



Méthodes haute-résolution : Application au canal Radio

Alain Sibille

Télécom ParisTech





Plan

- **Contexte : les réseaux sans fil**
- **Qu'est-ce que le canal radio ?**
- **Méthodes HR : pros/cons**
- **Méthode SAGE**
- **Exemple BR : formation de faisceaux**
- **Exemple HR : CLEAN SVD**
- **Conclusion**



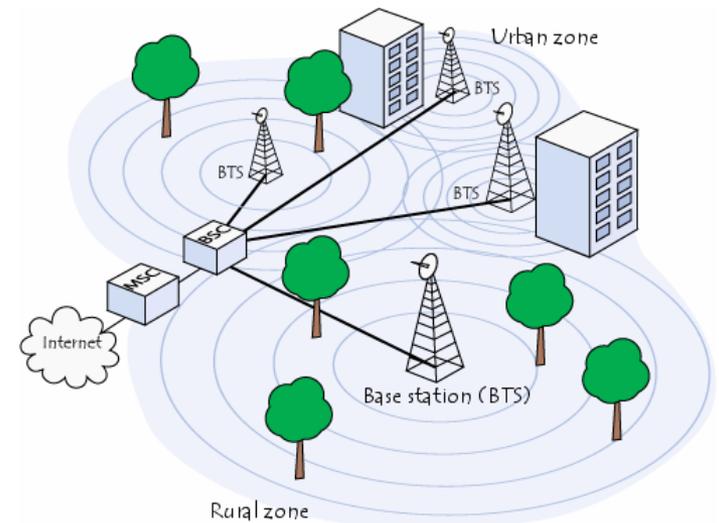
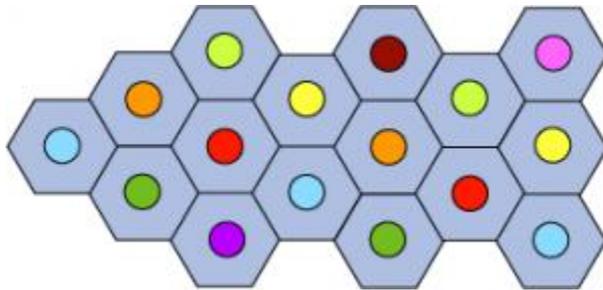
Plan

- **Contexte : les réseaux sans fil**
- Qu'est-ce que le canal radio ?
- Méthodes HR : pros/cons
- Méthode SAGE
- Exemple BR : formation de faisceaux
- Exemple HR : CLEAN SVD
- Conclusion

Contexte : les réseaux sans fil

■ Le GSM (2G)

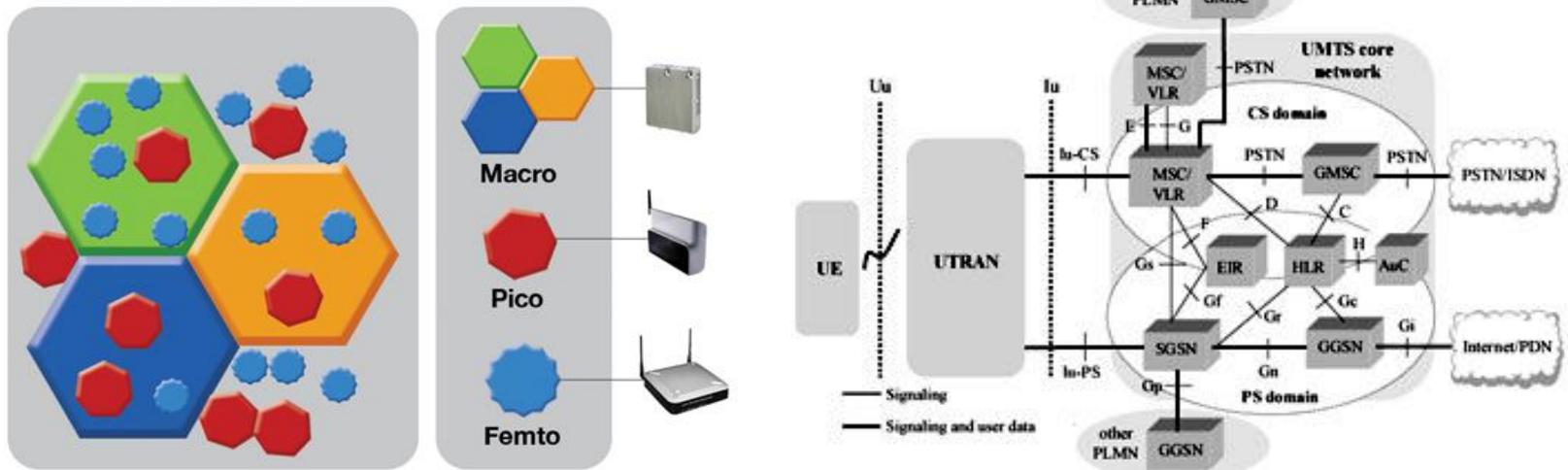
- une architecture de réseau cellulaire simple
 - Dédié à du trafic voix ou données bas débit (GPRS)
- ➔ Bande étroite (canaux de transmission de 200 kHz)



Contexte : les réseaux sans fil

■ UMTS (3G)

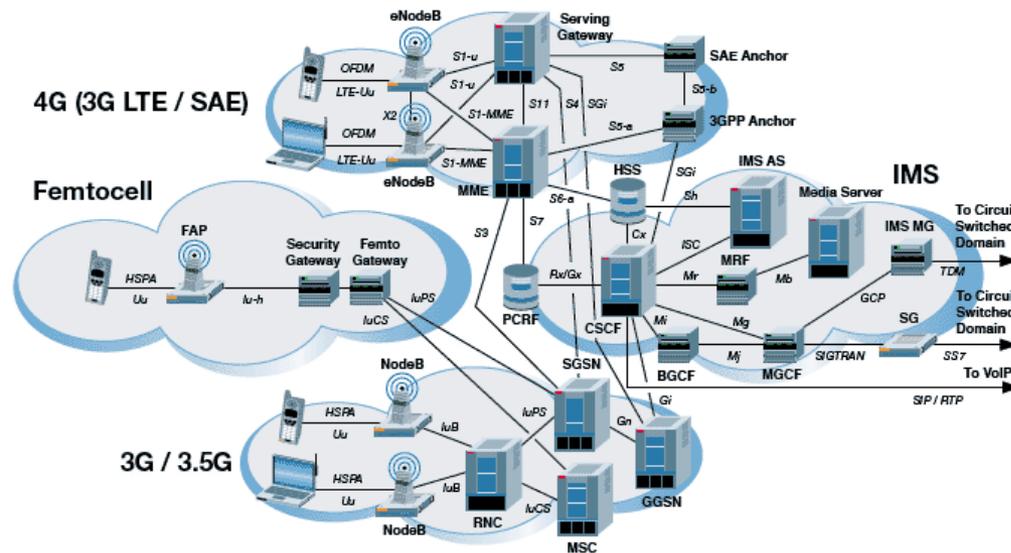
- une architecture de réseau cellulaire hiérarchique
 - Dédié à du trafic voix, données moyen-haut débit (HSPA, HSPA+...)
- ➔ Bande modérée (canaux de transmission de 384 kHz → 2 MHz)



Contexte : les réseaux sans fil

■ LTE (4G)

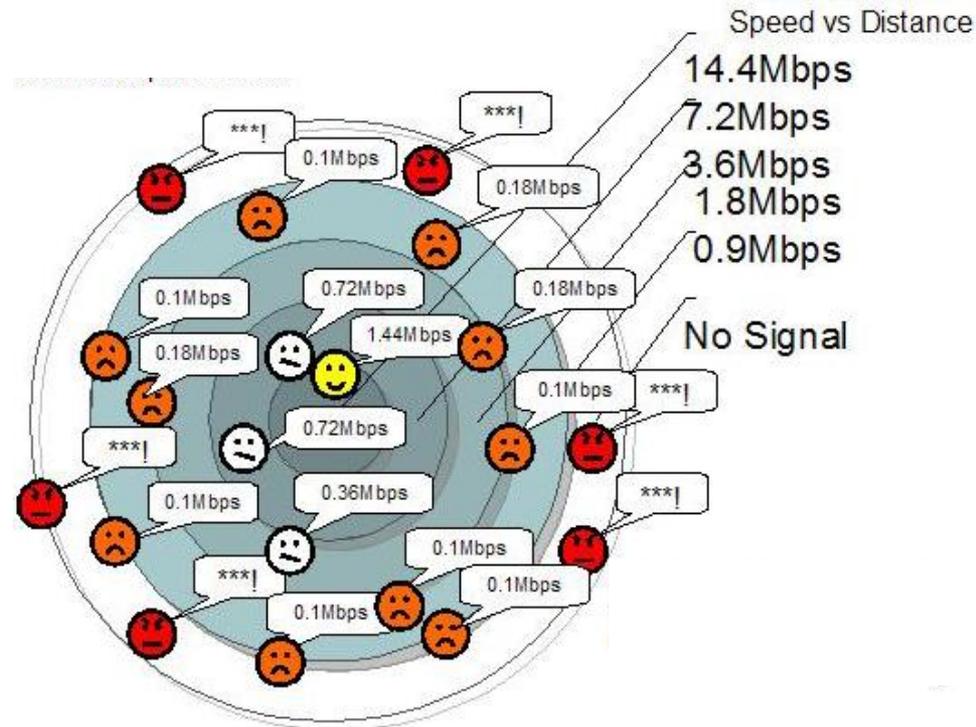
- une architecture de réseau cellulaire hiérarchique enrichie
 - Dédié à du trafic voix ou données “tous débits” (LTE Advanced...)
- ➔ Large bande (canaux de transmission de 1.4 MHz → 20 MHz)



Contexte : les réseaux sans fil

■ LTE (4G)

- Objectif : améliorer le débit sur l'ensemble de la cellule

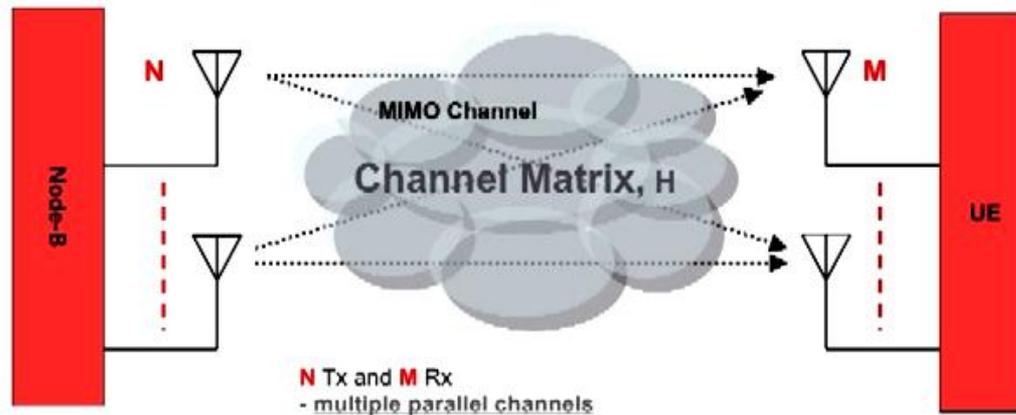


Contexte : les réseaux sans fil

■ LTE (4G)

- Objectif : améliorer le débit sur l'ensemble de la cellule

Technologie MIMO : Multiple Input / Multiple Output
(augmenter l'exploitation de la ressource spectrale)



IEEE 802.11n (WIFI)

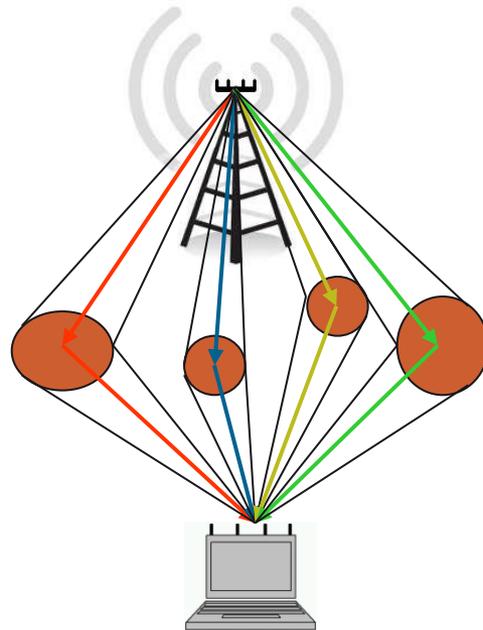


Contexte : les réseaux sans fil

■ LTE (4G)

- Objectif : améliorer le débit sur l'ensemble de la cellule

MIMO simple utilisateur

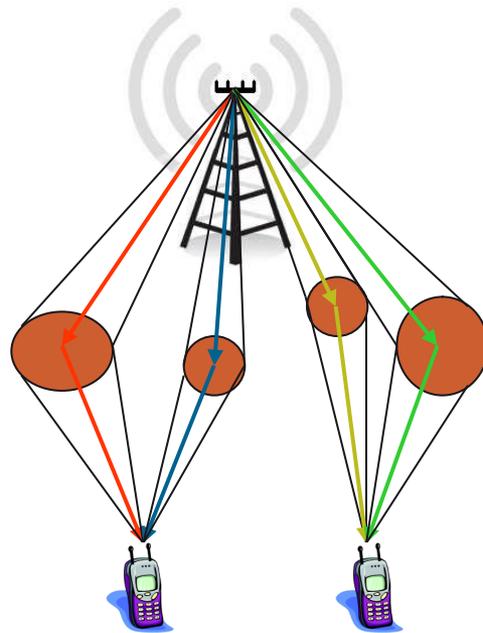


Contexte : les réseaux sans fil

■ LTE (4G)

- Objectif : améliorer le débit sur l'ensemble de la cellule

MIMO multi-utilisateurs

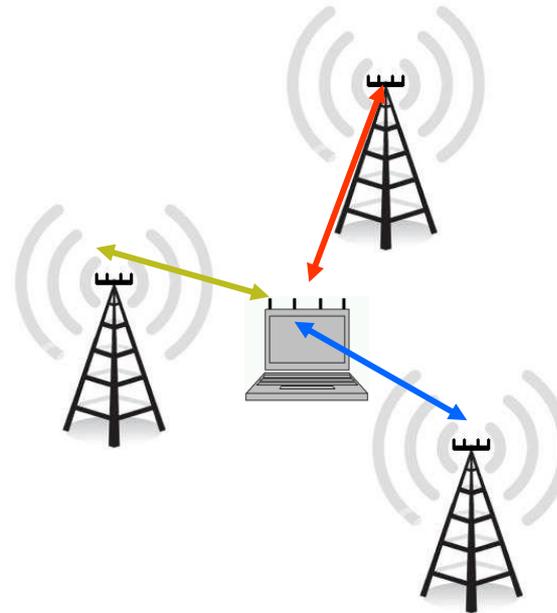


Contexte : les réseaux sans fil

■ LTE (4G)

