

# **Propagation en contexte MIMO dans un tunnel - Etude théorique et expérimentale**

*Martine Lienard\**, *Pierre Degauque\**,  
*Jose Maria Molina-Garcia-Pardo\*\**

\*Université de Lille, IEMN/TELICE

\*\* Universidad Politécnica de Cartagena

## Propagation en tunnel : Remarques préliminaires

- Cas idéal d'un canal parfaitement connu.
- Tunnel:  $B_c$  qq 10 MHz. Hypt: Canal non sélectif en fréquence, caractérisé par sa fonction de transfert  $h$
- MIMO: Matrice de transfert  $H$ . Elements: nombres complexes (caractérise propagation entre  $Tx_i$  et  $Rx_j$ )
- Capacité maximum du canal

$$C = \log_2 \left[ \det \left( I + \frac{\rho}{n_T} H H^H \right) \right] \text{ bit / s / Hz}$$

$$C = \sum_{i=1}^{\min(n_T, n_R, w)} \log_2 \left( 1 + \frac{\rho}{n_T} \lambda_i^2 \right)$$

Valeurs singulières de  $H$  (donc  $C$ ) dépendent fortement de la corrélation entre éléments du réseau

## Propagation en tunnel : Remarques préliminaires, cont.

- En bâtiment, multiples réflexions sur obstacles aléatoirement distribués : grand étalement des angles de départ et d'arrivée des rayons
- Question : en tunnel ? Diversité ? A grande distance : rayons rasants sont dominants !

Remplacer diversité spatiale par une diversité modale

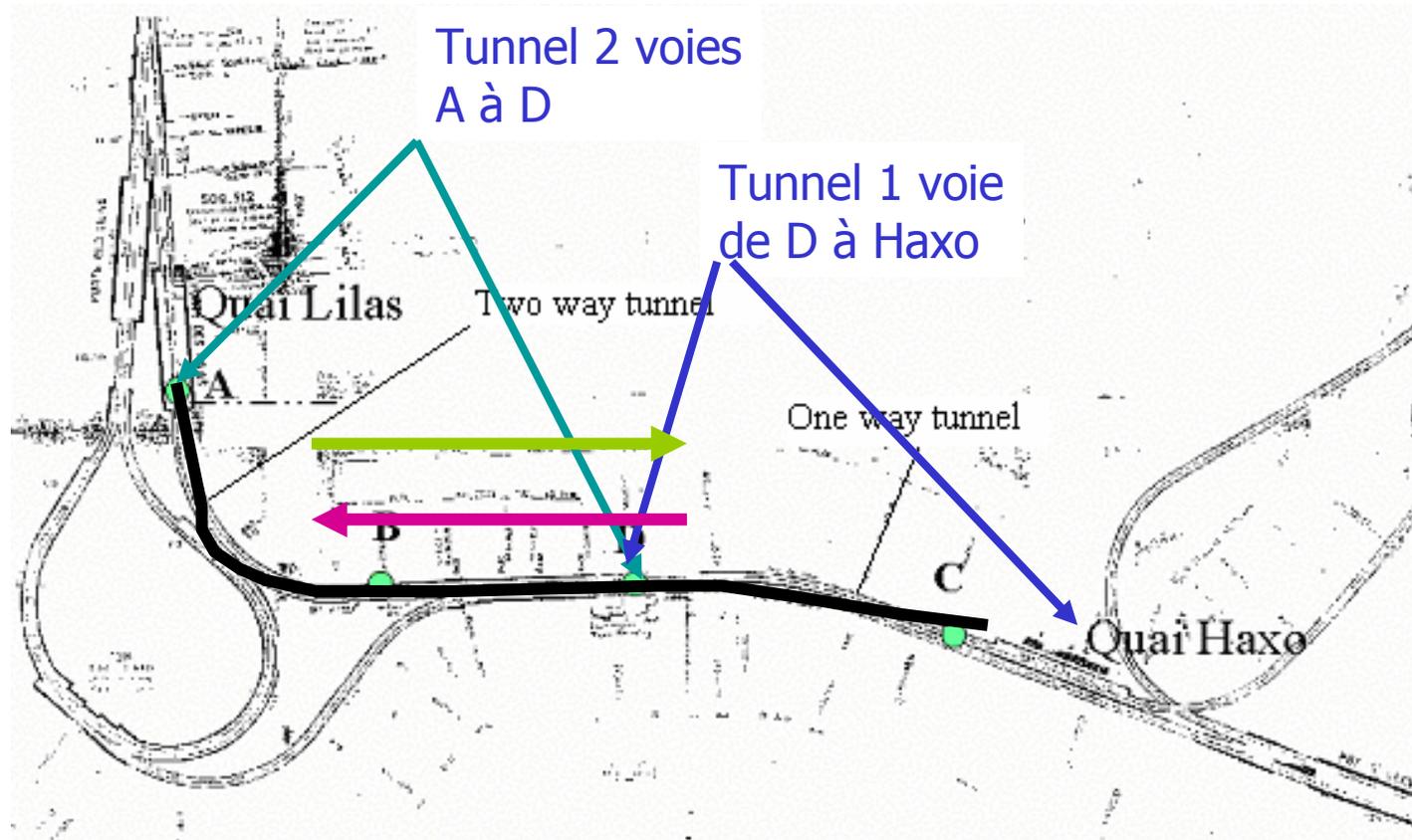
Chaque élément des réseaux Tx et Rx, excite (reçoit) des modes de poids différents ... mais suffisamment différents ?

