



# Une liaison radio expérimentale à 30 kbits/s par voie ionosphérique



Y. Erhel

Centre de Recherches des Ecoles de Coetquidan Saint-Cyr

56381 GUER France

yvon.erhel@st-cyr.terre.defense.gouv.fr

C. Perrine, D. Lemur and A. Bourdillon

Institut d'Electronique et de Télécommunications de Rennes

Université de Rennes 1 Campus de Beaulieu

35042 RENNES France

Y. ERHEL Journées Scientifiques du  
C.N.F.R.S. Paris, 28-29 mars 2006

# **PLAN**

**Introduction : le projet TRILION**

**Réponse spatiale d'une antenne H.F.**

**Concept de réseau hétérogène**

**Traitement du signal en réception multi-voies**

synoptique

égalisation spatio temporelle

**Résultats expérimentaux**

**Conclusion**

# Introduction

**Projet TRILION** : TRansmission d'Images par Liaison Ionosphérique  
(H.F. : 3-30 MHz)

**Défi technique** : “haut débit” dans un canal de bande de cohérence 3kHz  
longue portée ( $> 1000$  km)

**Moyen original** : réseau hétérogène (réception multi-voies) sensible à la  
polarisation

## **Standards en transmission numérique H.F.**

le plus courant : 4.8 kbits/s dans  $\Delta f=3$  kHz

STANAG 5066/G : 9.6 kbits/s dans  $\Delta f=4.5$  kHz (2001)

le plus récent D.R.M. 11.8 kbits/s dans  $\Delta f=6$  kHz (2004)

## Réponse spatiale $F(\theta)$ d'une antenne H.F.

### Sortie d'ionosphere :

polarisation T.E.M. elliptique ; 2 paramètres liés à la direction d'arrivée  $\theta$  (Appleton-Hartree + Budden) :

rapport de polarisation  $\eta(\theta)$  ; inclinaison  $\alpha(\theta)$  ( axe principal / horizontale locale)

Repère de DAVIES (plan d'onde): 
$$\vec{E}_D = \begin{pmatrix} 1 \\ j\eta \\ 0 \end{pmatrix} s_o(t)$$

Signal reçu (antenne électrique ; taille  $\ll \lambda$ ) :

$$\mathbf{s}_r(t) = \mathbf{V}_{\text{ant}} \vec{E}_r(t) = \mathbf{V}_{\text{ant}} \mathbf{R}(\theta) \mathbf{Q}(\alpha) \begin{pmatrix} \mathbf{1} \\ j\eta \\ \mathbf{0} \end{pmatrix} s_o(t) = \mathbf{F}(\theta) s_o(t) ; \mathbf{F}(\theta) \in \mathbf{C}$$

2 changements de repère :  $\mathbf{Q}(\alpha)$  et  $\mathbf{R}(\theta)$  ;  $\mathbf{V}_{\text{ant}}$  : pondération des composantes de  $\vec{E}$

*Radio Science vol.39 ,n° 1, pp 1003-1 to 1003-14 Jan-Feb. 2004*

Y. ERHEL Journées Scientifiques du  
C.N.F.R.S. Paris, 28-29 mars 2006

# Réseau hétérogène

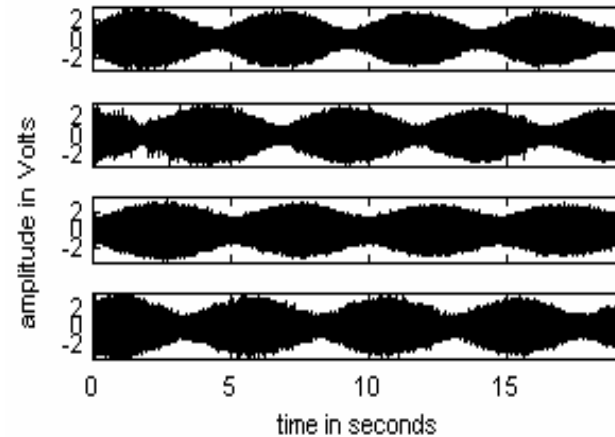
Distribution spatiale de NC antennes actives différentes  $\{F_n(\theta)\}$   
phases géométriques  $\{\varphi_n(\theta)\}$

réception de NS multi-trajets ionosphériques

$$x_n(t) = \sum_{k=1}^{NS} A_k F_n(\theta_k) e^{j\varphi_n(\theta_k)} s_k(t) + b_n(t)$$