- Objectif : améliorer le débit sur l'ensemble de la cellule

MIMO avec coopération des stations de base

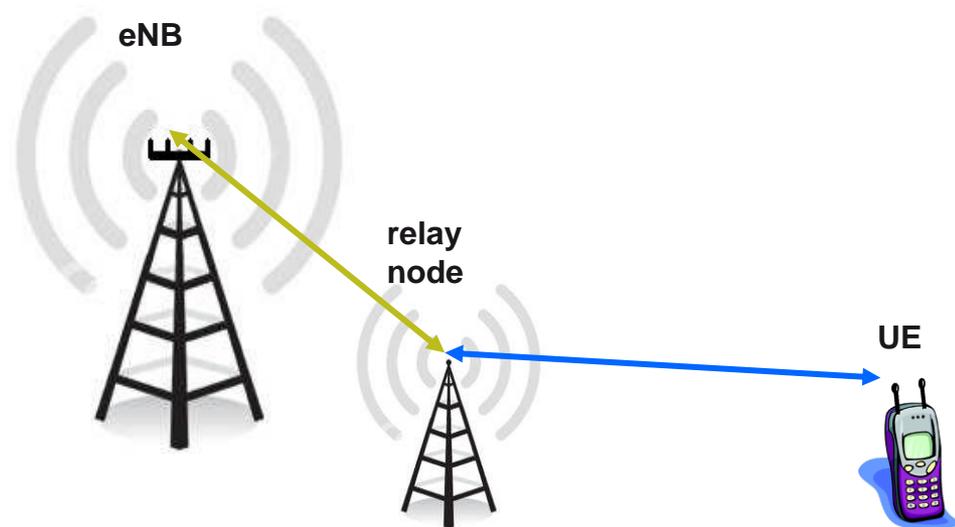


Contexte : les réseaux sans fil

■ LTE (4G)

- Objectif : améliorer le débit sur l'ensemble de la cellule

MIMO avec relais intermédiaire

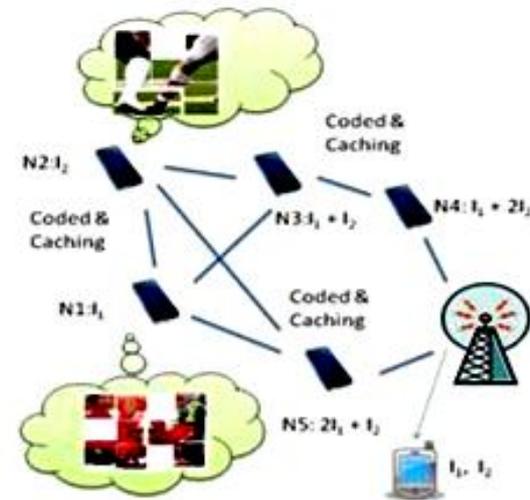
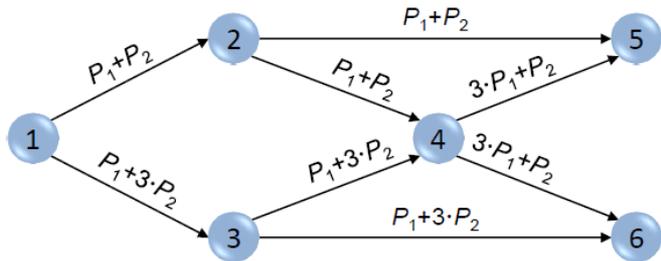


Contexte : les réseaux sans fil

■ A venir...

- Objectif : améliorer le débit sur l'ensemble de la cellule

Le codage de réseau



Contexte : les réseaux sans fil

■ So what ?

- Conséquence de ces nombreuses modalités : les mécanismes de propagation et la diversité des situations sont beaucoup plus marquées que pour l'antique GSM !
 - L'optimisation des paramètres du traitement de signal et de l'architecture du réseau dépend de façon cruciale de cet ensemble
- ➔ **Besoin de modèles fiables du canal radio multidimensionnel**, permettant l'évaluation de performances :
- Large bande
 - point à point
 - Doublement directionnel
 - point à multi-points
 - Polarisé
 - modèles déterministes / statistiques



Plan

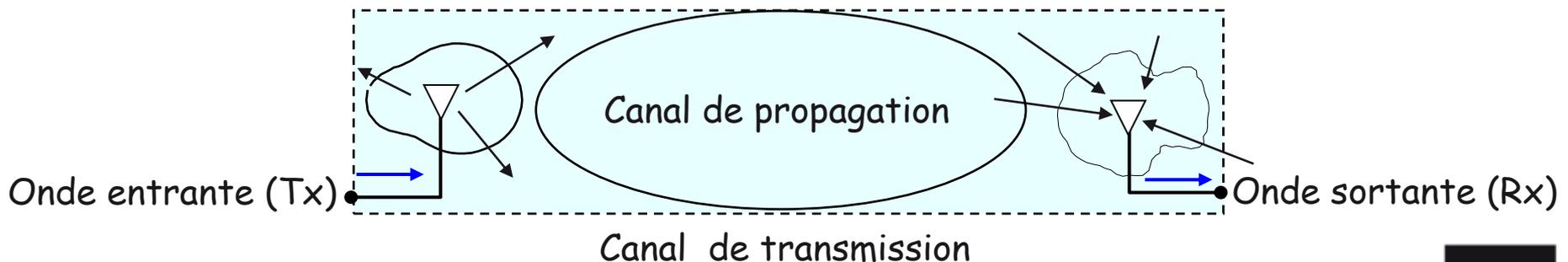
- Contexte : les réseaux sans fil
- **Qu'est-ce que le canal radio ?**
- Méthodes HR : pros/cons
- Méthode SAGE
- Exemple BR : formation de faisceaux
- Exemple HR : CLEAN SVD
- Conclusion

Qu'est-ce que le canal radio ?

■ Définitions

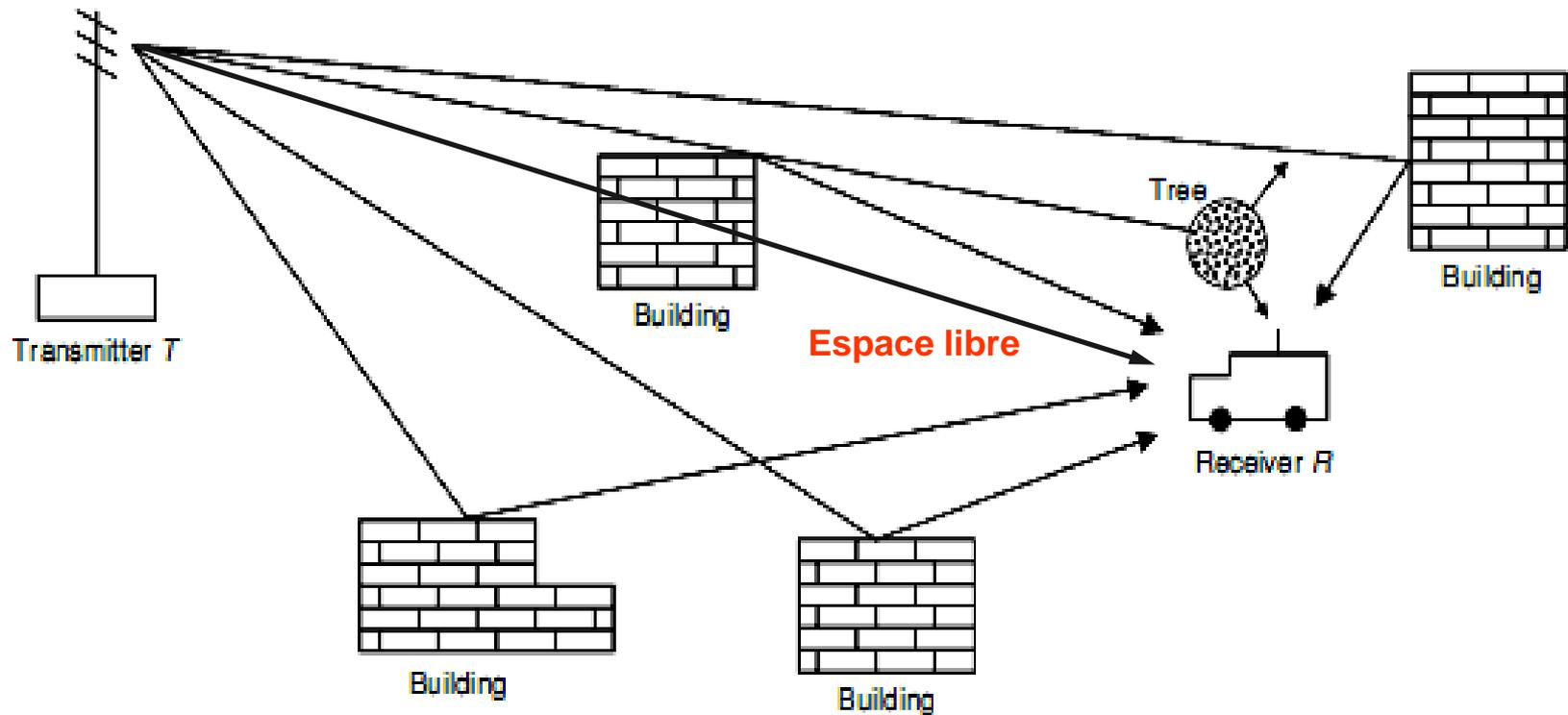
- Le canal de transmission inclut les antennes et tous les éléments physiques favorisant ou défavorisant la propagation entre les points d'accès aux antennes
- Le canal de propagation exclut les antennes et exprime l'ensemble des phénomènes de propagation entre l'émetteur et le récepteur

Nous nous concentrerons sur le canal de propagation



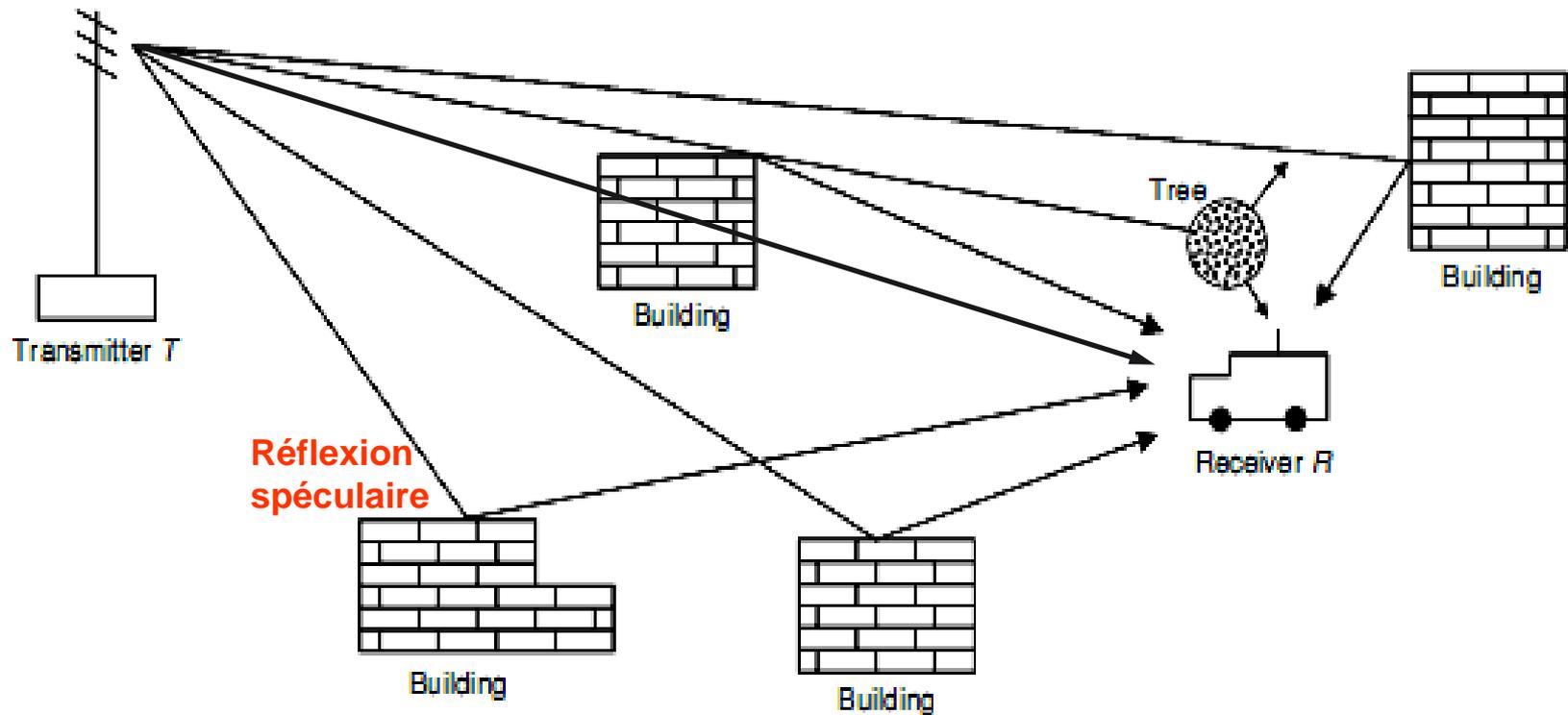
Qu'est-ce que le canal radio ?

■ Mécanismes physiques de la propagation



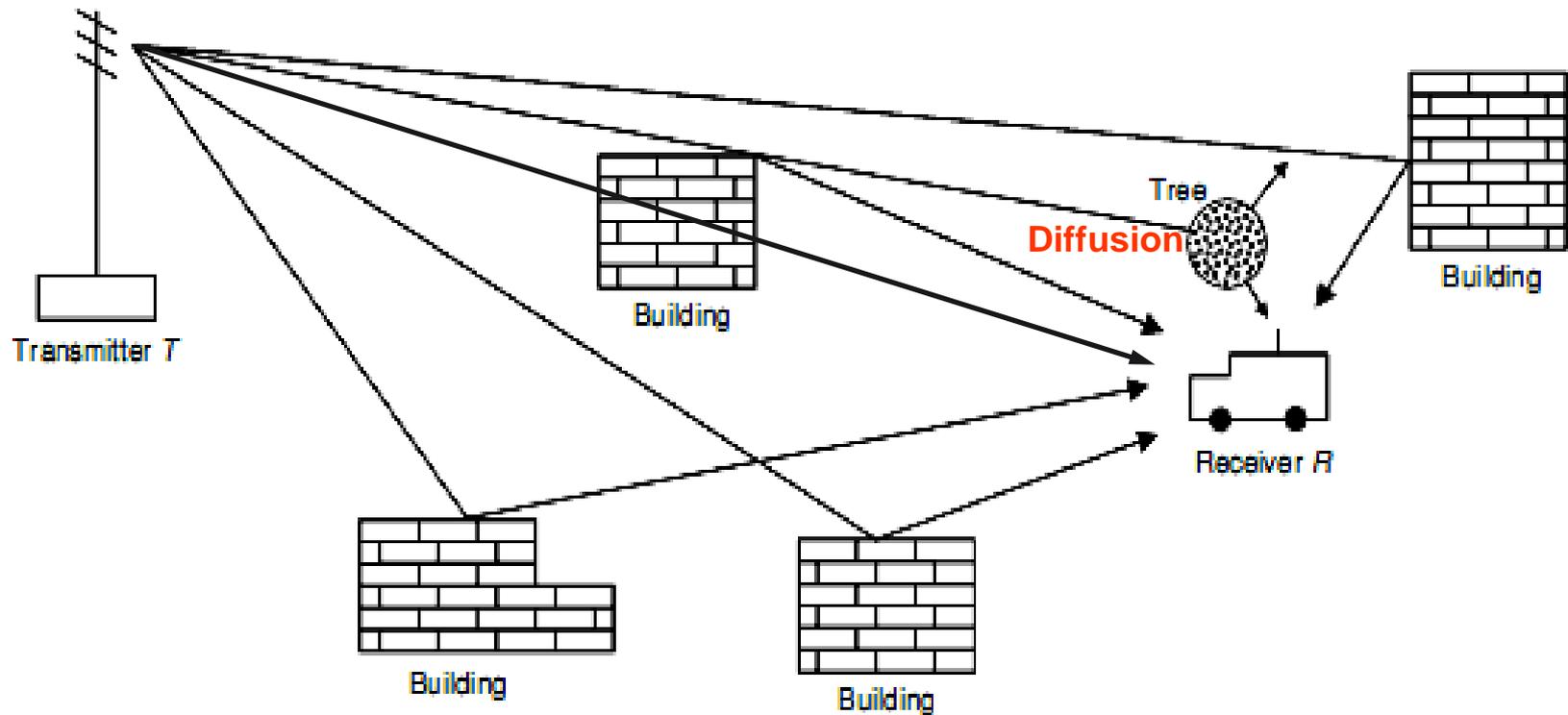
Qu'est-ce que le canal radio ?