Influence de la distance Tx – Rx ? ..Combien de modes contribuent au champ total ? A très grande distance, il ne reste plus qu'un seul mode (mode dominant) !

- Approche expérimentale (Validation en environnement réel – tunnel métro) puis simulation théorique (interprétation)

# Expérimentation

- Objectif : Tester les possibilités de MIMO pour augmenter la capacité en tunnel ferroviaire (GSM/R) 900 MHz
- Distance between Lilas and Haxo : 900 m



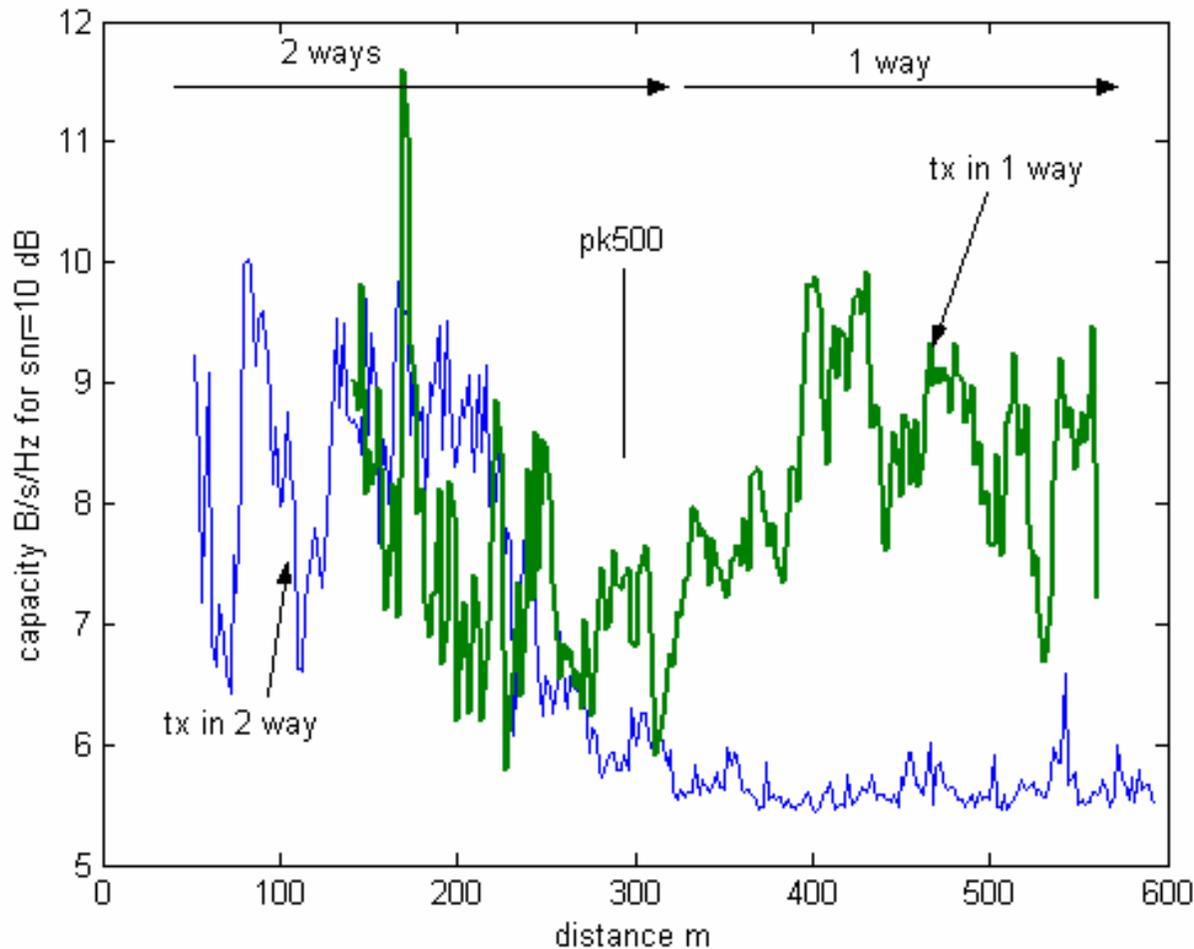
## Expérimentation, cont.

