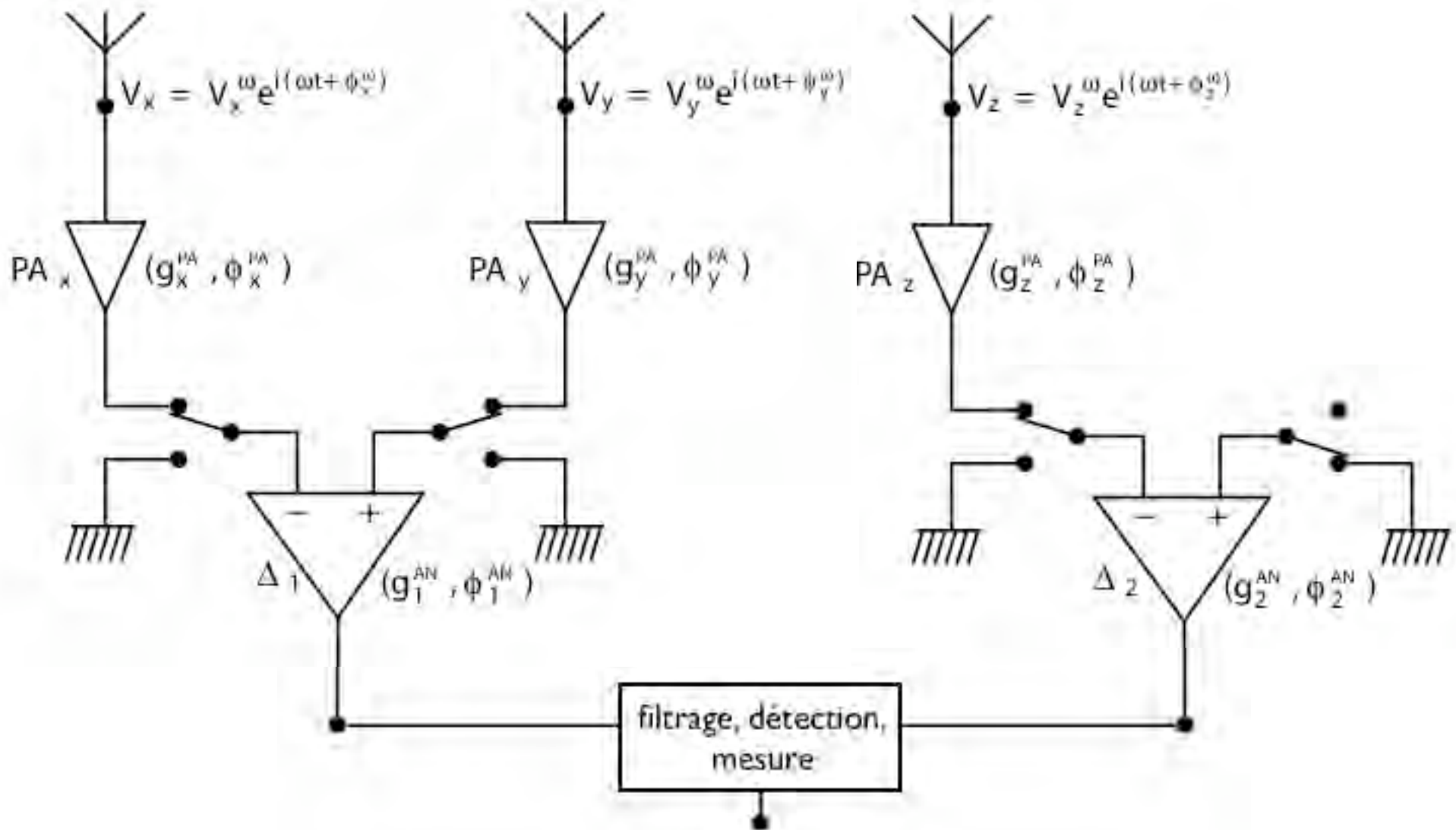


différence de potentiel à l'entrée du récepteur :

$$V'_h = V_h \frac{C_a}{C_a + C_b}$$

Récepteurs – Mesures

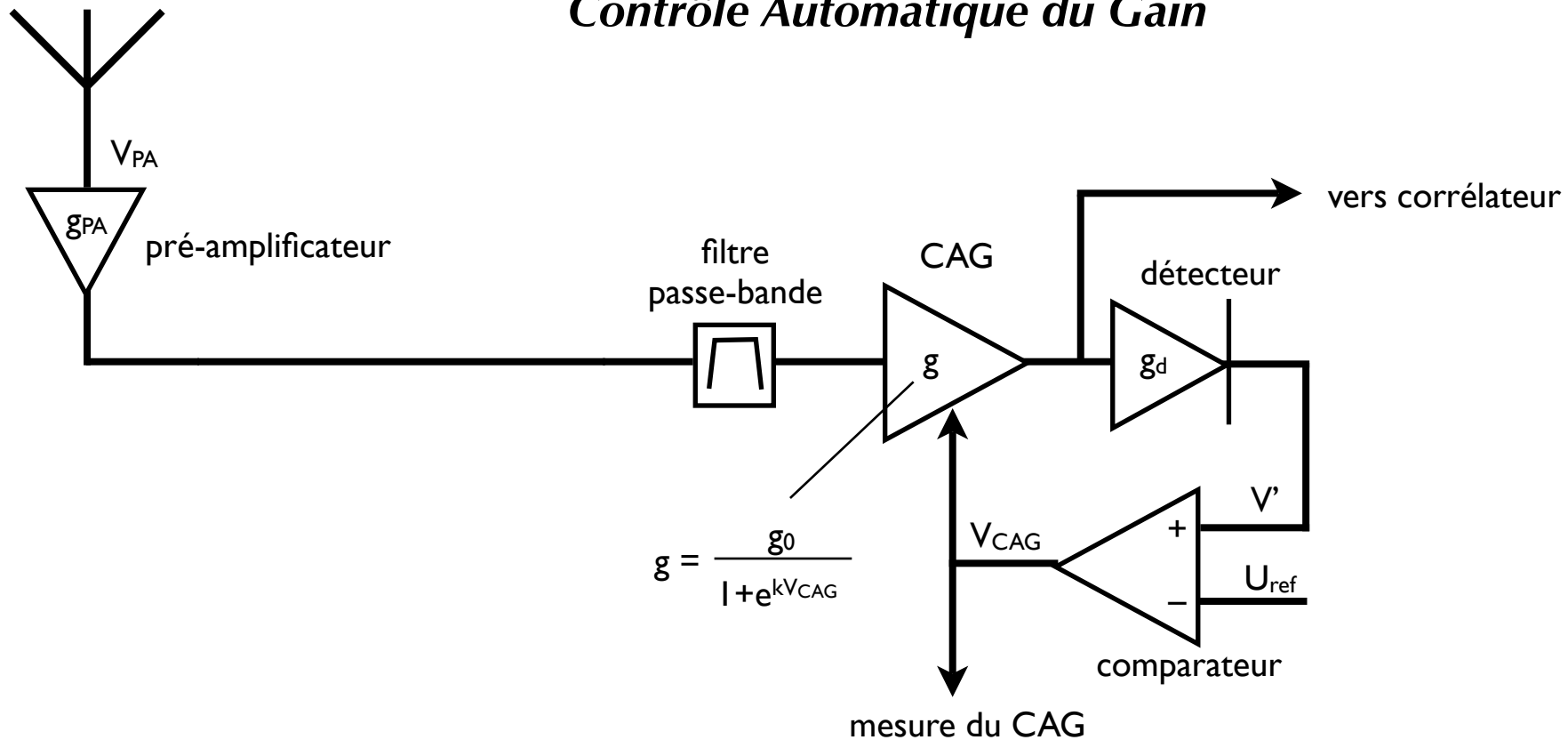
schéma simplifié d'un récepteur multicanal



Récepteurs – Mesures

Filtrage, détection, mesure

Contrôle Automatique du Gain



Le comparateur sort V_{CAG} tel que $V' = U_{ref}$

$$V' = g_{PA} \frac{g_0}{1 + e^{kV_{CAG}}} g_d V_{PA} = U_{ref} \quad \Rightarrow \quad V_{CAG} = \frac{1}{k} \log \left(\frac{V_{PA}}{V_0} - 1 \right) \quad \text{Fonction de transfert}$$

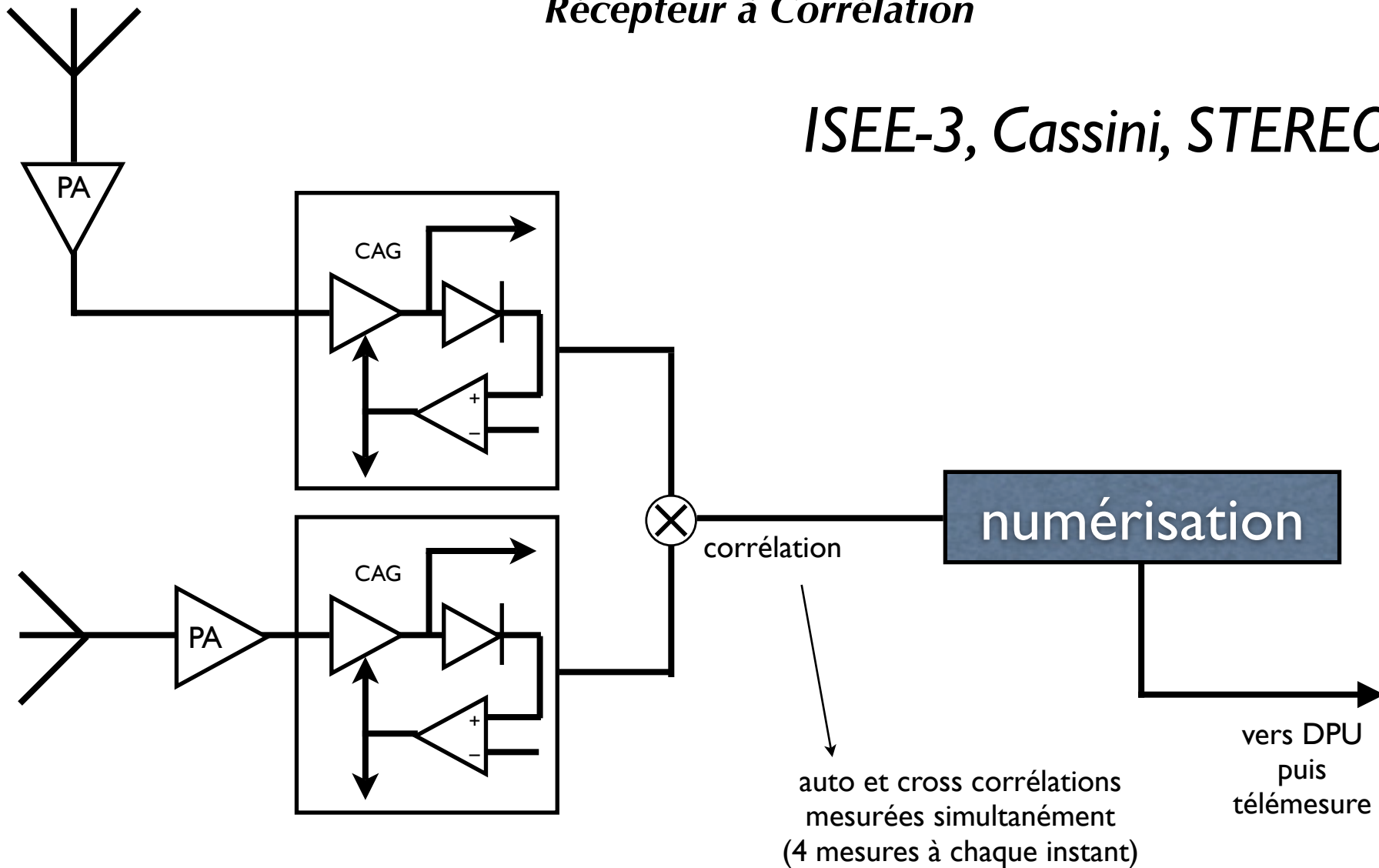
$$\text{avec } V_0 = \frac{U_{ref}}{g_{PA} g_0 g_d}$$