■ Mécanismes physiques de la propagation



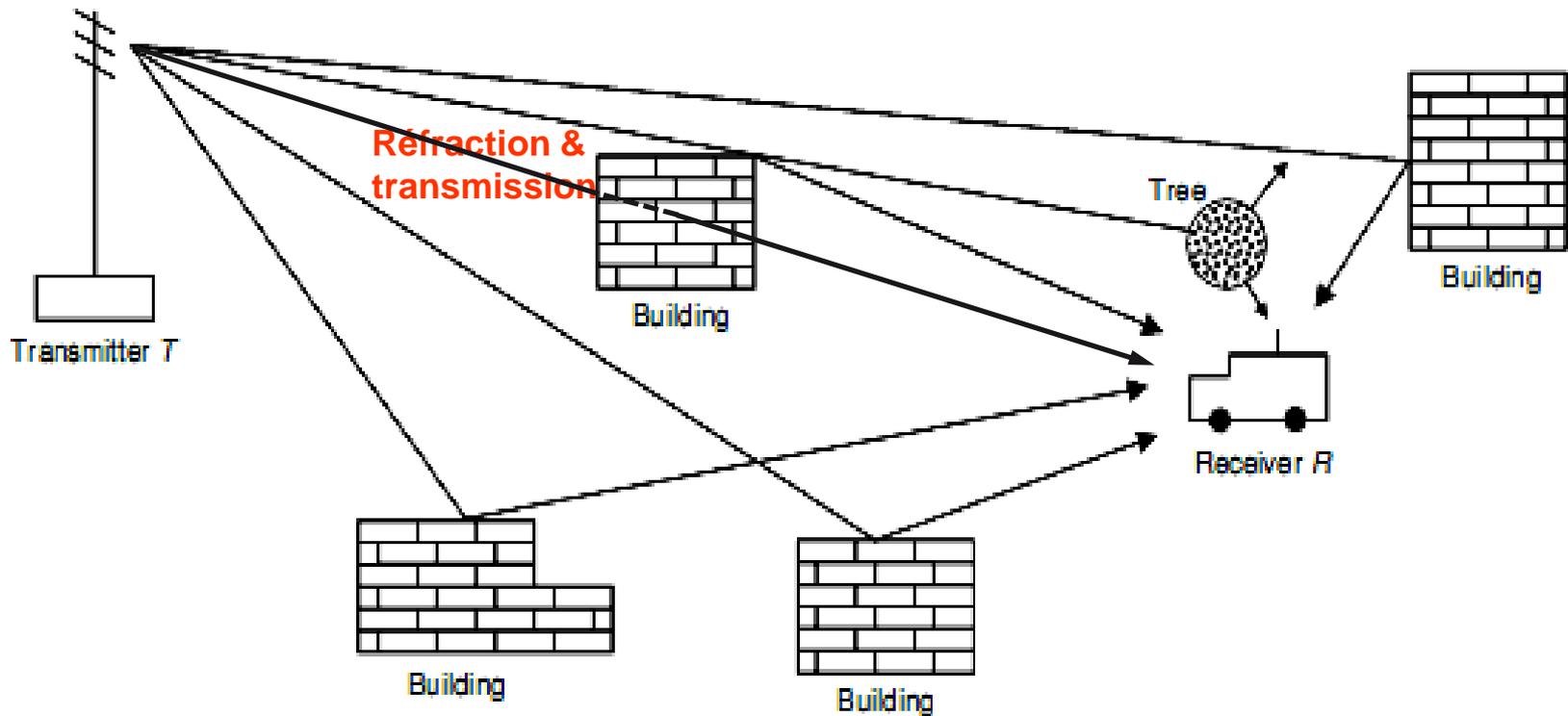
Qu'est-ce que le canal radio ?

■ Mécanismes physiques de la propagation



Qu'est-ce que le canal radio ?

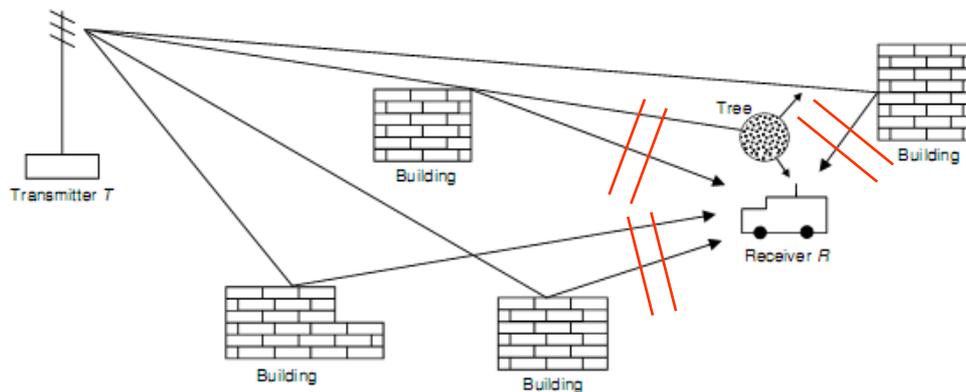
■ Mécanismes physiques de la propagation



Qu'est-ce que le canal radio ?

■ Hypothèses de travail usuelles

- Le milieu de propagation est **linéaire, passif, réciproque**
- Le canal de transmission (i.e. incluant les antennes) est un filtre linéaire, en général **dépendant du temps**
- Le récepteur reçoit une superposition d'ondes planes provenant des divers trajets suivis par celles-ci depuis l'émetteur



Qu'est-ce que le canal radio ?

■ Hypothèses de travail usuelles (canal SISO)

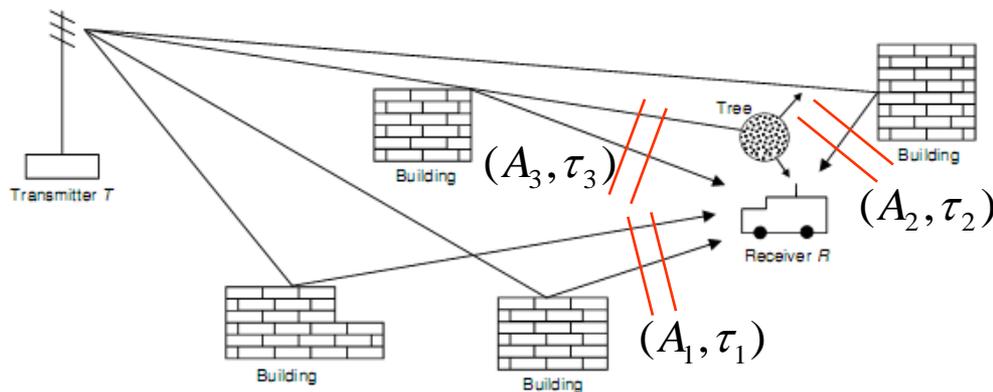
- On admet le **modèle de canal discret** :

$$h(t, \tau) = \sum_i A_i(t) \delta(\tau - \tau_i(t))$$

Temps ——— ↑ ——— Délai

$$H(t, F) = \sum_i A_i(t) \exp(-2j\pi F \tau_i(t))$$

Temps ——— ↑ ——— Fréquence



Qu'est-ce que le canal radio ?

■ Hypothèses de travail usuelles (canal SISO monopolarisé)

- On admet le **modèle de canal discret** (en bande de base) :

$$h(t, \tau) = \sum_i A_i(t) \delta(\tau - \tau_i(t)) \quad H(t, F) = \sum_i A_i(t) \exp(-2j\pi F \tau_i(t))$$

Temp_s ——— ↑ ↑ Délai Temp_s ——— ↑ ↑ Fréquence

Amplitude d'onde complexe

Matrices 2x2 dans le cas polarisé !

$h(t, \tau)$ est la réponse impulsionnelle du canal (variant dans le temps)

$H(t, F)$ est la fonction de transfert du canal (variant dans le temps)

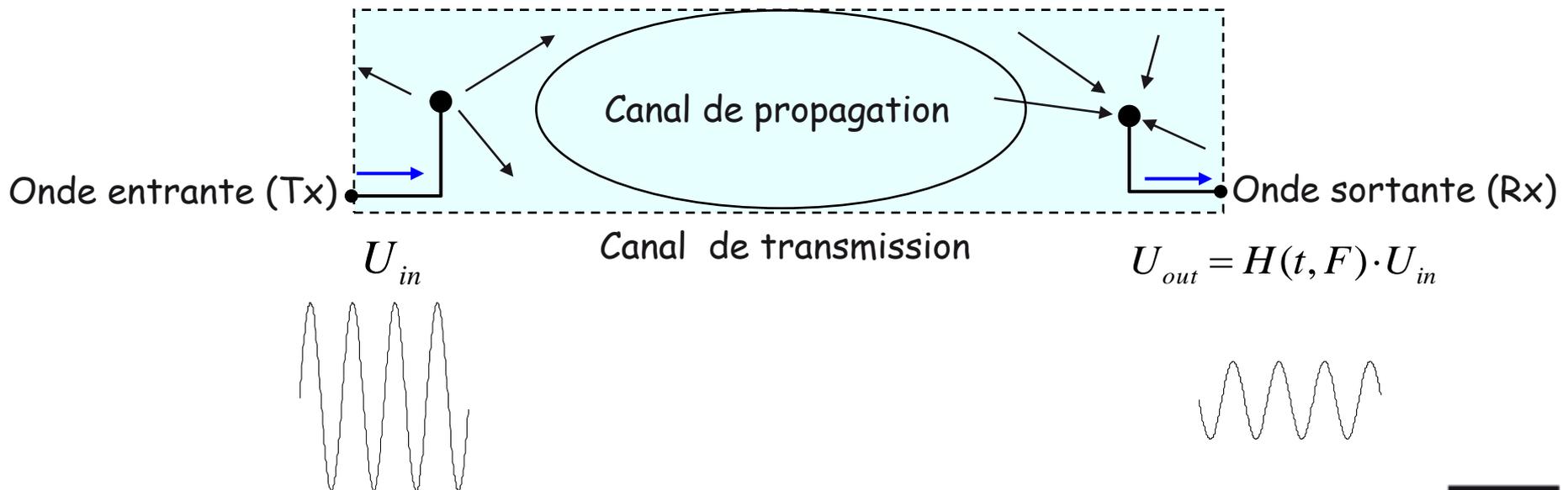
Qu'est-ce que le canal radio ?

■ Hypothèses de travail usuelles (canal SISO monopolarisé)

- On admet le **modèle de canal discret** (en bande de base) :

$$h(t, \tau) = \sum_i A_i(t) \delta(\tau - \tau_i(t))$$

$$H(t, F) = \sum_i A_i(t) \exp(-2j\pi F \tau_i(t))$$



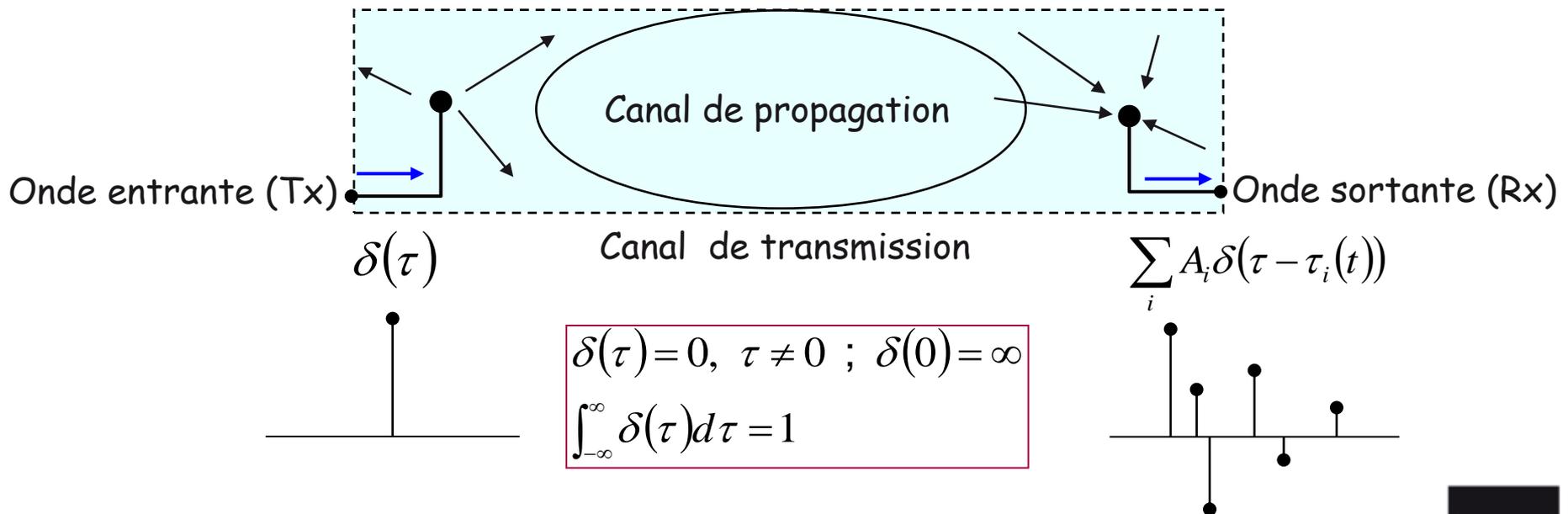
Qu'est-ce que le canal radio ?

■ Hypothèses de travail usuelles (canal SISO monopolarisé)

- On admet le **modèle de canal discret** (en bande de base) :

$$h(t, \tau) = \sum_i A_i(t) \delta(\tau - \tau_i(t))$$

$$H(t, F) = \sum_i A_i(t) \exp(-2j\pi F \tau_i(t))$$



Qu'est-ce que le canal radio ?

■ Hypothèses de travail usuelles (canal SISO monopolarisé)

- On admet le **modèle de canal discret** (en bande de base) :

$$h(t, \tau) = \sum_i A_i(t) \delta(\tau - \tau_i(t)) \quad H(t, F) = \sum_i A_i(t) \exp(-2j\pi F \tau_i(t))$$

- Difficultés :
 - Modèle possédant une largeur de bande infinie (peu réaliste)
 - Quel est le nombre de termes de la somme ?
 - Comment obtenir les amplitudes, les délais pour chaque trajet ?