- Mesures préliminaires : Réponse impulsionnelle du canal
- Orientation optimum du réseau : axe du réseau perpendiculaire à l'axe du tunnel (justification théorique ? analyse modale)
- MIMO 4x4. Sondeur de canal, principe de corrélation, 35 MHz de bande. Pas de déformation du signal. Elements de H : maximum du pic de corrélation

# Configuration des réseaux fixes et mobiles



# Capacité du canal sur tout le tronçon (2 voies + 1 voie)



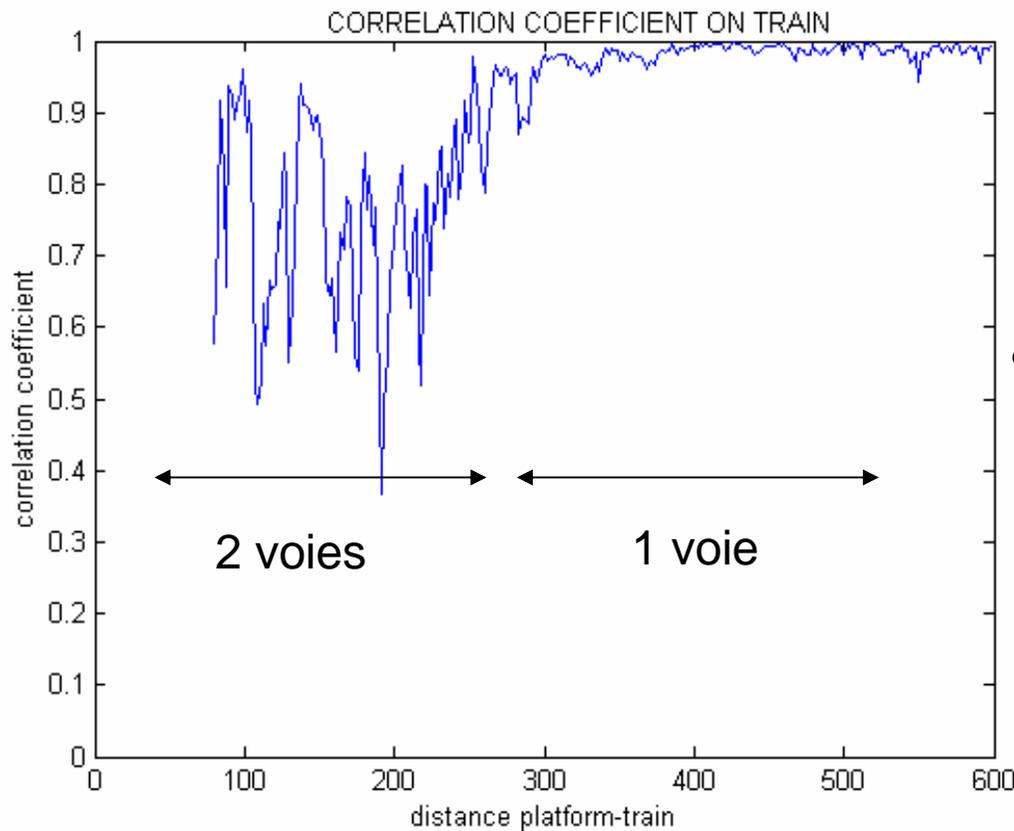
$C = 3$  bits/s/Hz  
(SISO,  
S/B: 10 dB)

$C \# 5$  bits/s/Hz  
(SIMO,  
S/B: 10 dB)

# Coefficient de corrélation moyen entre éléments sur le train

Antenne Tx dans tunnel 2 voies

Train se déplace de 2 voies vers 1 voie



- Dans tunnel 2 voies  $d < 300\text{m}$

$$\Downarrow$$
$$0.7 < \rho < 0.8$$
$$\Downarrow$$

Nombreux modes excités

- Après rétrécissement dans tunnel

1 voie

$$\Downarrow$$
$$\rho \approx 0.98$$
$$\Downarrow$$

Peu de modes se propagent ?

$\Downarrow$   
Matrice H mal conditionnée ?