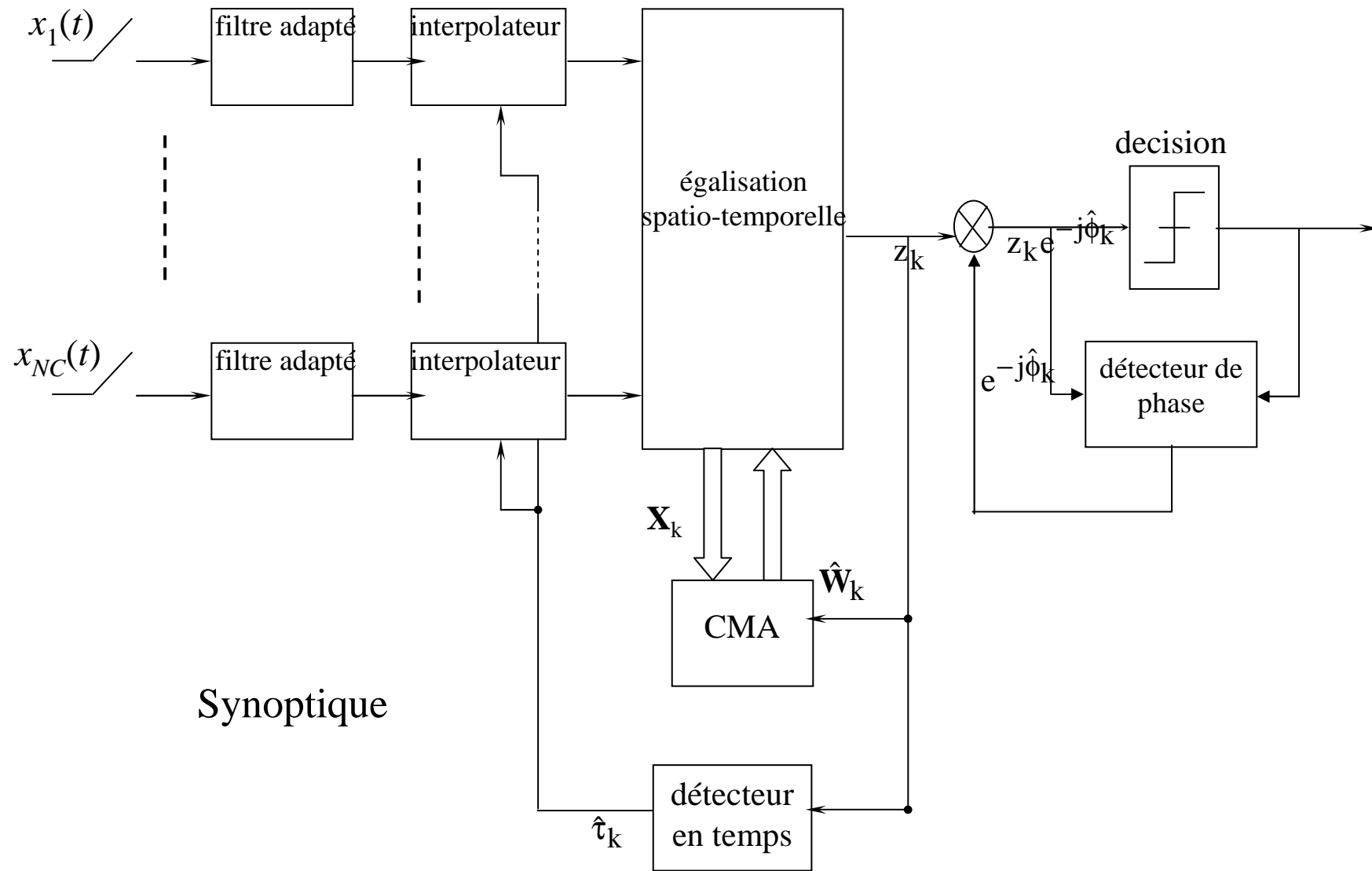
cas particulier : **antennes colocalisées**

