



## Bilans de liaison : de la 2G à la 5G

Marceau Coupechoux

Telecom Paris, Institut Polytechnique de Paris

Département Informatique et Réseaux

# Bilans de liaison : de la 2G à la 5G

---

- Introduction
- Concepts de base
  - Principes du bilan de liaison
  - SINR et sensibilité
  - Propagation
  - Antennes, diversité et sectorisation
  - Bruit thermique et facteur de bruit
  - Pertes câble
  - Marges
- Bilan de liaison GSM
  - Approche
  - Puissance du mobile
  - Sensibilité
  - Marge d'interférence
  - Rayons de cellule typiques
- Bilan de liaison LTE
  - Voie descendante
  - Voie montante
  - Rayons de cellule typiques
- Bilan de liaison NR
  - FD-MIMO et massive MIMO
  - Modèles de propagation
  - Correspondance débit-SINR
  - Voie montante
  - Voie descendante
  - Exemple de dimensionnement
- Conclusion
- Références

# Introduction

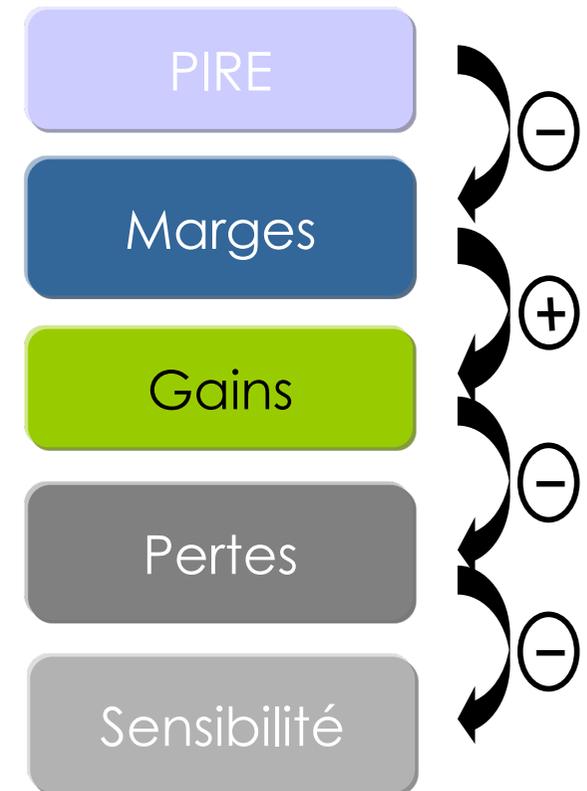
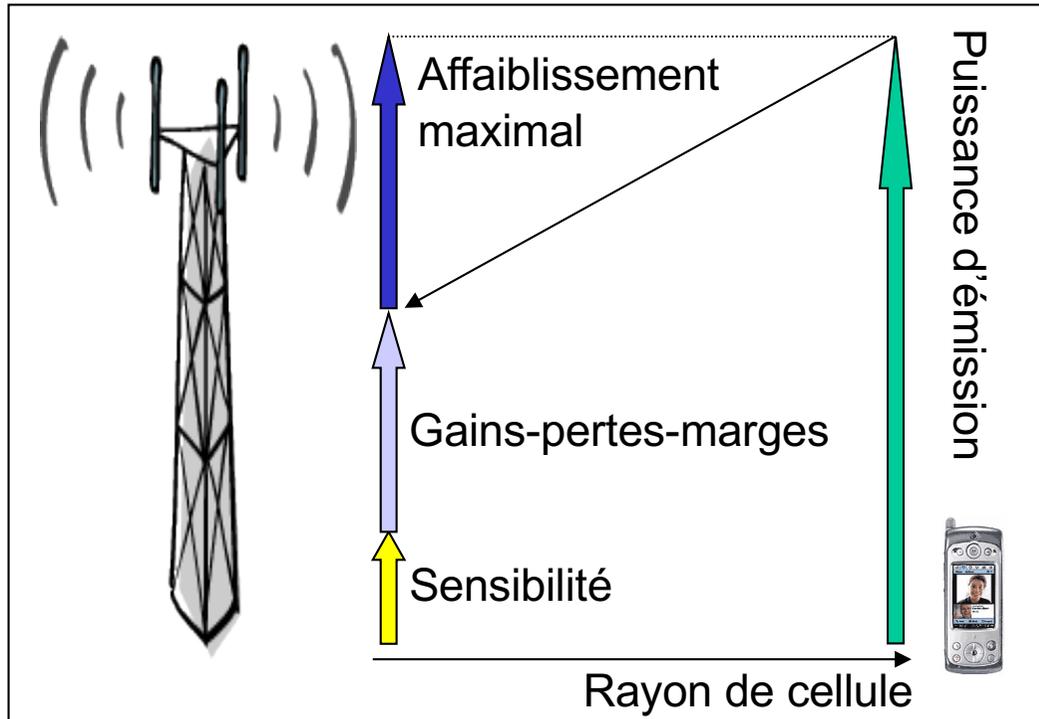
---