## Bilan en termes de capacité ergodique

- Autres séries de mesures en tunnel 1 voie et en tunnel 2 voies.  
Bilan :

S/B = 10 dB	SISO	SIMO	MIMO
Rayleigh	3 bits/s/Hz	5 bits/s/Hz	11 bits/s/Hz
Tunnel (d < 300m 1 voie) (d < 500m 2 voies)	3 bits/s/Hz	# 5 bits/s/Hz	8.5 bits/s/Hz

Si d augmente : Diminution de C due à

Corrélation entre antennes?

Nombre de modes insuffisants (< nombre d'éléments du réseau)?

Approche analytique

# Theorie modale appliquée aux tunnels

- Bien connue pour un guide métallique
- Guide d'ondes à pertes surdimensionné ?

Typiquement  $\sigma = 10^{-2}$  S/m,  $\epsilon_r = 5$ . Pas de solution analytique exacte dans le cas général

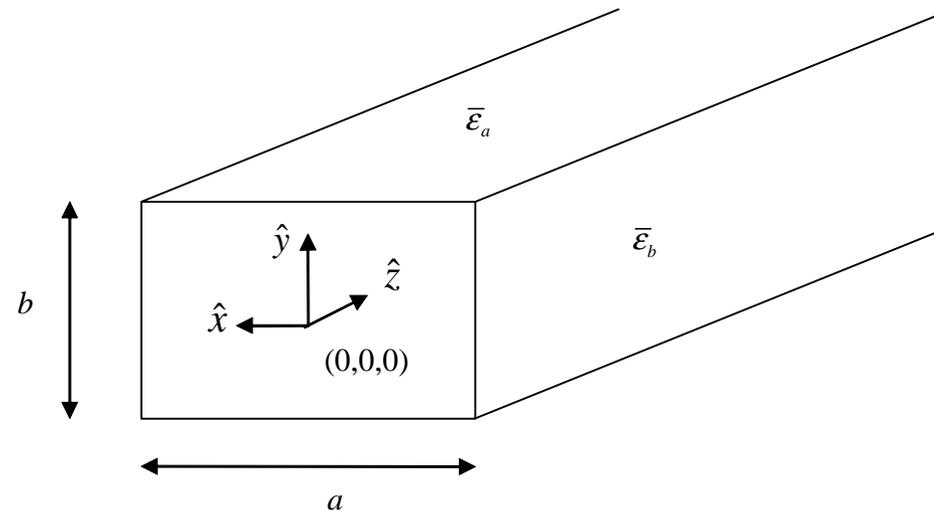
Approximations :

tunnel de forme géométrique simple : rectiligne, section rectangulaire (circulaire)

conditions aux limites sur les parois supposées infinies

Modes hybrides  $EH_{mn}$ . Base modale : carte de champ dans le plan transverse. Conditions aux limites : Equation modale (constante de propagation)

# Theorie modale en tunnel rectangulaire



$$E(x, y, z) = \sum_m \sum_n \beta_{m,n} \bar{e}_{m,n}(x, y) e^{-jk_{m,n}z}$$

}	$\beta_{m,n}$ Amplitude (complexe) du mode
	$\bar{e}_{m,n}$ base modale
	$k_{m,n}$ Constante de propagation

## Theorie modale en tunnel rectangulaire, cont.

Solutions :

$$\bar{e}_{m,n}(x, y) = \frac{1}{K} \left\{ \begin{array}{l} \left\{ \cos\left(\frac{m\pi}{a}x + \varphi_x\right) - \sin\left[\frac{j}{\sqrt{\bar{\epsilon}_a - 1}} \frac{2}{ka} \left(\frac{m\pi}{a}x\right)\right] \sin\left(\frac{m\pi}{a}x + \varphi_x\right) \right\} \\ \cdot \left\{ \sin\left(\frac{n\pi}{b}y + \varphi_y\right) + \sin\left[\frac{j\bar{\epsilon}_b}{\sqrt{\bar{\epsilon}_b - 1}} \frac{2}{kb} \left(\frac{n\pi}{b}y\right)\right] \cos\left(\frac{n\pi}{b}y + \varphi_y\right) \right\} \end{array} \right\}$$

$$k_{m,n} = \left\{ \begin{array}{l} \left[ \frac{2\pi}{\lambda} \left[ 1 - \frac{1}{2} \left(\frac{m\lambda}{2a}\right)^2 - \frac{1}{2} \left(\frac{n\lambda}{2b}\right)^2 \right] - \right. \\ \left. j \left( \frac{2}{a} \left(\frac{m\lambda}{2a}\right)^2 \operatorname{Re} \left[ \frac{1}{\sqrt{\bar{\epsilon}_a - 1}} \right] + \frac{2}{b} \left(\frac{n\lambda}{2b}\right)^2 \operatorname{Re} \left[ \frac{\bar{\epsilon}_b}{\sqrt{\bar{\epsilon}_b - 1}} \right] \right) \right] \end{array} \right\}$$

