



# *Smart antennas*

*antennes intelligentes*

Jean-Marie Gorce  
CITI INSA-Lyon  
2005-06



# Introduction

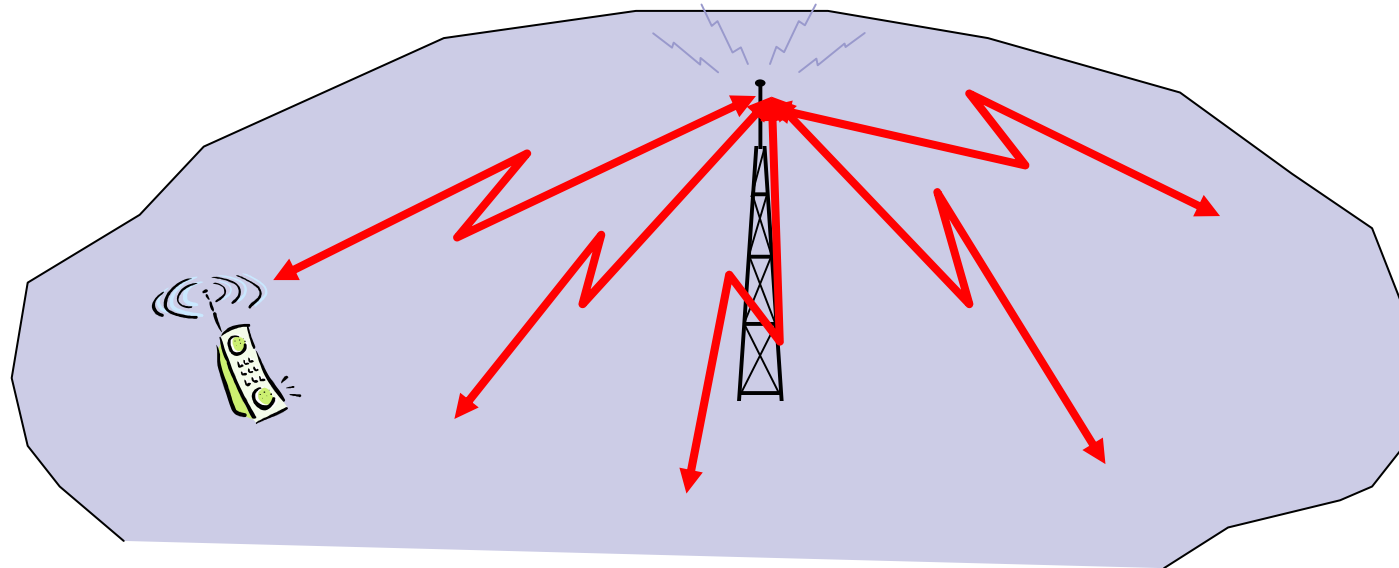
- Problème récurrent aux réseaux mobiles
  - Les contraintes de «mobilité» et de «débit global» sont **antinomiques** dans un système à ressources limitées.
  - La mobilité coûte cher : énergie, bande passante, protocoles, santé publique, ...

## Introduction

Pour garantir la mobilité, l'idéal EST :

- 1 station de base unique capable d'émettre et recevoir, vers et depuis toute position d'un mobile (le parapluie)

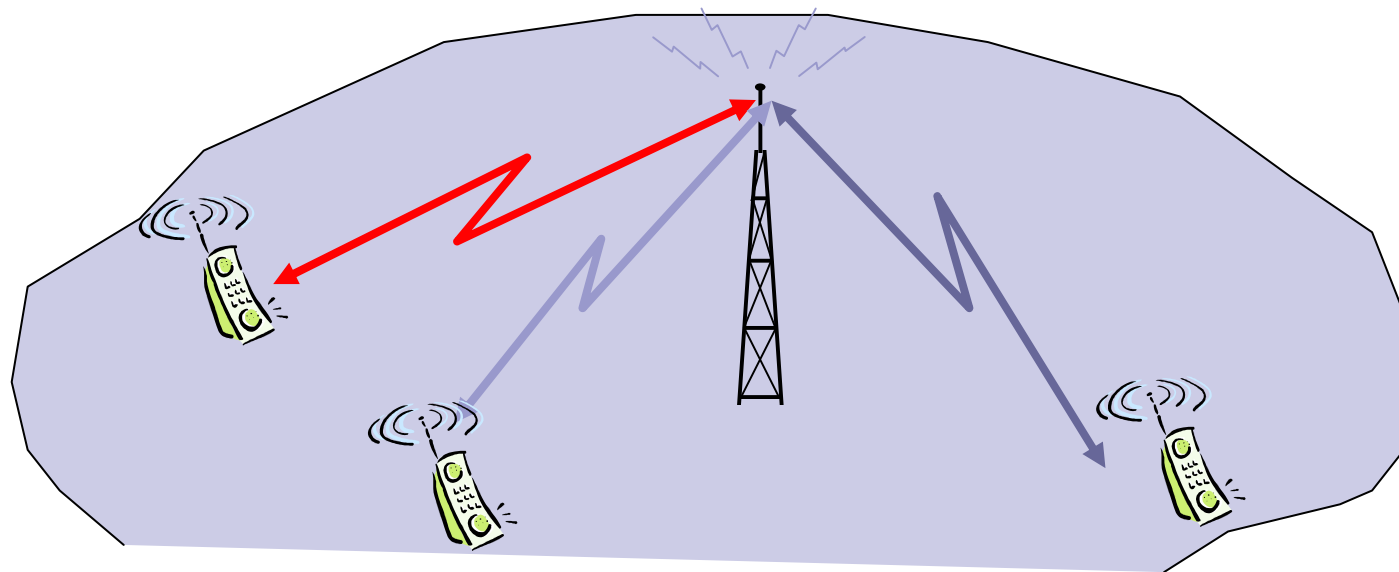
**Mais on 'arrose' très largement et les ressources ne peuvent être partagées**



## Introduction

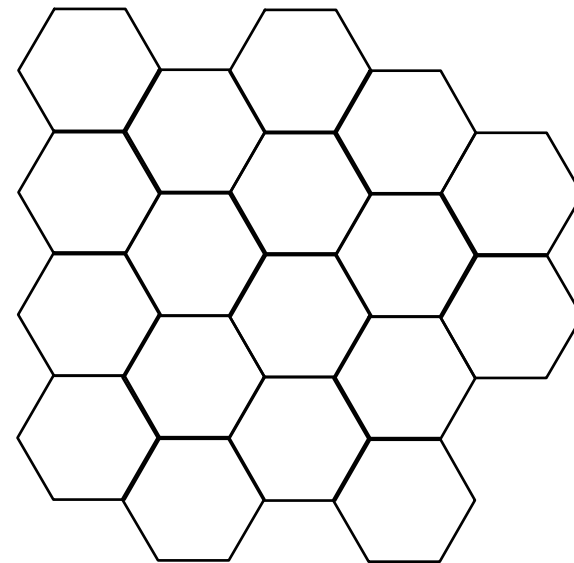
Pour garantir un débit élevé pour chaque terminal, l'idéal EST :  
- 1 liaison point à point

**Mais la transmission n'est possible que si les entités sont bien à l'endroit prévu**



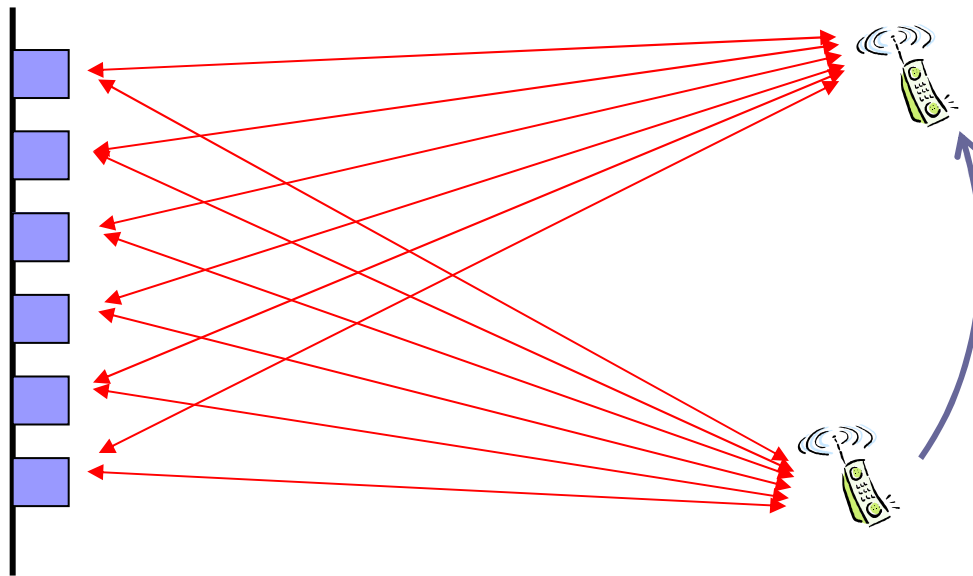
- Le cellulaire est un bon compromis, la mobilité est garantie par la division de la zone couverte en cellules.
  - Planification des cellules
  - Partage des ressources
  - Gestion des interférences
  - Gestion du handover

peut-on faire mieux ?

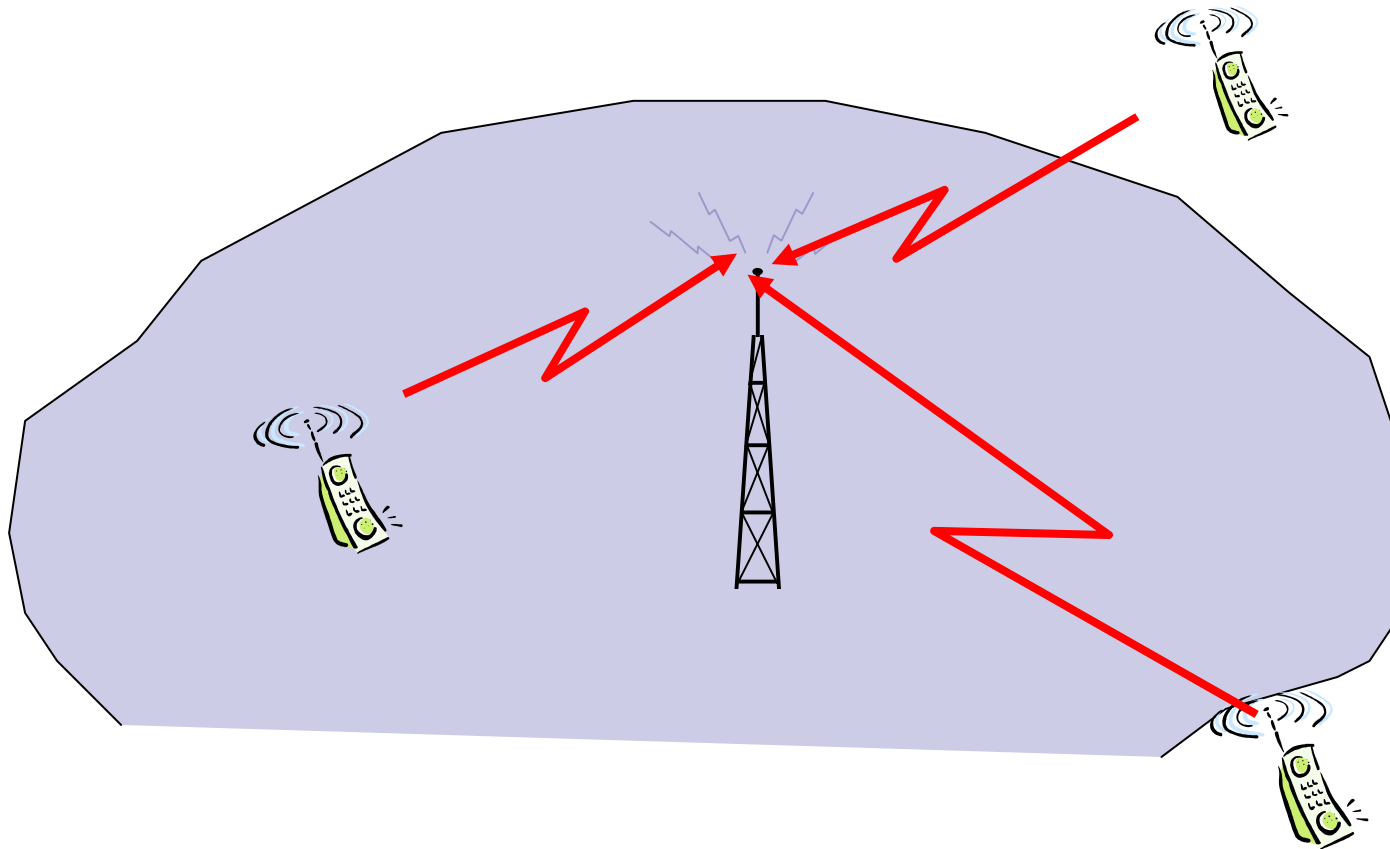


## Introduction

- L 'exploitation des concepts d 'antenne intelligente, déjà utilisés en radar, peut permettre de franchir un nouveau pas ...