Qu'est-ce que le canal radio ?

■ Hypothèses de travail usuelles (canal SISO monopolarisé)

- On admet le **modèle de canal discret** (en bande de base) :

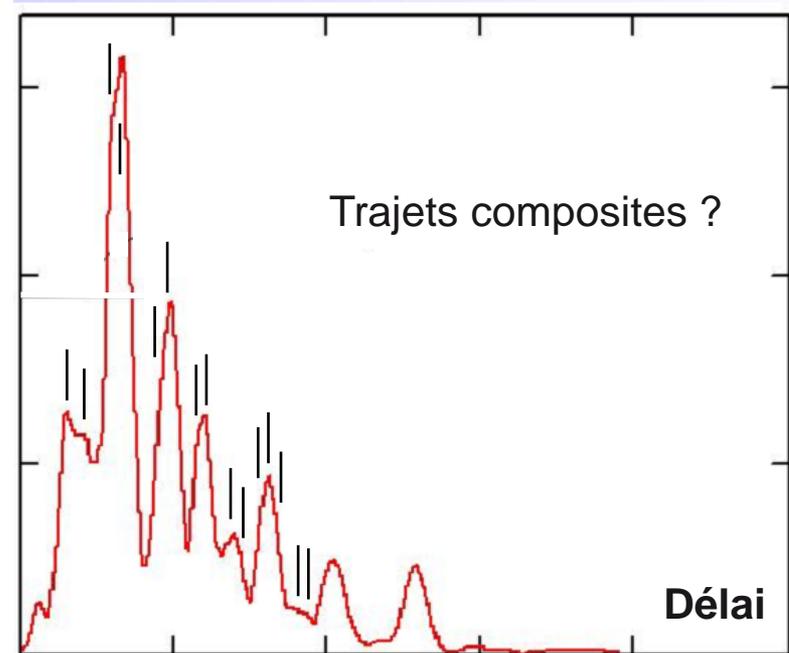
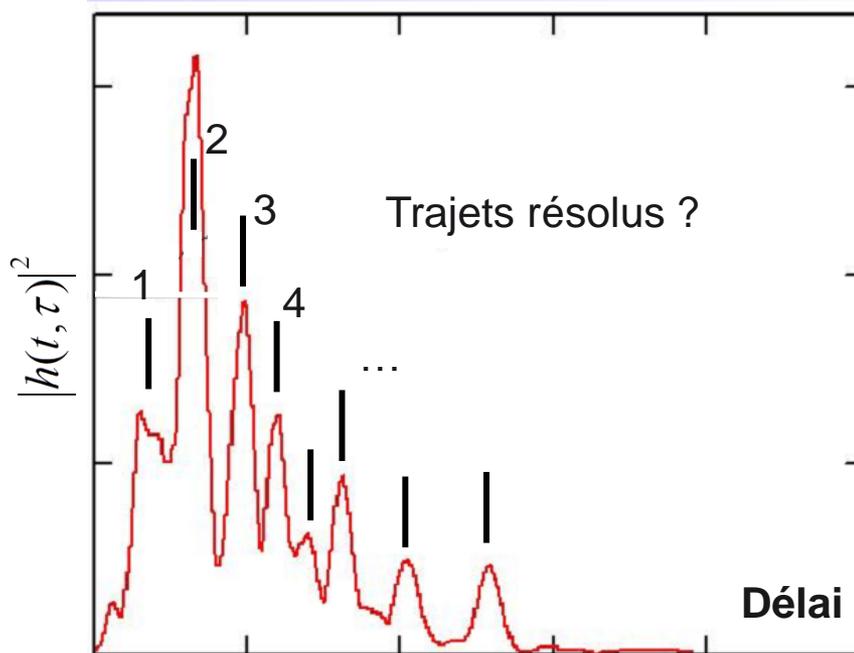
$$h(t, \tau) = \sum_i A_i(t) \delta(\tau - \tau_i(t)) \quad H(t, F) = \sum_i A_i(t) \exp(-2j\pi F \tau_i(t))$$

- Solutions :
 - Analyse de Fourier (agnostique au modèle) : résolution limitée par Fourier
 - Analyse "haute résolution" : modèle paramétrique → estimation paramétrique

Qu'est-ce que le canal radio ?

■ Analyse de Fourier

- La mesure est effectuée sur une largeur de bande $BW = \Delta\omega/2\pi$
- Résolution temporelle $\Delta\tau \sim 1/\Delta\omega$, sensibilité au fenêtrage...



Qu'est-ce que le canal radio ?

■ Quid du canal MIMO ?

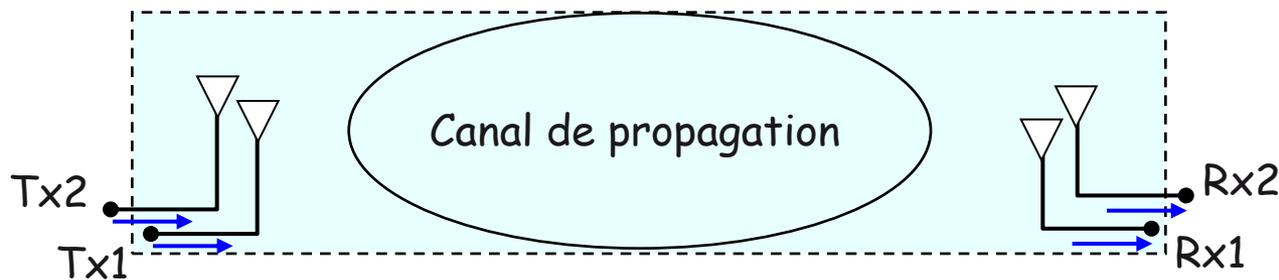
- On admet le **modèle de canal discret** (en bande de base) :

$$H(t, F, \vec{r}_T, \vec{r}_R) = \sum_i A_i(t, \vec{r}_T, \vec{r}_R) \exp(-2j\pi F \tau_i(t, \vec{r}_T, \vec{r}_R))$$

Position
émetteur

Position
récepteur

- On se limite ici principalement au cas de réseaux d'antennes "virtuels"



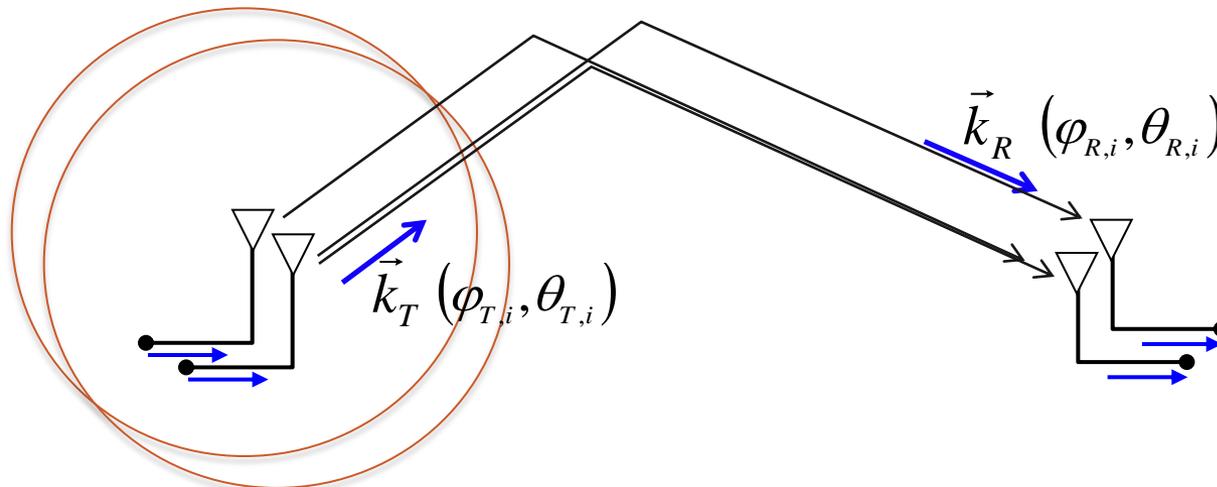
Qu'est-ce que le canal radio ?

■ Quid du canal MIMO ?

- On exploite l'invariance translationnelle à l'émetteur et au récepteur :
hypothèse onde sphérique à l'émission, onde plane à la réception

$$2\pi F \tau_i(t, \vec{r}_T, \vec{r}_R) = 2\pi F \tau_i(t, \vec{0}, \vec{0}) + \vec{k}_{R,i} \cdot \vec{r}_R - \vec{k}_{T,i} \cdot \vec{r}_T \text{ (stationnarité spatiale)}$$

→ Canal **doublement directionnel** $\{\tau_i, A_i, \varphi_{R,i}, \theta_{R,i}, \varphi_{T,i}, \theta_{T,i}\}_{i=1, \dots, N}$





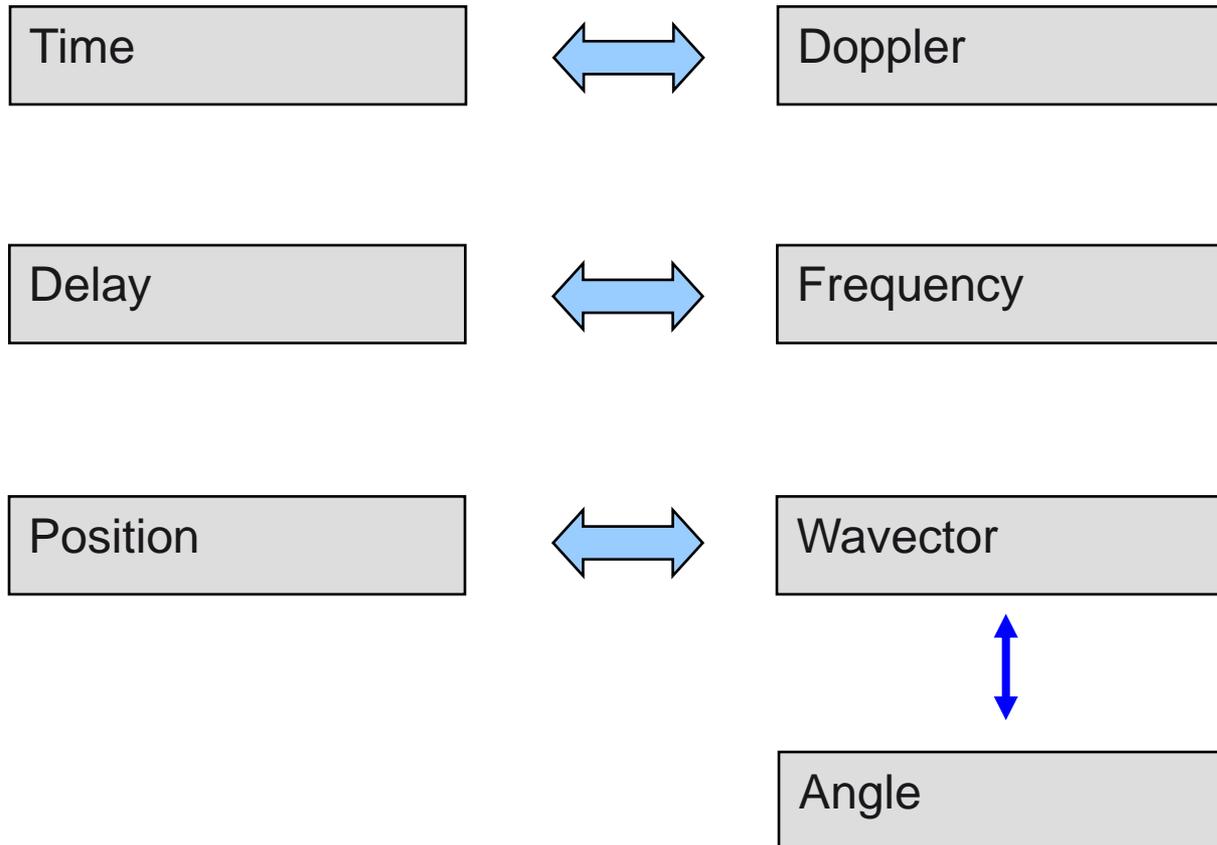
Qu'est-ce que le canal radio ?

■ Résumé

- On mesure la fonction de transfert du canal (ou la réponse impulsionnelle) sur une certaine largeur de bande
 - Information sur le nombre, l'amplitude des ondes (trajets)
- On effectue cela pour plusieurs positions d'antennes à l'émission et à la réception
 - Information sur les vecteurs d'ondes
- On peut reconstruire la matrice de canal pour un système multi-antennes

Qu'est-ce que le canal radio ?

■ Relations de Fourier



Qu'est-ce que le canal radio ?

■ Hypothèses / limitations

- Les phénomènes physiques de la propagation ne sont qu'approximativement décrits par le modèle de canal discret
 - Les **amplitudes peuvent dépendre de la fréquence** (dispersion)
 - Rester dans la bande de fréquence mesurée, ou à proximité
- Les mesures sont souvent effectuées avec un réseau d'antennes plutôt qu'une antenne qu'on déplace
 - **l'invariance de translation n'est pas stricte** (calibration du réseau)
- Si on se limite à une analyse de Fourier, la résolution temporelle/angulaire est souvent assez mauvaise (ex : 20 MHz → 50 ns → 15 m)



Plan

- Contexte : les réseaux sans fil
- Qu'est-ce que le canal radio ?
- **Méthodes HR : pros/cons**
- Méthode SAGE
- Exemple BR : formation de faisceaux
- Exemple HR : CLEAN SVD
- Conclusion

■ Pros

- Précision du modèle de canal : directions d'arrivée/départ, temps de propagation
- Mise en évidence de la structure fine des « clusters »

■ Cons

- Comment définir l'ordre du modèle ?
- Fiabilité des résultats, foi à accorder aux informations « fines »
- Complexité, temps de calcul...

Méthodes HR : pros/cons

■ Ce qu'il faut déterminer

$$\Theta_{opt} = \{\Theta_i\}_{i=1,\dots,N} = \{\tau_i, A_i, \varphi_{R,i}, \theta_{R,i}, \varphi_{T,i}, \theta_{T,i}\}_{i=1,\dots,N}$$

→ Optimisation dans un espace à 6 dimensions pour chaque trajet !

→ Les diverses méthodes HR visent à simplifier l'optimisation

- ESPRIT

- MUSIC

} Méthodes à base de "sous-espaces"

- SAGE : estimation selon le « maximum de vraisemblance »

- ...