$\beta_{m,n} = \text{????} \Rightarrow$  Poids du mode dépend des conditions d'excitation  
 $\Rightarrow$  Raccord dans le plan d'excitation : approche lourde et délicate  
 $\Rightarrow$  Solution : combiner modes et rayons

## Determination du poids des modes

Poids d'un mode dans une section droite qq :  $\alpha_{m,n}(z) = \beta_{m,n} e^{-jk_{nm}z}$

On peut poser 
$$E(x, y, z) = \sum_m \sum_n \alpha_{mn}(z) \bar{e}_{m,n}(x, y)$$

Déterminé par approche “rayons”

Connu par approche modale

$$\alpha_{m,n}(z) = \int_{-a/2}^{a/2} \int_{-b/2}^{b/2} E(x, y, z) \cdot \bar{e}_{m,n}(x, y) dx dy$$

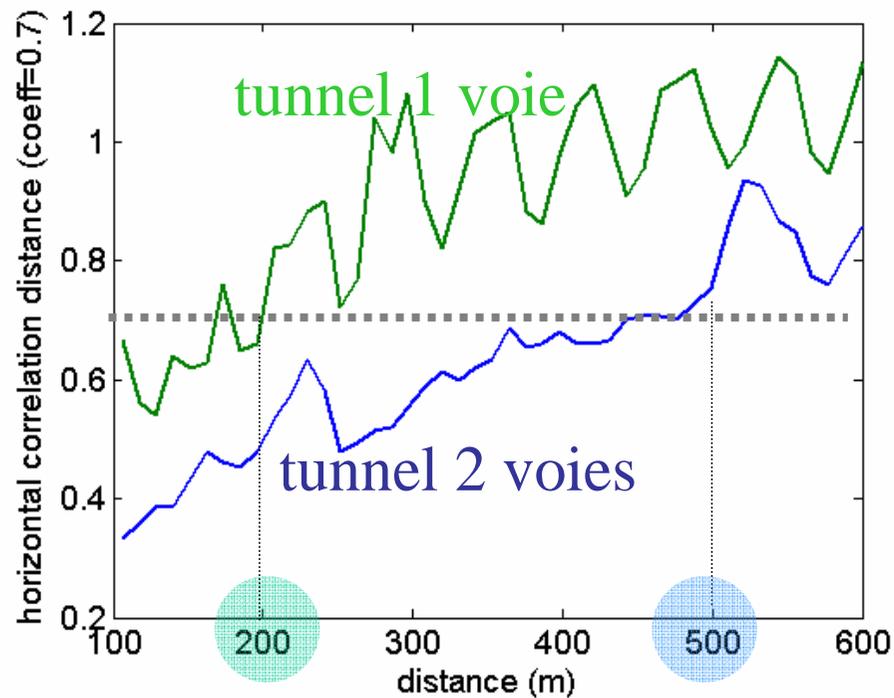
On déduit  $\alpha_{m,n}$  (si les fonctions de base modales sont orthogonales)