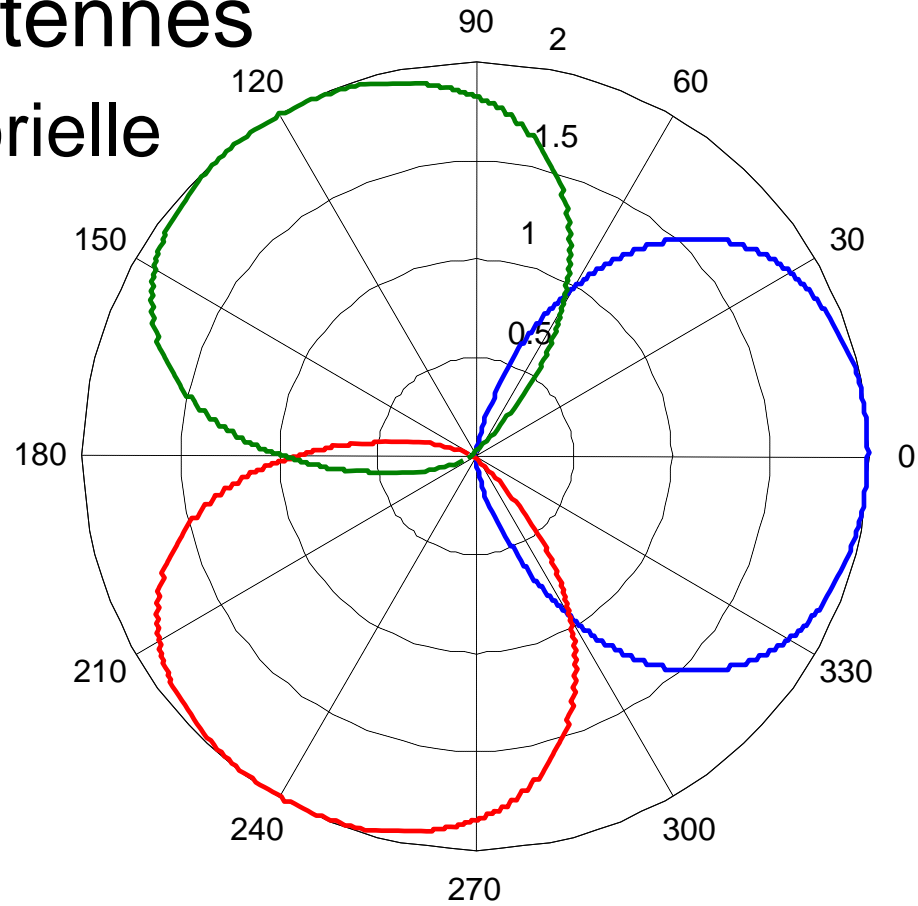
# I- Antennes adaptatives en réception



# I-1. Antennes sectorielles

- Systèmes d'antennes

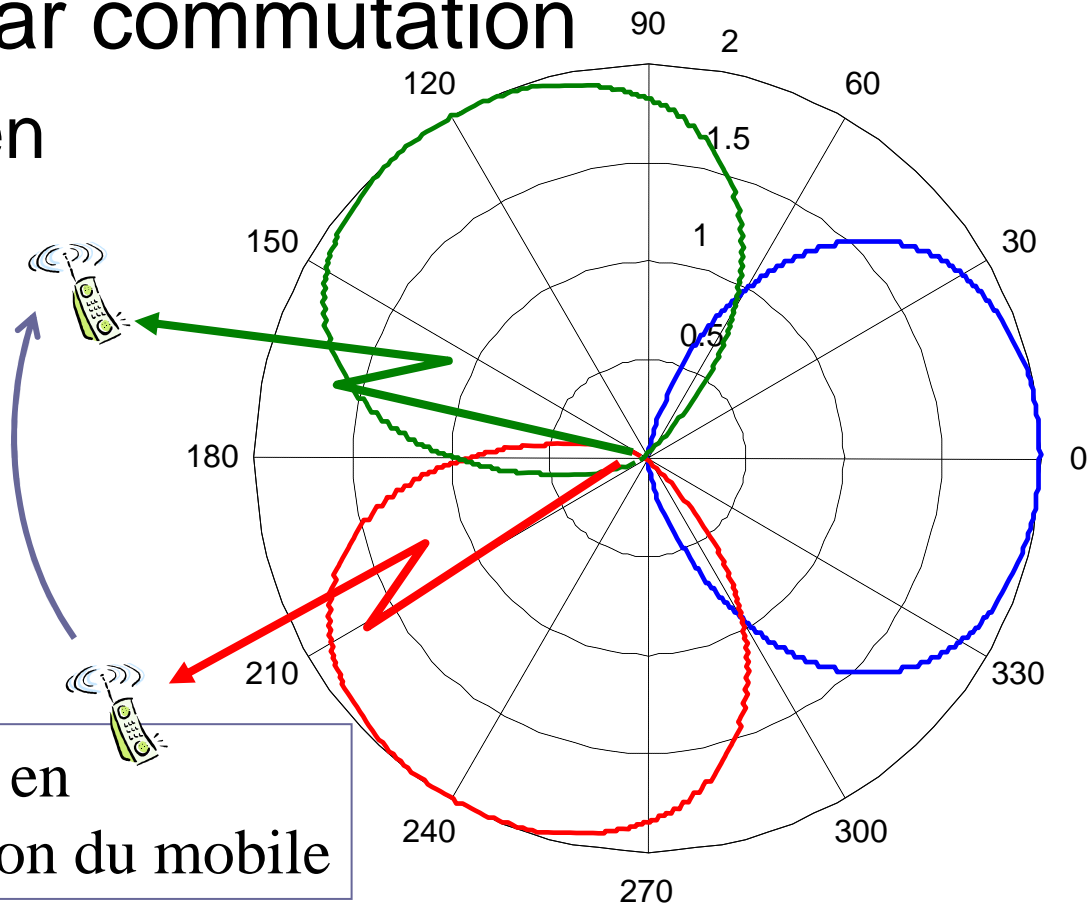
- l'antenne sectorielle





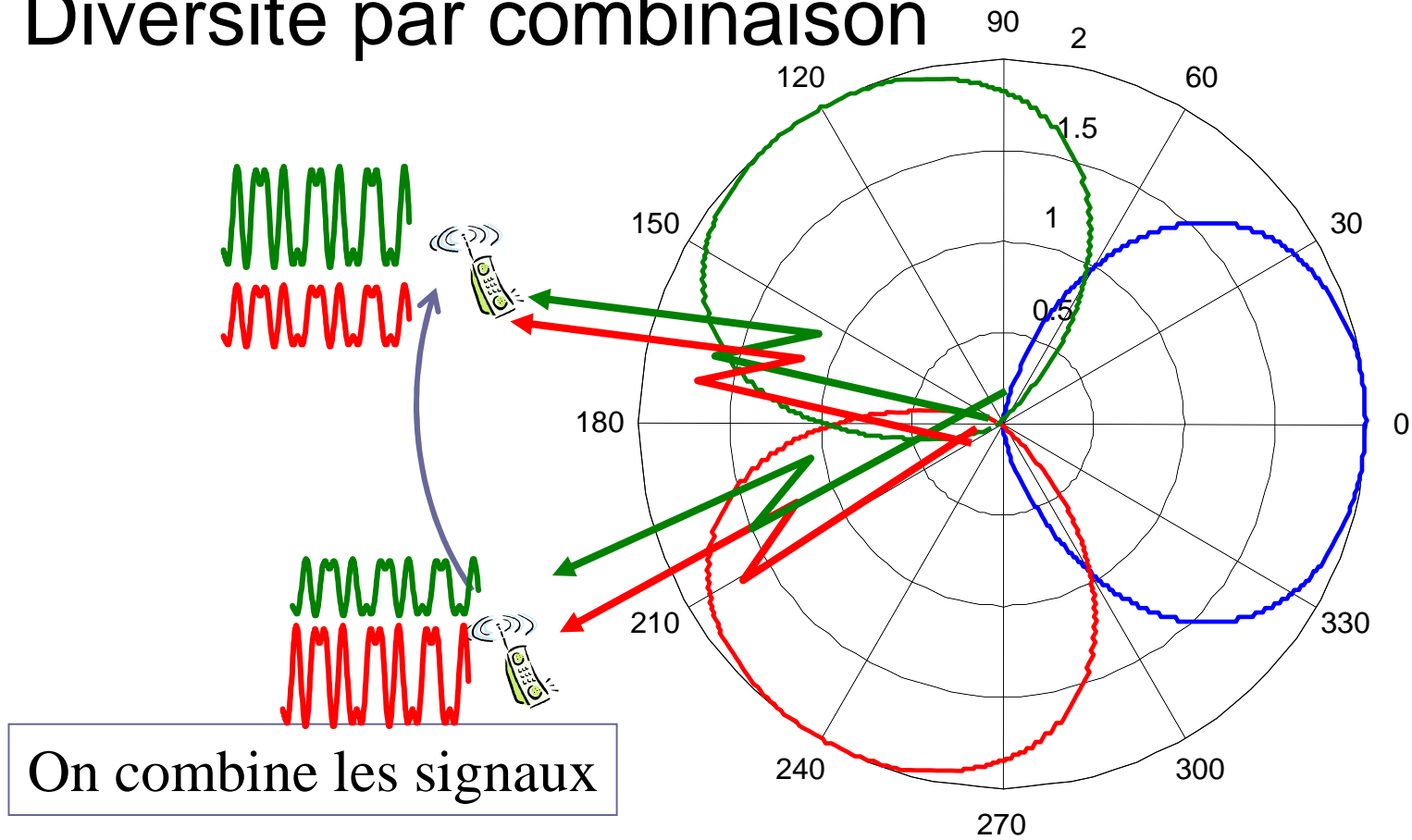
## ■ Diversité par commutation

□ tout ou rien



On choisi 1 antenne en fonction de la position du mobile

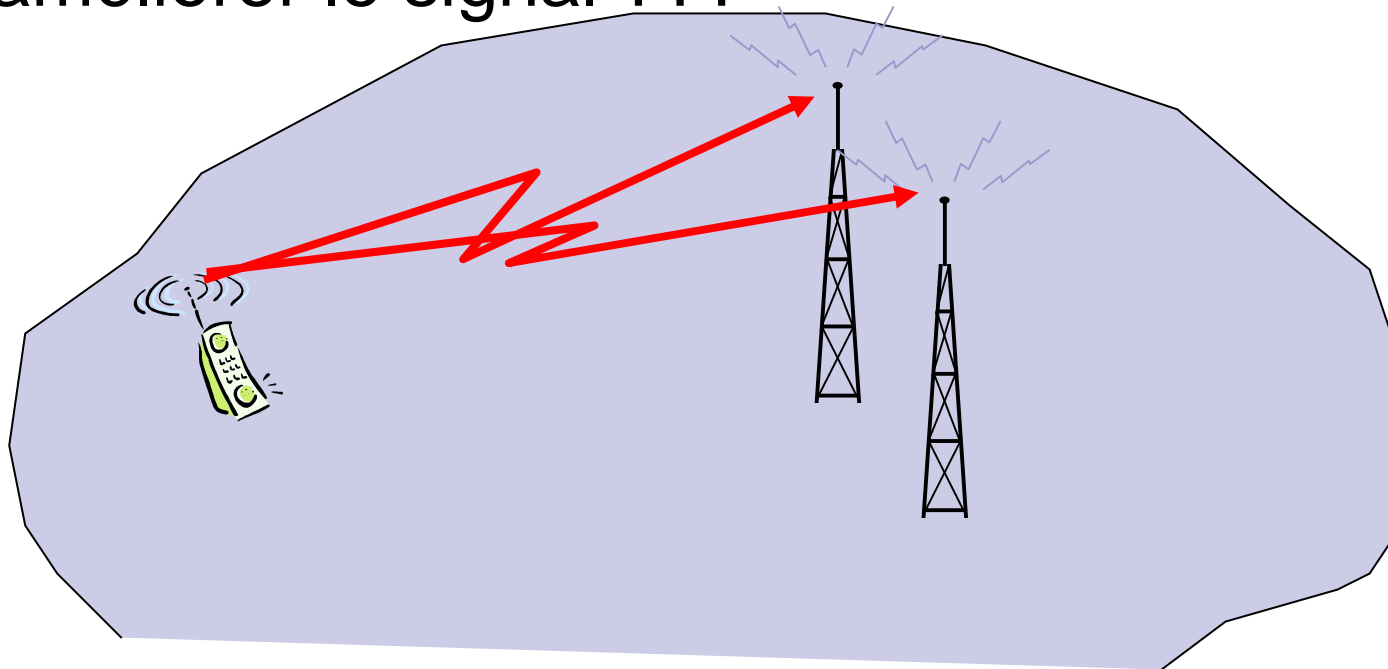
## ■ Diversité par combinaison



## I-2 Modélisation

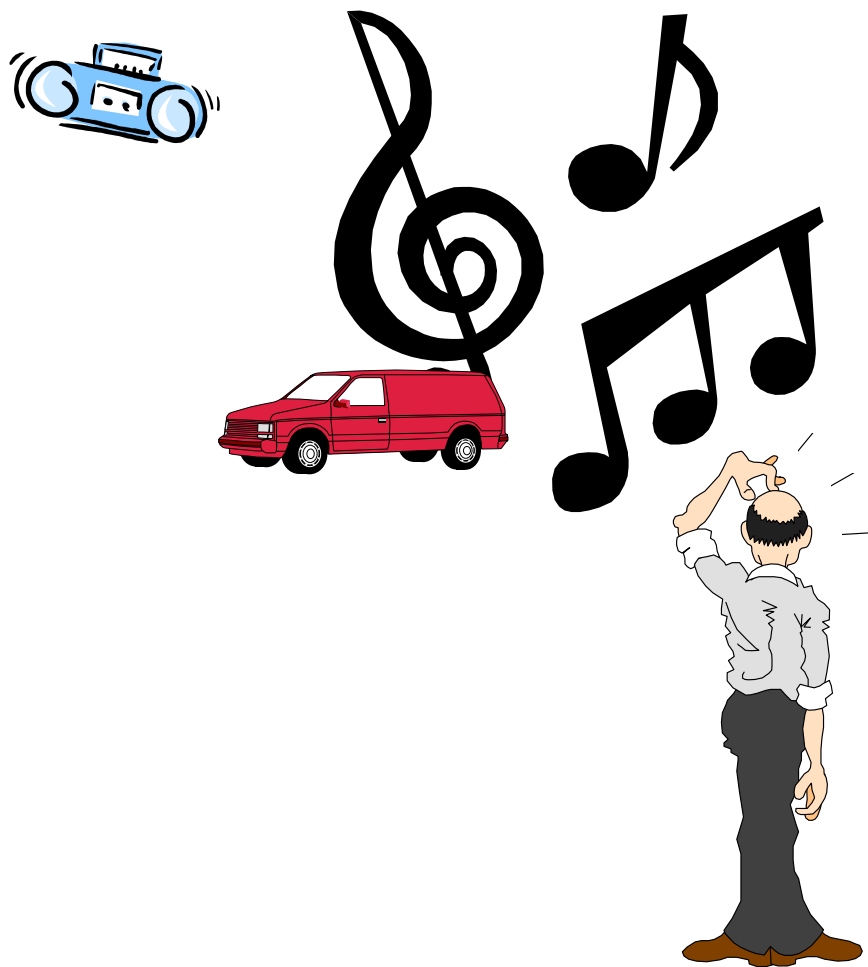
### ■ Problématique

- combiner plusieurs signaux en réception pour améliorer le signal ???

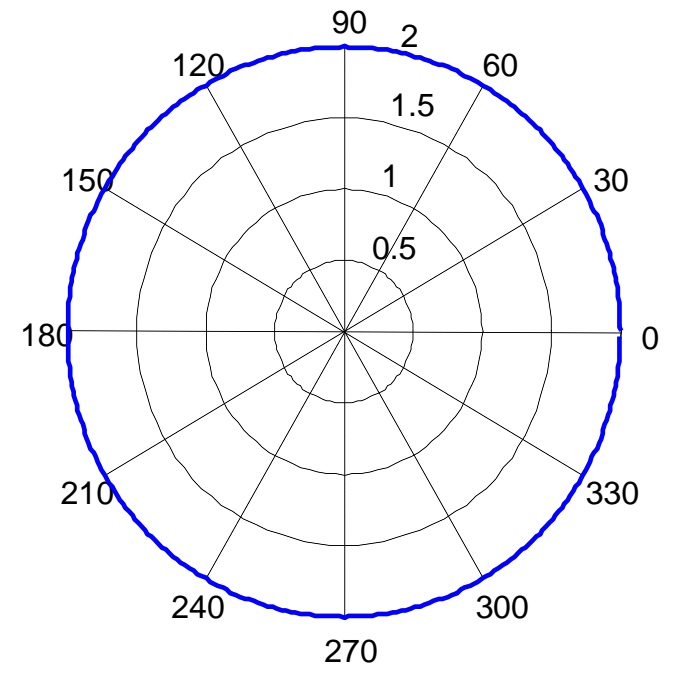
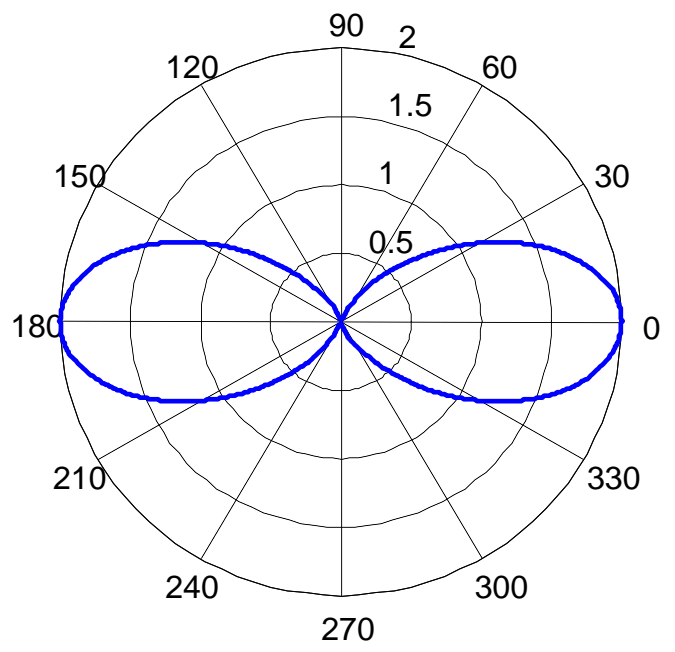


*I-2 modélisation*

Analogie

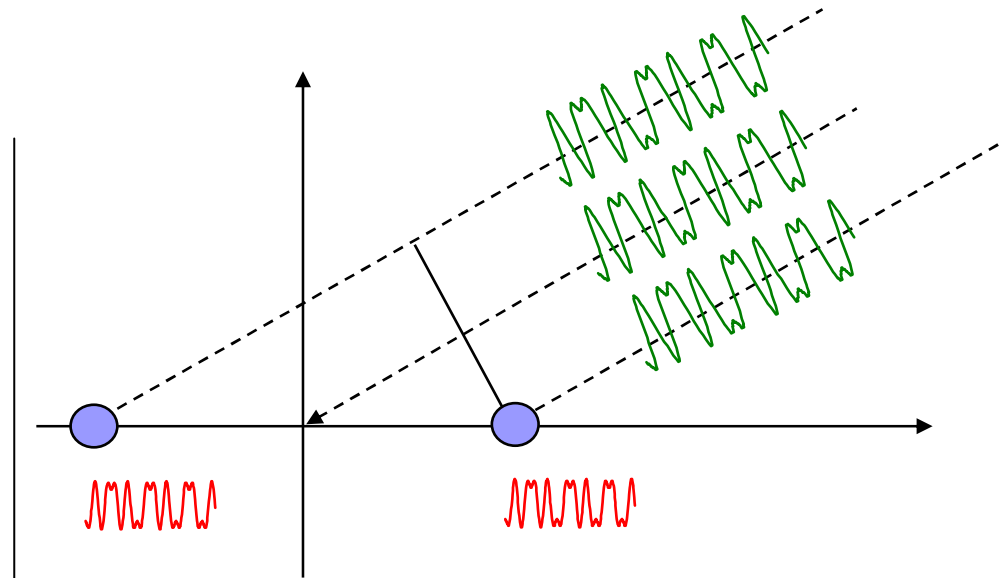


■ Rappel : l'antenne omnidirectionnelle



□ Modèle de base (2D)

- 1 direction d'arrivée du signal ( $\Psi_0$ )
- mobile en champ lointain
- les antennes en réception sont omnidirectionnelles
- Le signal reçu est le même sur les 2 antennes, avec simplement un déphasage, liée à la distance



$$S_1(f) = S_0(f) \cdot e^{j\beta d \cos \psi}$$
$$S_2(f) = S_0(f) \cdot e^{-j\beta d \cos \psi}$$

□ Modèle général :

- N éléments rayonnants (capteur)
- chaque capteur reçoit un signal transformé par le canal :

$$s_1(t) = h_1(t) \otimes s_0(t) + b_1(t)$$

$$s_2(t) = h_2(t) \otimes s_0(t) + b_2(t)$$

⋮

$$s_N(t) = h_N(t) \otimes s_0(t) + b_N(t)$$

$$S_1(f) = H_1(f) \cdot S_0(f) + B_1(f)$$

$$S_2(f) = H_2(f) \cdot S_0(f) + B_2(f)$$

⋮

$$S_N(f) = H_N(f) \cdot S_0(f) + B_N(f)$$

□ Modèle en bande étroite :