Méthodes HR : pros/cons

■ Ce qu'il faut déterminer

$$\Theta_{opt} = \{\Theta_i\}_{i=1,\dots,N} = \{\tau_i, A_i, \varphi_{R,i}, \theta_{R,i}, \varphi_{T,i}, \theta_{T,i}\}_{i=1,\dots,N}$$

- 6N paramètres. **Mais comment déterminer N ?**

→ Critère d'Akaike : minimiser $2(6N) - 2\ln(\Lambda_{opt})$

(éviter le surapprentissage)

k = nombre de paramètres du modèle

$\Lambda_{opt} = \text{Prob}(\Theta_{opt} | \mathbf{y})$ = vraisemblance du paramétrage optimal

RQ : on peut être BR sur certains paramètres et HR sur d'autres

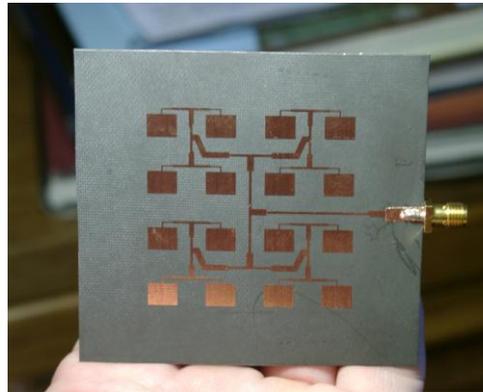
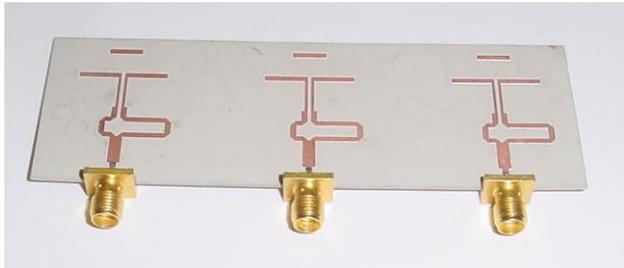
Méthodes HR : pros/cons

■ Ce qu'il faut déterminer

$$\Theta_{opt} = \{\Theta_i\}_{i=1,\dots,N} = \{\tau_i, A_i, \varphi_{R,i}, \theta_{R,i}, \varphi_{T,i}, \theta_{T,i}\}_{i=1,\dots,N}$$

■ Problème : plus on est précis, plus on risque de se tromper !

- Exemple : non respect de l'invariance translationnelle ou circulaire Tx/Rx du réseau "virtuel"



Méthodes HR : pros/cons

■ Ce qu'il faut déterminer

$$\Theta_{opt} = \{\Theta_i\}_{i=1,\dots,N} = \{\tau_i, A_i, \varphi_{R,i}, \theta_{R,i}, \varphi_{T,i}, \theta_{T,i}\}_{i=1,\dots,N}$$

■ Problème : plus on est précis, plus on risque de se tromper !

- Exemple : non respect de l'invariance translationnelle Tx/Rx du réseau "virtuel"
 - Effets de bord → éléments rayonnants non équivalents
 - Couplage entre éléments
- Nécessité de calibration des antennes réseau



Plan

- Contexte : les réseaux sans fil
- Qu'est-ce que le canal radio ?
- Méthodes HR : pros/cons
- **Méthode SAGE**
- Exemple BR : formation de faisceaux
- Exemple HR : CLEAN SVD
- Conclusion

■ **Hypothèse modèle** : $\mathbf{h} = \sum_{i=1, \dots, N} \mathbf{h}_i(\Theta_i) + \mathbf{n} = \mathbf{h}_s(\Theta) + \mathbf{n}$

Vecteur réponse trajet i vecteur bruit (Gaussien)

- L'ensemble des réponses mesurées forme l'observation \mathbf{y}

- Vraisemblance $\Lambda(\mathbf{y}; \Theta) = \text{Prob}(\Theta | \mathbf{y})$

→ Recherche du maximum de la log-vraisemblance :

$$\hat{\Theta}_{MV} = \text{ArgMax}_{\Theta} \{ \log [\Lambda(\mathbf{y}; \Theta)] \}$$

Cela paraît très difficile !

Méthode SAGE

■ **Hypothèse modèle** : $\mathbf{h} = \sum_{i=1, \dots, N} \mathbf{h}_i(\Theta_i) + \mathbf{n} = \mathbf{h}_s(\Theta) + \mathbf{n}$

Vecteur réponse trajet i vecteur bruit (Gaussien)

- L'ensemble des réponses mesurées forme l'observation \mathbf{y}
- Vraisemblance $\Lambda(\mathbf{y}; \Theta) = \text{Prob}(\Theta | \mathbf{y})$

→ Recherche du maximum de la log-vraisemblance :

$$\hat{\Theta}_{MV} = \text{ArgMax}_{\Theta} \{ \log [\Lambda(\mathbf{y}; \Theta)] \}$$

Hypothèse Gaussienne : $\Lambda(\mathbf{y}; \Theta) \sim \exp \left\{ - [\mathbf{y} - \mathbf{h}_s(\Theta)]^H \mathbf{R}^{-1} [\mathbf{y} - \mathbf{h}_s(\Theta)] \right\}$

$\mathbf{R} = E(\tilde{\mathbf{h}}\tilde{\mathbf{h}}^H)$: matrice de covariance de l'observation (canal mesuré)

Méthode SAGE

■ Solution : méthode itérative, paramètre par paramètre (SAGE = space-alternating generalized expectation-maximization)

- Initialisation Θ^0 (par exemple : beamforming)
- Maximisation de la log-vraisemblance, un paramètre après l'autre

→ Θ^1 et on réitère si nécessaire (croissance LV garantie)

- Exemple dans un cas simplifié : $\Theta_i = \{\tau_i, A_i, \varphi_i\}_{i=1, \dots, N}$

$$\tau_i^1 = \text{ArgMax}_{\tau} \left\{ \log[Z(\mathbf{y}; \tau_i^0, \varphi_i^0)] \right\}$$

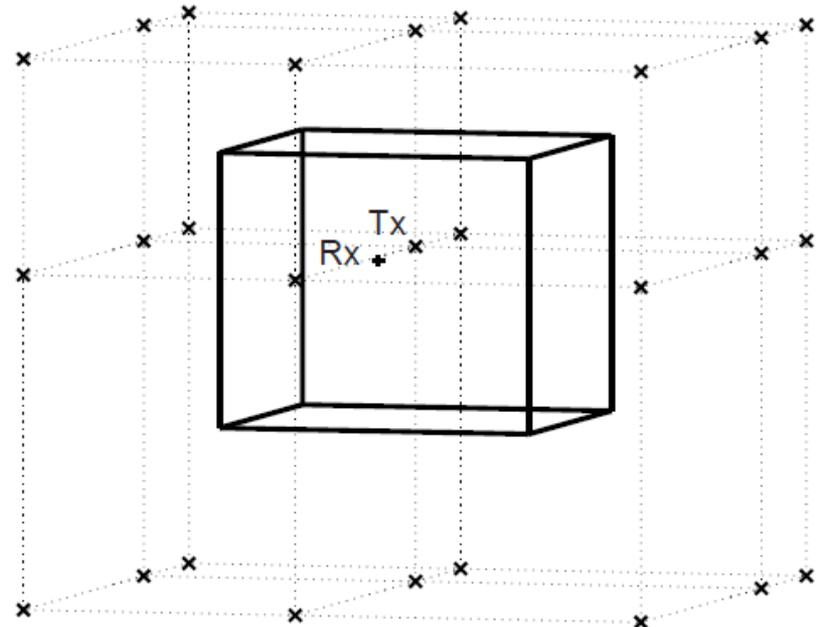
$$\varphi_i^1 = \text{ArgMax}_{\varphi} \left\{ \log[Z(\mathbf{y}; \tau_i^1, \varphi_i^0)] \right\}$$

- Finalement A_i s'en déduit directement par une expression explicite



Méthode SAGE

■ Comparaison expérience+SAGE / simulation

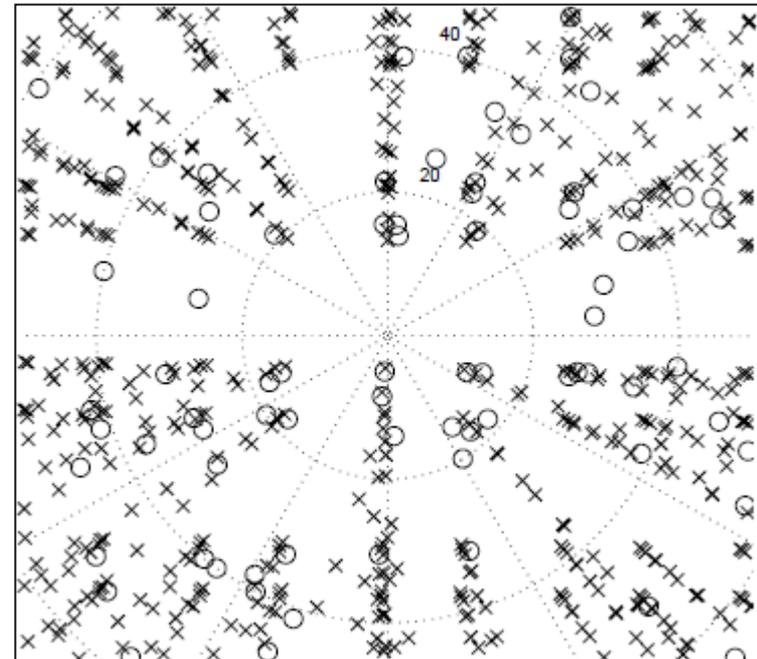
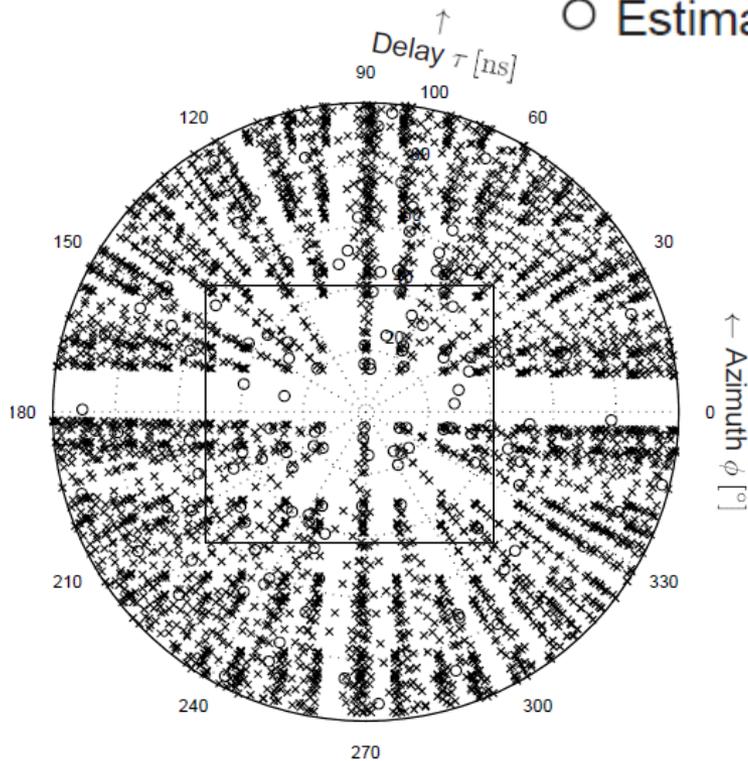


Ralf Heddergott et al., 3RD European Personal Mobile Communications Conference , PARIS, FRANCE, March 1999

Méthode SAGE

■ Comparaison expérience+SAGE / simulation

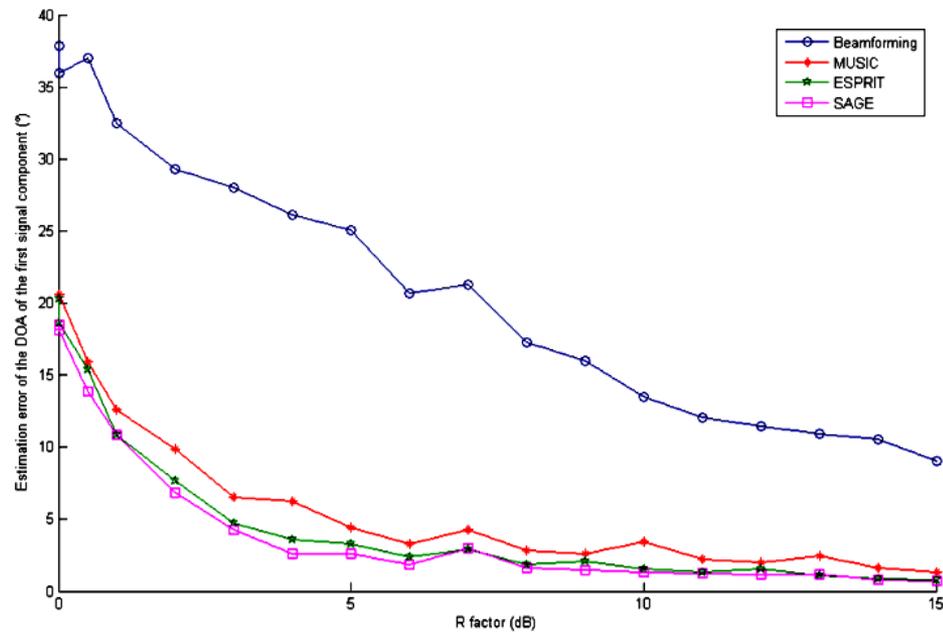
- × Virtual imaging method
- Estimation (SAGE)



Ralf Heddergott et al., 3RD European Personal Mobile Communications Conference , PARIS, FRANCE, March 1999

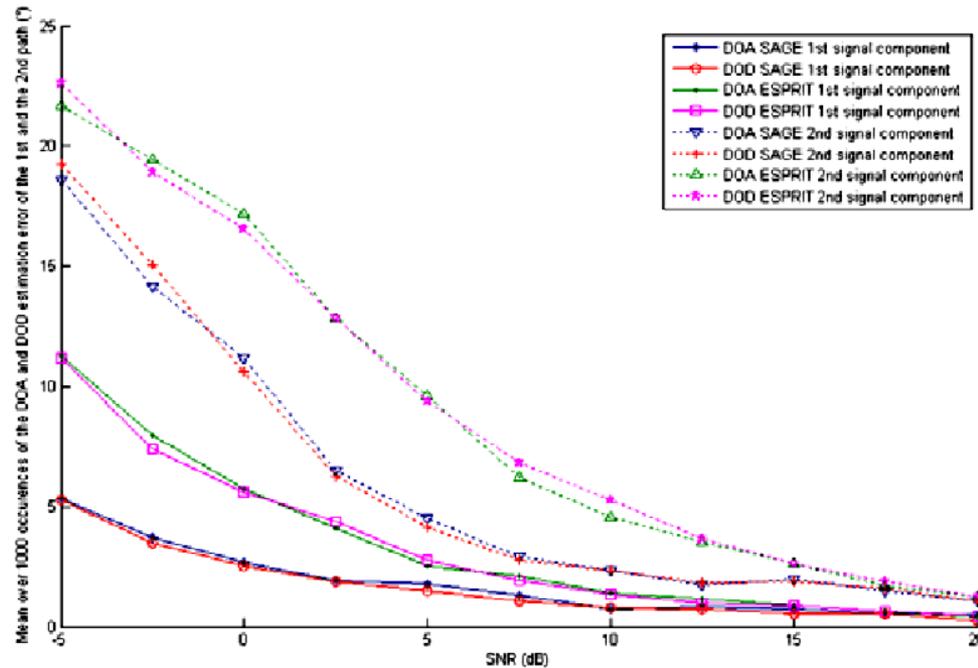
■ Comparaison SAGE / ESPRIT

- Erreur d'estimation angulaire du trajet principal vs. sa puissance relativement aux autres (R)