- Problématiques :
  - **Dimensionnement** d'un réseau cellulaire : combien de stations de base sont-elles nécessaires pour couvrir une région caractérisée par une certaine propagation radio et un certain trafic ?
  - **Capacité** d'un réseau cellulaire : combien d'abonnés peuvent être servis par le réseau ?
  - **Couverture** : quelle est le rayon des cellules ?
  - **Déploiement** : quelles techniques radio utiliser pour augmenter la couverture et/ou la capacité ?
  
- Dans ce cours, on s'intéresse à la couverture en utilisant un outil approximatif, le bilan de liaison.

# Concepts de base

## Principes du bilan de liaison

- Principe : on dispose d'un budget de puissance auquel on retranche les pertes et les marges ; la puissance reçue doit être supérieure à la sensibilité du récepteur.



**= MAPL**

Exemple : voie montante  
 Note: Affaiblissement maximal = Maximum Allowable Path Loss (MAPL)

Modèle de propagation, e.g. Hata

Affaiblissement maximal [dB] Rayon de cellule [Km]

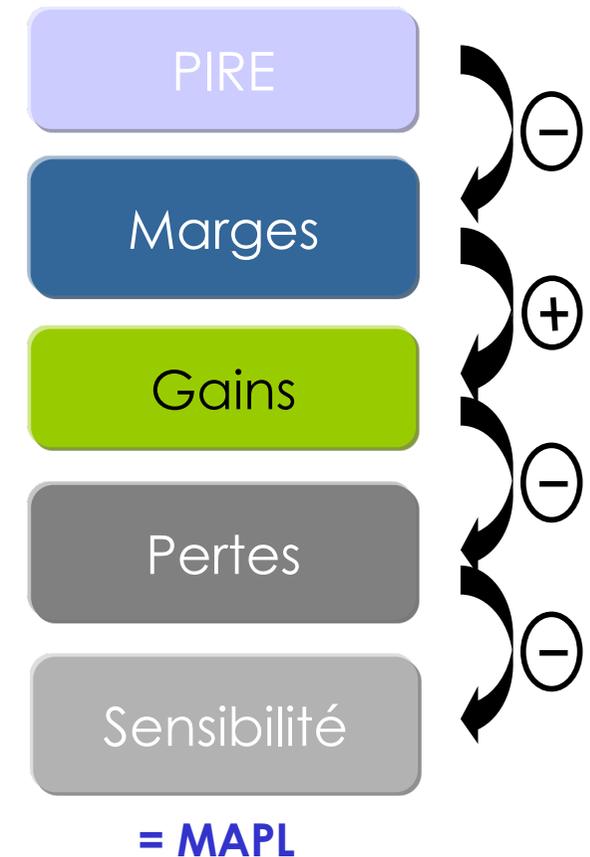
# Concepts de base

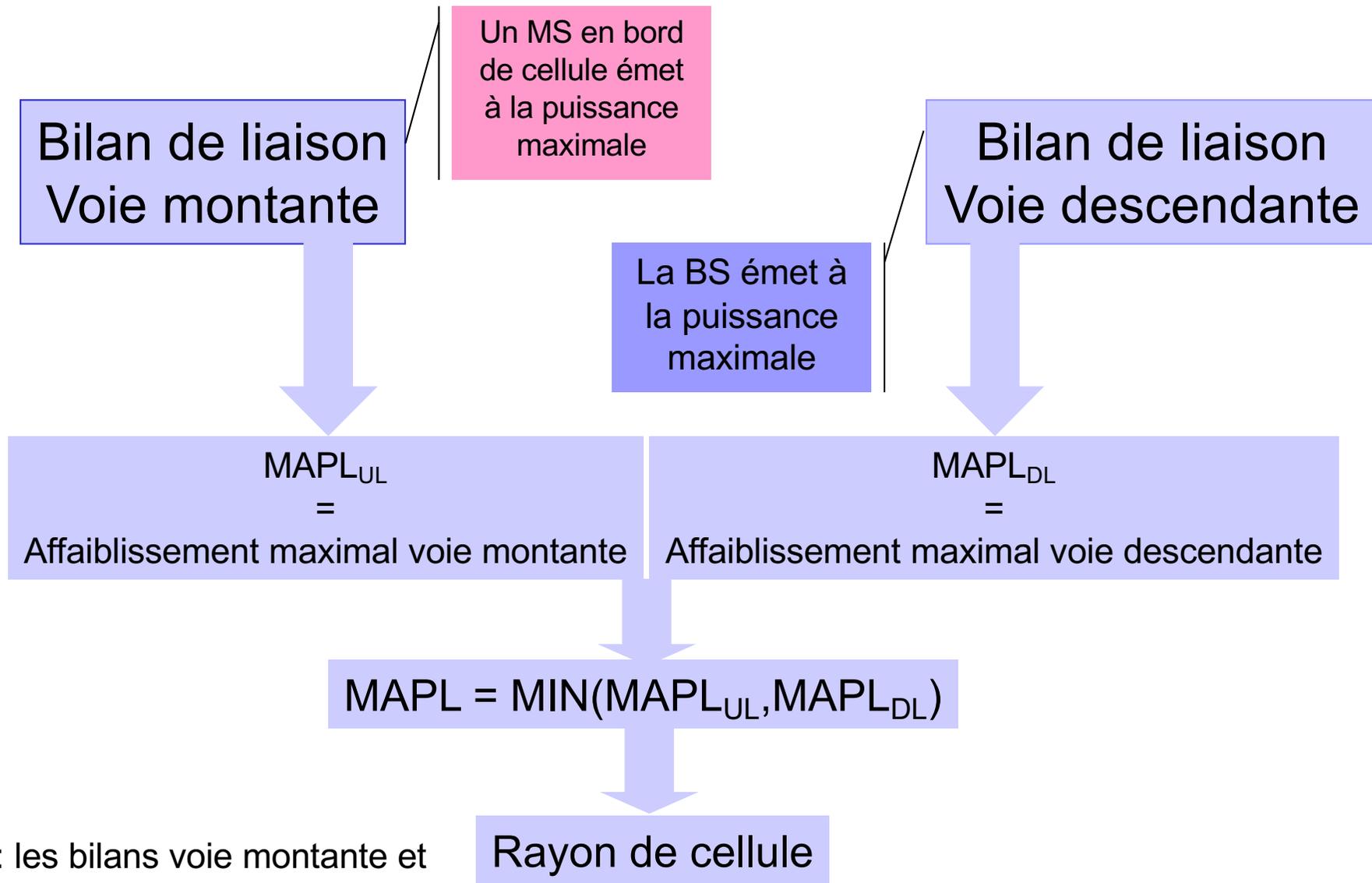
## Principes du bilan de liaison

- Principe : on dispose d'un budget de puissance auquel on retranche les pertes et les marges ; la puissance reçue doit être supérieure à la sensibilité du récepteur.

- Calcul du MAPL:

$$\begin{aligned} P_r &= P_t - PL(R) - M + G - P \geq S \\ PL(R) &\leq P_t - S - M + G - P \\ MAPL &= P_t - S - M + G - P \end{aligned}$$