# Distance de corrélation en réception

TX:  $x=a/4$   $y=b/2-0.5$  m (50 cm du plafond), 900 MHz,  $\lambda=33$ cm

Distance minimum pour que  $\rho < 0.7$

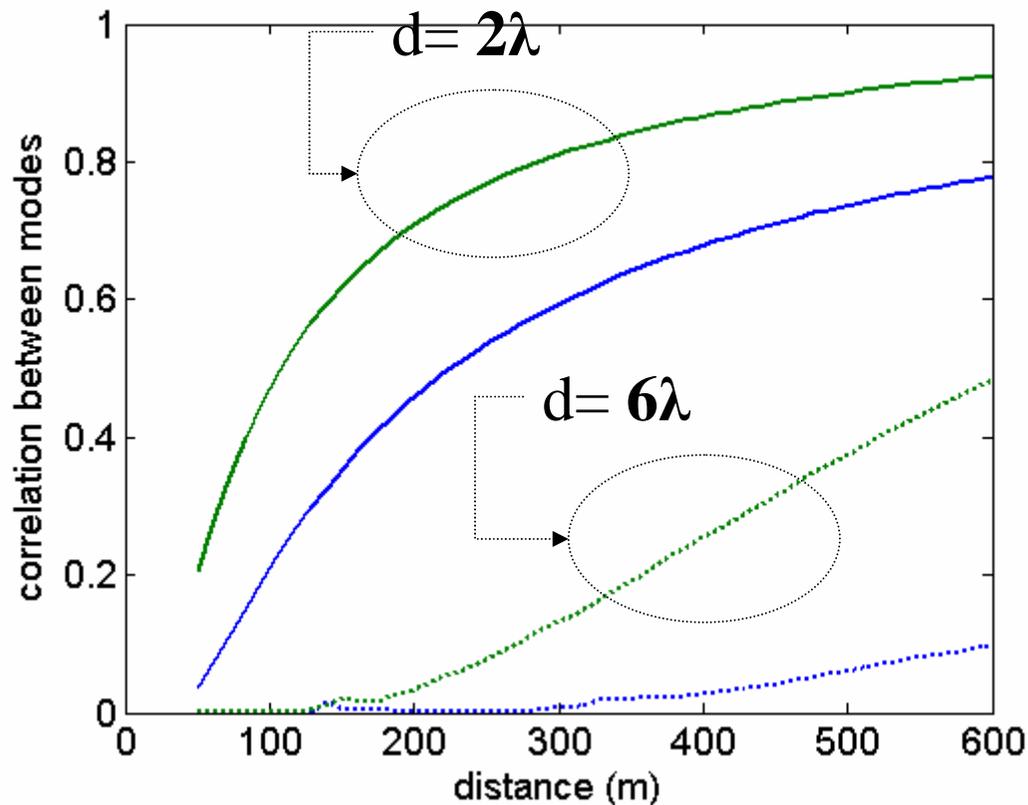


- Si on se limite à espacement de 67 cm, i.e.  $2\lambda$  :  
portée < 200 m ou 500 m pour que  $\rho < 0.7$

# Correlation entre les modes dus à 2 éléments $j_1$ et $j_2$ à une abscisse $z$ .

Distance entre éléments  $d=2\lambda$  (0.6m) ou  $d=6\lambda$  (1.8m)

$$r_{j_1, j_2}^{Modes}(z) = \frac{\mathbb{E}_{m,n} \left[ \alpha_{m,n}(z, j_1) \alpha_{m,n}^*(z, j_2) \right]}{\sqrt{\mathbb{E}_{m,n} \left[ \alpha_{m,n}(z, j_1) \alpha_{m,n}^*(z, j_1) \right]} \sqrt{\mathbb{E}_{m,n} \left[ \alpha_{m,n}(z, j_2) \alpha_{m,n}^*(z, j_2) \right]}}$$



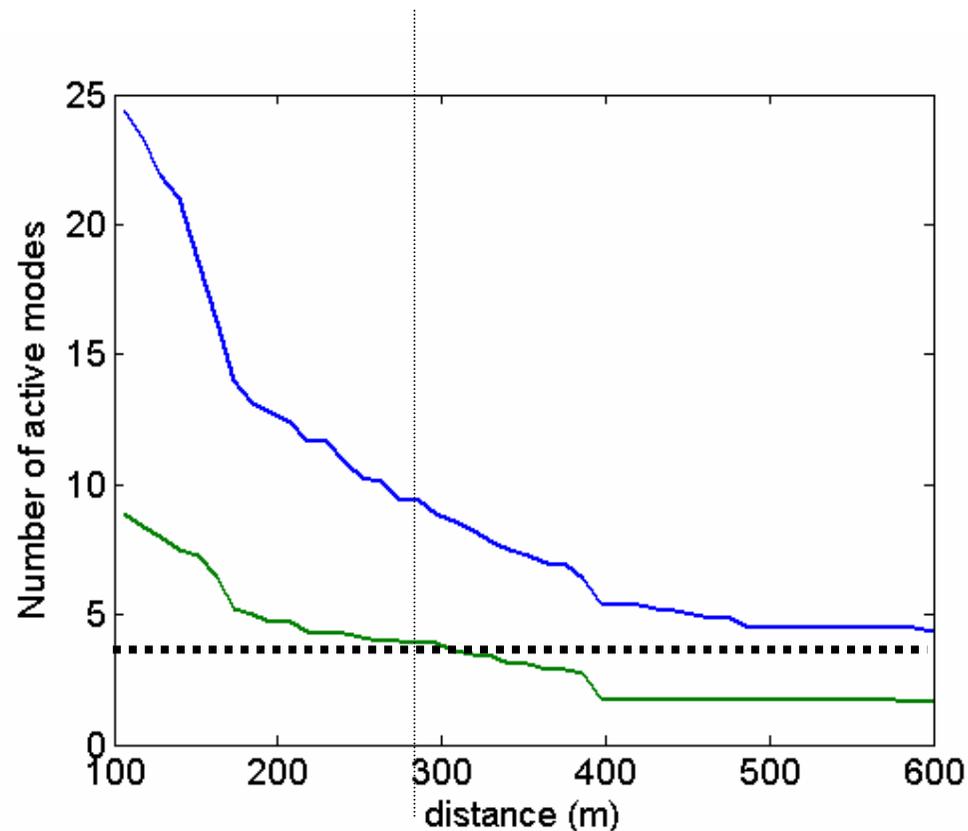
Tunnel 1 voie (4.5 x 4 m)