■ Comparaison SAGE / ESPRIT

- Erreur d'estimation angulaire de plusieurs trajets vs. Le SNR

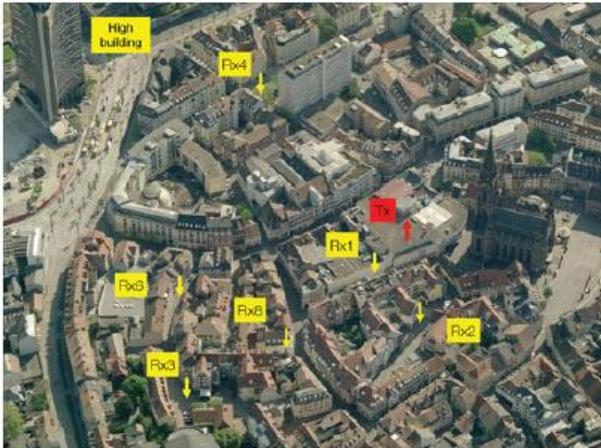




Plan

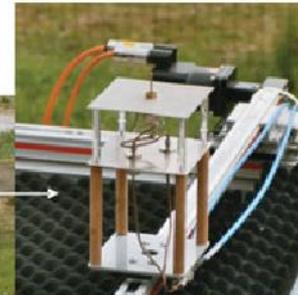
- Contexte : les réseaux sans fil
- Qu'est-ce que le canal radio ?
- Méthodes HR : pros/cons
- Méthode SAGE
- **Exemple BR : formation de faisceaux**
- Exemple HR : CLEAN SVD
- Conclusion

Exemple BR : formation de faisceaux



2.2 GHz ($\lambda = 13.6$ cm), bande 62.5 MHz

Transmetteur :
1 antenne



Récepteur :
réseau d'antennes virtuel 2D (21 x 21)

J.M. Conrat and P. Pajusco, International Journal of Microwave and Wireless Technologies, 2012, 4(1), 3–13

Exemple BR : formation de faisceaux

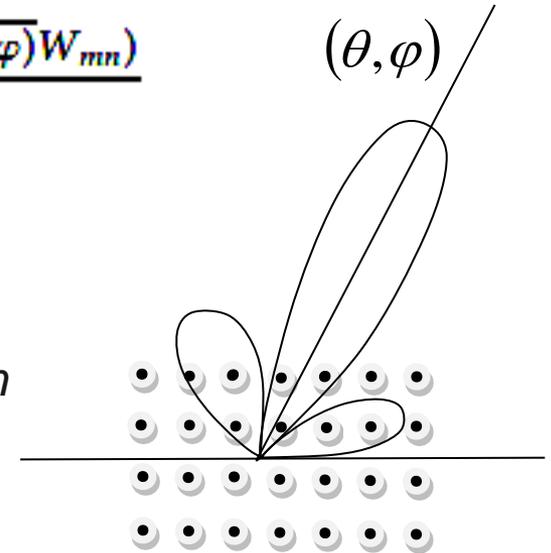
$$h(\theta, \varphi, \tau) = \frac{\sum_m^{NbAntRow} \sum_n^{NbAntLine} (h_{mn}(\tau) \overline{B_{mn}(\theta, \varphi)} W_{mn})}{G_{BS} G_{MS}(\theta, \varphi) \sum_m^{21} \sum_n^{21} W_{mn}}$$

$B_{mn}(\theta, \varphi)$: beamformer de Bartlett

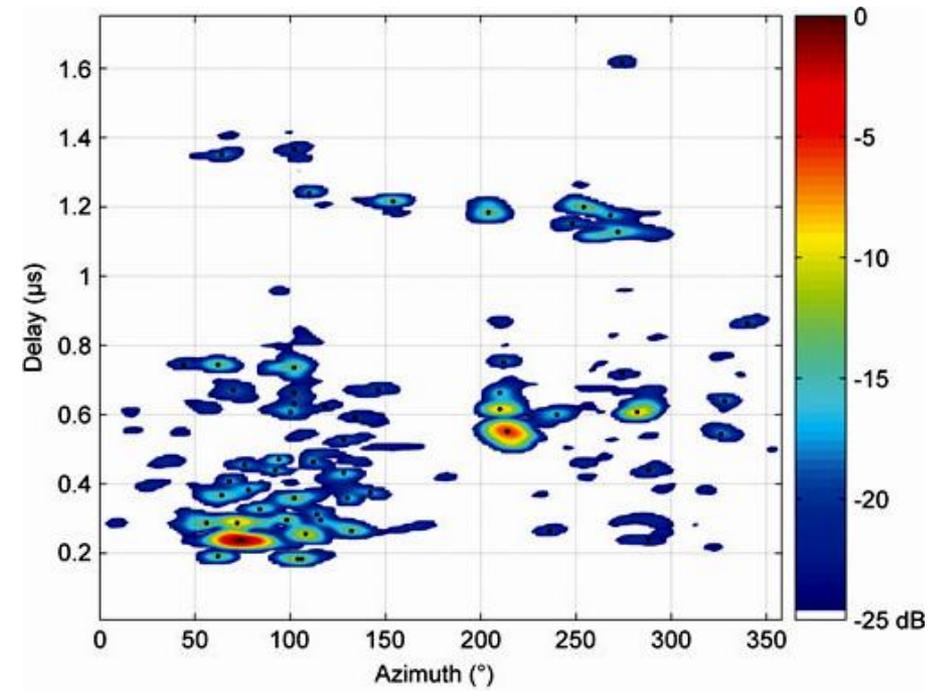
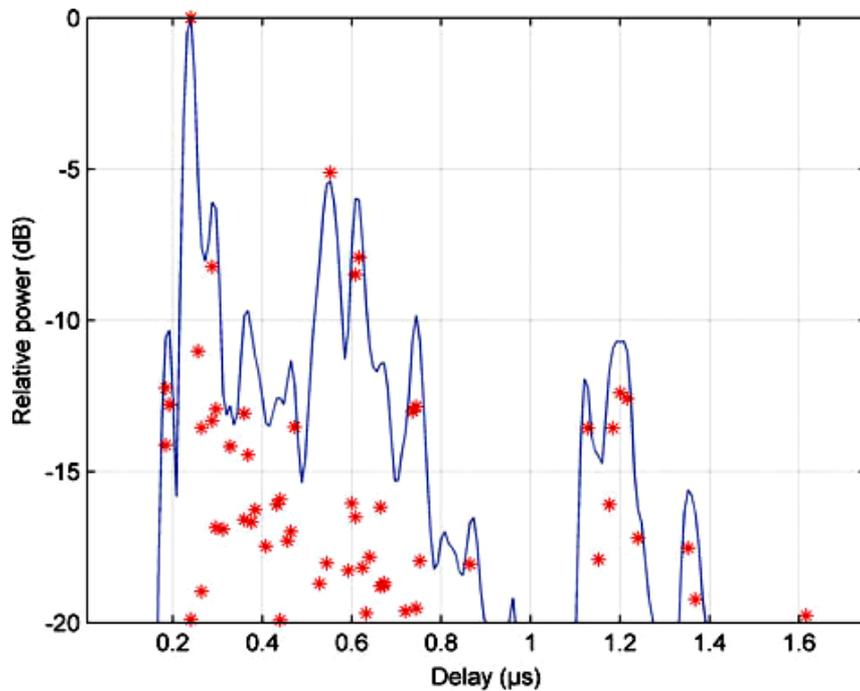
$h_{mn}(\tau)$: réponse impulsionnelle de l'antenne mn

$G_{BS} G_{MS}(\theta, \varphi)$: Gain des antennes

W_{mn} : coefficient de pondération (fenêtrage)

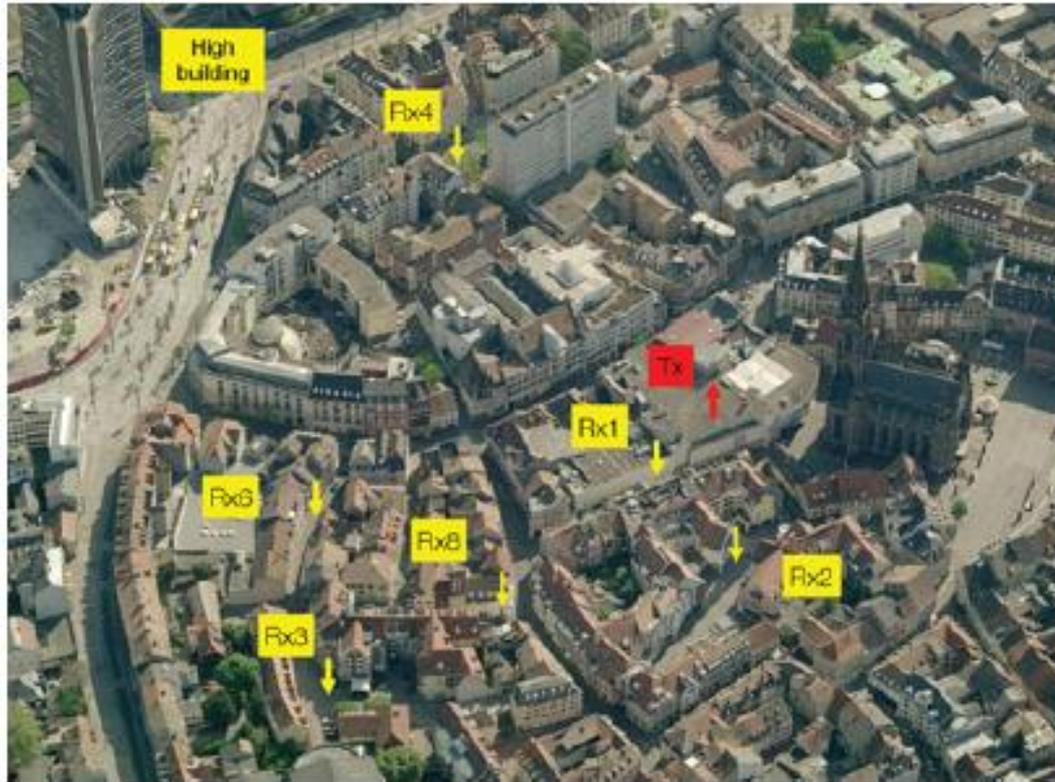


Exemple BR : formation de faisceaux



Note : il s'agit d'une "grosse" antenne !

Exemple BR : formation de faisceaux



Rx3.avi

Rx1.avi

Rx7.avi

J.M. Conrat and P. Pajusco, *International Journal of Microwave and Wireless Technologies*, 2012, 4(1), 3–13



Plan

- Contexte : les réseaux sans fil
- Qu'est-ce que le canal radio ?
- Méthodes HR : pros/cons
- Méthode SAGE
- Exemple BR : formation de faisceaux
- **Exemple HR : CLEAN SVD**
- Conclusion



Exemple HR : CLEAN SVD

■ Méthode CLEAN :

- Itérative et soustractive par amplitude décroissante des trajets
 - on identifie le trajet le plus puissant
 - On estime ses caractéristiques
 - On le soustrait
 - Puis on recommence pour le trajet suivant
 - Limitation : **le modèle de signal pour un trajet est imparfait**
- Après plusieurs itérations le résiduel est bruité

Exemple HR : CLEAN SVD

■ SVD « Singular Value decomposition »

- Permet d'obtenir simultanément le modèle doublement directionnel

$$Y = HX + N$$

$$X = \begin{bmatrix} x_1 & x_2 & \dots & x_{n_{TX}} \end{bmatrix}^t \text{ les signaux appliqués au réseau TX}$$

$$Y = \begin{bmatrix} y_1 & y_2 & \dots & y_{n_{RX}} \end{bmatrix}^t \text{ les signaux reçus par le réseau RX}$$

$$H = U\Sigma V^H$$

$$V = \begin{bmatrix} v_1 & v_2 & \dots & v_{n_T} \end{bmatrix}^t \text{ la matrice unitaire } n_{TX} \times n_{TX} \text{ contenant les vecteurs colonnes } v_i \text{ de la base d'entrée (vecteurs directionnels TX)}$$

$$U = \begin{bmatrix} u_1 & u_2 & \dots & u_{n_R} \end{bmatrix}^t \text{ la matrice unitaire } n_{RX} \times n_{RX} \text{ contenant les vecteurs colonnes } v_i \text{ de la base de sortie (vecteurs directionnels RX)}$$

Σ : matrice diagonale des valeurs singulières (non négatives) = racines carrées de valeurs propres de HH^H (si non nulles)

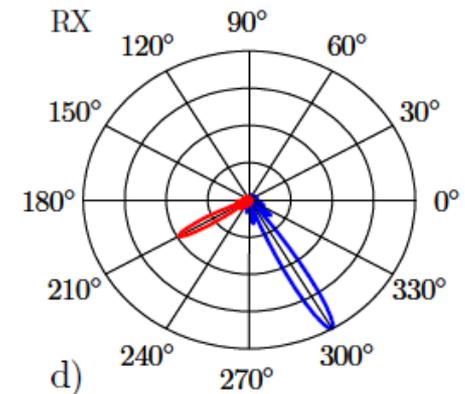
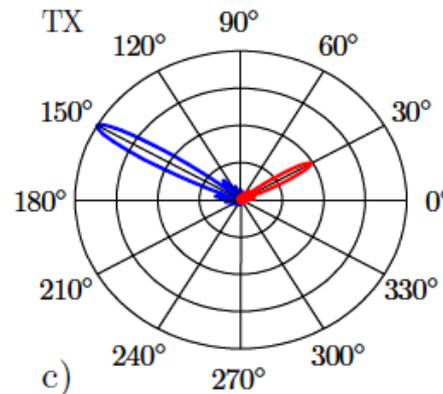
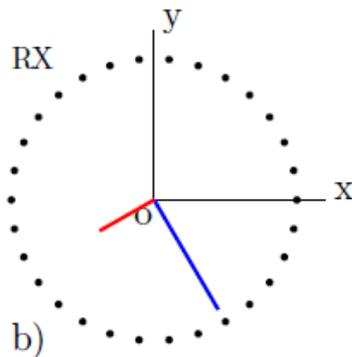
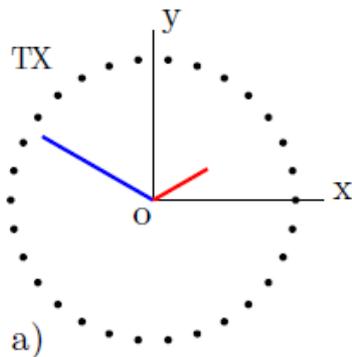
Exemple HR : CLEAN SVD

■ SVD « Singular Value decomposition »

- Permet d'obtenir simultanément le modèle doublement directionnel

$$A_k^{TX}(\theta, \varphi) = \sum_{m=1}^{n_T} G_m^{TX}(\theta, \varphi) u'_k(m)$$