NB : les bilans voie montante et voie descendante sont indépendants

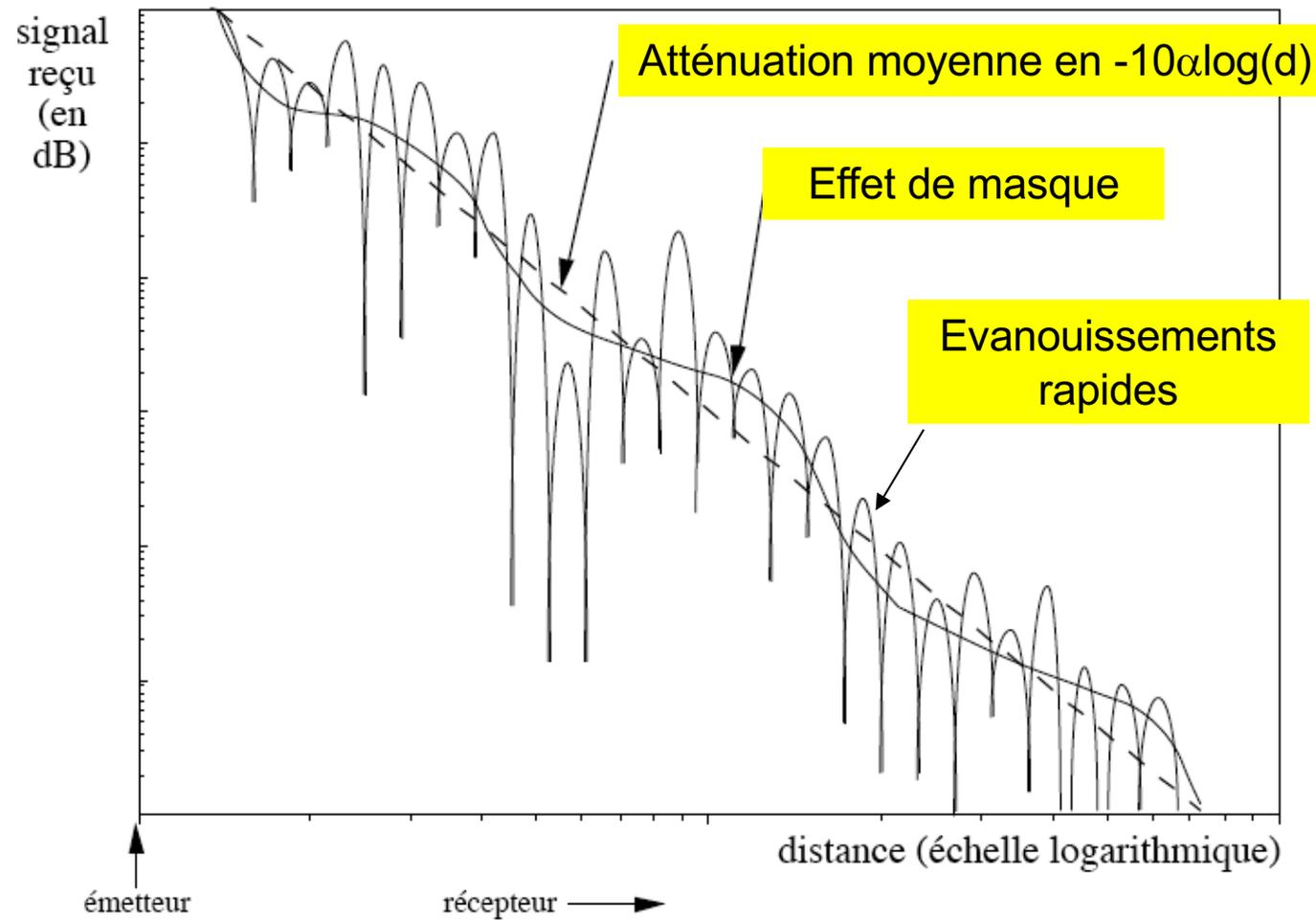
- L'affaiblissement maximal (MAPL) est le minimum de l'affaiblissement sur la voie montante et sur la voie descendante.
- Pour améliorer la couverture, il faut identifier le lien limitant :
  - Lien limité par la voie montante (*UL limited*) :  $MAPL_{ul} < MAPL_{dl}$
  - Lien limité par la voie descendante (*DL limited*) :  $MAPL_{dl} < MAPL_{ul}$
- L'extension de la couverture se fait par un choix approprié de fonctionnalités radio :
  - Lien limité par la voie montante :
    - Diversité en réception (2 ou 4 antennes),
    - Tower Mounted Amplifier (TMA).
  - Lien limité par la voie descendante :
    - Amplificateur de haute puissance,
    - Diversité en transmission, beamforming
    - Configuration BTS à faibles pertes.

- **Sensibilité** = puissance minimale nécessaire pour garantir une certaine qualité de service ou un certain débit en présence de bruit seul
- Technologies à « canal dédié » (UMTS R99, GSM) : on vise un SNR ou SINR cible  $\gamma^*$ . En dessous de ce seuil, la qualité de service n'est pas acceptable.
- Technologies à « canal partagé » (HSDPA, LTE) : le débit est une fonction croissante du SNR/SINR. On déduit du débit minimum visé, le seuil de SNR ou SINR  $\gamma^*$  à obtenir.
- A partir de la puissance du bruit et du SNR seuil, on déduit la sensibilité :

$$\gamma^* = \frac{S}{N} \Rightarrow S = N\gamma^*$$

- Les interférences sont prises en compte dans la marge d'interférence.