Récepteurs – Mesures

Filtrage, détection, mesure

Récepteur à Corrélation

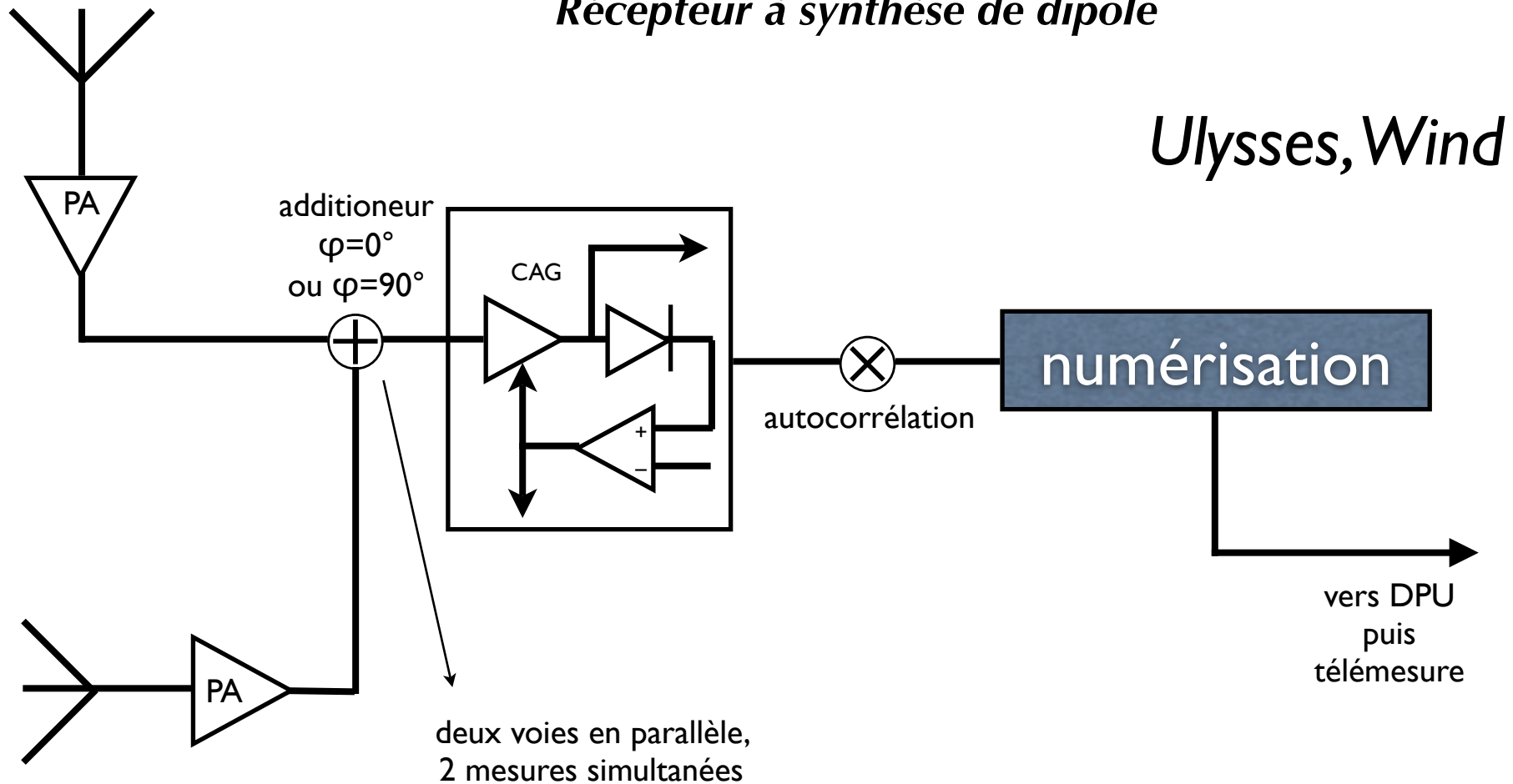
ISEE-3, Cassini, STEREO



Récepteurs – Mesures

Filtrage, détection, mesure

Récepteur à synthèse de dipole



Récepteurs – Mesures

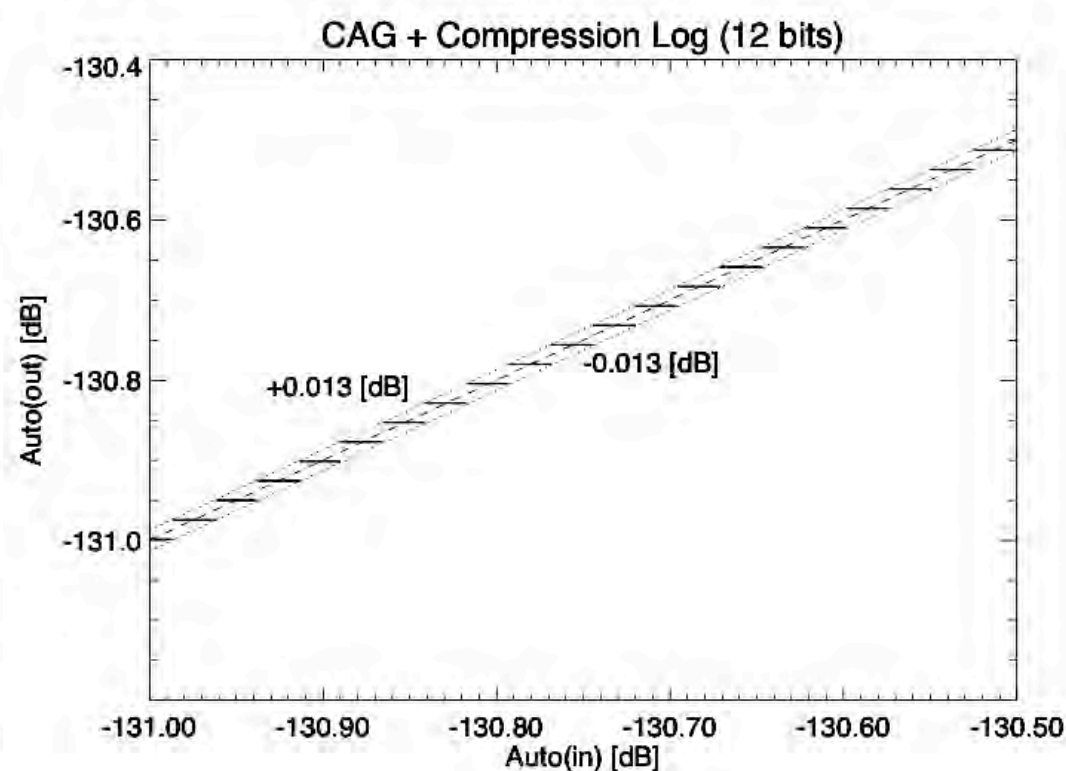
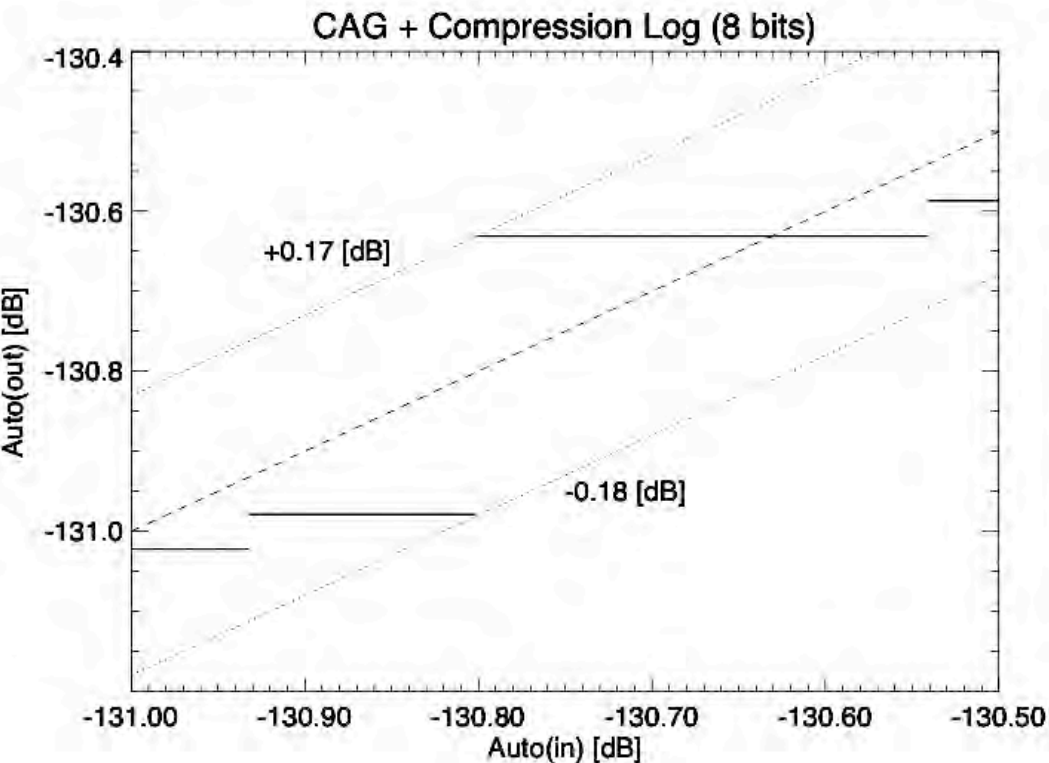
Numérisation

Numérisation des CAG

- numérisation linéaire sur 2^n niveaux ($n=8$ pour Wind, Cassini; $n=12$ pour STEREO) mais avec fonction de transfert avec profil logarithmique (“loi log”).

Numérisation des corrélations (via analyse numérique à bord : FFT, ondelettes...)

- numérisation en flottants (mantisse et exposant + signe pour les cross-corrélations) sur 8 bits pour Cassini/RPWS et 12 bits pour STEREO/Waves.



Récepteurs – Mesures

Puissances

Mesures :

densité spectrale de puissance P [$V^2.Hz^{-1}$] :

auto- (cross-) corrélations des tensions mesurées aux bornes des antennes

Flux reçu :

$S = E^2 / (Z_0 b)$ [$W.m^{-2}.Hz^{-1}$] (où b =bande passante d'observation)

$$= V^2 / (Z_0 b h^2)$$

Sensibilité des observations :

$$\sqrt{S_{\min}} / (Z_0 h^2) = V / b^{1/2} \quad [V.Hz^{-1/2}]$$

caractérise la sensibilité des récepteurs radio embarqués

actuellement : ~ 5 à 10 nV.Hz^{-1/2} (récepteur du LESIA)

d'où : $S_{\min} \sim 1.5$ à 6×10^{-22} W.m⁻².Hz⁻¹ avec $h \sim 20$ m

c'est le seuil de détection effectif si $f \lesssim 1$ MHz

si $f \gtrsim 1$ MHz bruit de fond galactique dominant.

Récepteurs – Mesures

Forme d'onde

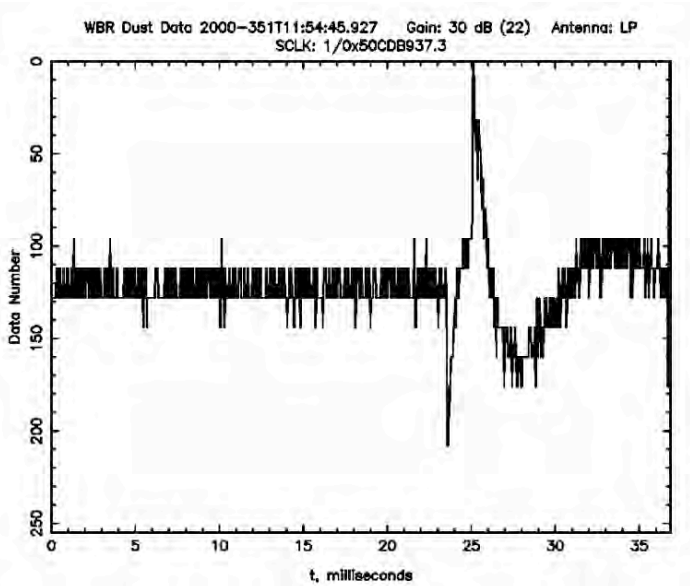
Mesures en forme d'onde :

mesure de $V(t)$ sur une durée courte ($<10s$) à haute cadence (256000 échantillons/seconde sur 12bits sur STEREO).

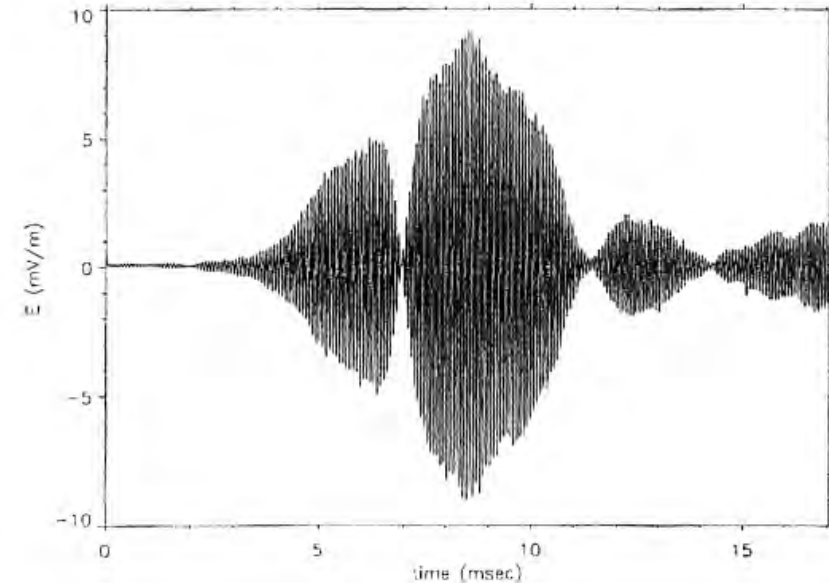
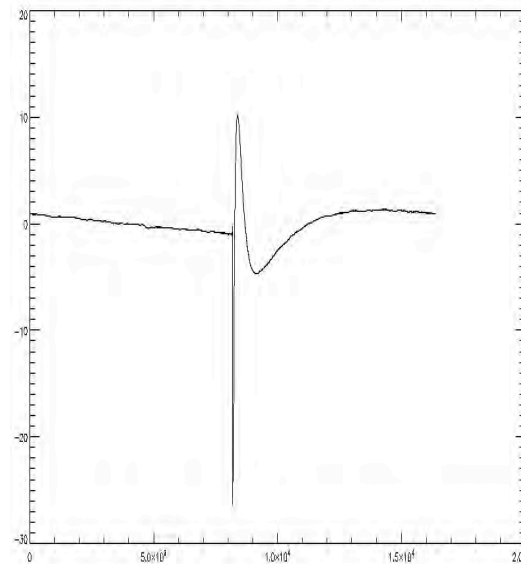
Nécessité d'un algorithme de détection pour ne garder que les événements "intéressants".

Possibilité d'hétérodynage.

Cassini/RPWS/WBR

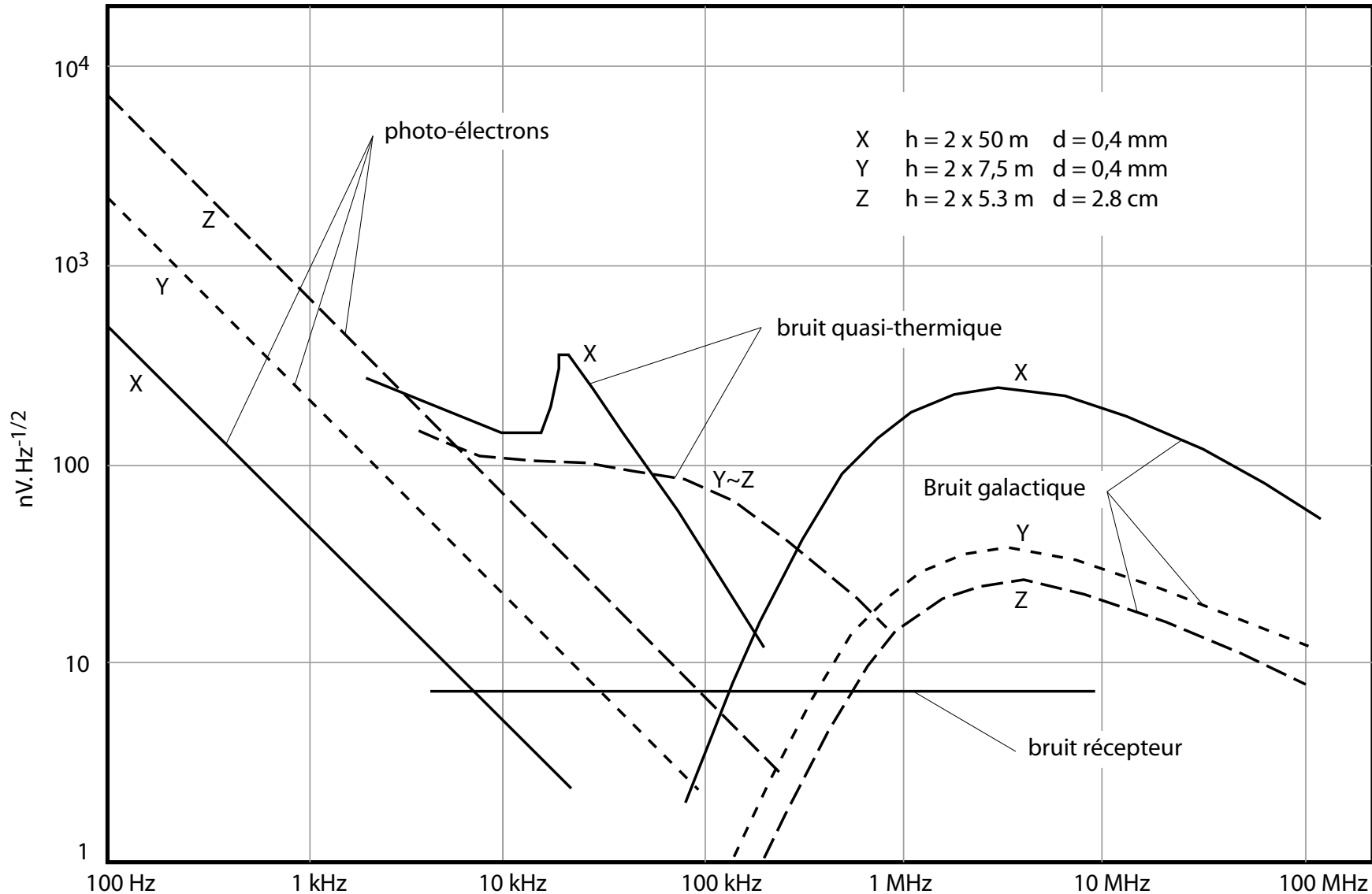


STEREO/Waves/TDS



Récepteurs – Mesures

Les différentes sources de bruit sur un récepteur radio embarqué



+ raies parasites

Récepteurs – Mesures

Contraintes Spécifiques pour les observations spatiales

Contraintes

- L_{max} *inertie, déploiement, gêne optique*
- *Masse* \leq *quelques kg*
- *Puissance consommée* \leq *quelques W*
- *Dimensions* *miniaturisations, ASIC...*
- *Dynamique* *2 étages : CAG + analyse numérique*