$$\underline{X}(t) = [F] \underline{S}(t) + \underline{B}(t)$$



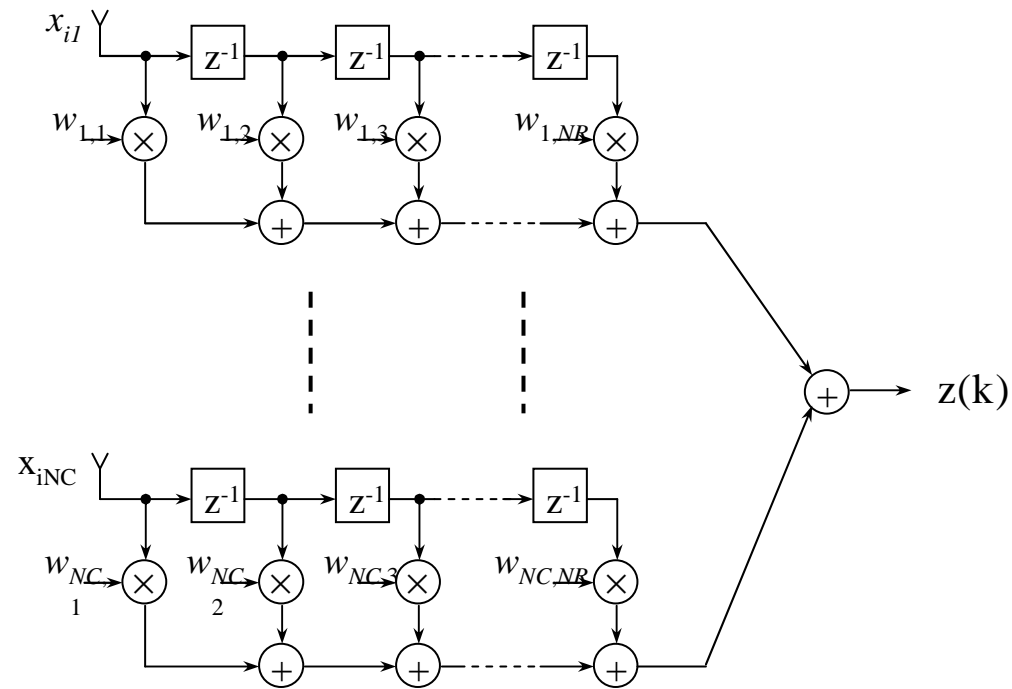
décorrélation partielle car sensibilité différente à la polarisation incidente

# Traitement du signal multi-voies



Synoptique

# Traitement du signal multi-voies



Égaliseur spatio temporel : structure transverse

$$\underline{\mathbf{X}}_{\text{et}}(\mathbf{k}) = [\underline{\mathbf{X}}(\mathbf{k})^T \underline{\mathbf{X}}(\mathbf{k}-1)^T \dots \underline{\mathbf{X}}(\mathbf{k}-\text{NR}+1)^T]^T$$

$$z(\mathbf{k}) = \underline{\hat{\mathbf{W}}}^T \underline{\mathbf{X}}_{\text{et}}(\mathbf{k})$$

$\underline{\hat{\mathbf{W}}}$

vecteur des pondérations ;  $\text{NC} \times \text{NR}$  éléments

# Traitement du signal multi-voies

Égalisation aveugle : algorithme C.M.A. (constant modulus algorithm)

\* minimisation de la dispersion d'ordre 2  $D^{(2)} = E(|z_k|^2 - R_2)^2$

où  $R_2 = E[|c_n|^4] / E[|c_n|^2]$  est une statistique de la constellation émise