- Rappel : le modèle de propagation à trois étages.

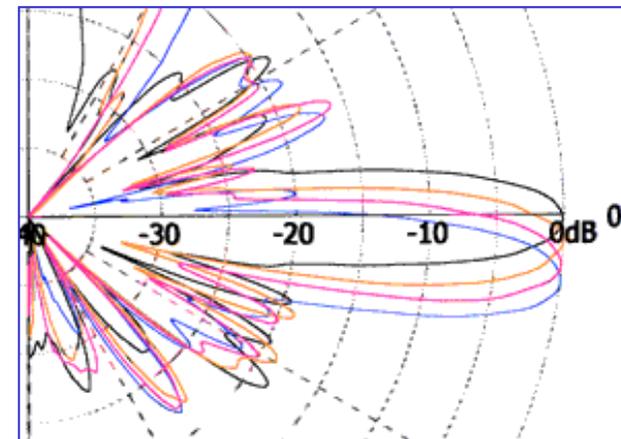


- Dans les bilans de liaison :
  - Atténuation moyenne : on utilise un modèle empirique
  - Effet de masque : on prend une marge supplémentaire dans le calcul du MAPL
  - Evanouissements rapides : ils sont généralement pris en compte dans la sensibilité à atteindre (sauf en UMTS R99), qui est elle même issue de simulations de niveau lien (intégrant les évanouissements rapides).