Sources de Bruit

- *Thermique* *agitation des électrons libres au voisinage de l'antenne*
bruit électrostatique avec un pic à f_{pe}
- *Photoélectrique* *électrons arrachés à l'antenne ou au satellite*
- *Fond galactique* *domine $f \geq 1$ MHz*
- *Parasites de bord* *convertisseurs d'alimentation*

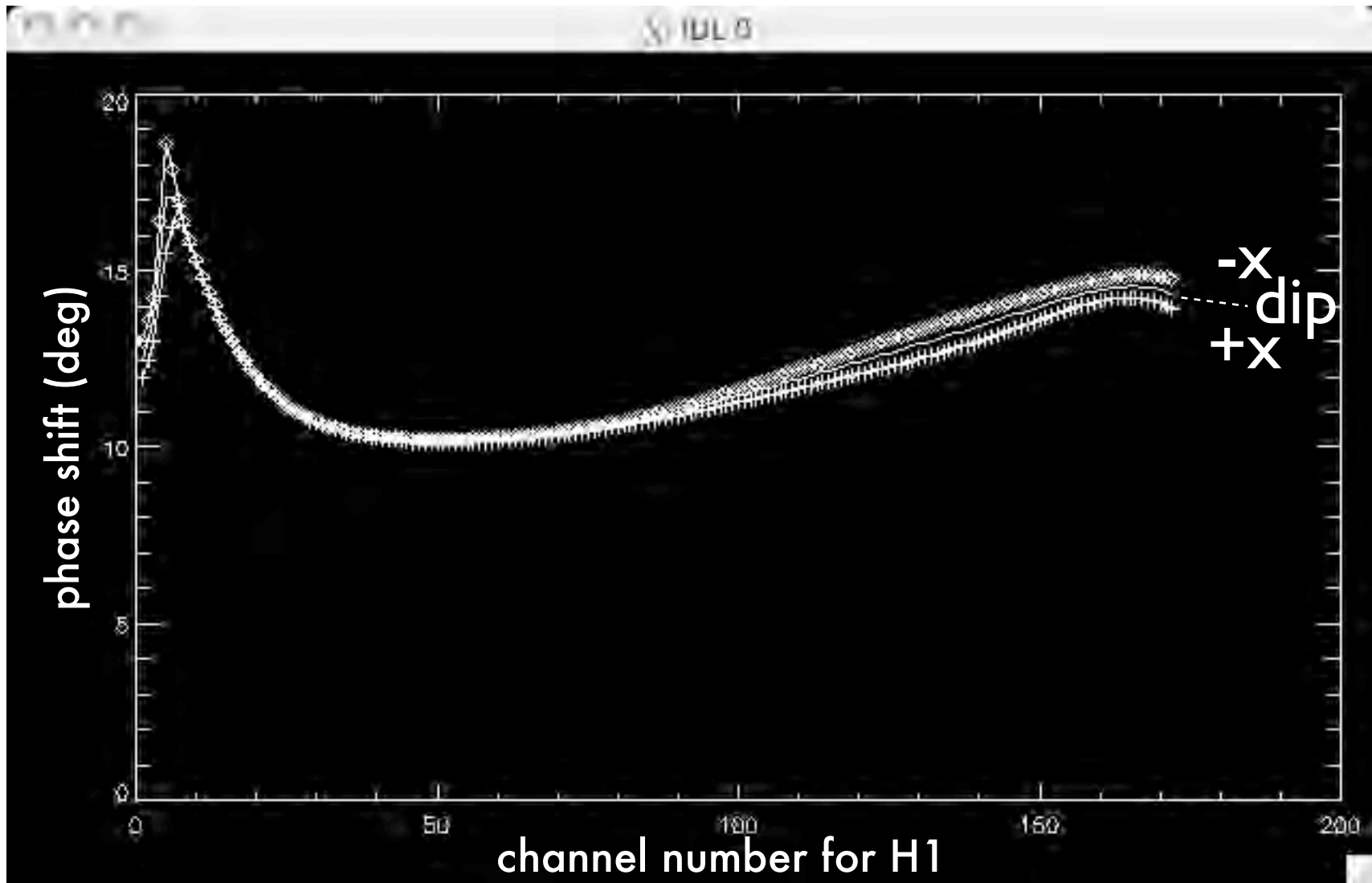
Mesure

- *Auto- et Cross-corrélations des tensions mesurées aux bornes des antennes :*
$$P_{ij} = \langle V_i V_j^* \rangle$$

Récepteurs – Mesures

Etalonnage en phase

Etalonnage en labo avec générateur de bruit (illustration Cassini/RPWS)



Récepteurs – Mesures

Etalonnage en gain

source étalon : Rayonnement BF galactique [dulk et al., 2001] ~ isotrope
connu à mieux que $\pm 50\%$ (Wind, Ulysses, ISEE-3, BIRS)

obtention du rapport $h.C_a / (C_a + C_b) \Rightarrow$ Flux

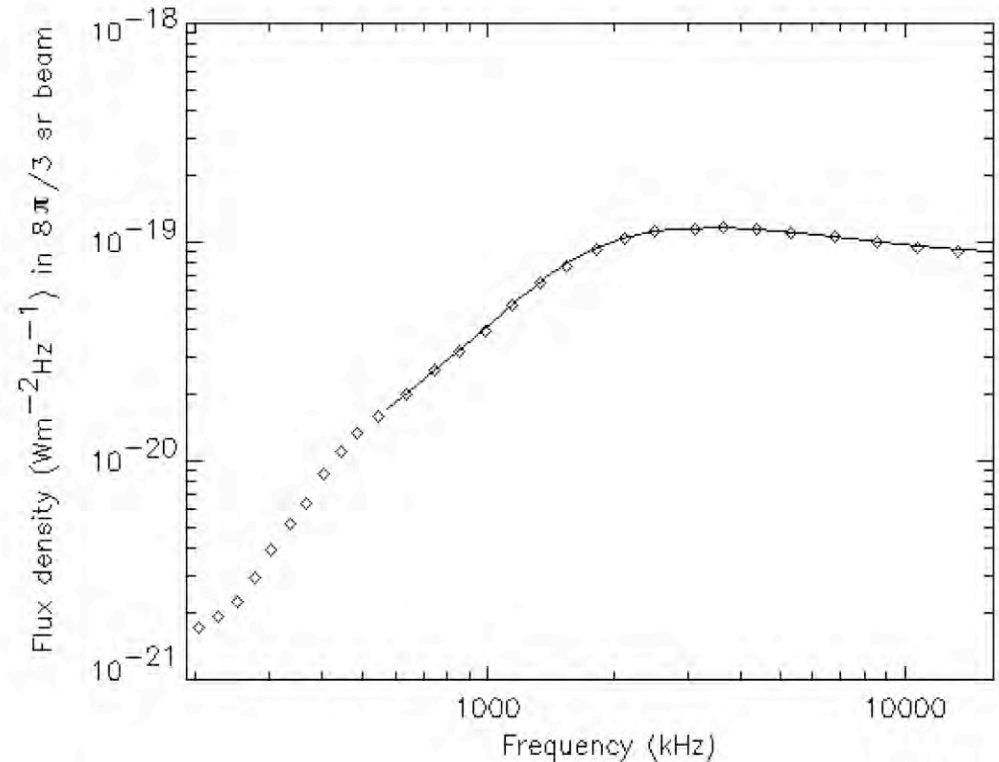
Résultats (Cassini/RPWS) :

$$h.C_a / (C_a + C_b) = 3.06 \text{ (dipôle)}$$

$$h.C_a / (C_a + C_b) = 1.68 \text{ (monopôle)}$$

d'où les paramètres :

- longueurs : $h \sim 8\text{m}$
- capacités de base ($C_b \sim 150\text{pF}$) pour une capacité d'antenne $C_a = 100\text{pF}$



PLAN

Introduction

Antennes

Récepteurs – Mesures

Goniopolarimétrie

Quelques Résultats

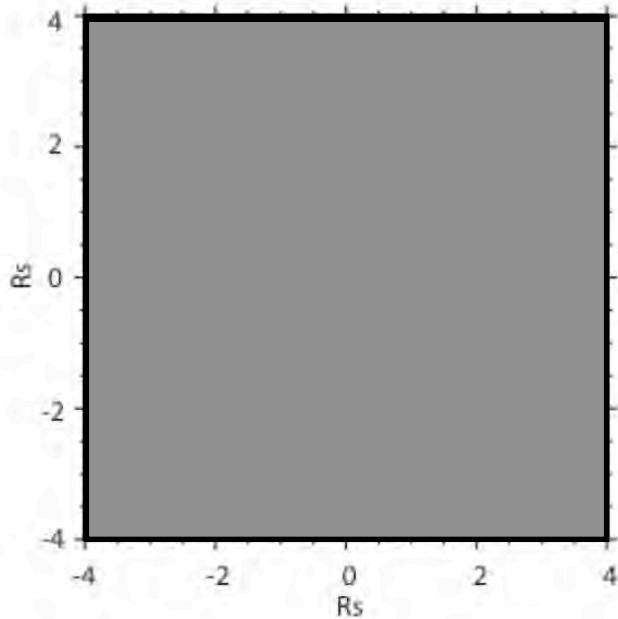
Concours

Goniopolarimétrie

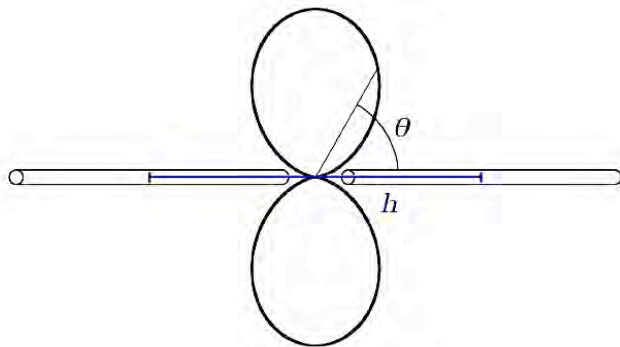
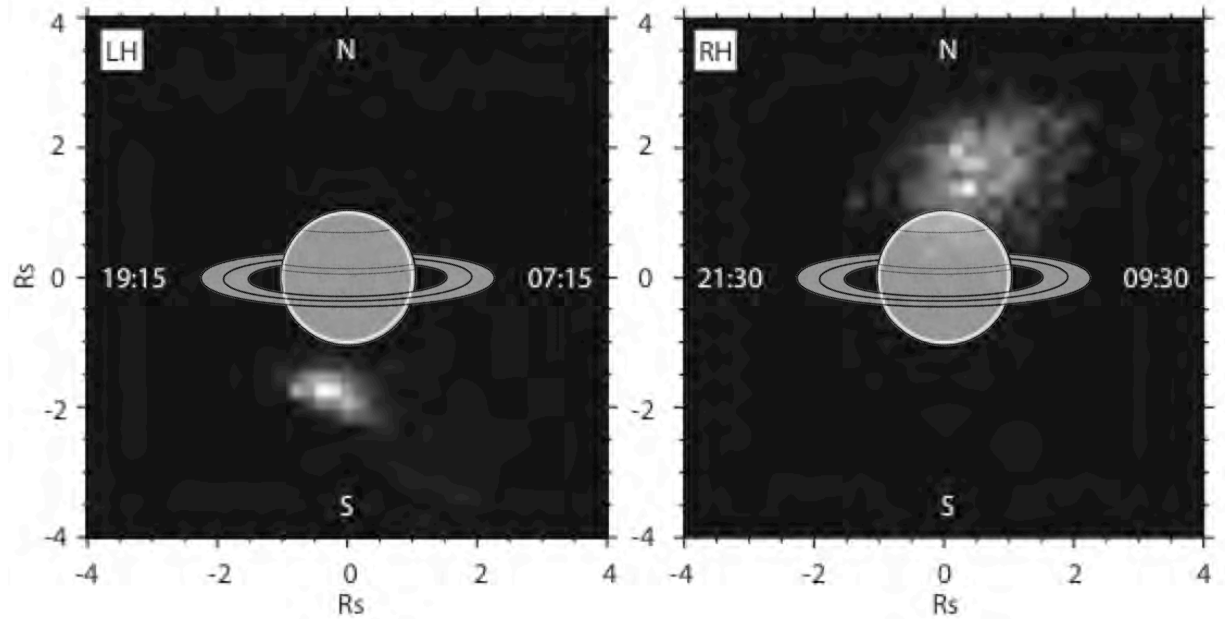
pourquoi faire ?

- λ/D à 300kHz ($\lambda \sim 1000\text{m}$) = $\sim 100^\circ$

λ/D



goniométrie (Direction-Finding) [$\sim 1^\circ$ précision]



- **Gonio-polarimétrie** (direction/
polarisation couplées)
 - ~HRA en radio
 - ~Spectro-Imageur Polarimétrique

Goniopolarimétrie

Cas de Cassini/RPWS (ou de STEREO/Waves).

- Satellite stabilisé 3 axes
- 3 antennes (monopôles)
- mesures = autocorrélations + intercorrélations.