\* méthode de gradient stochastique

$$\hat{\mathbf{W}}(k+1) = \hat{\mathbf{W}}(k) - \lambda \mathbf{X}_{\text{et}}^*(k) z(k) (|z(k)|^2 - R_2)$$



# Expérimentation : liaison Rennes - El Arenosillo (Espagne)



portée : 1300 km

**Emission** : contexte mono-porteuse ;  $P_{max}=700$  W

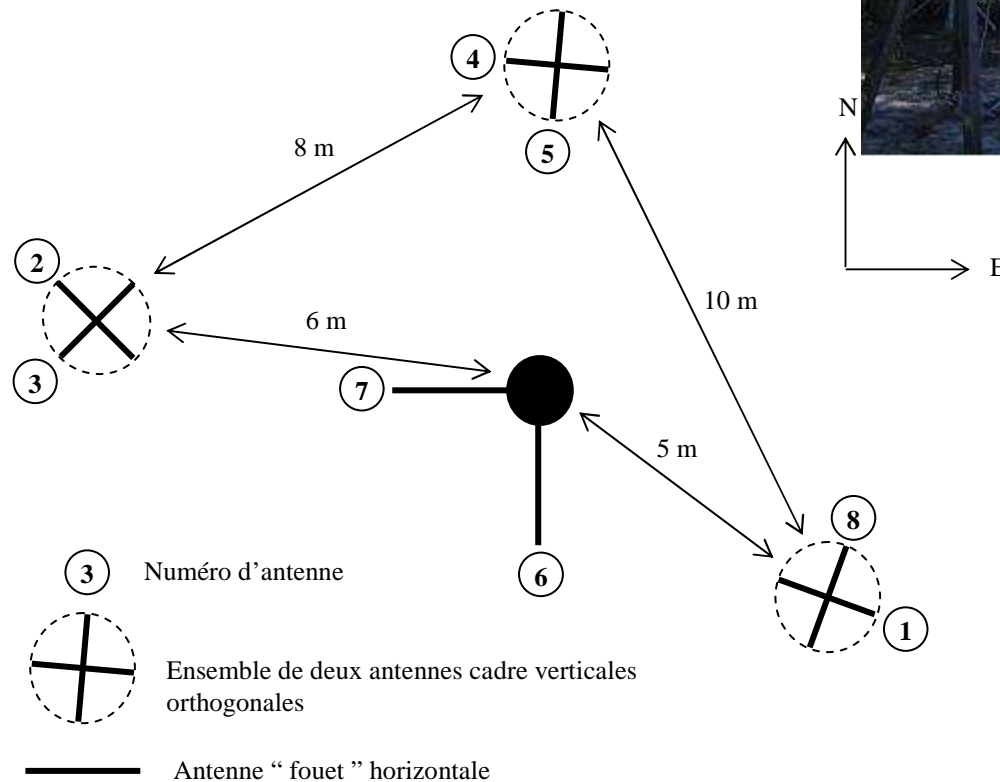
antenne log-périodique ;  $f_0 \in [10\text{MHz} - 15\text{MHz}]$



Y. ERHEL Journées Scientifiques du  
C.N.F.R.S. Paris, 28-29 mars 2006

# Expérimentation : liaison Rennes - El Arenosillo (Espagne)

vue du réseau de réception

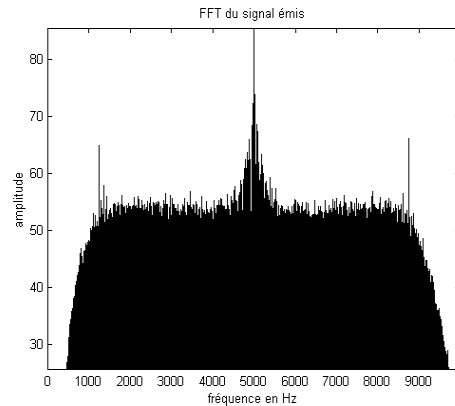


plan du réseau hétérogène  
(faible ouverture)