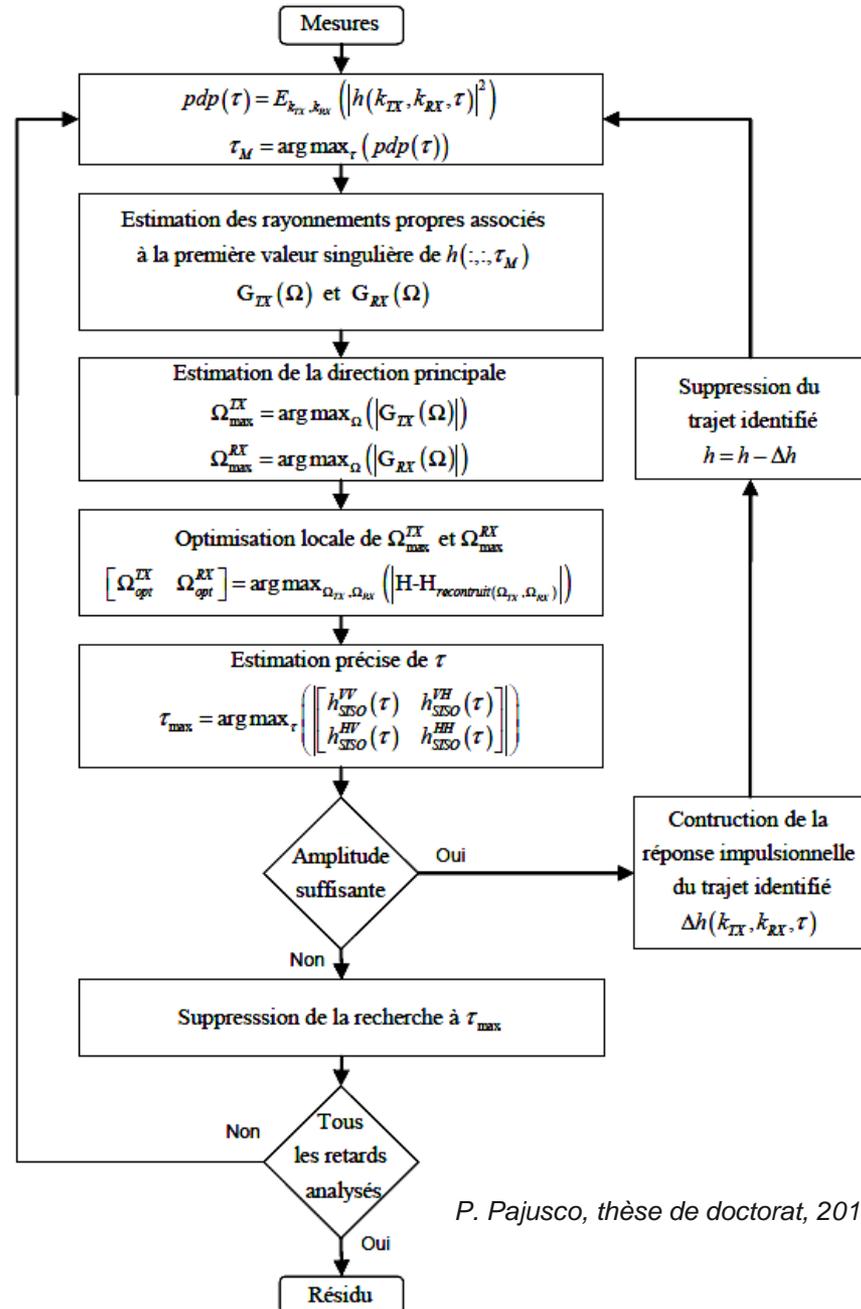
$$A_k^{RX}(\theta, \varphi) = \sum_{m=1}^{n_R} G_m^{RX}(\theta, \varphi) v'_k(m)$$



P. Pajusco, thèse de doctorat, 2011

Exemple HR :

CLEAN SVD

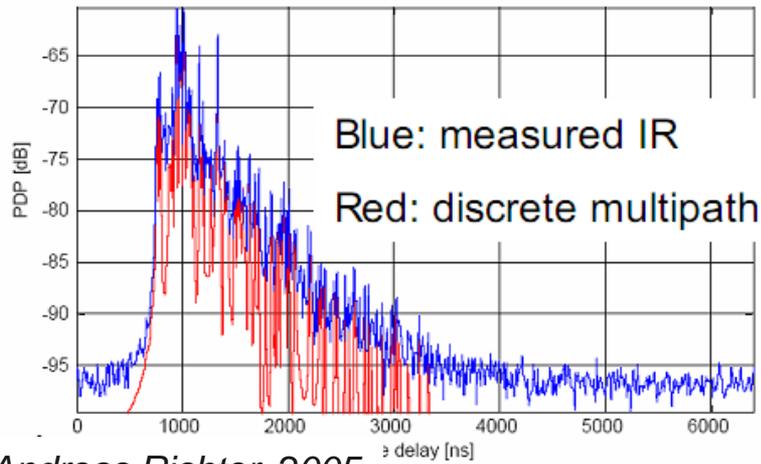


P. Pajusco, thèse de doctorat, 2011

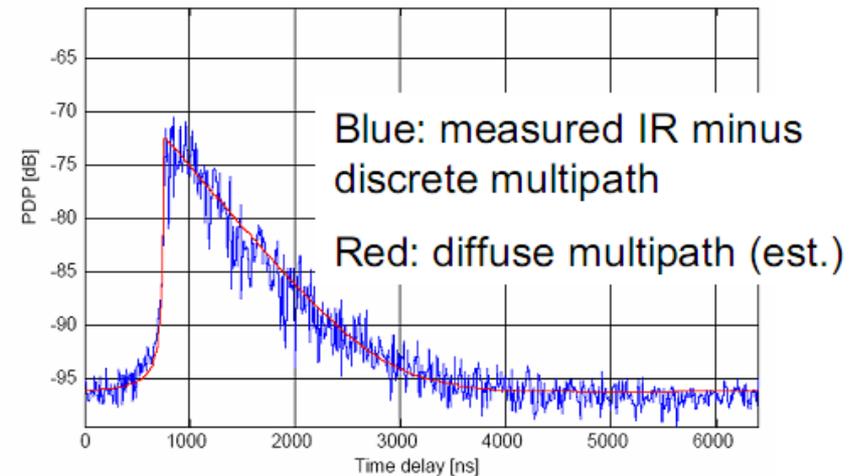
Exemple HR : CLEAN SVD

■ Modélisation de la composante diffuse

- Composante de la réponse impulsionnelle difficile à résoudre dans les domaines délai et/ou angulaire
- Origine physique : rugosité, fouillis, réverbération/multitrajets denses...



Andreas Richter, 2005



Exemple HR : CLEAN SVD

■ Modélisation de la composante diffuse

- On représente le diffus comme un **phénomène aléatoire**
- On l'approxime à une **statistique de Rayleigh** (i.e. Gaussienne centrée de même variance sur les parties réelles et imaginaires)
- On considère décorrélés (donc ici indépendants) les aléas du côté émetteur et du côté récepteur (modèle dit de Kronecker)

$$H = (R_{RX})^{1/2} H_{IID} \left((R_{TX})^{1/2} \right)^T$$

$R_{TX} = [\rho_{m,n}^{TX}]$ la matrice de corrélation à l'émetteur

$R_{RX} = [\rho_{m,n}^{RX}]$ la matrice de corrélation au récepteur

H_{IID} une matrice diagonale contenant sur sa diagonale des variables gaussiennes unitaires centrées et indépendantes

Exemple HR : CLEAN SVD

■ Modélisation de la composante diffuse

- Les matrices de corrélation s'obtiennent à partir des spectres angulaires de puissance et des diagrammes de rayonnement des antennes, par exemple du côté émetteur :

$$\rho_{m,n}^{TX} = \int_{\varphi=0}^{2\pi} \int_{\theta=0}^{\pi} G_m^{TX}(\theta, \varphi) (G_n^{TX}(\theta, \varphi))^* G_{PAS}^{TX}(\theta, \varphi) (G_{PAS}^{TX}(\theta, \varphi))^* \sin(\theta) d\theta d\varphi$$

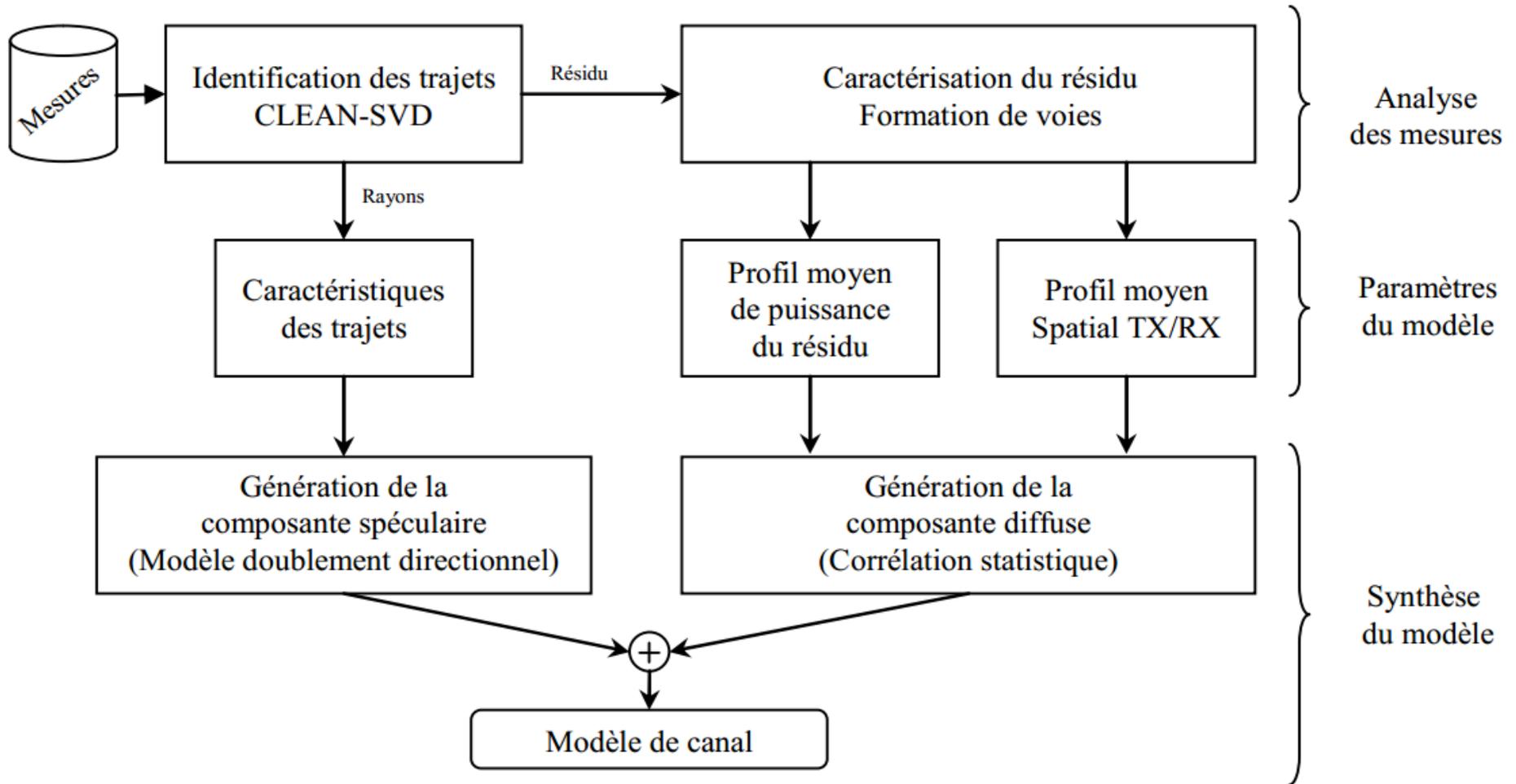
$$H = (R_{RX})^{1/2} H_{IID} \left((R_{TX})^{1/2} \right)^T$$

$R_{TX} = [\rho_{m,n}^{TX}]$ la matrice de corrélation à l'émetteur

$R_{RX} = [\rho_{m,n}^{RX}]$ la matrice de corrélation au récepteur

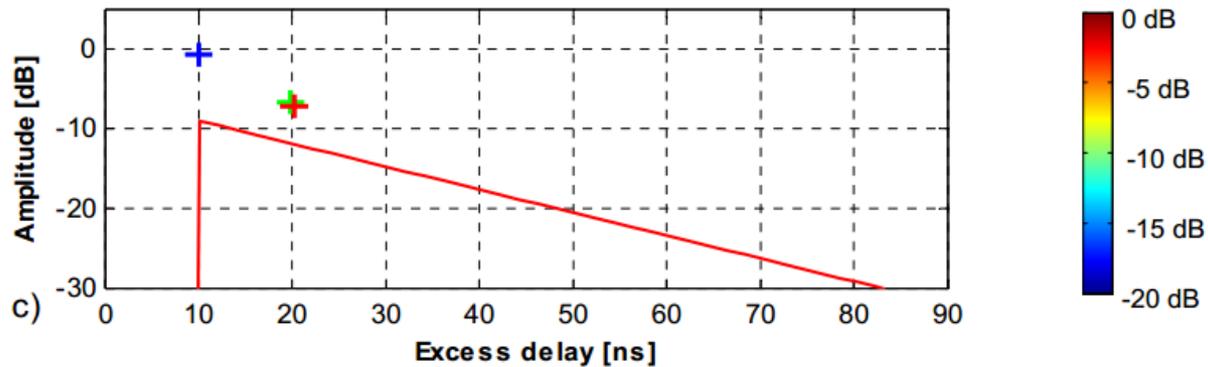
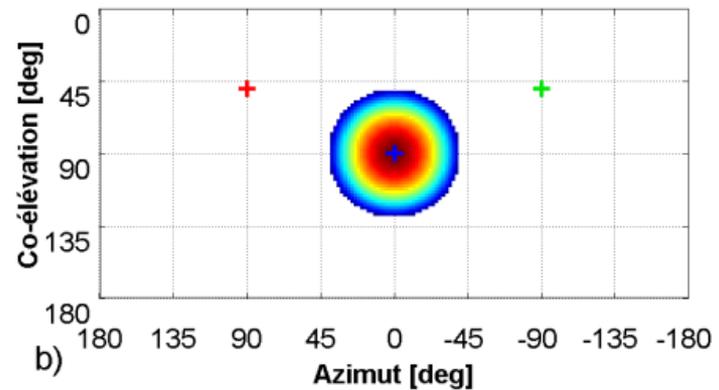
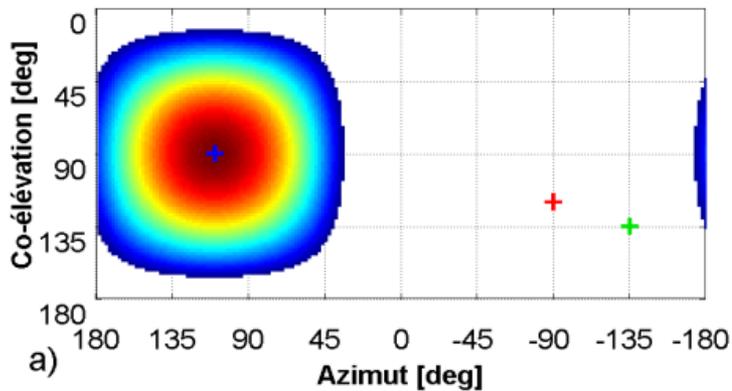
H_{IID} une matrice diagonale contenant sur sa diagonale des variables gaussiennes unitaires centrées et indépendantes