“GP instantanée”

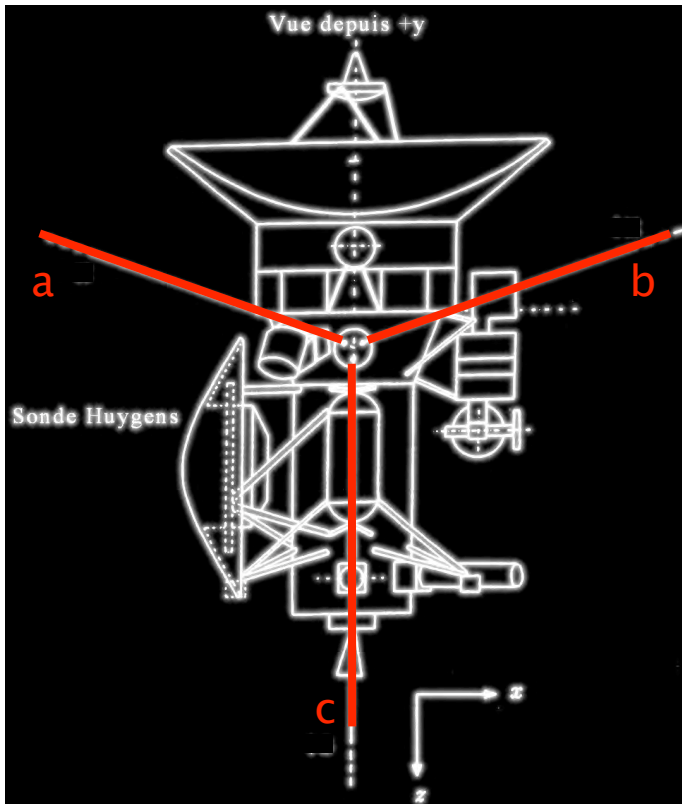
Autres systèmes Goniopolarimétriques :

- satellites tournants + corrélations
ISEE-3
- satellites tournants + sommes phasées
Wind, Ulysses, Interball

“GP par démodulation”

Goniopolarimétrie

Principes et Paramètres (Satellite stabilisé 3 axes)



7 (ou 9) Mesures :

- Autocorrélations (a, b et c) [3]
- Intercorrélations (ac et bc) [4=2x2]
- ou (ab, bc et ac) [6=3x2]

Onde électromagnétique : 6(+1) paramètres

- S : flux de Poynting (E^2/Z_0)
- Q : taux de polar. Verticale
- U : taux de polar. Horizontale
- V : taux de polar. Circulaire

• θ et ϕ : direction du vecteur d'onde

• σ : taille de la source

Mesures:

$$P_{ij} = \langle (\mathbf{h}_i \cdot \mathbf{E}) (\mathbf{h}_j \cdot \mathbf{E})^* \rangle = \langle V_i V_j^* \rangle$$

$$\begin{cases} \langle E_X \cdot E_X^* \rangle = Z_0 S (1 + Q) \\ \langle E_Y \cdot E_Y^* \rangle = Z_0 S (1 - Q) \\ \langle E_X \cdot E_Y^* \rangle = Z_0 S (U - iV) \\ \langle E_Y \cdot E_X^* \rangle = Z_0 S (U + iV) \end{cases}$$

Paramètres d'antennes (9)

- longueur h_i , direction θ_i et ϕ_i $i=[a,b,c]$

Goniopolarimétrie

Mesures

Hypothèses :

- Source unique et ponctuelle (*onde plane électromagnétique*)
- Antennes dipolaires

$$P_{ij} = \frac{Z_0 G h_i h_j S_0}{2} [(1 + Q)A_i A_j + (U - iV)A_i B_j + (U + iV)A_j B_i + (1 - Q)B_i B_j]$$

projections des antennes sur le plan d'onde

$$A_i(\theta_C, \phi_C) = -\sin \theta_i \cos \theta_C \cos(\phi_C - \phi_i) + \cos \theta_i \sin \theta_C$$

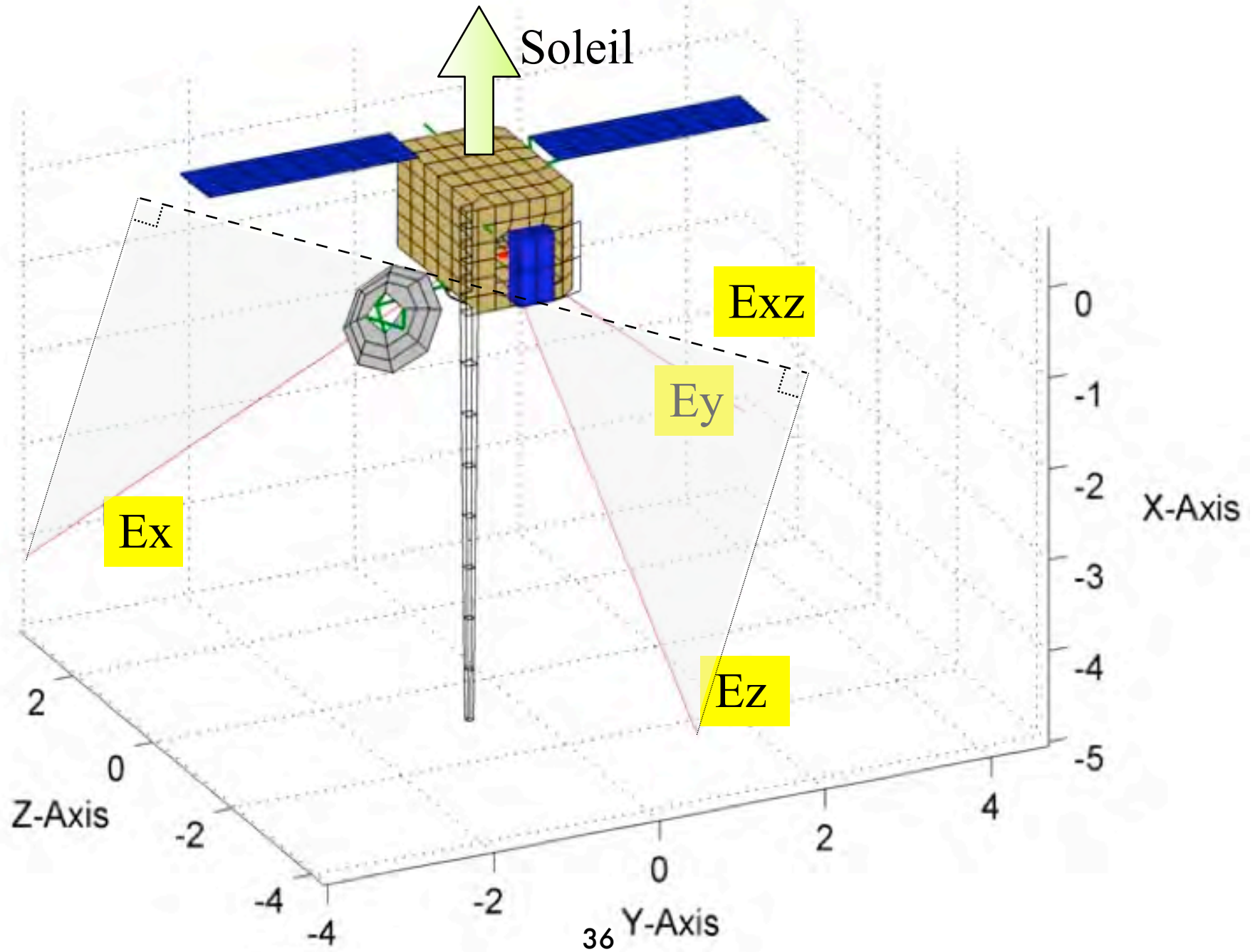
$$B_i(\theta_C, \phi_C) = -\sin \theta_i \sin(\phi_C - \phi_i)$$

Remarques

- Sh^2 : indissociable en GP
- $A_n(\theta, \varphi, \theta_n, \varphi_n), B_n(\theta, \varphi, \theta_n, \varphi_n)$ connus :
système algébrique en S, SQ, SU, SV
- si $\theta' = \pi - \theta, \varphi' = \pi + \varphi, Q' = Q, U' = -U, V' = -V$: mesures identiques
⇒ on ne peut pas dissocier la polarisation de la direction d'arrivée

Goniopolarimétrie

antennes (STEREO/Waves)



Goniopolarimétrie

Etalonnages des antennes

Paramètres

- directions
- longueurs

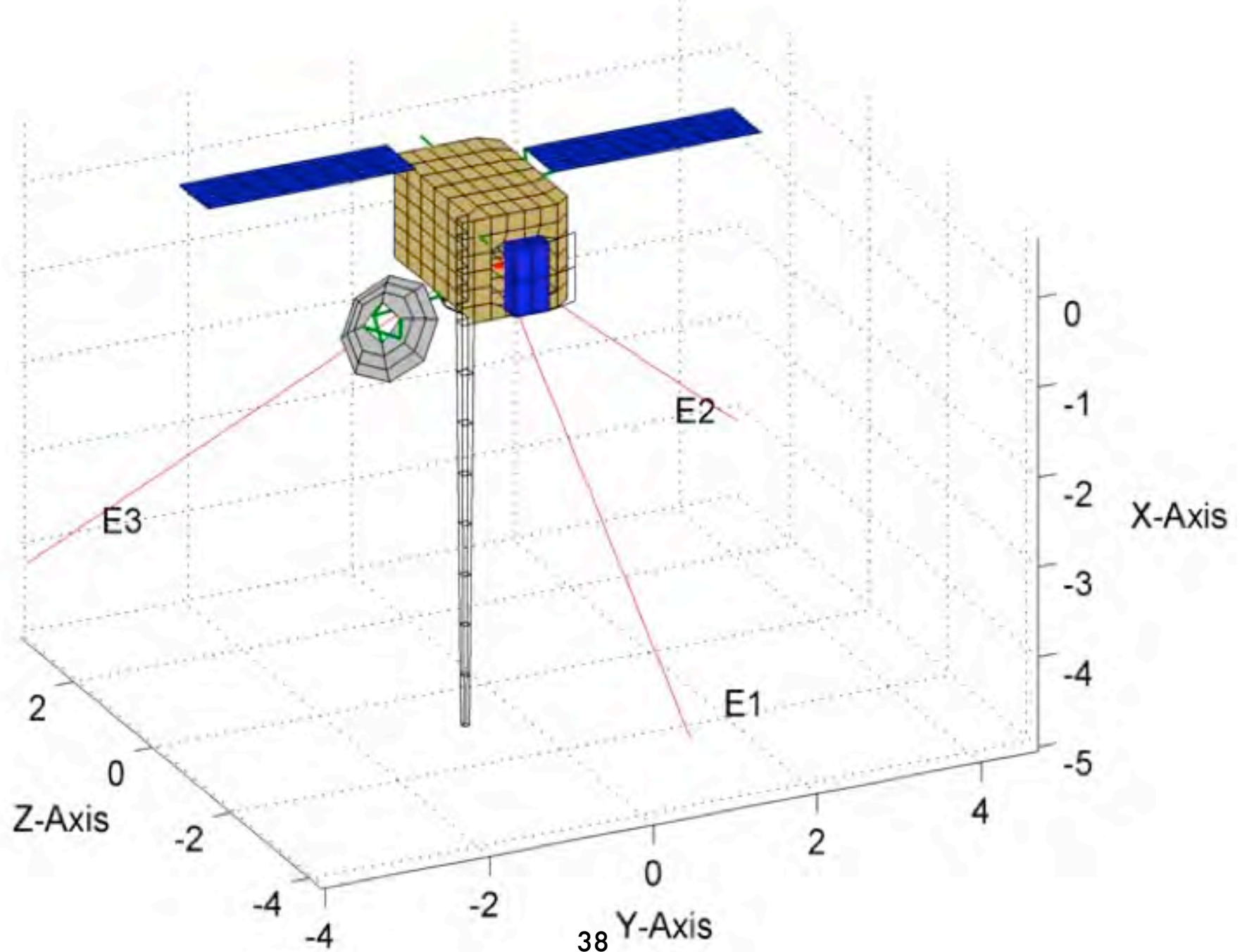
Méthodes

- *Simulations Electromagnétiques.*
- *Rhéométrie.*
- *Mesures en vol.*

il faut obtenir $\sim 1^\circ$ de précision sur les directions des antennes pour avoir 1° de précision pour la goniopolarimétrie.

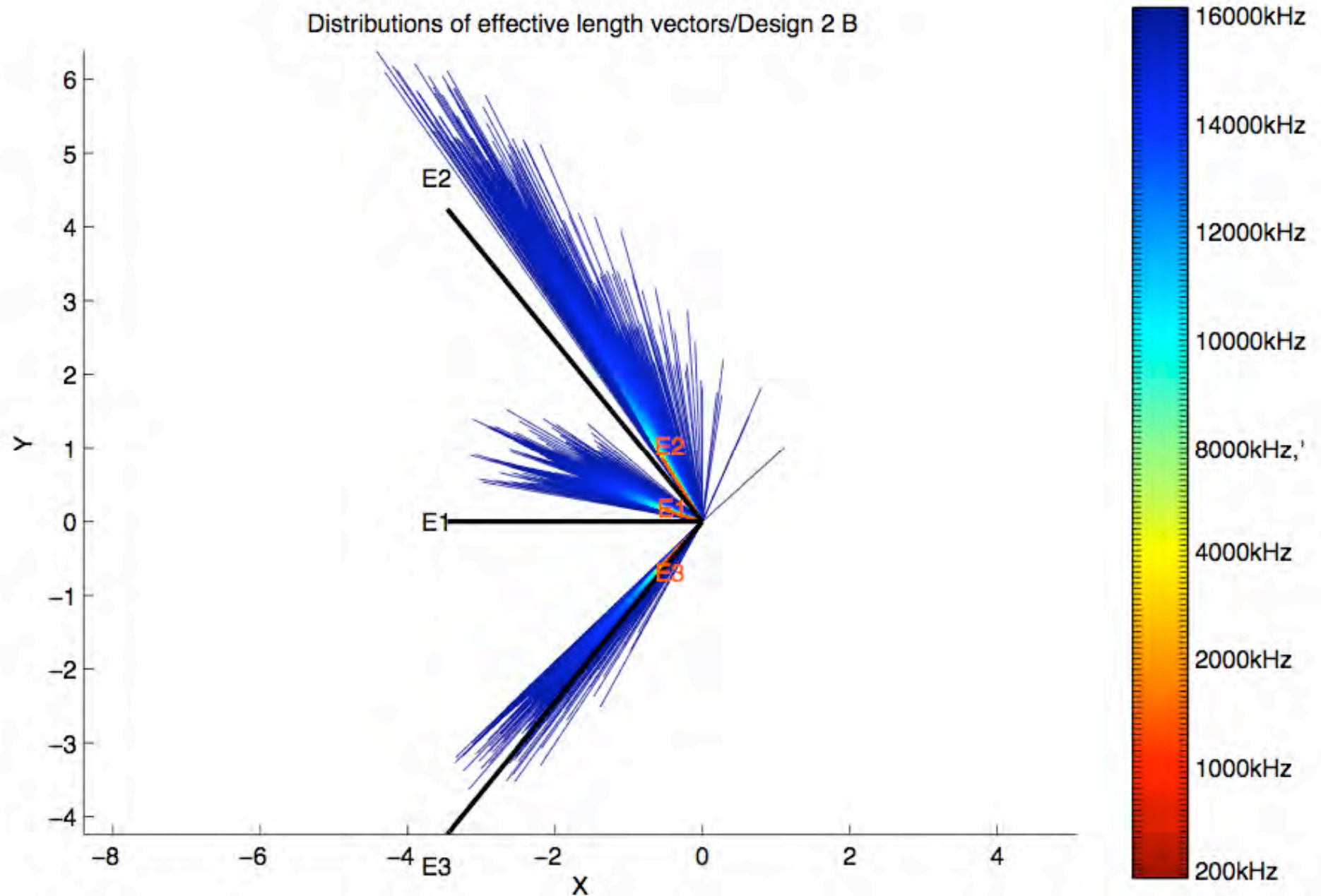
Goniopolarimétrie

Etalonnages des antennes (STEREO/Waves) [Simulations électromagnétiques]