- on peut assimiler  $H_i$  à une constante complexe

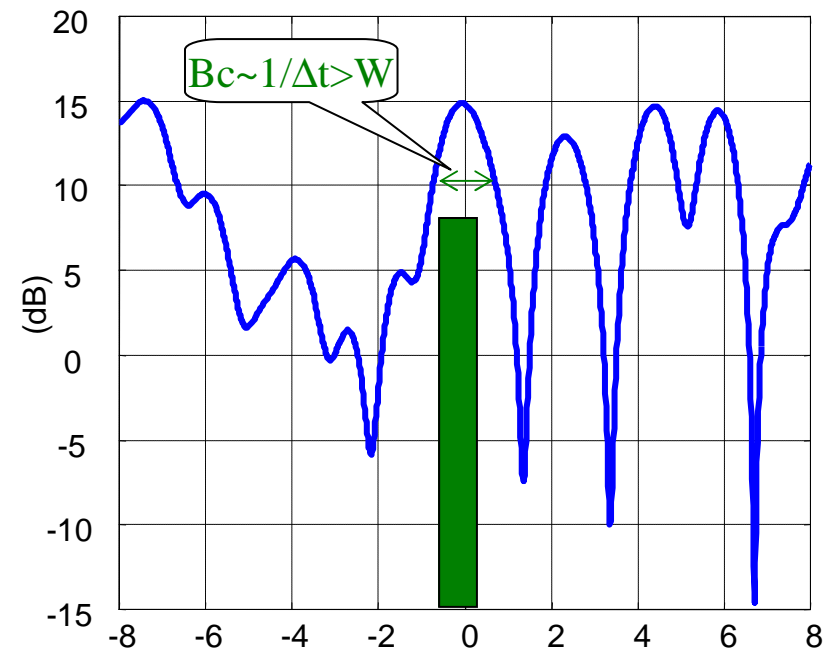
$$S_1 = H_1 \cdot S_0 + B_1$$

$$S_2 = H_2 \cdot S_0 + B_2$$

⋮

$$S_N = H_N \cdot S_0 + B_N$$

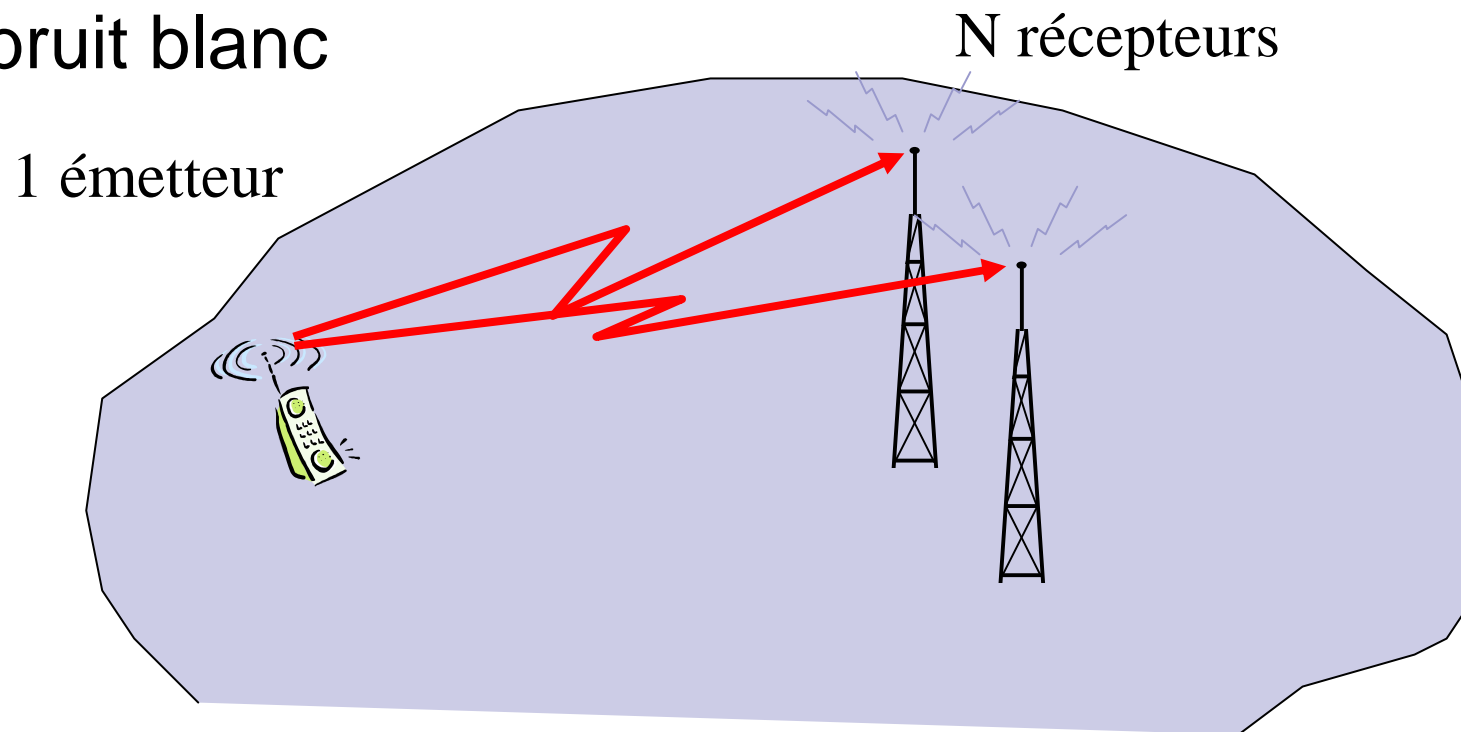
$$\underline{S} = \underline{H} \cdot S_0$$





## I-3 Réception optimale dans un canal AWGN

- Combinaison dans un environnement de bruit blanc



### I-3 réception sur canal AWGN

□ Signal reçu :  $\underline{S} = \underline{H} \cdot S_0 + \underline{B}$

□ on choisit un filtre tel que :

$$\hat{S} = \underline{F}^T \cdot (\underline{H} \cdot S_0 + \underline{N}) \approx S_0$$

□ prenons :

$$\underline{F} = \frac{\underline{H}^*}{\underline{H}^\perp \cdot \underline{H}}$$

### I-3 réception sur canal AWGN

- Exemple des 2 antennes :

$$\underline{S} = \underline{H} \cdot S_0 + \underline{N}$$

$$\underline{H} = \begin{bmatrix} e^{j\beta d \cos \Psi_0} \\ e^{-j\beta d \cos \Psi_0} \end{bmatrix}$$

- le filtre correspondant :

$$\underline{F} = \frac{\underline{H}^*}{\underline{H}^\perp \cdot \underline{H}}$$

$$\underline{F} = \frac{1}{2} \cdot \begin{bmatrix} e^{-j\beta d \cos \Psi_0} \\ e^{j\beta d \cos \Psi_0} \end{bmatrix}$$

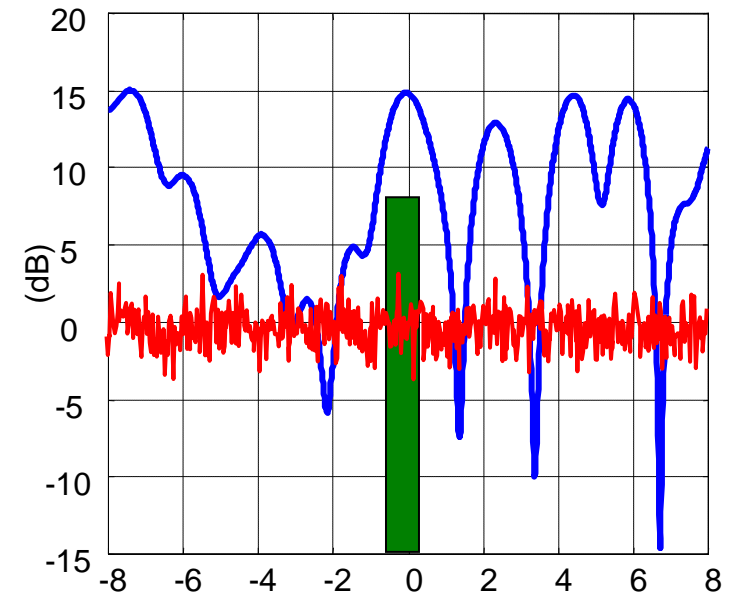
### ■ Influence du bruit

- une voie en réception :  
bruit B :

$$\sigma(f) = \sigma = \sqrt{N_0}$$

- Plusieurs voies :  
matrice d'intercorrélation  
spectrale

$$\Gamma_N = \begin{bmatrix} \sigma & & & \\ & \sigma & & \\ & & \ddots & \\ & & & \sigma \end{bmatrix} = \sigma \cdot Q$$



### I-3 réception sur canal AWGN

#### ■ Résultats

□ Matrice d'intercorrélation après filtrage : 
$$\underline{\Gamma}'_N = \underline{F}^T \cdot \underline{\Gamma}_N \cdot \underline{F}^*$$

□ Gain de SNR lié au filtrage : 
$$G = \frac{1}{|H_0|^2} \cdot \frac{|\underline{F}^T \cdot \underline{H}|^2}{\underline{F}^T \cdot \underline{Q} \cdot \underline{F}^*}$$

□ Exemple avec l'antenne à 2 éléments

$$\underline{\Gamma}'_N = \underline{F}^T \cdot \underline{\Gamma}_N \cdot \underline{F}^* = 0.5 \cdot \sigma$$

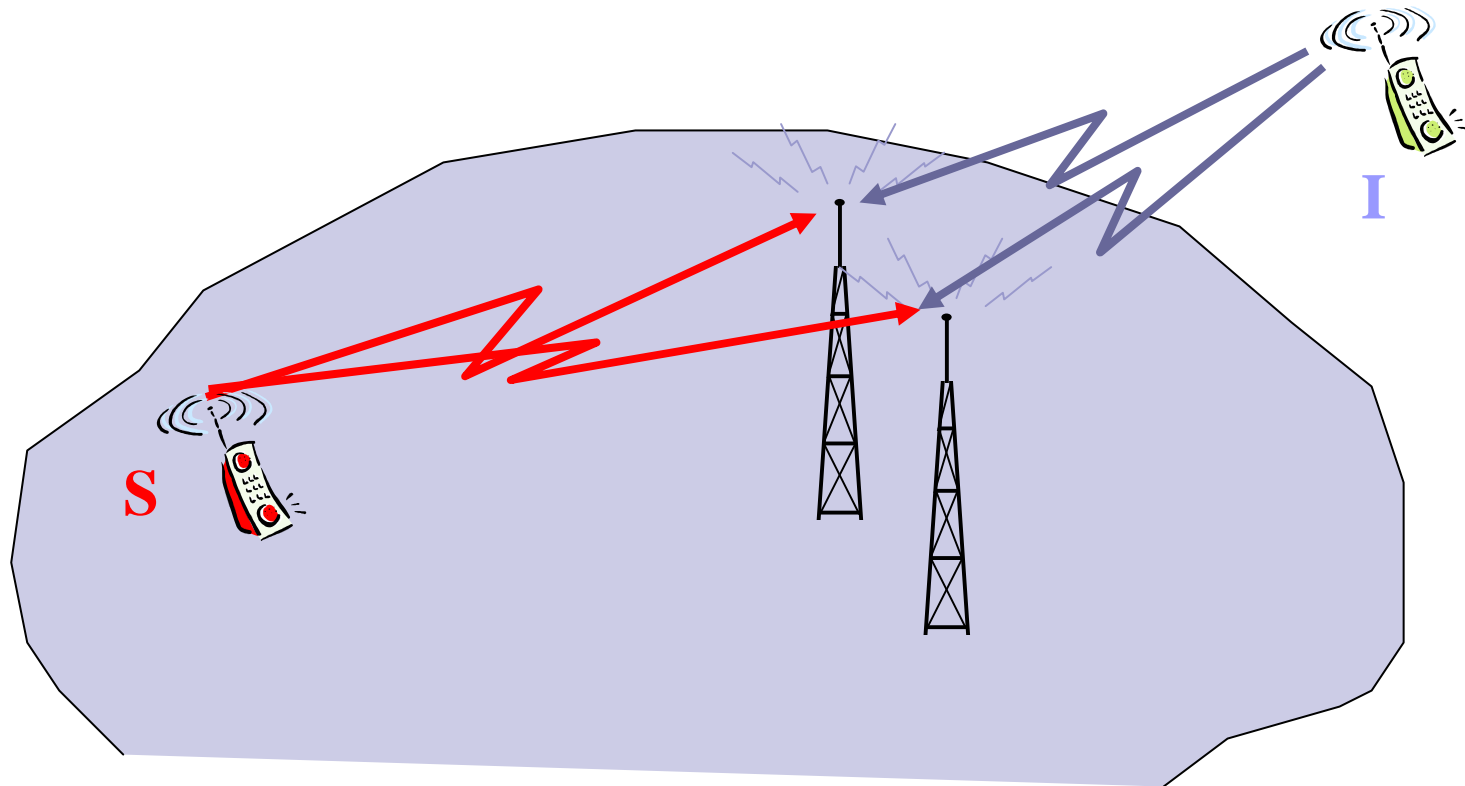
$$G = \frac{|\underline{F}^T \cdot \underline{H}|^2}{\underline{F}^T \cdot \underline{Q} \cdot \underline{F}^*} = \frac{1}{0.5} = 2$$

□ *Conclusions*

- *Le gain avec  $N$  voies est égal au plus à  $N$ .*
- *Il est obtenu :*
  - *si la puissance est de même niveau sur chaque voie*
  - *Si la décorrélation inter-capteurs du bruit est totale*
- *Il nécessite :*
  - *Une estimation du rapport signal à bruit sur chaque voie*
  - *La connaissance du canal pour appliquer le filtre idéal*

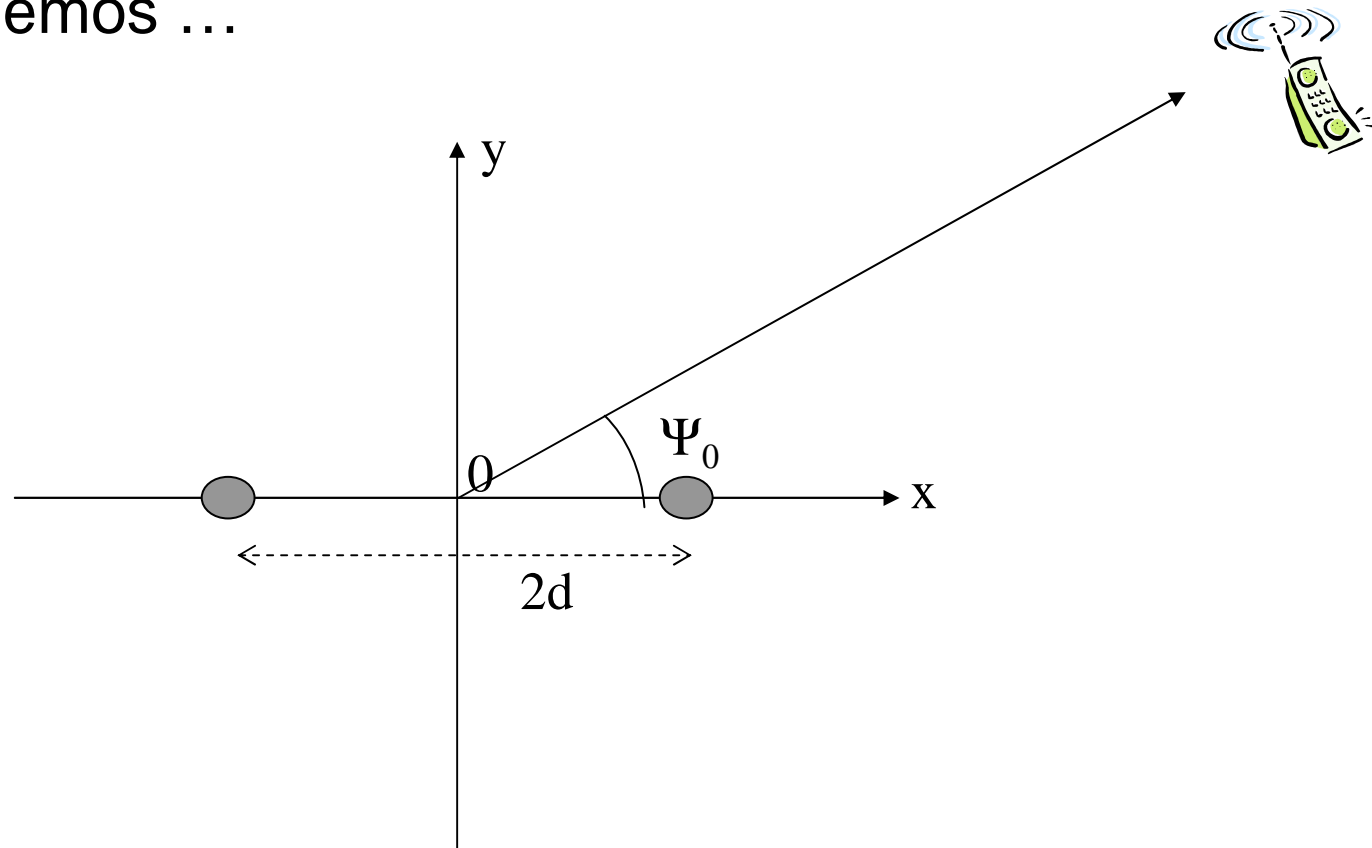
## I-4 Réception optimale avec interférents