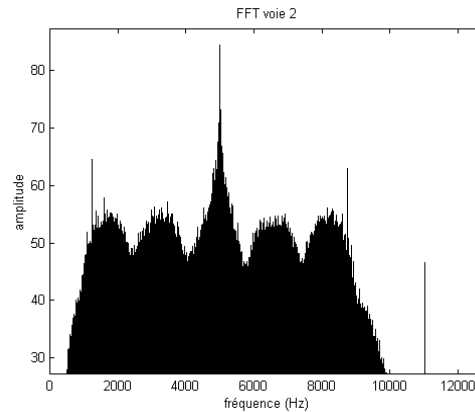
# Expérimentation : liaison Rennes - El Arenosillo (Espagne)

## efficacité de l'égalisation

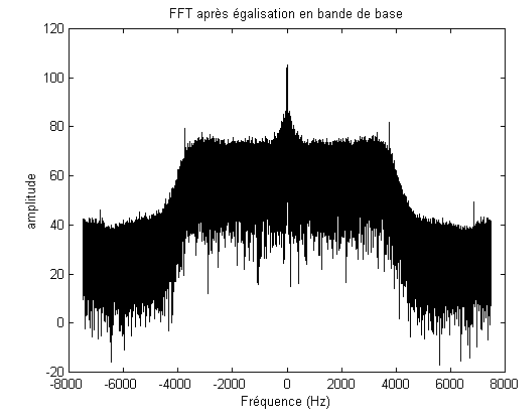
R=7500 bauds ; MAQ 16 avec  $\alpha=0.2$  ; D=30 kbits/s dans B=9 kHz



spectre émis  
B=9 kHz



spectre reçu  
(1 voie de meilleur S/B)



spectre égalisé

sélectivité fréquentielle du canal (fig. 2) :

« trous » de périodicité  $\Delta f=1200$  Hz  $\Rightarrow$  2 trajets principaux  
 $\Delta\tau_g = 1/\Delta f = 0.833$  ms

# Expérimentation : liaison Rennes - El Arenosillo (Espagne)

transmission d'images fixes compressées (WTSOM par IRCOM-SIC Poitiers)

256\*256 pixels ; 256 niveaux de gris ; taux de compression Rc=16

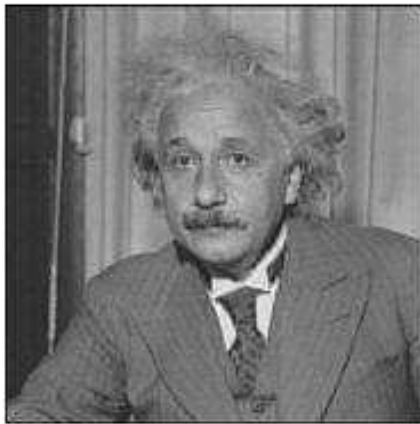


image source "Einstein"

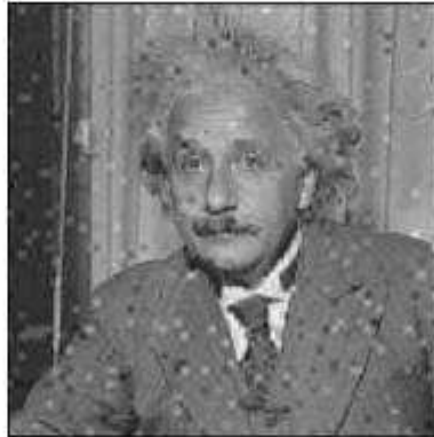


image reçue et décompressée  
(égalisation sur 1 voie)