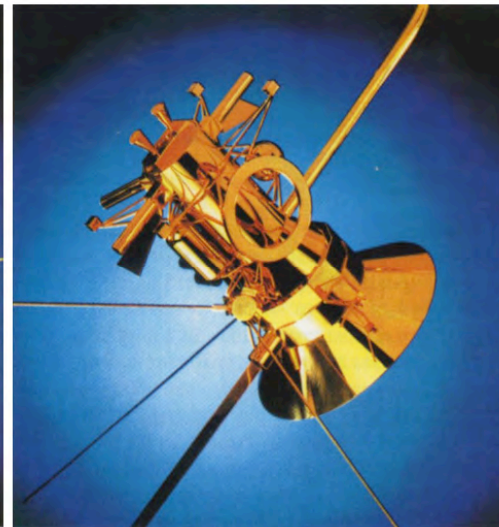
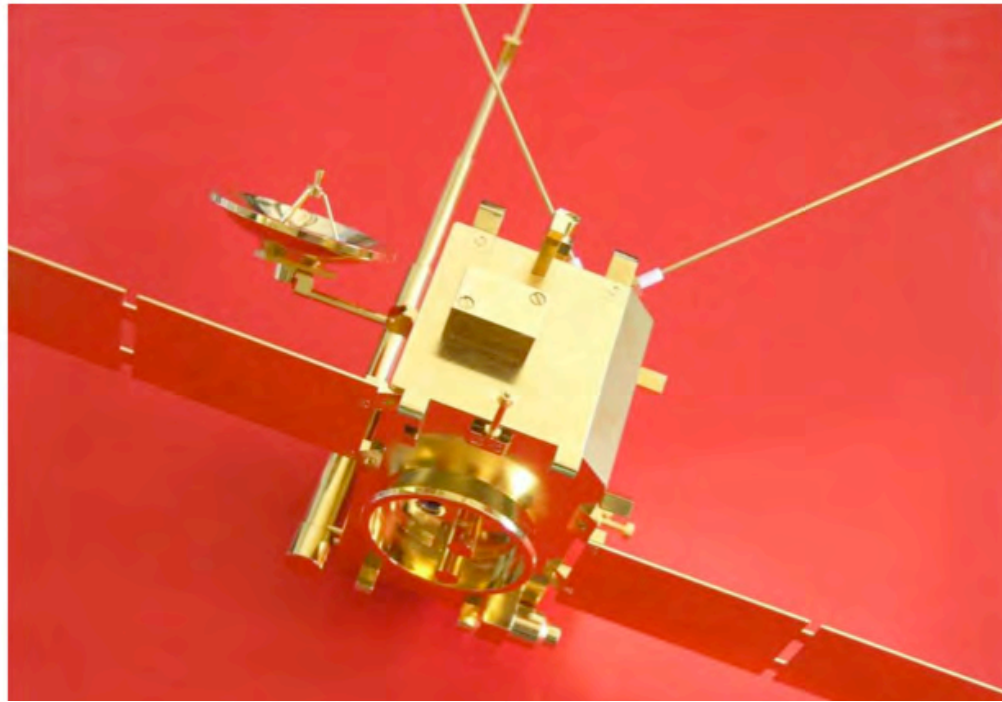
Goniopolarimétrie

Etalonnages des antennes (STEREO/Waves) [Simulations électromagnétiques]



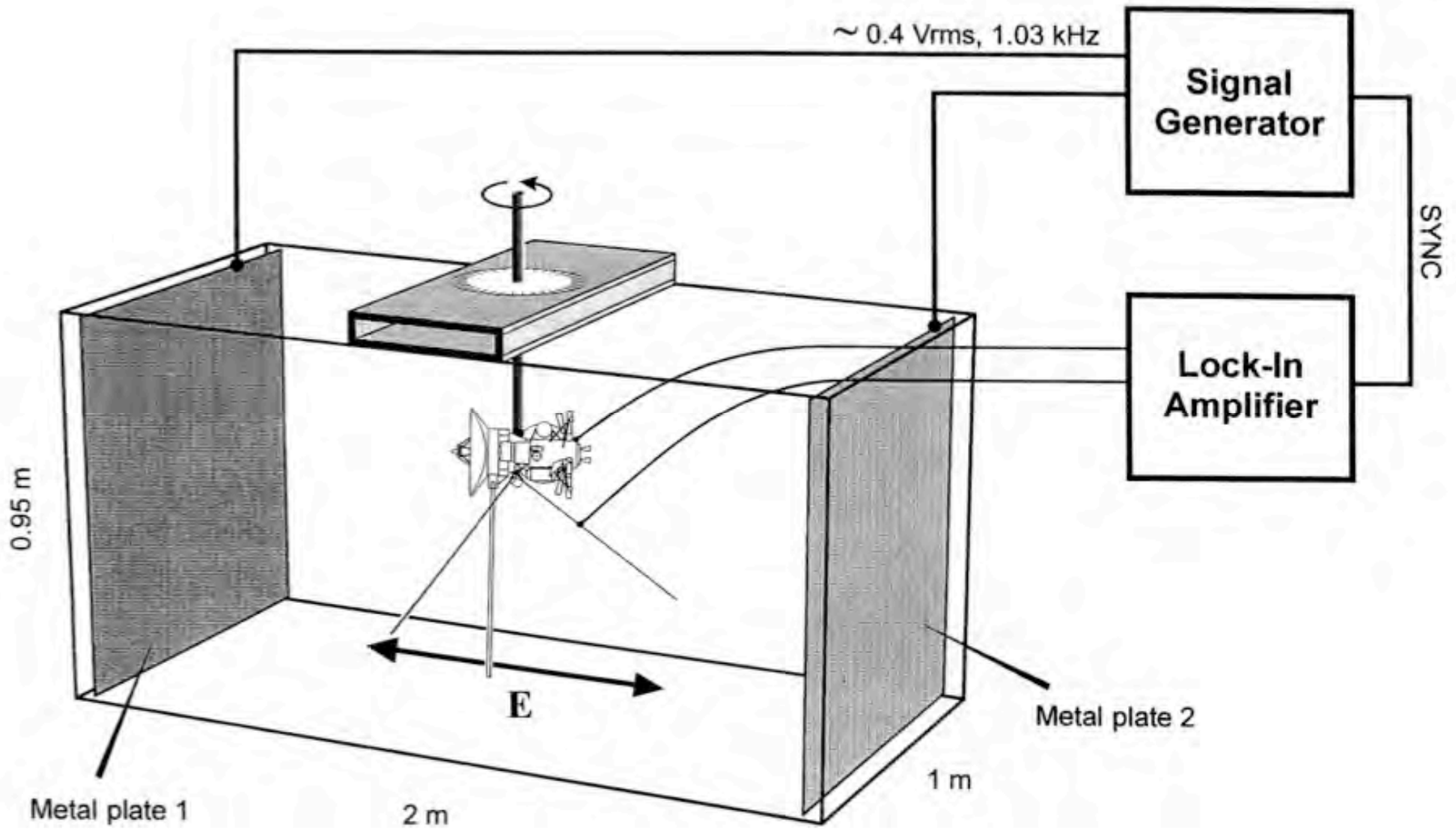
Goniopolarimétrie

Etalonnages des antennes [Rhéométrie]



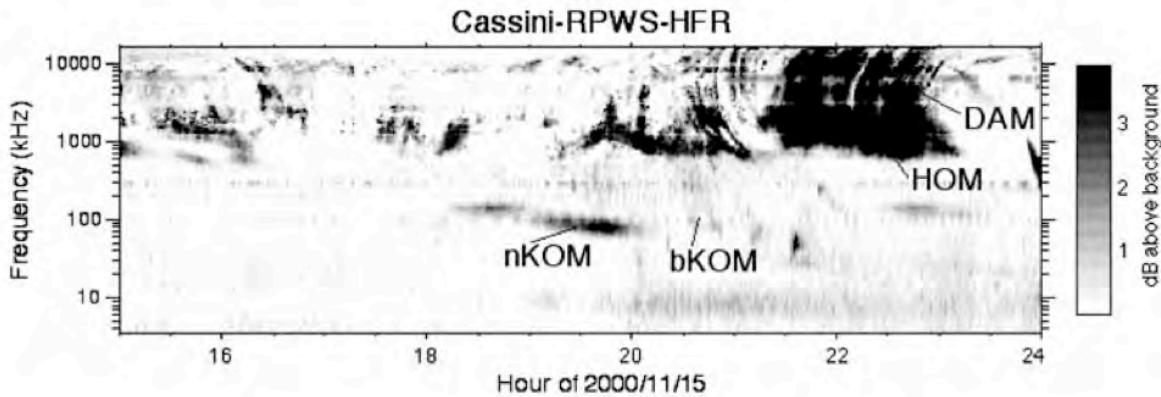
Goniopolarimétrie

Etalonnages des antennes [Rhéométrie]

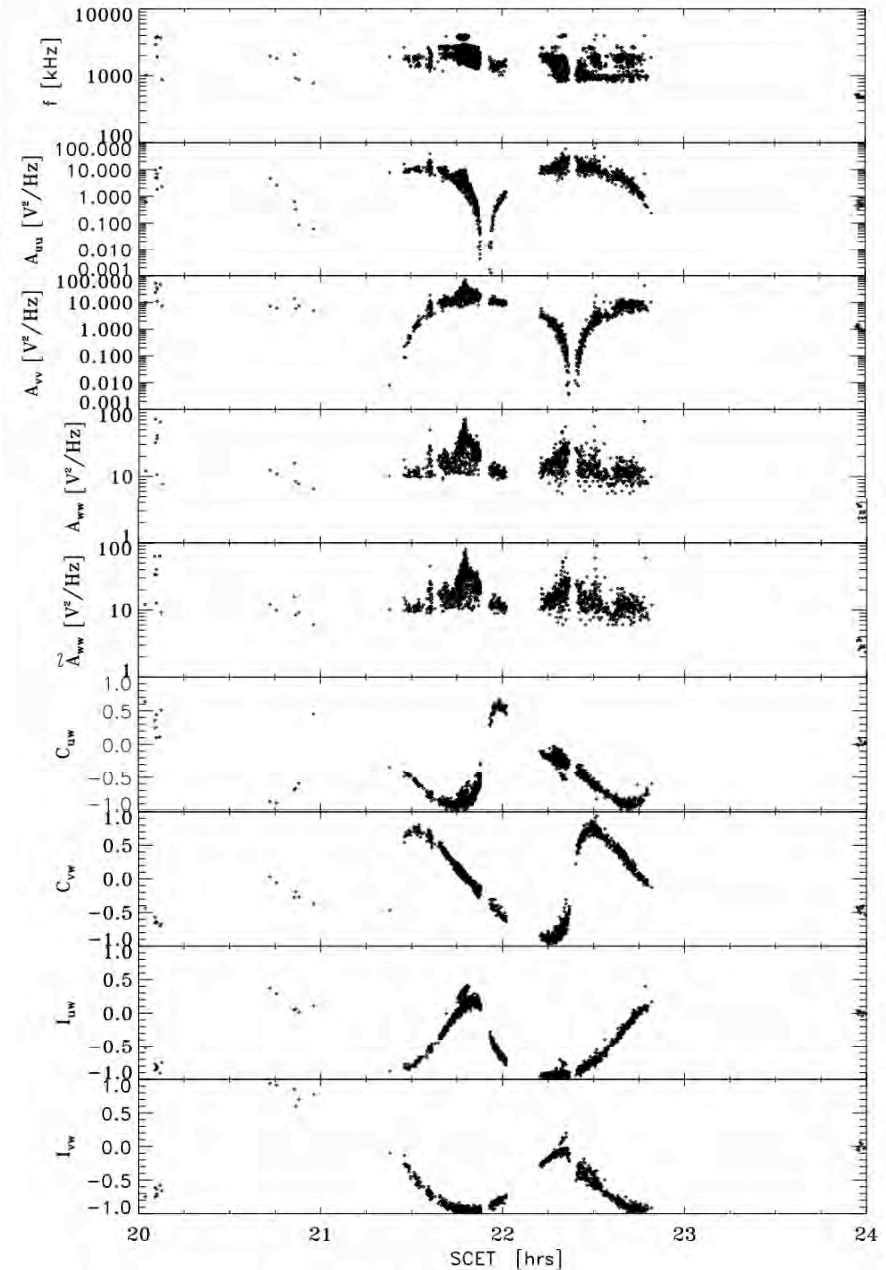
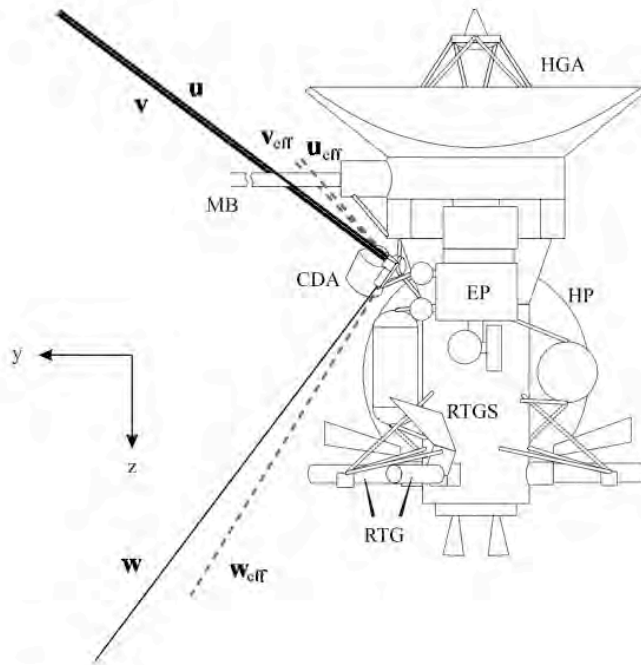


Goniopolarimétrie

Etalonnages des antennes [Etalonnage en vol]



rotation du satellite
 => modulation du signal reçu
 depuis une source connue



Goniopolarimétrie

Méthodologie (Cassini/RPWS et STEREO/Waves)

Modes de mesures

Recepteur à 2 voies, mesures instantannées :
Auto(v1), Auto(v2), Re(Cross12), Im(Cross12)

*Chaque voie peut être connectée à des monopoles
ou des dipoles (combinaison de 2 monopoles)*

(DF0)

mesure
2 antennes

(DF1)

mesure 3 antennes
(2 DF0 successives avec
changement d'antenne)

(DF2)

mesure 3 antennes
(3 DF0 successives avec
changement d'antenne)

Inversions 2 antennes (DF0)

(a) $\left. \begin{array}{l} \text{Auto}(v1) \\ \text{Auto}(v2) \\ \text{Re}(\text{Cross}12) \\ \text{Im}(\text{Cross}12) \end{array} \right\} \rightarrow S, V, \theta, \varphi$
(U=Q=0)

(b) $\left. \begin{array}{l} \text{Auto}(v1) \\ \text{Auto}(v2) \\ \text{Re}(\text{Cross}12) \\ \text{Im}(\text{Cross}12) \end{array} \right\} \rightarrow S, Q, U, V$
(θ, φ connus)

Goniopolarimétrie

Méthodologie (Cassini/RPWS et STEREO/Waves)

Inversions 3 antennes (DF1)

<p>(c)</p> $\left. \begin{array}{l} \text{Auto}(v1) \\ \text{Auto}(v2) \\ \text{Auto}(v3) \\ \text{Re}(\text{Cross } 12) \\ \text{Im}(\text{Cross } 12) \\ \text{Re}(\text{Cross } 13) \\ \text{Im}(\text{Cross } 13) \end{array} \right \rightarrow S^*, Q^*, U^*, V^*, \theta, \varphi$ <p style="text-align: center;">(V ≠ 0)</p>	<p>(d)</p> $\left. \begin{array}{l} \text{Auto}(v1) \\ \text{Auto}(v2) \\ \text{Auto}(v3) \\ \text{Re}(\text{Cross } 12) \\ \text{Im}(\text{Cross } 12) \\ \text{Re}(\text{Cross } 13) \\ \text{Im}(\text{Cross } 13) \end{array} \right \rightarrow S, V^*, \theta^*, \varphi^*$ <p style="text-align: center;">(U = Q = 0 V quelconque)</p>
---	--

* 1 valeur pour chaque mesure instantanée DF0

Inversion 3 antennes complète (DF2)

(e)

$$\left. \begin{array}{l} \text{Auto}(v1) \\ \text{Auto}(v2) \\ \text{Auto}(v3) \\ \text{Re}(\text{Cross } 12) \\ \text{Im}(\text{Cross } 12) \end{array} \right| \left. \begin{array}{l} \text{Re}(\text{Cross } 13) \\ \text{Im}(\text{Cross } 13) \\ \text{Re}(\text{Cross } 23) \\ \text{Im}(\text{Cross } 23) \end{array} \right| \rightarrow S, Q, U, V, \theta, \varphi, \sigma$$

(hypothèse ?)