### □ Impact d'un interférent

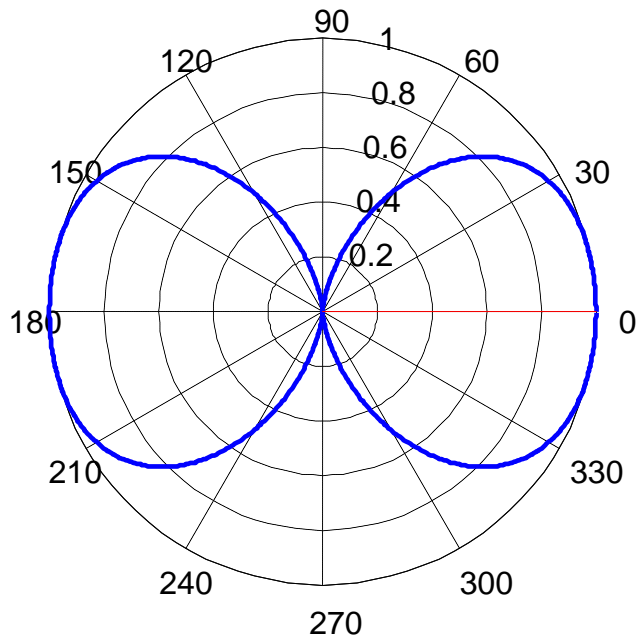
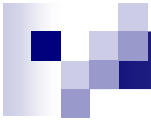


■ Interprétation spatiale du filtre optimal

Démos ...

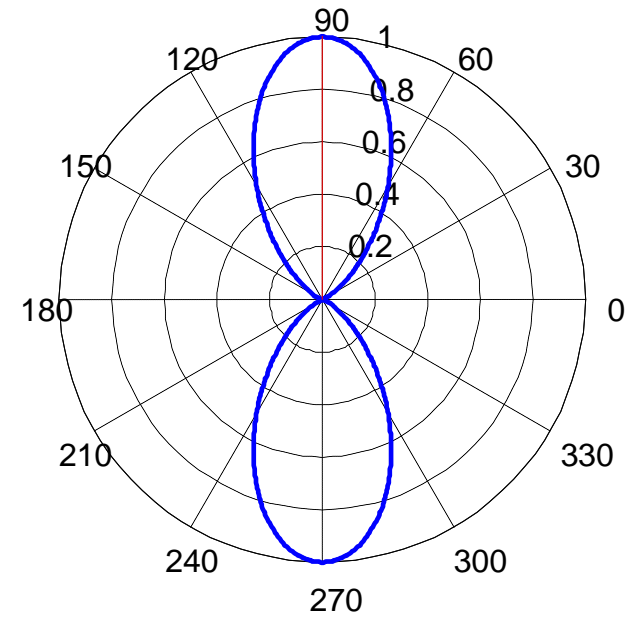




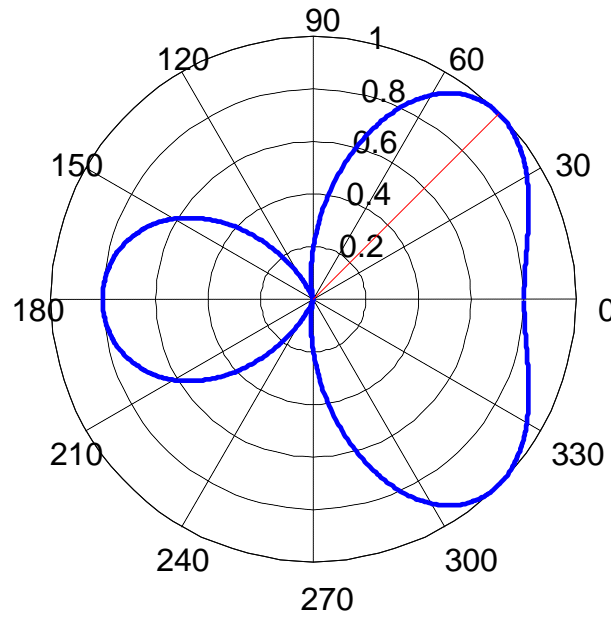


$$\Psi_0 = 0$$

$$\Psi_0 = \pi/4$$



$$\Psi_0 = \pi/2$$

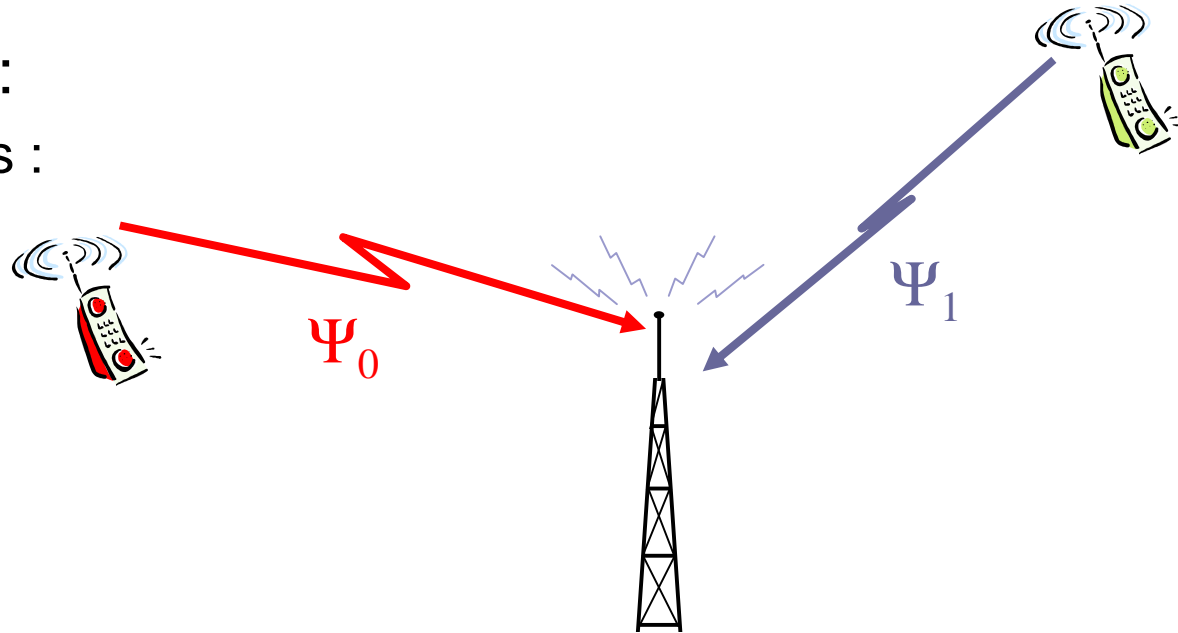


- Autres démos :
  - influence de la distance entre antennes
    - nécessité de l'indépendance des signaux
  - influence du nombre d'éléments
    - augmentation du pouvoir discriminant
  - influence de la géométrie
    - existence de directions privilégiées

## I-4 réception avec interférents

- Sélectivité :

- 2 sources :

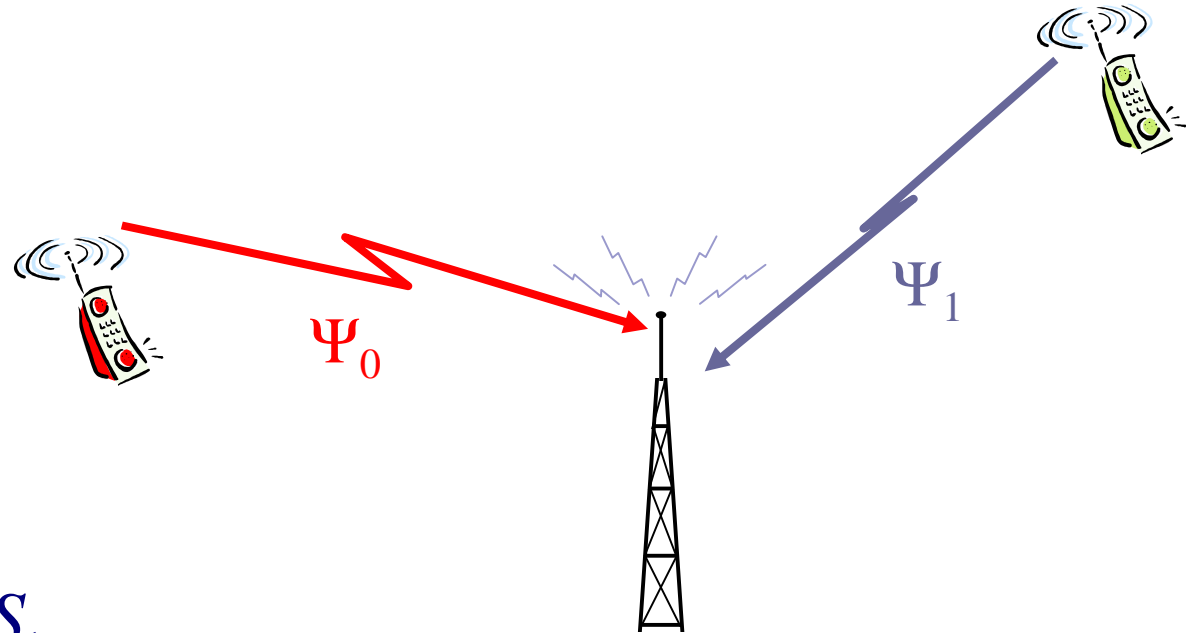


- focalisation avec le bon filtre sur M0.

$$\underline{H}_0 = \frac{1}{2} \cdot \begin{bmatrix} e^{j\beta d \cos \Psi_0} \\ e^{-j\beta d \cos \Psi_0} \end{bmatrix} \quad \underline{H}_1 = \frac{1}{2} \cdot \begin{bmatrix} e^{-j\beta d \cos \Psi_1} \\ e^{j\beta d \cos \Psi_1} \end{bmatrix} \quad \underline{F}_0 = \frac{1}{2} \cdot \begin{bmatrix} e^{-j\beta d \cos \Psi_0} \\ e^{j\beta d \cos \Psi_0} \end{bmatrix}$$