Exemple HR : CLEAN SVD



Exemple HR : CLEAN SVD

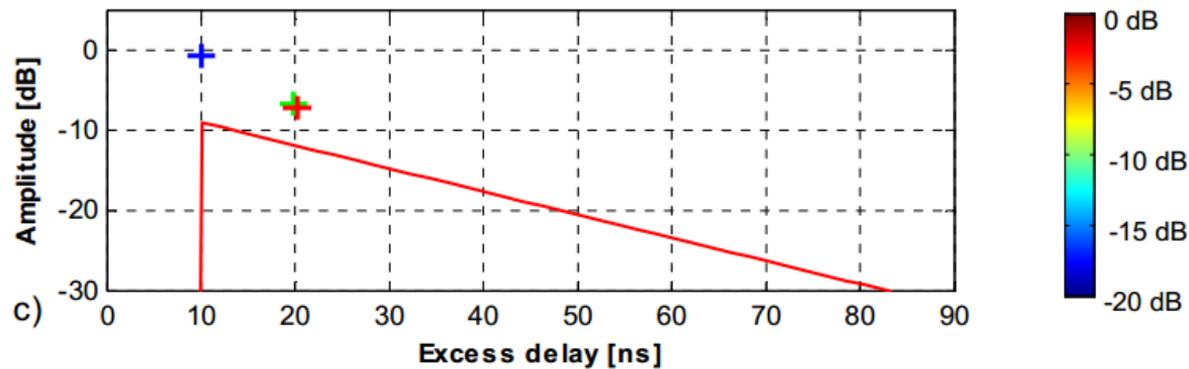
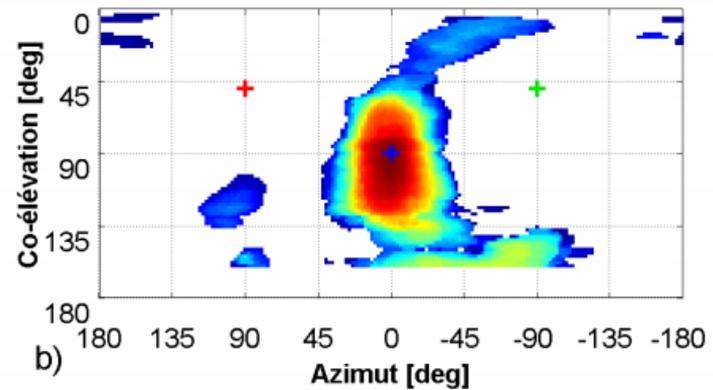
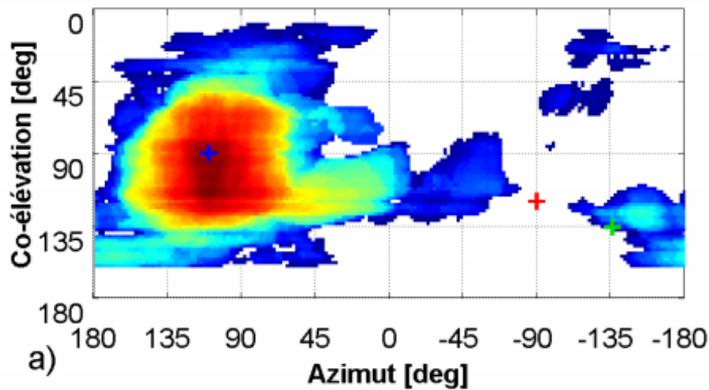
■ Validation par simulation



P. Pajusco, thèse de doctorat, 2011

Exemple HR : CLEAN SVD

■ Validation par simulation



P. Pajusco, thèse de doctorat, 2011

Exemple HR : CLEAN SVD

■ Application à la mesure doublement directionnelle

5 GHz – $\lambda = 6$ cm

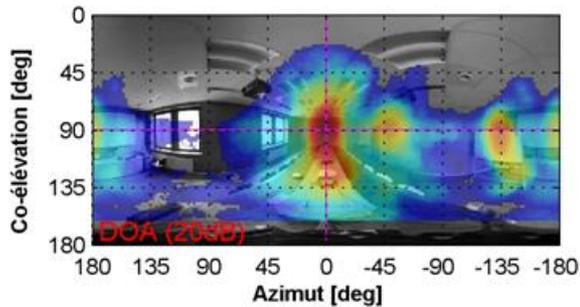


P. Pajusco, thèse de doctorat, 2011

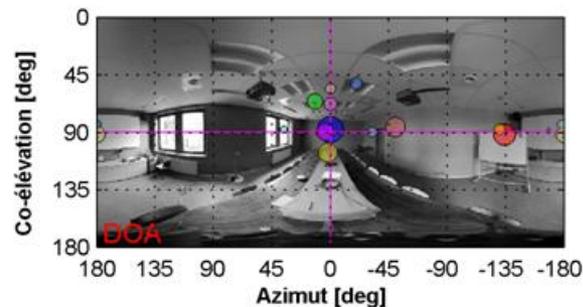
Exemple HR : CLEAN SVD

■ Application à la mesure doublement directionnelle

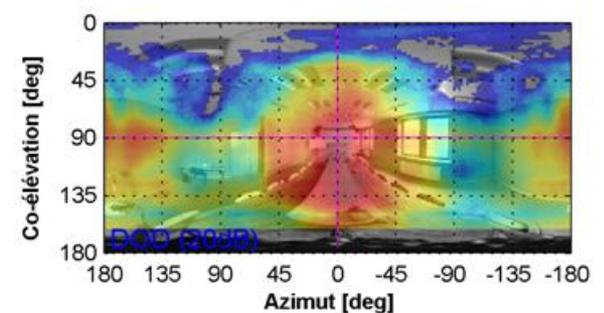
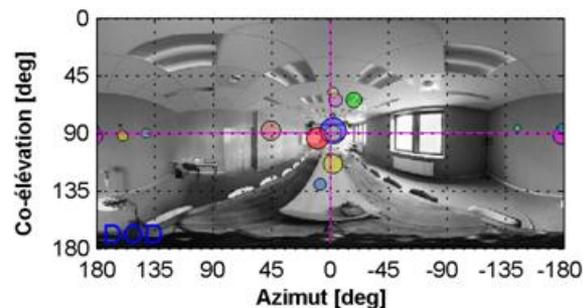
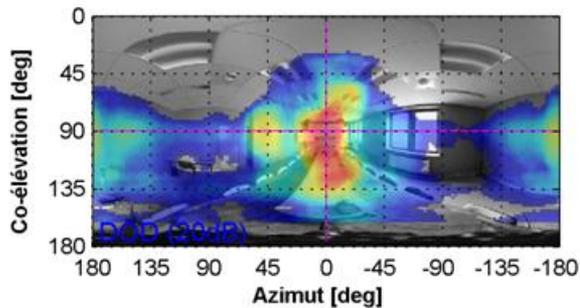
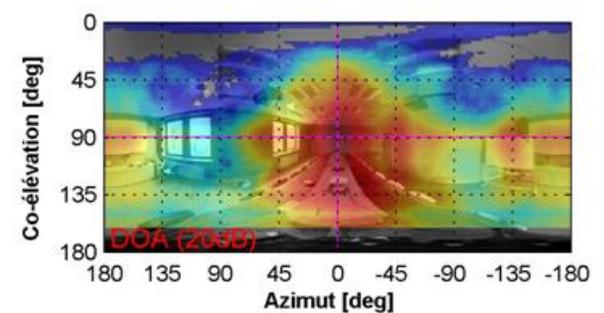
Analyse par formation de voie



Composantes spéculaires



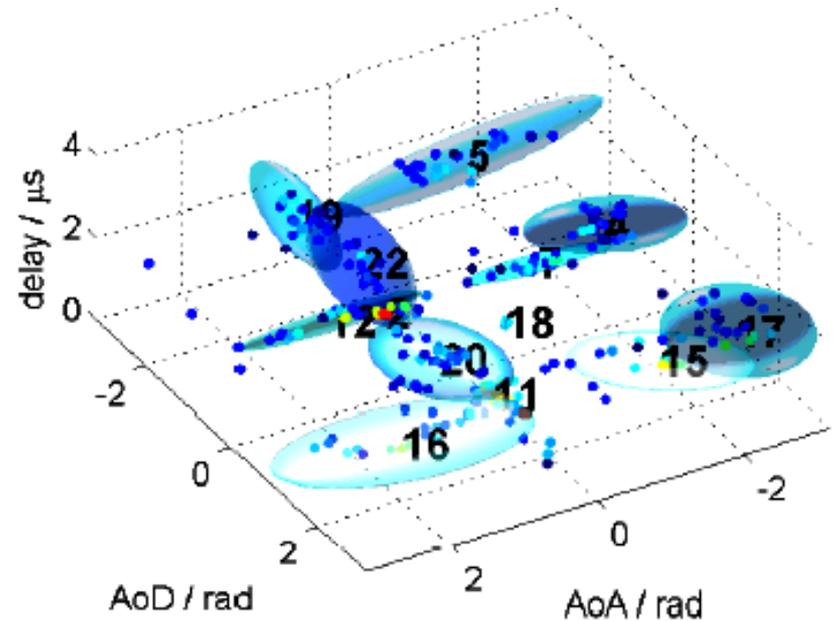
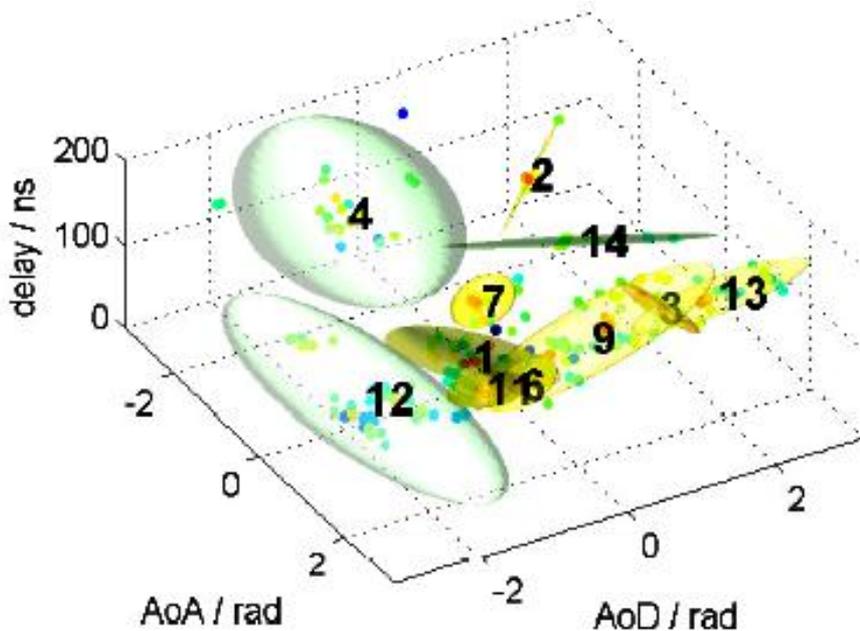
Résidus de calcul



P. Pajusco, thèse de doctorat, 2011

Exemple HR : clusterisation

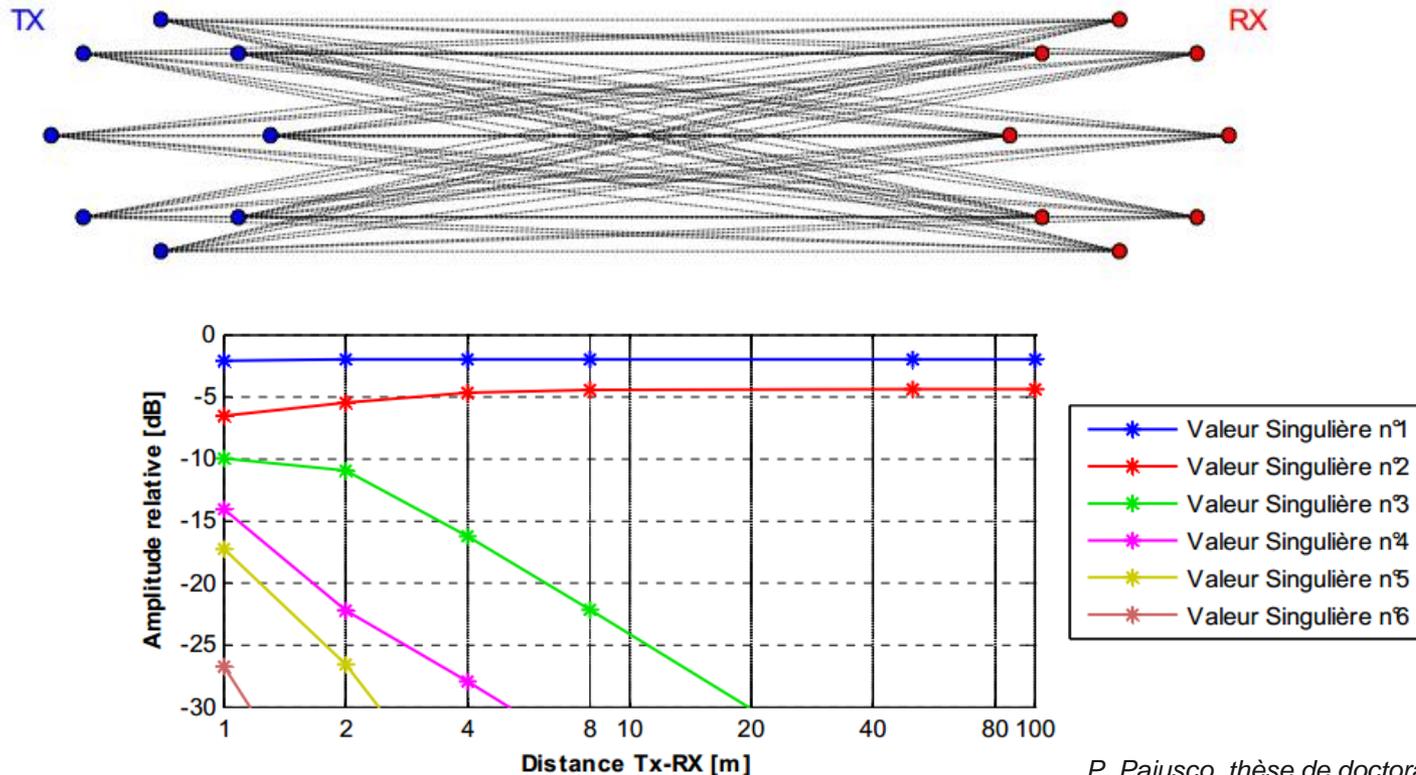
- Les multi-trajets sont souvent « clusterisés » dans les domaines angulaire et/ou délai (modèle Saleh-Valenzuela)



Exemple HR : CLEAN SVD

■ Un exemple de sensibilité au modèle

- Hypothèse d'ondes planes : quid de l'erreur ?



P. Pajusco, thèse de doctorat, 2011



Plan

- Contexte : les réseaux sans fil
- Qu'est-ce que le canal radio ?
- Méthodes HR : pros/cons
- Méthode SAGE
- Exemple BR : formation de faisceaux
- Exemple HR : CLEAN SVD
- **Conclusion**



Conclusion

- La modélisation du canal multidimensionnel pour les besoins des communications mobiles est un bon exemple d'utilisation des méthodes HR
- La haute résolution est surtout nécessaire si le système multi antenne est de petite taille
- Formation de faisceau = robustesse maximale. Méthode HR = sensible au modèle. Attention à ne pas lui en faire dire plus que la réalité



■ Questions ?