+ taille de la source

Goniopolarimétrie

Sources d'erreur

1. Rapport signal sur bruit

un rapport signal sur bruit minimum de 20 à 30dB est nécessaire pour avoir une précision de 1° sur la direction d'arrivée, 10% sur les taux de polarisation et de 1dB sur les flux.

2. Bruit de fond galactique

Il doit être déterminé sur de longues périodes temporelles.

3. Bruit récepteur

bruit des préamplificateurs.

4. Bruit de numérisation

suivant le nombre de bits dans le signal transmis. Erreur induites dans le cas de numérisation 8 bits (Cassini): ~ bruit à 20 dB.

5. Configuration géométrique

La direction d'arrivée ne doit pas être proche de la direction d'une antenne.

6. Indétermination des inversions

suivants les inversions, certaines directions de l'espace ne peuvent pas être observées avec précision.

7. Erreur d'étalonnage des antennes

erreur sur direction se transmet aux mesures de direction en GP.
monopole+satellite ~ dipole

8. Variabilité intrinsèque de la source

mesures quasi-instantanées (variabilité entre deux mesures DF0 successive)

9. Sources multiples

on mesure le potentiel de l'antenne, qui résulte de la somme de tous les E présents autour du satellite.

10. Source étendue

hypothèse source ponctuelle

NB. on ne mesure que la direction du vecteur d'onde à l'endroit du satellite !

Goniopolarimétrie

Source étendue

Hypothèse de source ponctuelle.

$$P_{ij} = \frac{Z_0 G h_i h_j S_0}{2} [(1 + Q)A_i A_j + (U - iV)A_i B_j + (U + iV)A_j B_i + (1 - Q)B_i B_j]$$

En cas d'utilisation d'inversions sources ponctuelles : biais sur les résultats GP

Sources radio étendues : sursauts solaires de type III (20° à 50° pour $f \leq 1$ MHz) nécessaire pour STEREO/Waves.

Expressions des mesures plus complexe:

$$P_{ij} = \frac{Z_0 G h_i h_j S_0}{2} \left[(1 + Q) \left(A_i A_j \frac{\Gamma_2}{2} + C_i C_j \left(\Gamma_1 - \frac{\Gamma_2}{2} \right) \right) + (U - iV) \left(A_i B_j \frac{\Gamma_2}{2} \right) + (U + iV) \left(A_j B_i \frac{\Gamma_2}{2} \right) + (1 - Q) \left(A_i A_j \frac{1}{2} \left(\Gamma_1 - \Gamma_2 + \frac{\Gamma_3 + \Gamma_1}{4} \right) + B_i B_j \frac{1}{2} \left(\Gamma_1 + \frac{\Gamma_3 + \Gamma_1}{4} \right) + C_i C_j \left(\frac{\Gamma_2}{2} - \frac{\Gamma_3 + \Gamma_1}{4} \right) \right) \right]$$

pour une source uniforme

$$\Gamma_1^a(\gamma) = 1, \quad \Gamma_2^a(\gamma) = 1 + \cos \gamma,$$

$$\Gamma_3^a(\gamma) = \frac{4}{3}(1 + \cos \gamma + \cos^2 \gamma) - 1$$

pour une source gaussienne

$$\Gamma_k^c(\gamma) = \frac{K_c}{1 - \cos \gamma} \int_0^{\pi/2} \exp\left(-\ln(2) \frac{\tan^2 \theta'_M}{\tan^2 \gamma}\right) \sin(k\theta'_M) d\theta'_M$$

Nouvelles inversions en cours de développement.

Goniopolarimétrie

Bibliographie

- B. Cecconi. *Étude Goniopolarimétrique des émissions radio de Jupiter et Saturne à l'aide du récepteur radio de la sonde Cassini (Goniopolarimetric study of the Jovian and Kronian radio emissions with the Cassini spacecraft radio receiver)*. Thèse de doctorat, Observatoire de Paris-Université Paris 7, Meudon, France, avril **2004**.
- B. Cecconi and P. Zarka. *Direction finding and antenna calibration through analytical inversion of radio measurements performed using a system of 2 or 3 electric dipole antennas*. Radio Sci., 40:RS3003, **2005**. 10.1029/2004RS003070.
- B. Cecconi. *Influence of an extended source on Goniopolarimetry (or Direction Finding) with Cassini and STEREO radio receivers*. Radio Sci., 42(RS2003):1–17, **2007**. 10.1029/2006RS003458.
- B. Cecconi, X. Bonnin, S. Hoang, M. Maksimovic, A. Lecacheux, and J.-L. Bougeret. *S/Waves Goniopolarimetry*. Space Sci. Rev., in press **2007**.
- J. Fainberg, S. Hoang, and R. Manning. *Measurements of Distributed Polarized Radio Sources from Spinning Spacecraft - Effect of a Tilted Axial Antenna - ISEE-3 Application and Results*. Astron. Astrophys., 153:145–150, **1985**.
- H. P. Ladreiter, P. Zarka, A. Lecacheux, W. Macher, H. O. Rucker, R. Manning, D. A. Gurnett, and W. S. Kurth. *Analysis of electromagnetic wave direction finding performed by spaceborne antennas using singular-value decomposition techniques*. Radio Sci., 30:1699–1712, **1995**.
- A. Lecacheux. *Direction Finding of a Radiosource of Unknown Polarization with Short Electric Antennas on a Spacecraft*. Astron. Astrophys., 70:701–706, **1978**.
- R. Manning and J. Fainberg. *A new method of measuring radio source parameters of a partially polarized distributed source from spacecraft observations*. Space Sci. Inst., 5:161–181, **1980**.
- M. Panchenko. *Polarimetry of auroral kilometric radiation with a triaxial nonorthogonal antenna system*. Radio Sci., 39:RS6010, **2004**.

PLAN

Introduction

Antennes

Récepteurs – Mesures

Goniopolarimétrie

Quelques Résultats

Concours

Quelques Résultats

Sondes spatiales dotées de récepteurs goniopolarimétriques

*GP par démodulation
de la rotation du satellite*

*GP instantanée
sur satellite stabilisé 3 axes*

*DE-1
ISEE-3
WIND
ULYSSES
INTERBALL*

*CASSINI
STEREO*

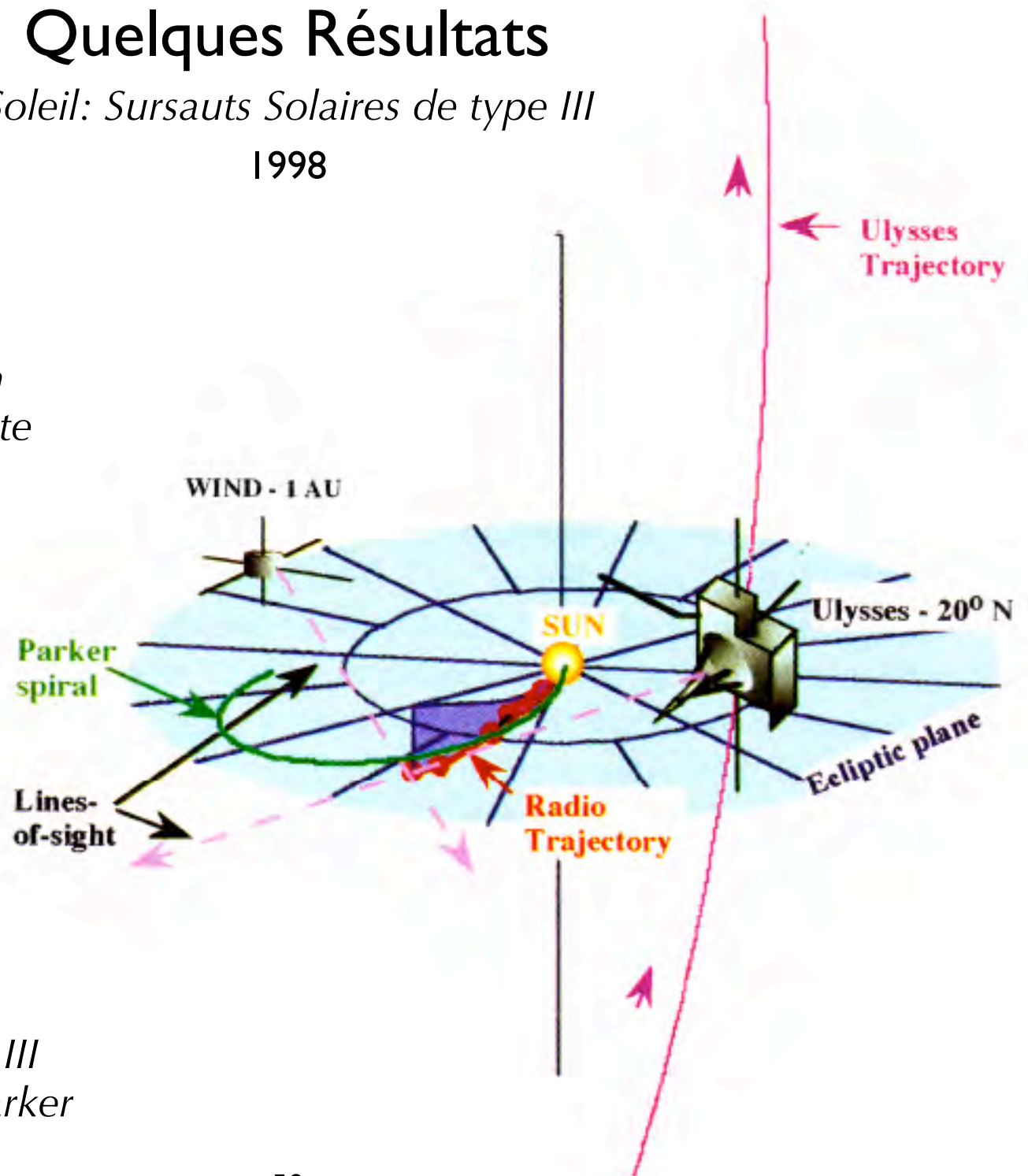
Quelques Résultats

Soleil: Sursauts Solaires de type III

1998

Ulysses+Wind

*GP par démodulation
de la rotation du satellite*

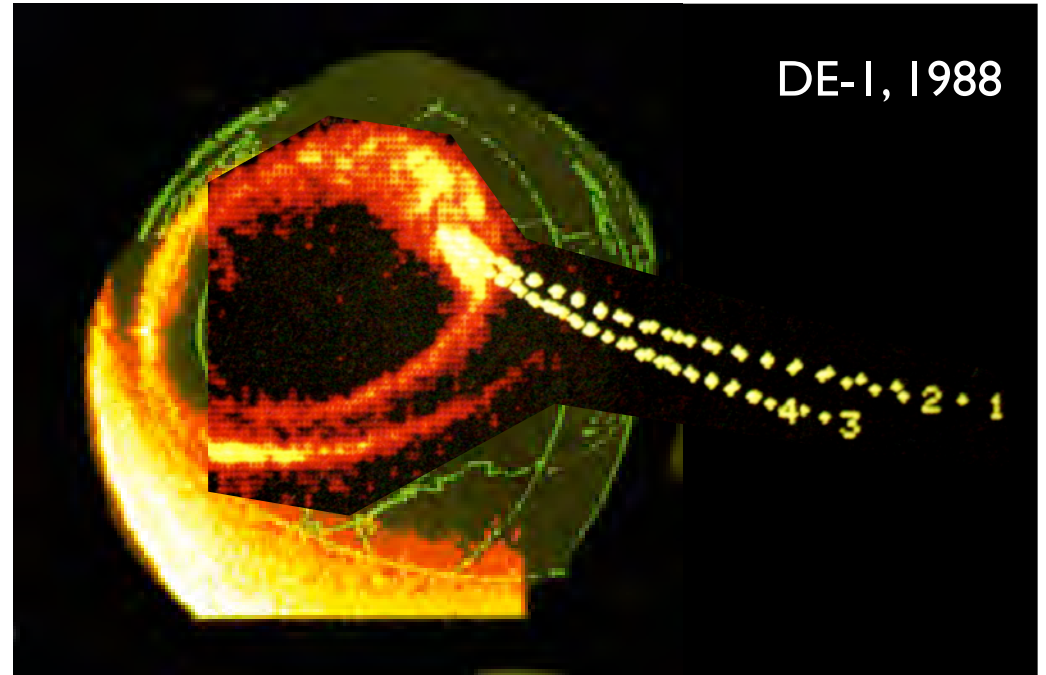
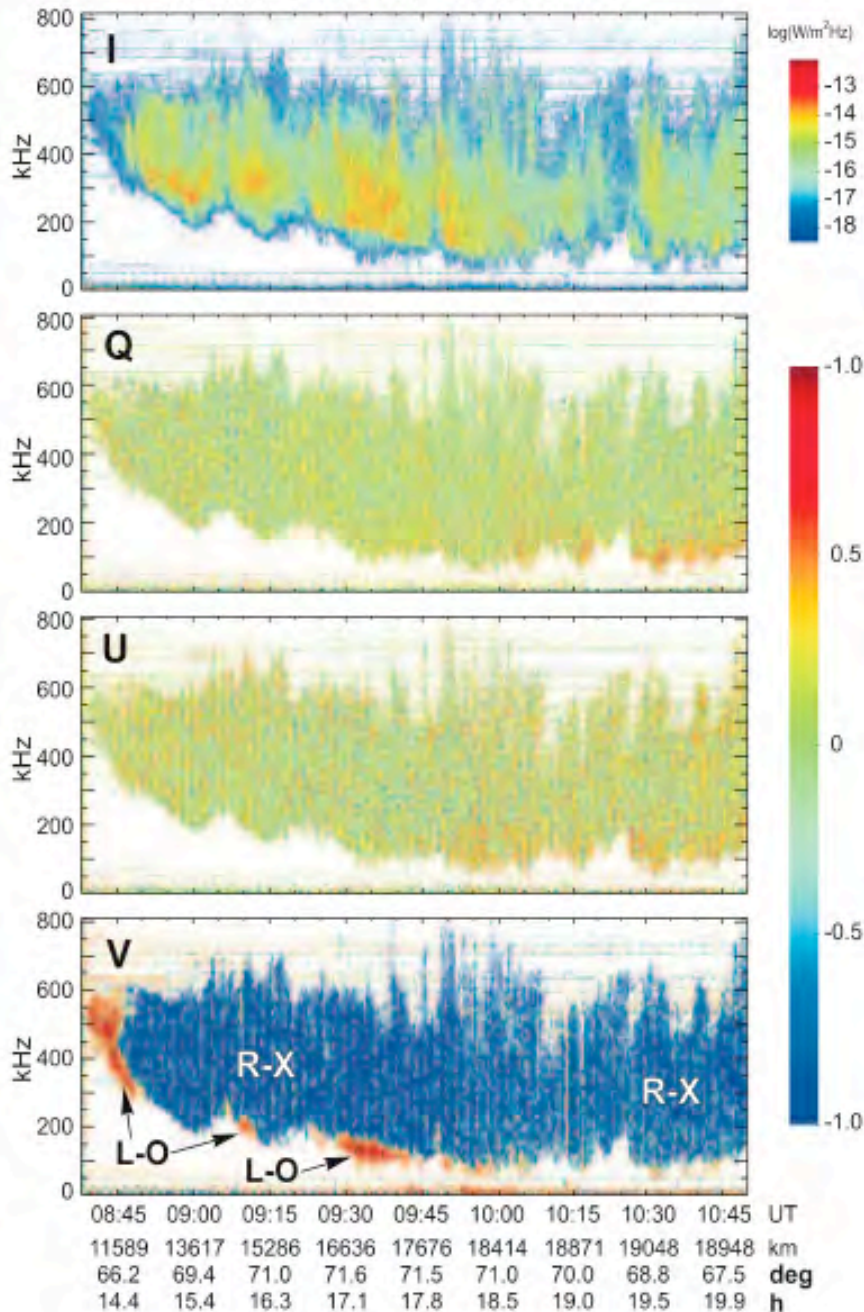