#### I-4 réception avec interférents

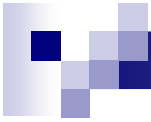
#### ■ Résultat



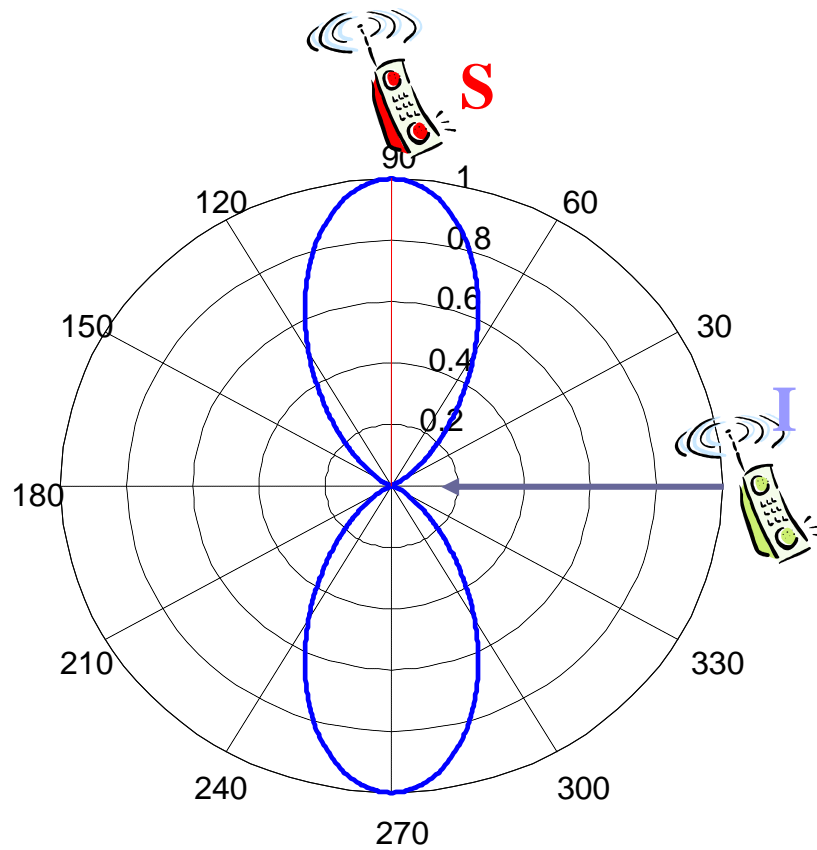
$$\underline{S} = \underline{H}_0 \cdot S_0 + \underline{H}_1 \cdot S_1$$

$$\widehat{S} = \underline{F}_0^T \cdot \underline{S} = S_0 + \cos(\beta d (\cos \psi_0 - \cos \psi_1)) \cdot S_1$$

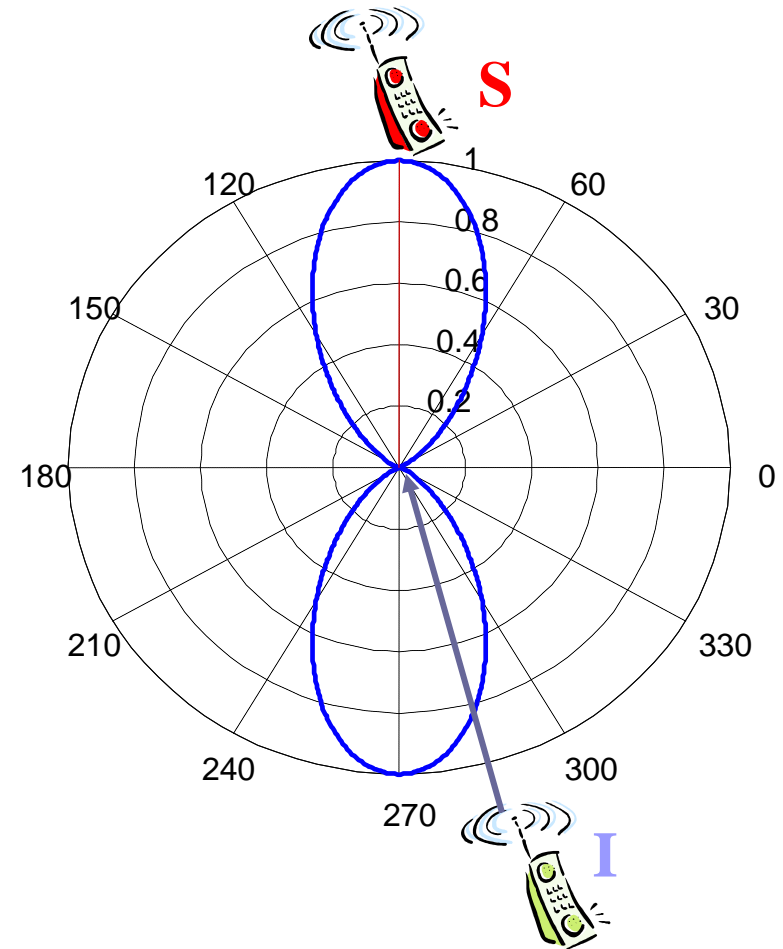
$$\widehat{S} = S_0 + k_{01} \cdot S_1$$



## I-4 réception avec interférents



Interférent bien filtré



Interférent mal filtré

□ Réjection d'interférent

- Le filtre précédent a pour but de combiner les voies pour améliorer le SNR global.
- Par contre, il n'est pas optimal lorsque le bruit est lié à une source ponctuelle.
- Réjection : pénaliser les directions où un mobile est présent
  - la direction de la source S est caractérisée par son filtre de propagation  $\underline{H}_0$
  - La direction de l'interférent I est caractérisé par son filtre propre  $\underline{H}_1$ .
- Chercher un filtre qui maximise S en minimisant I.

□ **Filtre optimal**

- on considère le bruit comme étant la somme du bruit blanc environnant et de l'interférent. Sa matrice interspectrale est :

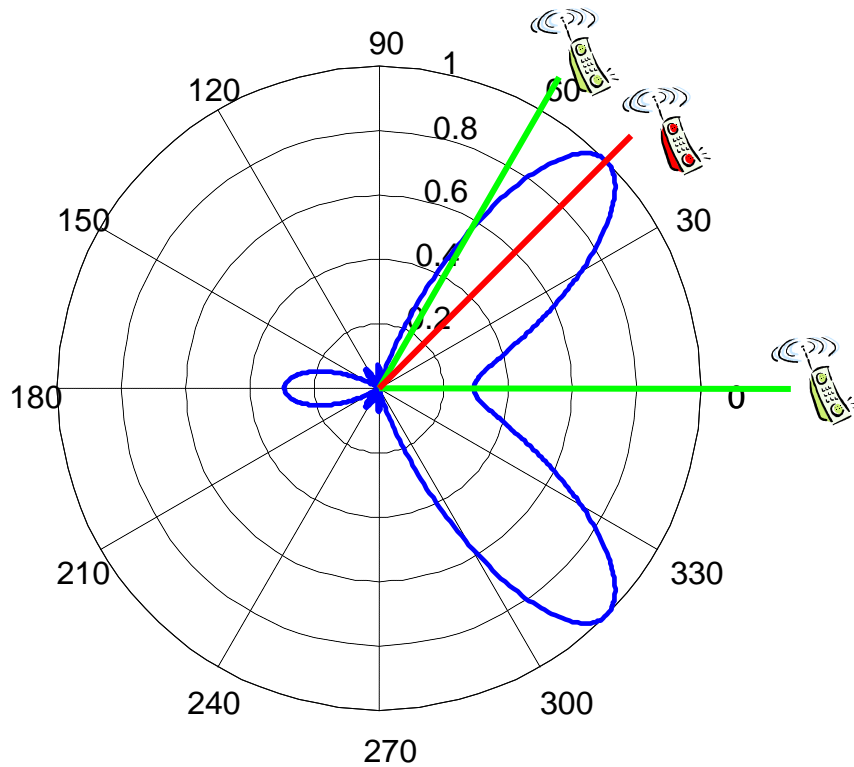
$$\Gamma_N = \sigma \cdot I + \gamma \cdot \underline{F}_1 \cdot \underline{F}_1^\perp$$

$$Q = \frac{\Gamma_N}{\sigma + \gamma}$$

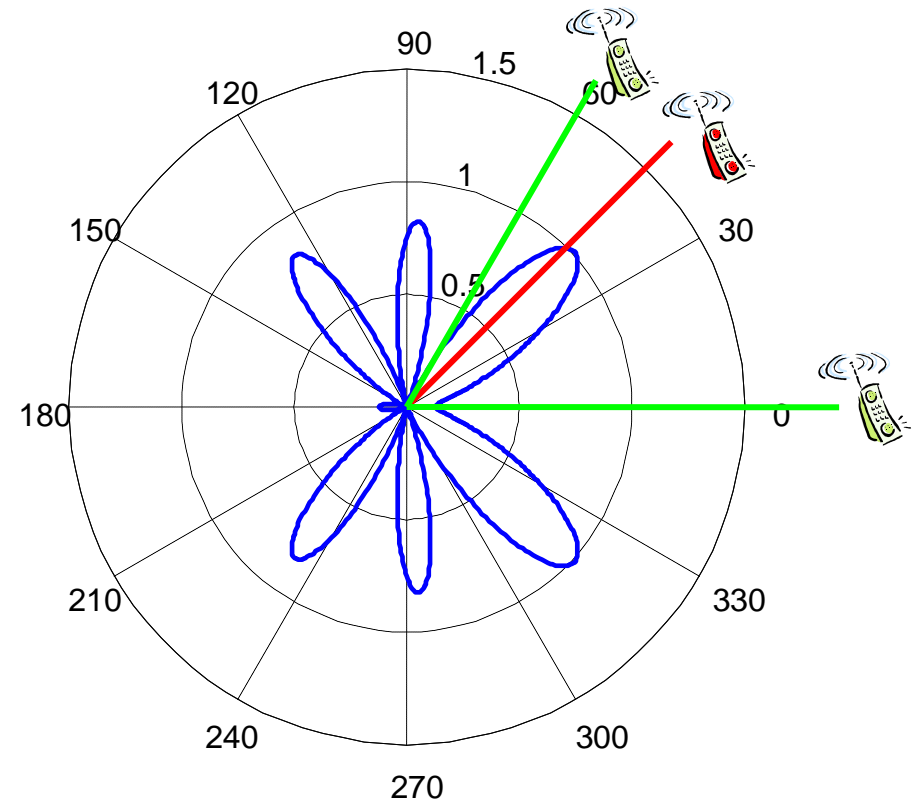
- filtre de blanchiment du bruit + filtre de détection

$$\underline{F} = \frac{(\underline{Q}^{-1} \cdot \underline{H}_0)^*}{\underline{H}_0^\perp \cdot \underline{Q}^{-1} \cdot \underline{H}_0}$$

$\Psi_0 = \pi/4$ ;  $\Psi_{\text{int}} = [\pi/3, 0]$  ;  
 4 antennes,  $2d = 0.5$   
 filtre classique



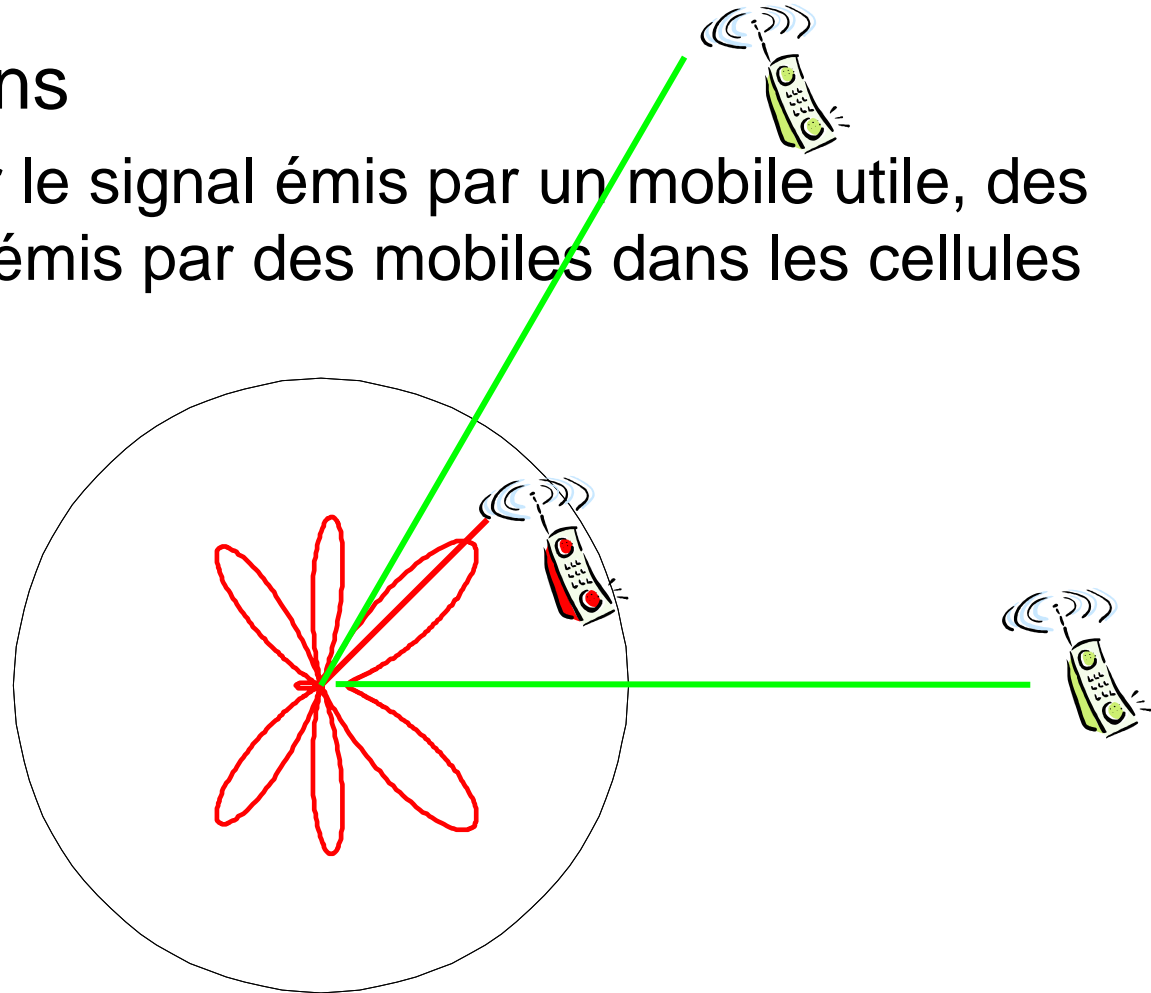
$\Psi_0 = \pi/4$ ;  $\Psi_{\text{int}} = [\pi/3, 0]$  ;  
 4 antennes,  $2d = 0.5$   
 filtre avec réjection