$$TEB = 1.2 \cdot 10^{-3}$$

$$PSNR = 26.3 \text{ dB}$$

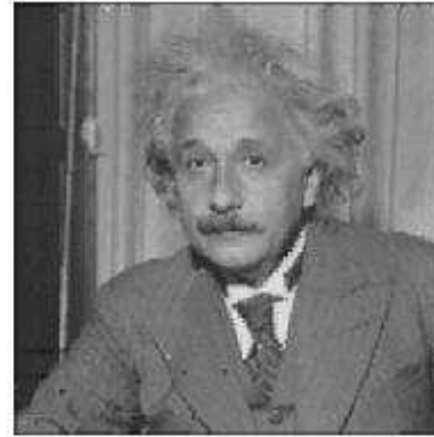


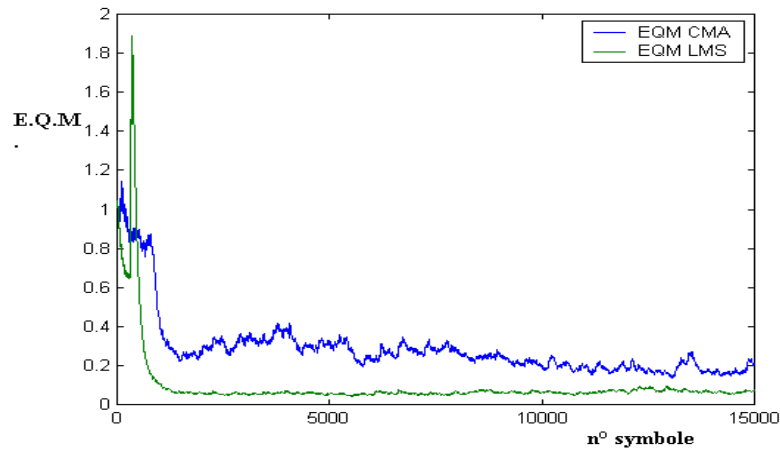
image reçue et décompressée  
(égalisation sur 7 voies)

$$TEB = 5.1 \cdot 10^{-4}$$

$$PSNR = 31.1 \text{ dB}$$

# Expérimentation : liaison Rennes - El Arenosillo (Espagne)

Essais complémentaires : comparaison algos C.M.A./L.M.S.

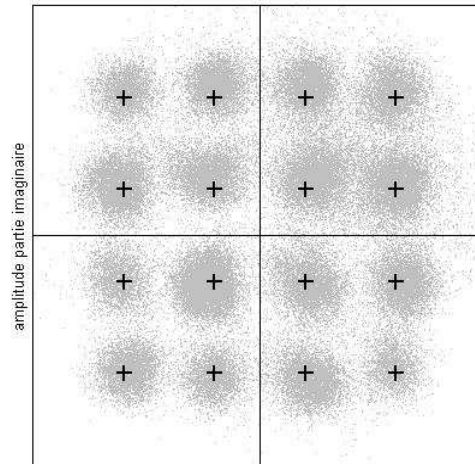


**Vitesse de convergence**

**E.Q.M. résiduelle**

**C.M.A.**

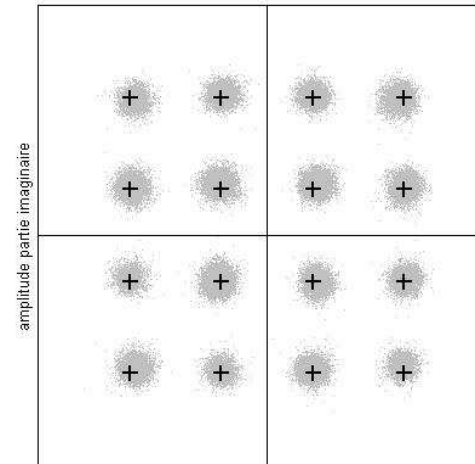
constellation des phases de transmission



amplitude partie réelle

**L.M.S.**

constellation des phases de transmission



amplitude partie réelle

# Conclusion

## Développement et test d'un système de transmission iono. de type SIMO

**Originalité :** réseau hétérogène d'antennes sensible à la diversité des polar. incidentes

- \* encombrement réduit
- \* mise en œuvre d'une égalisation aveugle
- \* support de transmission d'images fixes

**Performances typiques :**  $D=30$  kbits/s ;  $B=9$  kHz ; T.E.B.= $4 \cdot 10^{-4}$   
(*modem H.F. « on the shelf » 4.8 kbits/s dans  $B=3$  kHz*)

### Perspectives :

- \* augmentation de la portée
- \* augmentation du débit numérique (40 kbits/s en test)
- \* visioconférence autonome par voie iono.