Tunnel 2 voies (8 x 4 m)

## Nombre de modes “actifs” contribuant au champ total à une certaine distance de Tx

Nombre de modes actifs : nombre de modes dont les poids, à une abscisse donnée, sont au moins égal à  $x\%$  du poids du mode le plus élevé.

Exemple :  $X=10\%$



Si Nb modes actifs  $< 4$  :  
dégénérescence de H

Si  $Nb > 4$ , amélioration de C si  
augmentation de la distance inter  
éléments

# Conclusions

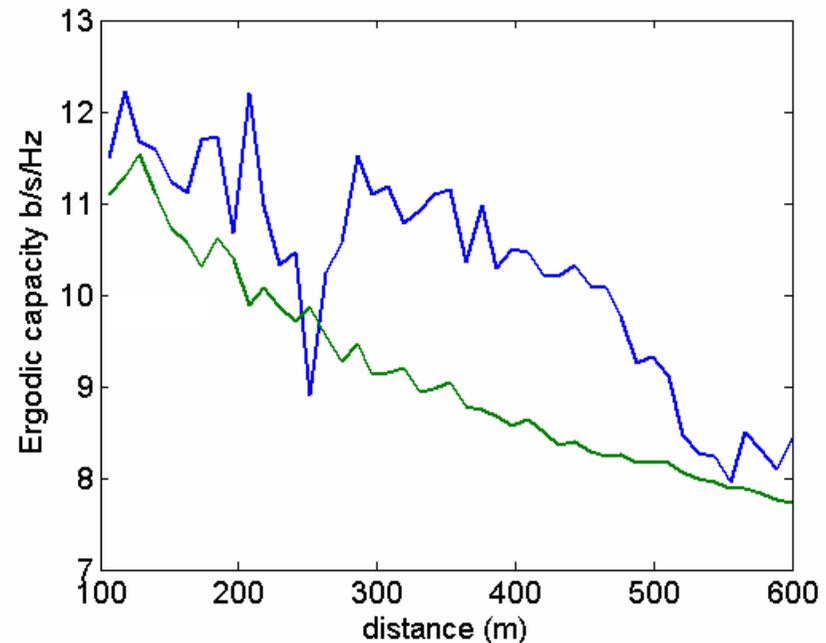
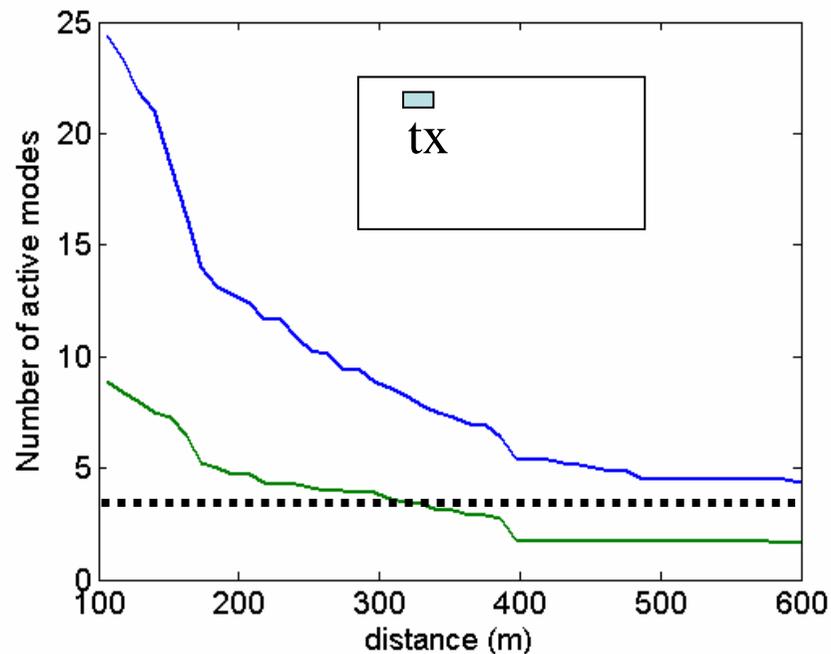
- Perspectives intéressantes pour MIMO en tunnel
- Approche modale combinée avec la théorie des rayons
  - Pondération des modes excités en fonction de la position de l'élément du réseau
  - Poids des modes à une abscisse quelconque
  - Corrélation à l'émission et à la réception
- Interprétation des résultats