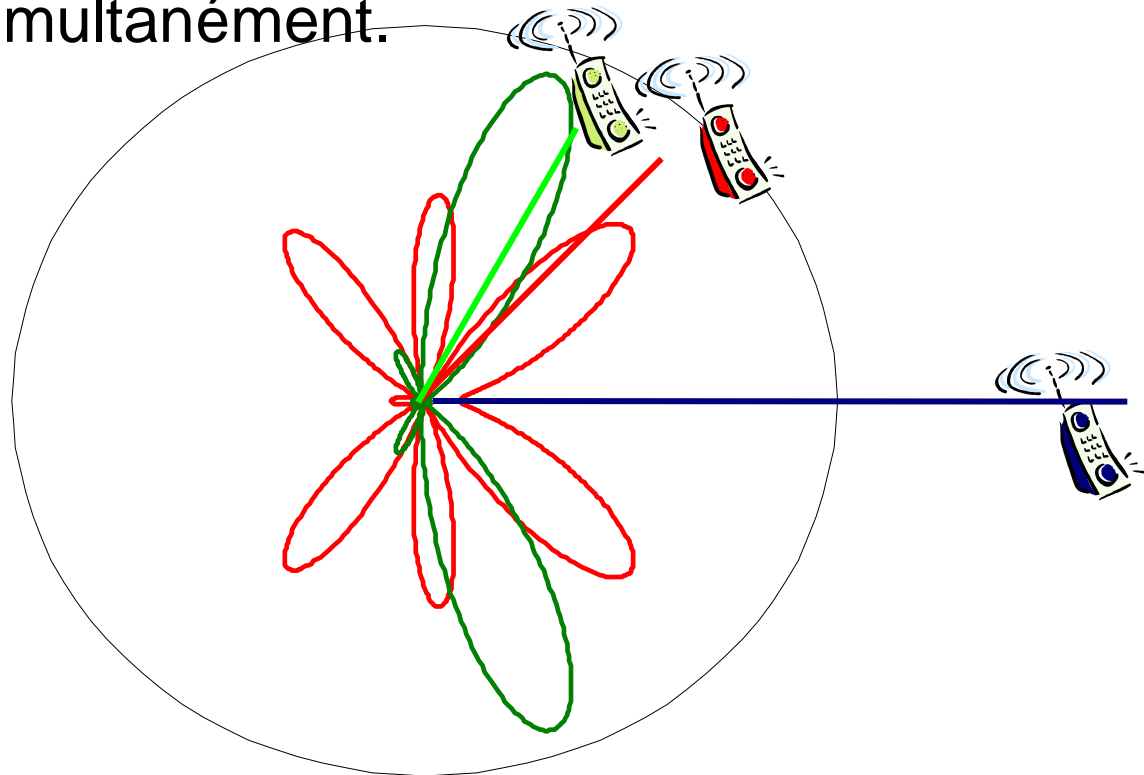
□ Applications

- dissocier le signal émis par un mobile utile, des signaux émis par des mobiles dans les cellules voisines



□ Applications

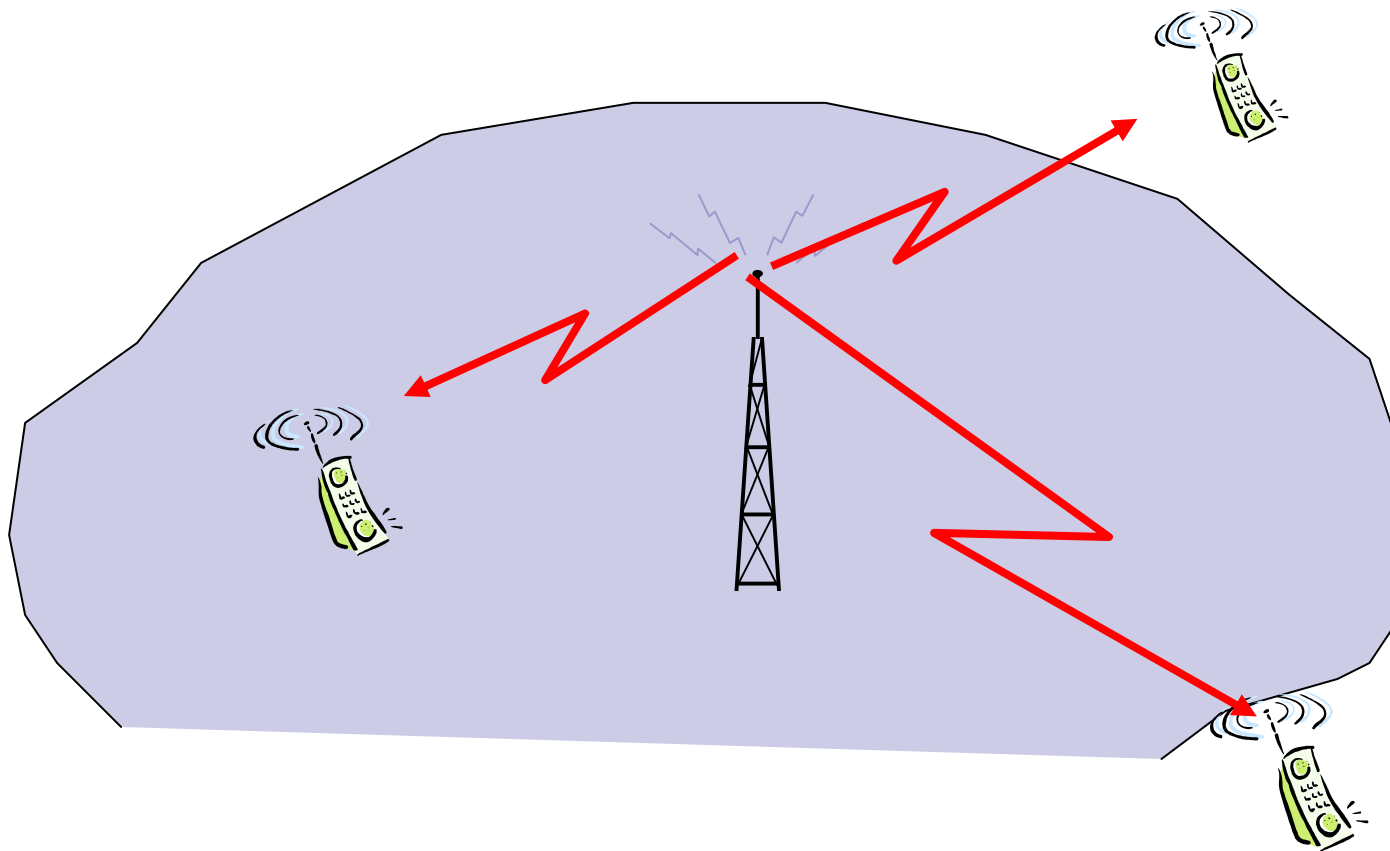
- dissocier les signaux émis par 2 mobiles utiles (ou N), simultanément.



## ■ Propriétés

- Amélioration de l'efficacité (moins de puissance)
- Réduction / suppression des interférences entre mobiles internes à une cellule (meilleure utilisation du spectre)
- Augmentation du facteur de réutilisation spatial des ressources (amélioration du nombre de canaux par cellule)
- Réutilisation de ressources (fréquence/code) par plusieurs mobiles appartenant à la même cellule = SDMA (efficacité spectrale)

# II-Antennes adaptatives en émission



□ **Traitement à l'émission**

■ **Même traitement qu'à la réception ?**

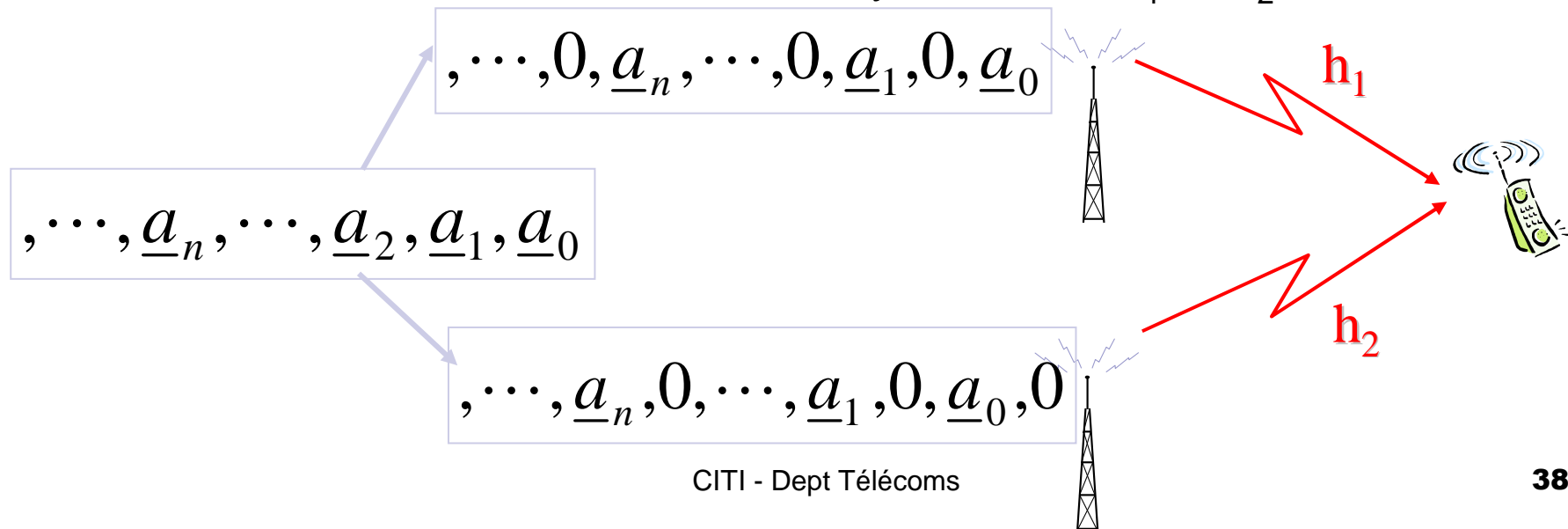
- en réception, le traitement est fait à posteriori. On peut ainsi envisager naturellement un traitement adaptatif dynamique.
  
- en émission, le traitement est possible (=focalisation), mais nécessite la connaissance initiale de l'objectif visé.
  
- la précision peut se faire au détriment de la mobilité, surtout si le canal n'est pas stable.

## II-2. Diversité par Codage

- Il existe une solution qui permet d'obtenir de la diversité, sans connaissance a priori de la position de la source. Cela permet d'introduire de la diversité.