*Résultat :
émission radio de Type III
le long de la spirale de Parker*

Quelques Résultats

Terre: émissions radio aurorales

Interball-2 Polrad, 16 Nov. 1997



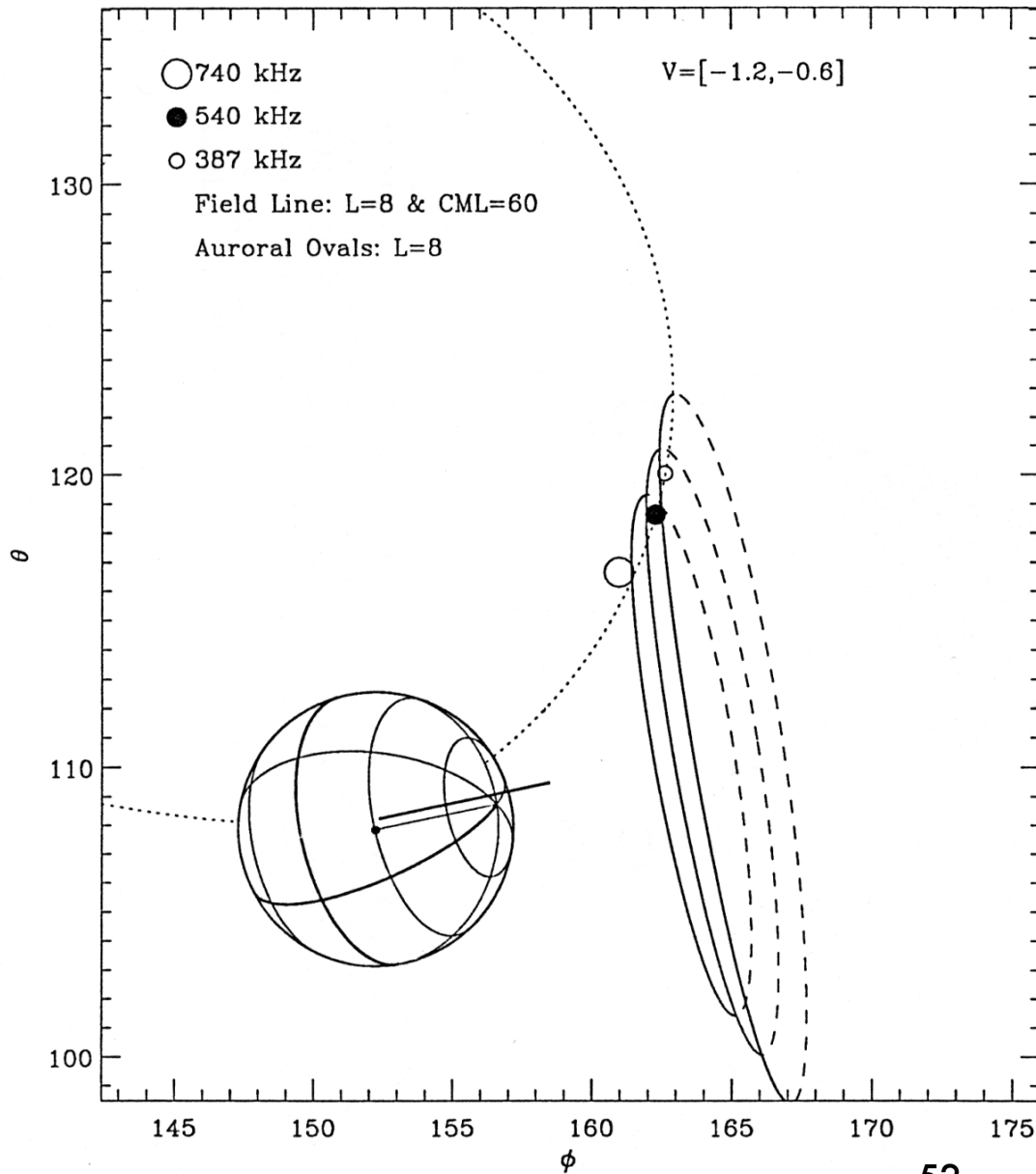
*Interball-2 / Polrad (polarisation)
DE-1 (localisation)*

*GP par démodulation
de la rotation du satellite*

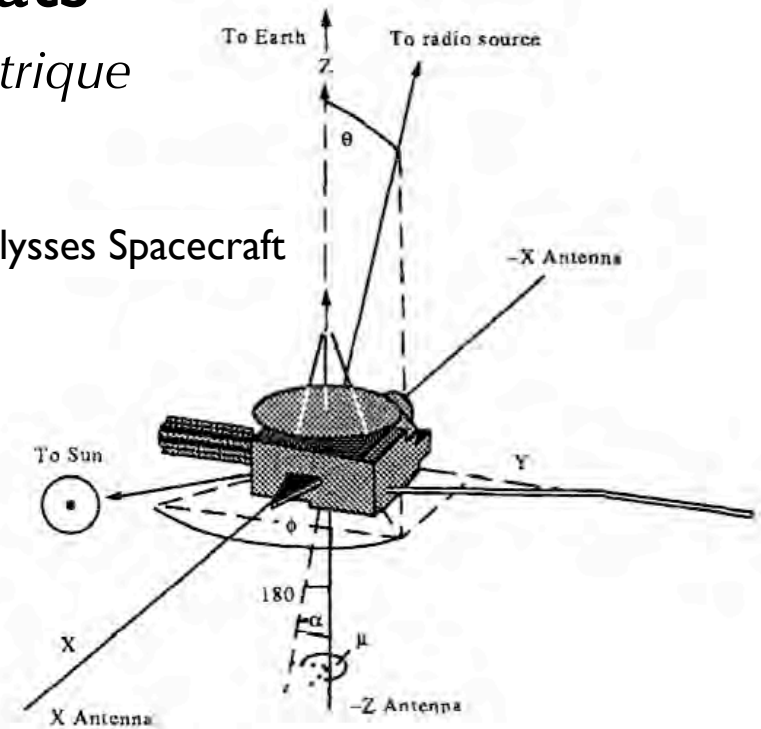
Quelques Résultats

Jupiter: émissions hectométrique

1994



Ulysses Spacecraft



Survol de Jupiter par Ulysses

*GP par démodulation
de la rotation du satellite*

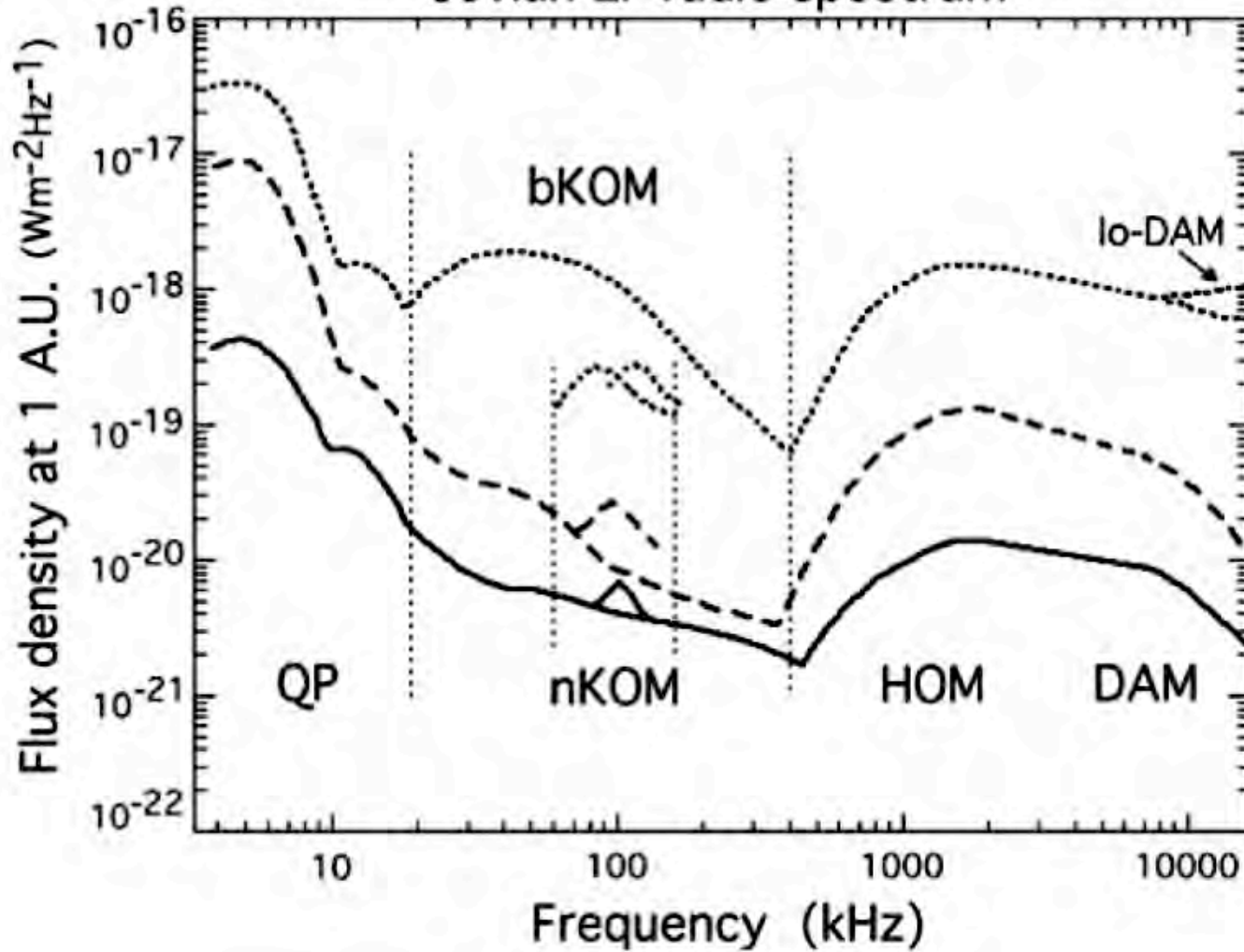
*Résultat :
émission à la fréquence
cyclotron locale*

Quelques Résultats

Jupiter: spectre radio BF

2001

Jovian LF radio spectrum



Survol de Jupiter par Cassini

(Pas de GP)

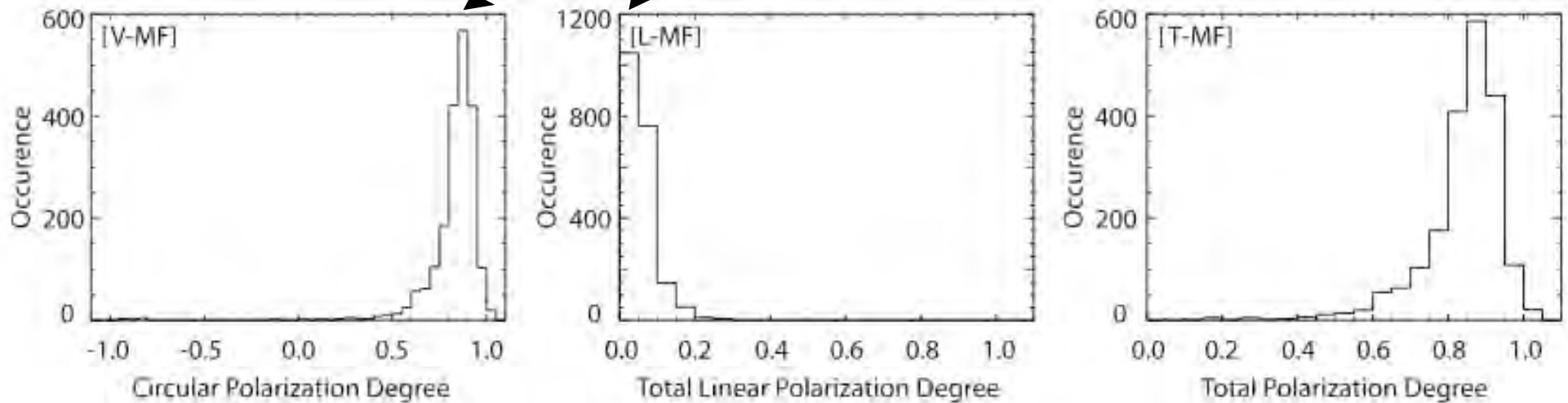
*Obtenu grâce à l'étalonnage
en flux.*

Quelques Résultats

Saturne: émissions radio kilométriques aurorales

Données : 100kHz-1MHz, début 2004 (pôle sud visible, distance à Saturne ~ 1400 R_s)

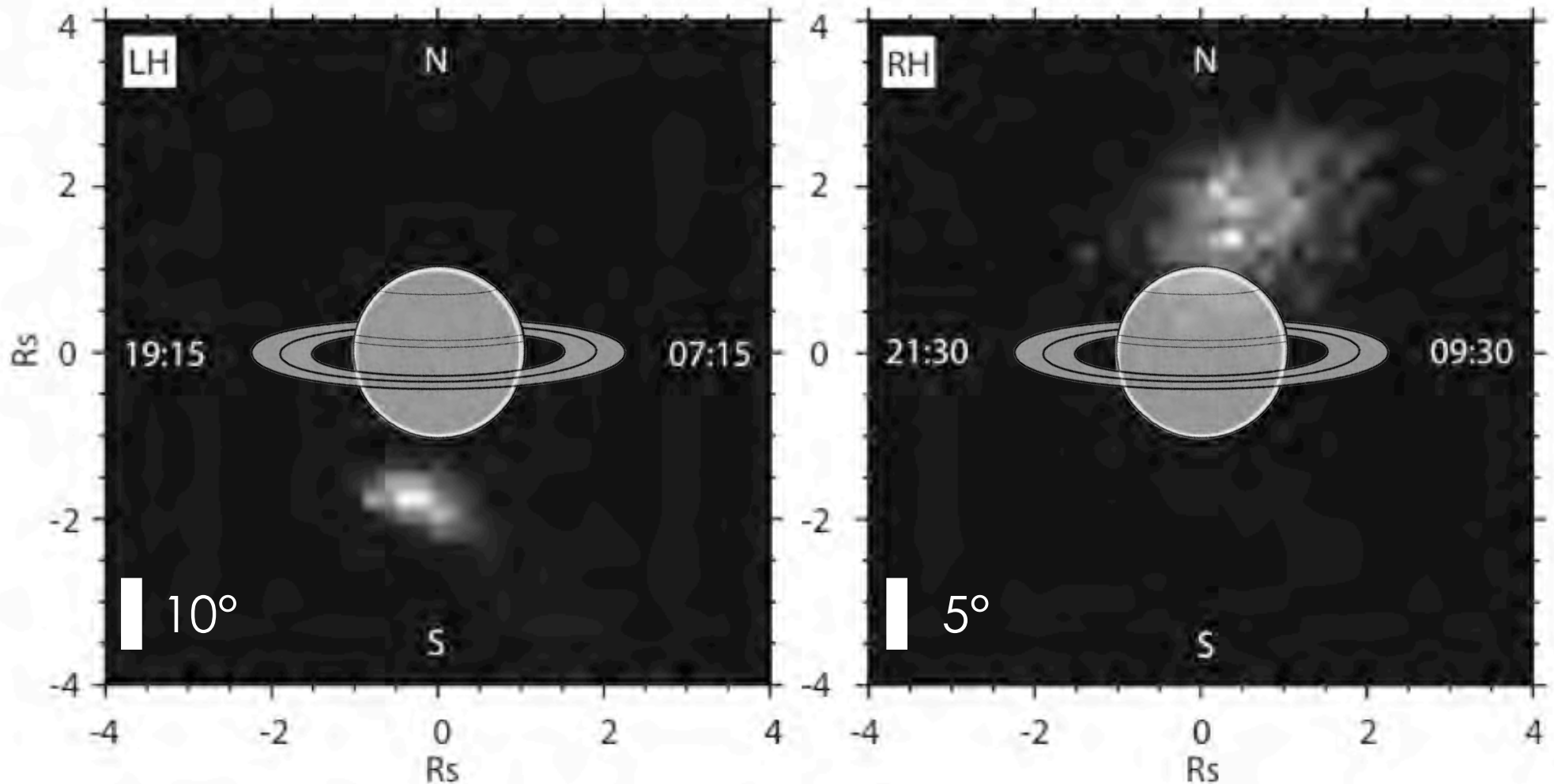
taux de polarisation circulaire : 87%
taux de polarisation linéaire : < 2 %
barre d'erreur sur les polarisations ~ 10%