# Nombre de modes "actifs" contribuant au champ total à une certaine distance de Tx

Nombre de modes actifs : nombre de modes dont les poids, à une abscisse donnée, sont au moins égal à  $x\%$  du poids du mode le plus élevé.

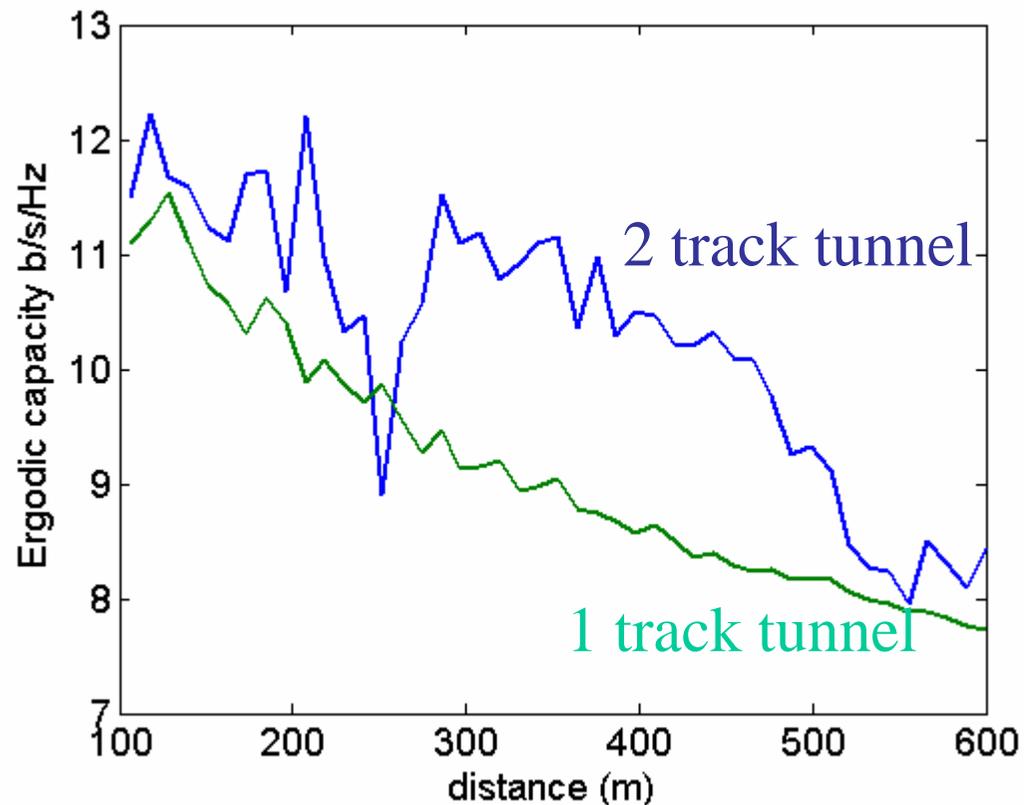
Exemple :  $X=10\%$



# Multi antenna System in Tunnel : MIMO 4X4

Ergodic capacity (100 matrices averaging at each z)  $C = \log_2 \left( \det \left( \mathbf{I}_N + \frac{SNR}{M} \mathbf{H}\mathbf{H}^H \right) \right)$

Off centered position  
of the TX linear array  
 $D_{\min} = 2\lambda$



## Orthogonalité des fonctions $e_{m,n}$

- Produit interne des fonctions  $e_{m,n}$  et  $e'_{m,n}$

$$\rho_{m,n,m',n'} = \int_{-a/2}^{a/2} \int_{-b/2}^{b/2} e_{m,n}(x,y), e_{m',n'}(x,y) dx dy$$

max order $\bar{e}_{m,n}$	3,3	5,4	8,5	10,6	15,7	20,8	25,9	30,10
max( $\rho$ )	0.0019	0.0046	0.0084	0.0133	0.0195	0.0272	0,0363	0.0471

<1%

<4%

- non-orthogonalité (conductivité finie) :  
faible pour les 60 premiers modes !