### □ exemple avec 2 émetteurs :

- émission alternée d'un symbole sur  $A_1$  et  $A_2$  :



## II-2. Diversité par codage

- Algorithme de détection :
  - l'algorithme travaille sur 2 périodes

1ère impulsion :  $r_{2m} = h_1 \cdot a_m$

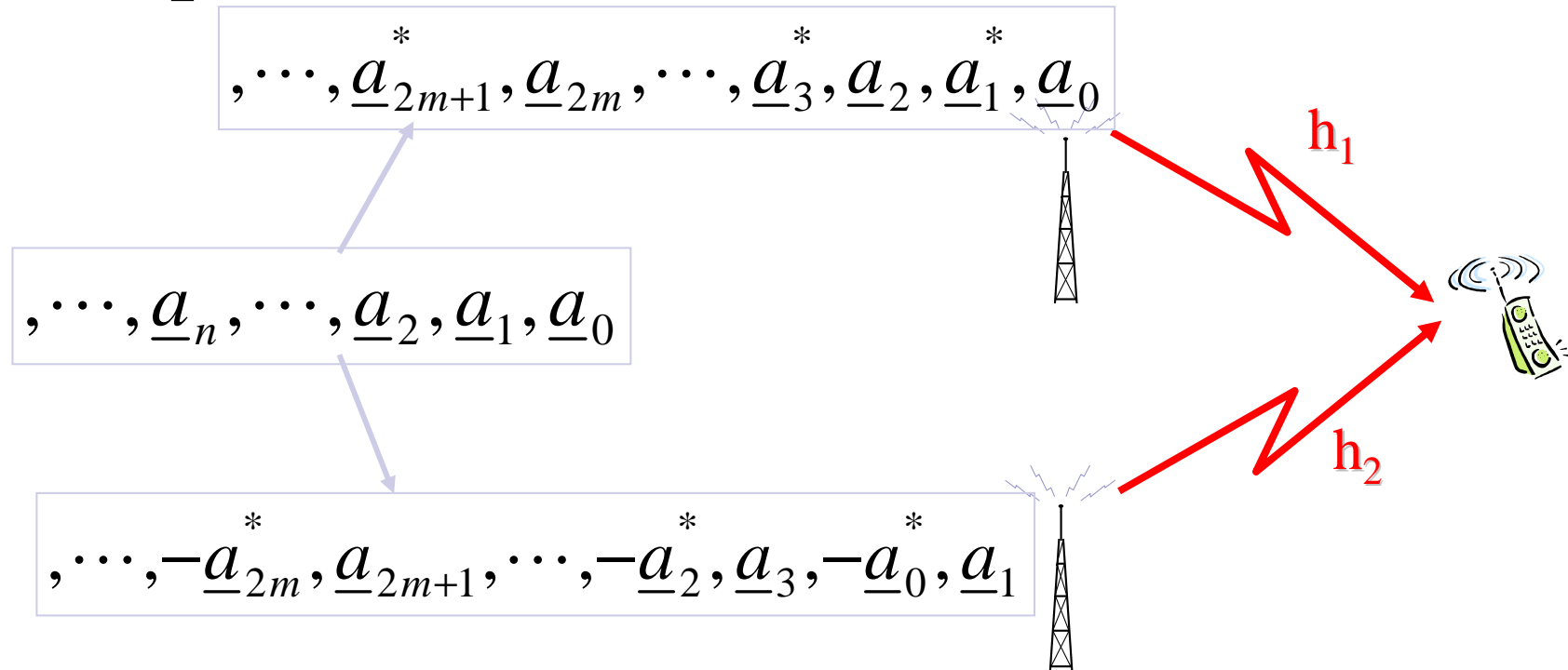
2ième impulsion :  $r_{2m+1} = h_2 \cdot a_m$

combinaison :  $\hat{a}_m = h_1^* \cdot r_{2m} + h_2^* \cdot r_{2m+1} = \left( |h_1|^2 + |h_2|^2 \right) \cdot a_m$

inconvénient : on divise le débit par 2.

## II-2. Diversité par codage

- Emission simultanée de 2 symboles sur  $A_1$  et  $A_2$  :





## II-2. Diversité par codage

- Algorithme de détection :
  - l'algorithme travaille sur 2 périodes

$$\text{1ère impulsion : } r_{2m} = h_1 \cdot a_{2m} + h_2 \cdot a_{2m+1}$$

$$\text{2ième impulsion : } r_{2m+1} = h_1 \cdot a_{2m+1}^* - h_2 \cdot a_{2m}^*$$

combinaison :

$$\hat{a}_{2m} = h_1^* \cdot r_{2m} - h_2 \cdot r_{2m+1}^* = (|h_1|^2 + |h_2|^2) \cdot a_{2m}$$
$$\hat{a}_{2m+1} = h_2^* \cdot r_{2m} + h_1 \cdot r_{2m+1}^* = (|h_1|^2 + |h_2|^2) \cdot a_{2m+1}$$



## *II-2. Diversité par codage*

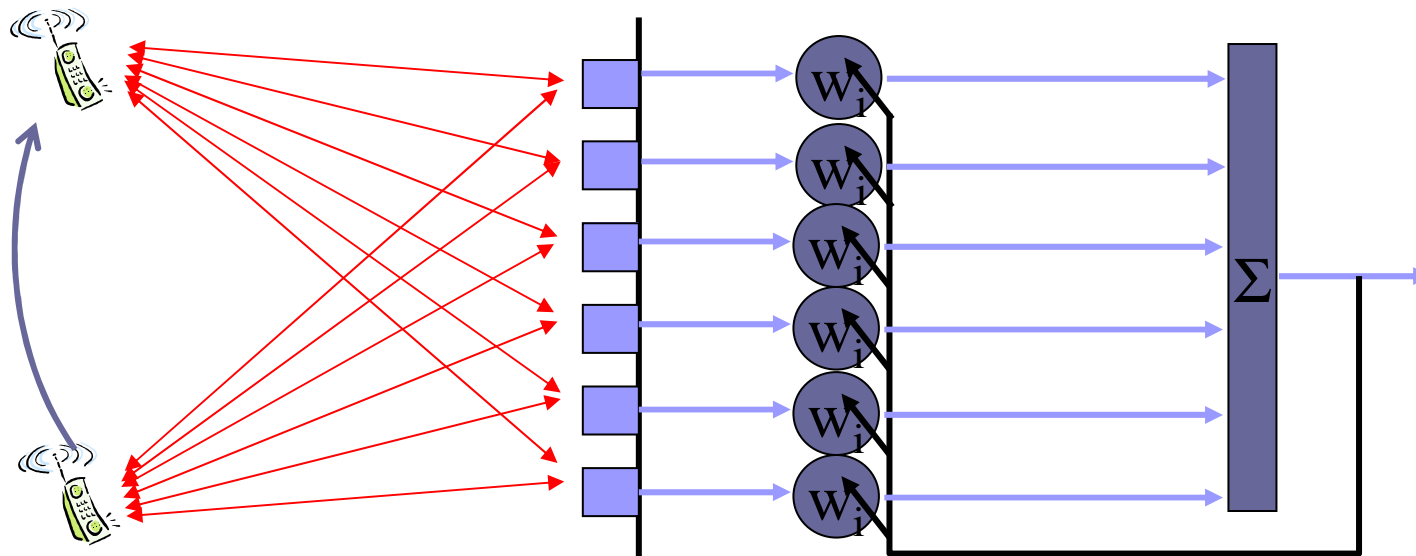
### ■ Propriétés :

- Même diversité (N) en émission qu'en réception.
- Il faut connaître le canal au niveau du récepteur (et pas de l'émetteur). Nécessité d'une séquence d'apprentissage,...
- La combinaison émission/réception est possible et améliore encore la diversité.
- L'existence de chemins multiples (fast fading) peut réduire la diversité
  - => Egalisation multi-voies.

# Conclusions et perspectives

## □ filtre adaptatif

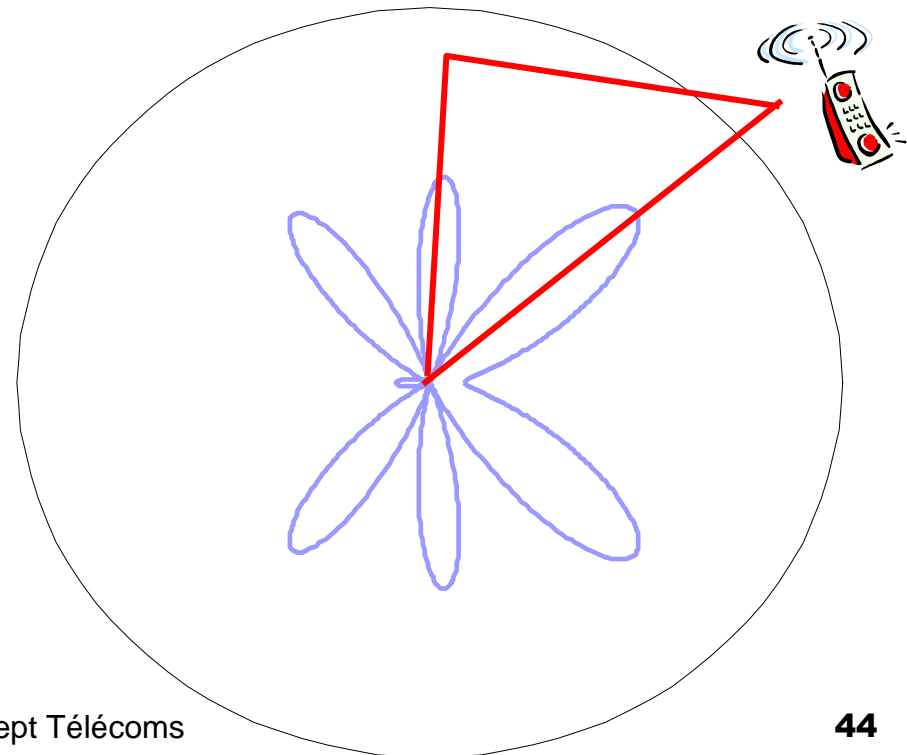
- le filtre optimal suppose la connaissance de la source et des interférents : technique de filtrage adaptatif qui optimise la structure du filtre au cours du temps



## Conclusions et perspectives

- Les chemins multiples de type ' dispersion ' :
  - le fading lent, qui en découle, complique la compréhension du problème, mais pas la réalisation du filtre

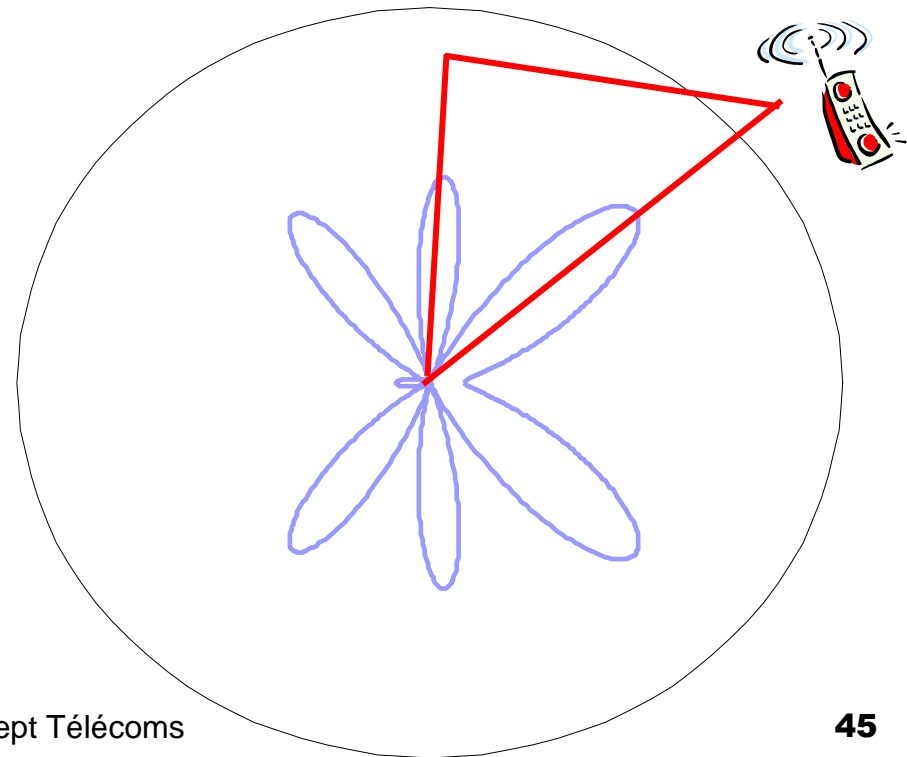
C 'est même un moyen  
d 'améliorer la réception  
en combinant les raies  
(implicite au filtre optimal)



## Conclusions et perspectives

- Les chemins multiples de type 'échos retardés':
  - le fading rapide, qui en découle, est traité par l'égalisation : possibilité d'un RAKE 2D.

On peut également les combiner avantageusement, a posteriori





## Conclusions et perspectives

- Problèmes traités actuellement :
  - Rapidité et optimalité des algorithmes de détection MIMO.
  - Estimation «aveugle» du canal.
  - Robustesse au bruit, aux interférences.
  - Intégration des antennes multi-capteurs sur les mobiles.
  - ...