Quelques Résultats

Saturne: émissions radio kilométriques aurorales

2006

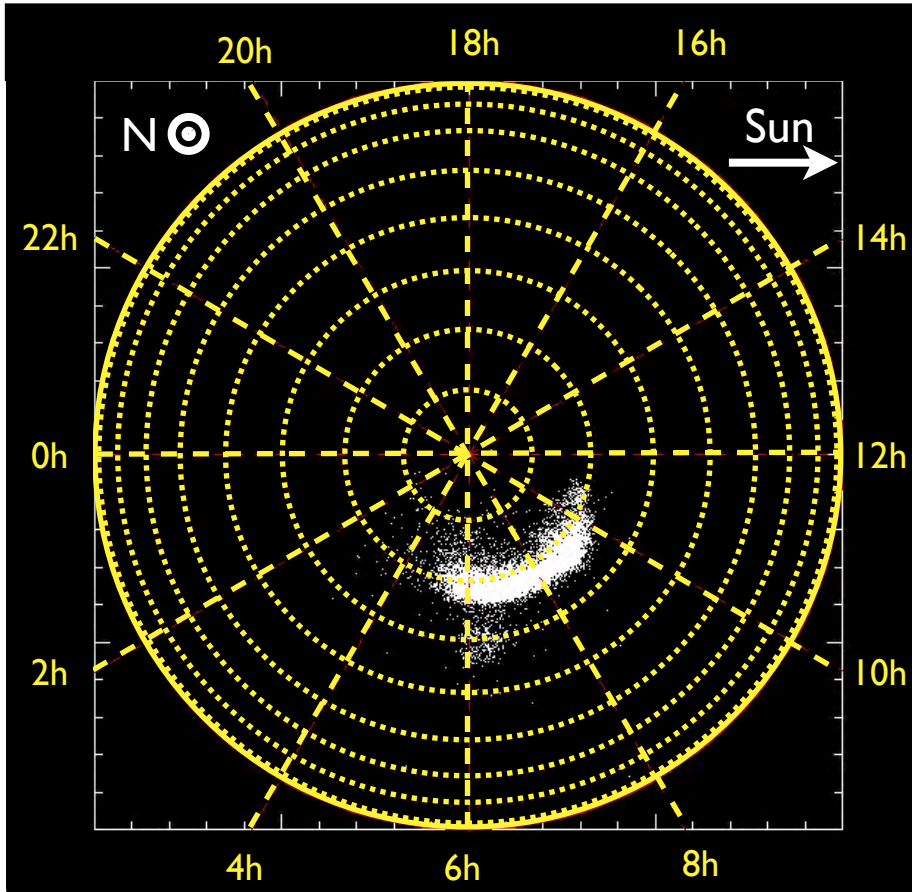


*Cassini/RPWS
GP instantanée*

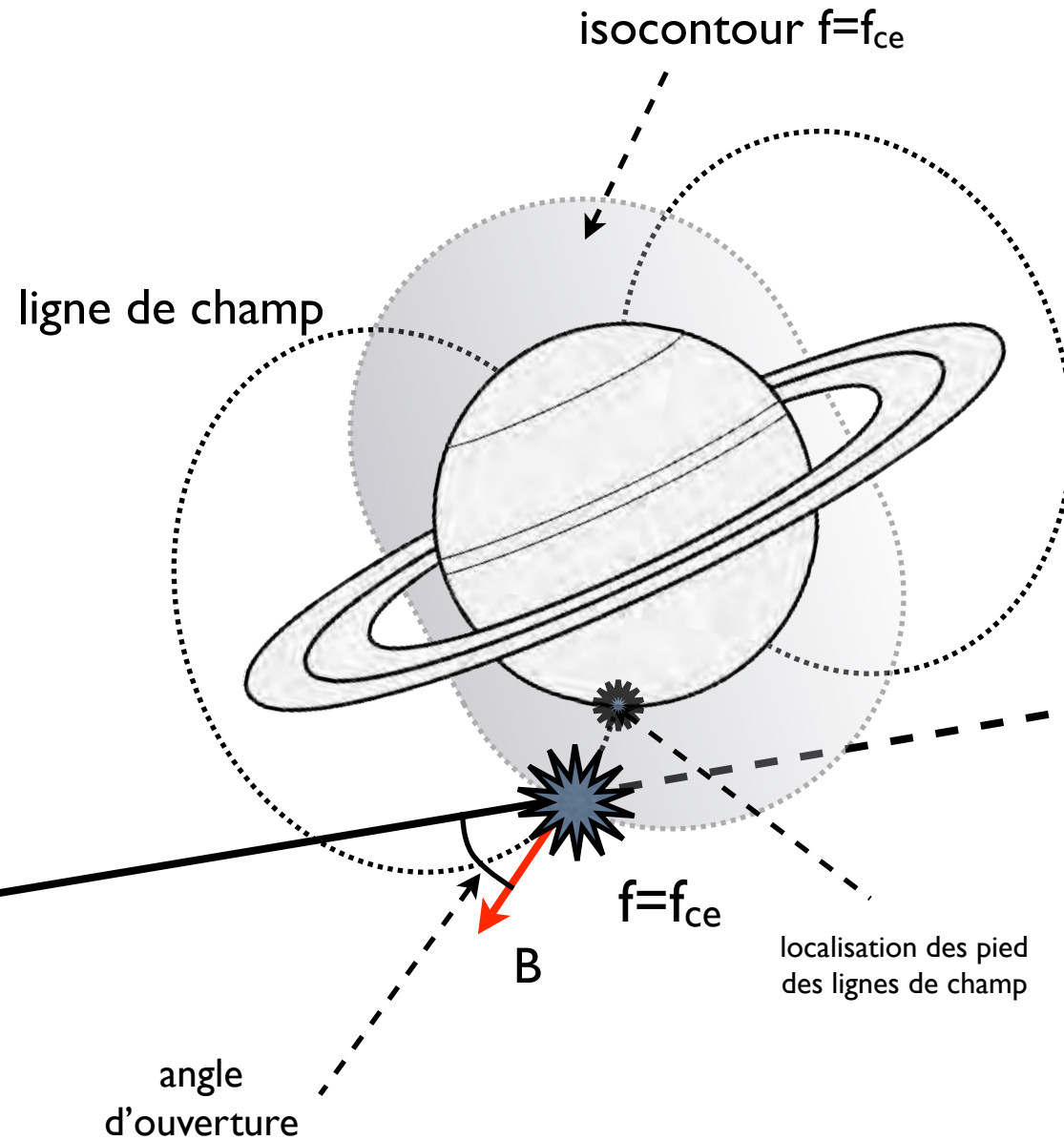
*Résultat :
émissions sur le mode X
à la fréquence cyclotron
électronique locale*

Quelques Résultats

Saturne : Localisation 3D des sources radio

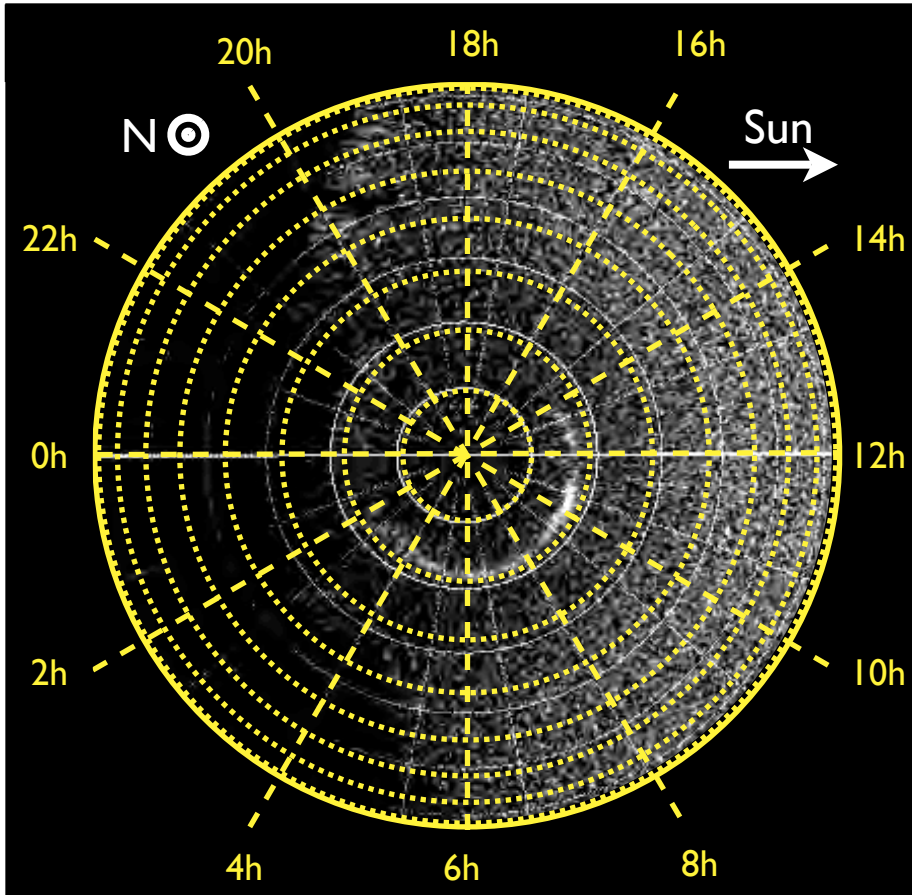


localisation radio



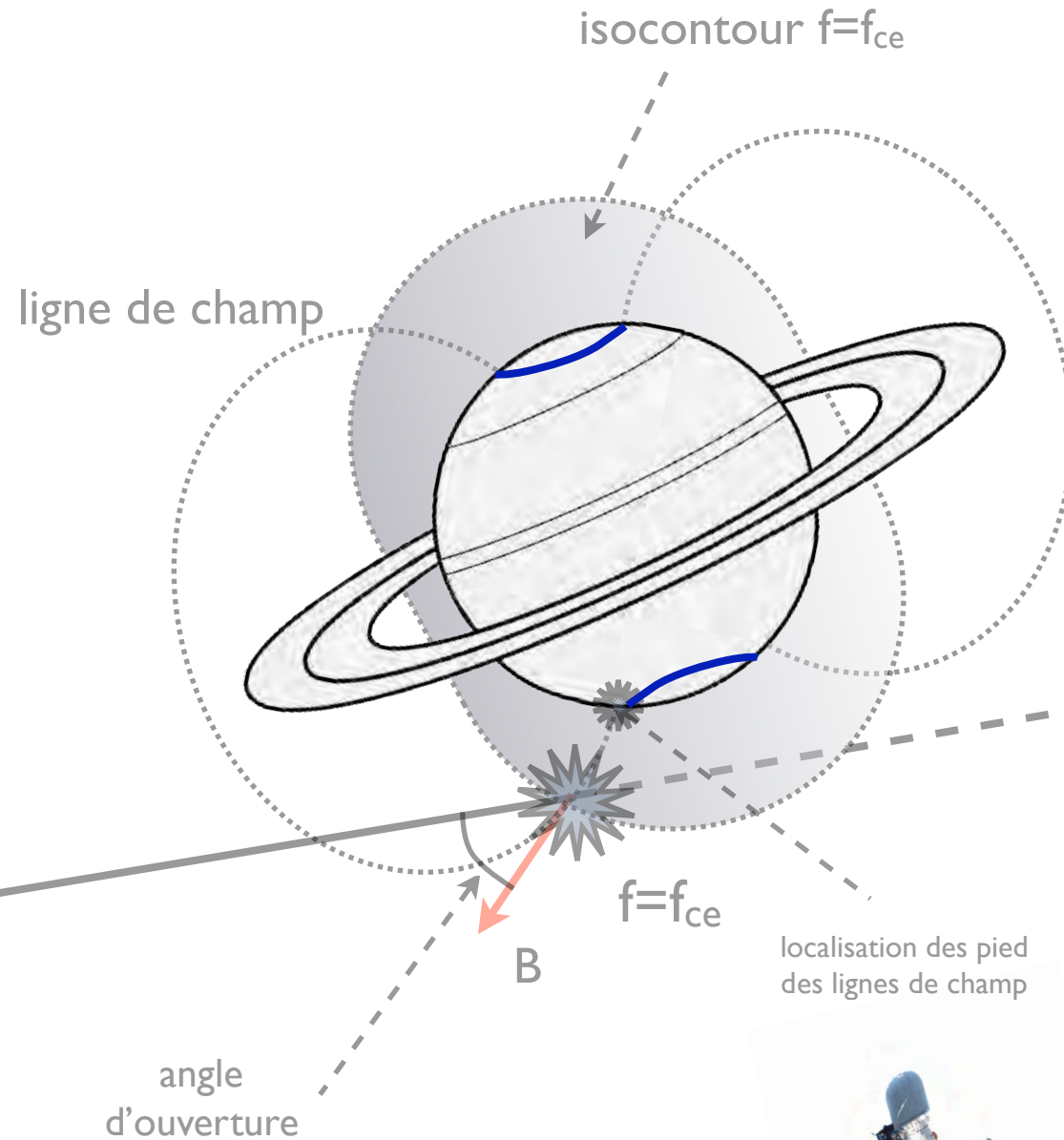
Quelques Résultats

Saturne : Localisation 3D des sources radio



carte UV (image HST)

k



PLAN

Introduction

Antennes

Récepteurs – Mesures

Goniopolarimétrie

Quelques Résultats

Concours

Grand Jeu-Concours

Où ranger la goniopolarimétrie ?

- imagerie classique ?*
- imagerie haute résolution angulaire ?*
- interférométrie ?*
- ailleurs... mais où ?*