# Concepts de base

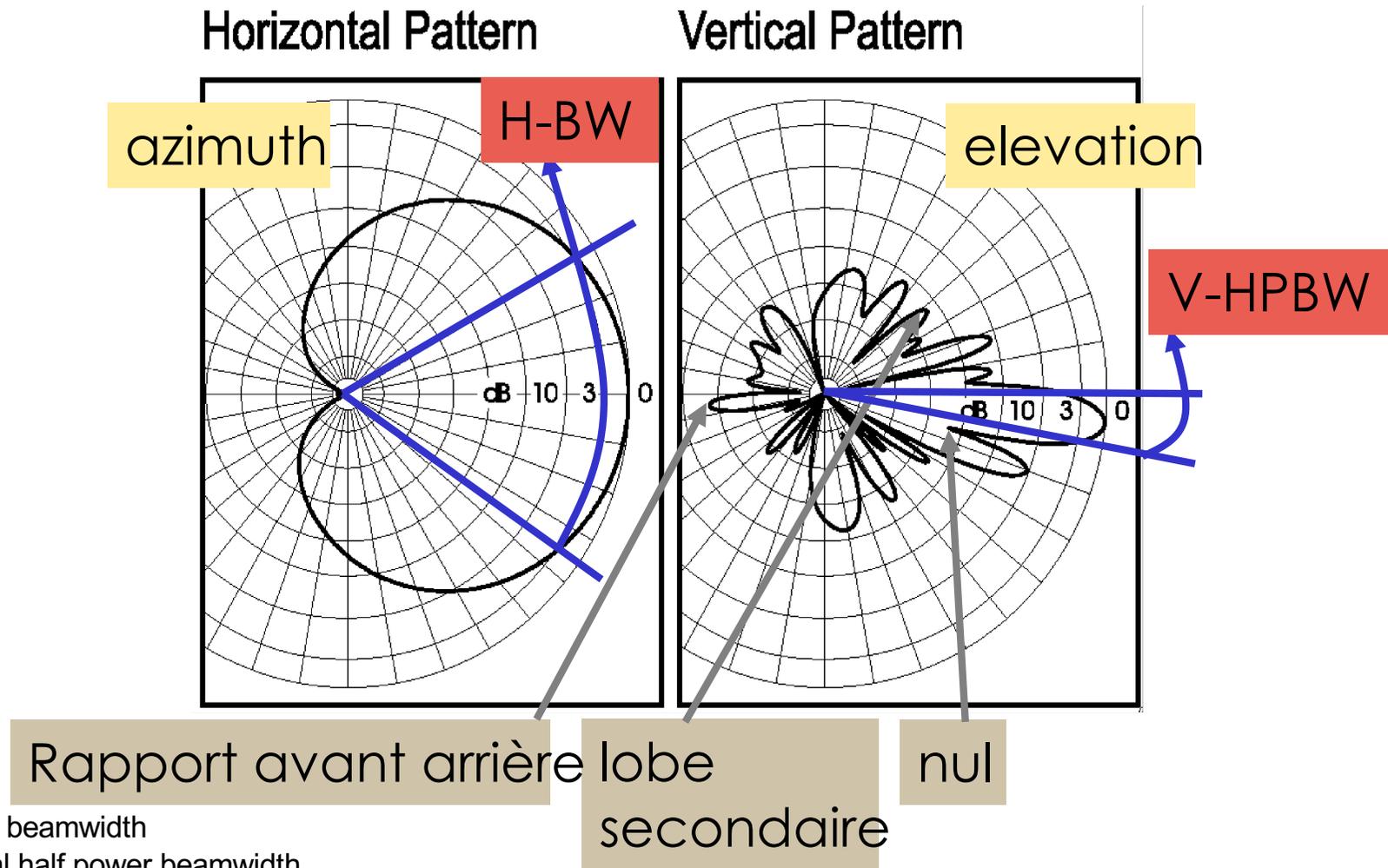
## Antennes, diversité et sectorisation

- Principales caractéristiques d'une antenne (rappel) :
  - Bande de fréquence,
  - Ouverture horizontale (en  $^{\circ}$  ),
  - Ouverture verticale (en  $^{\circ}$  ),
  - Gain (en dBi),
  - Polarisation (horizontale, verticale)
  - Longueur (rarement plus de 2 m),
  - Tilt électrique ou mécanique (en  $^{\circ}$  ).



tilt d'antenne

- Diagramme d'antenne



HBW: Horizontal beamwidth

V-HPBW: Vertical half power beamwidth

# Concepts de base

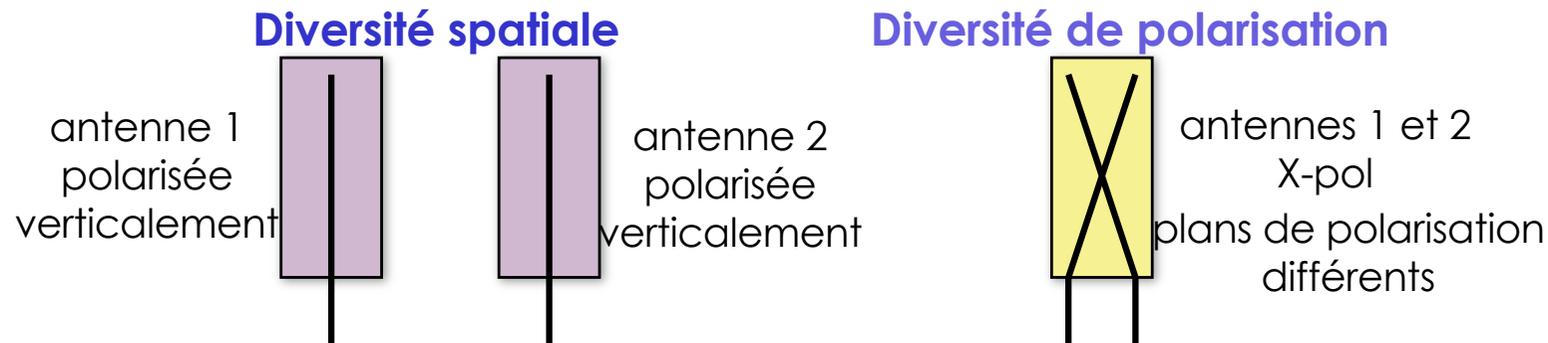
## Antennes, diversité et sectorisation

- Le gain dépend de la longueur, de la bande de fréquence et de la capacité de l'antenne à focaliser l'énergie dans une direction.
- Gains typiques d'antennes

Spectre	Omni	Tri-sectorisé
Bandes basses (700 — 900 MHz)	12 dBi	16 dBi
Bandes intermédiaires (1.3 – 2.3 GHz)	13 dBi	18 dBi
Bandes hautes (2.5 – 2.6 GHz)	14 dBi	19 dBi



- **La diversité de réception** (ou d'antenne) réduit les effets des évanouissements rapides en combinant différents signaux décorrélés.
- **Diversité spatiale** : deux antennes sont éloignées verticalement ou horizontalement. L'impact visuel est important. Gains importants en LOS : adaptée aux environnements ruraux.
- **Diversité de polarisation** : les antennes sont dans des plans de polarisation différents. Plus adaptée aux environnements urbains.
- **Gains typiques** : 3dB (2RxDiv), 6dB (4RxDiv)



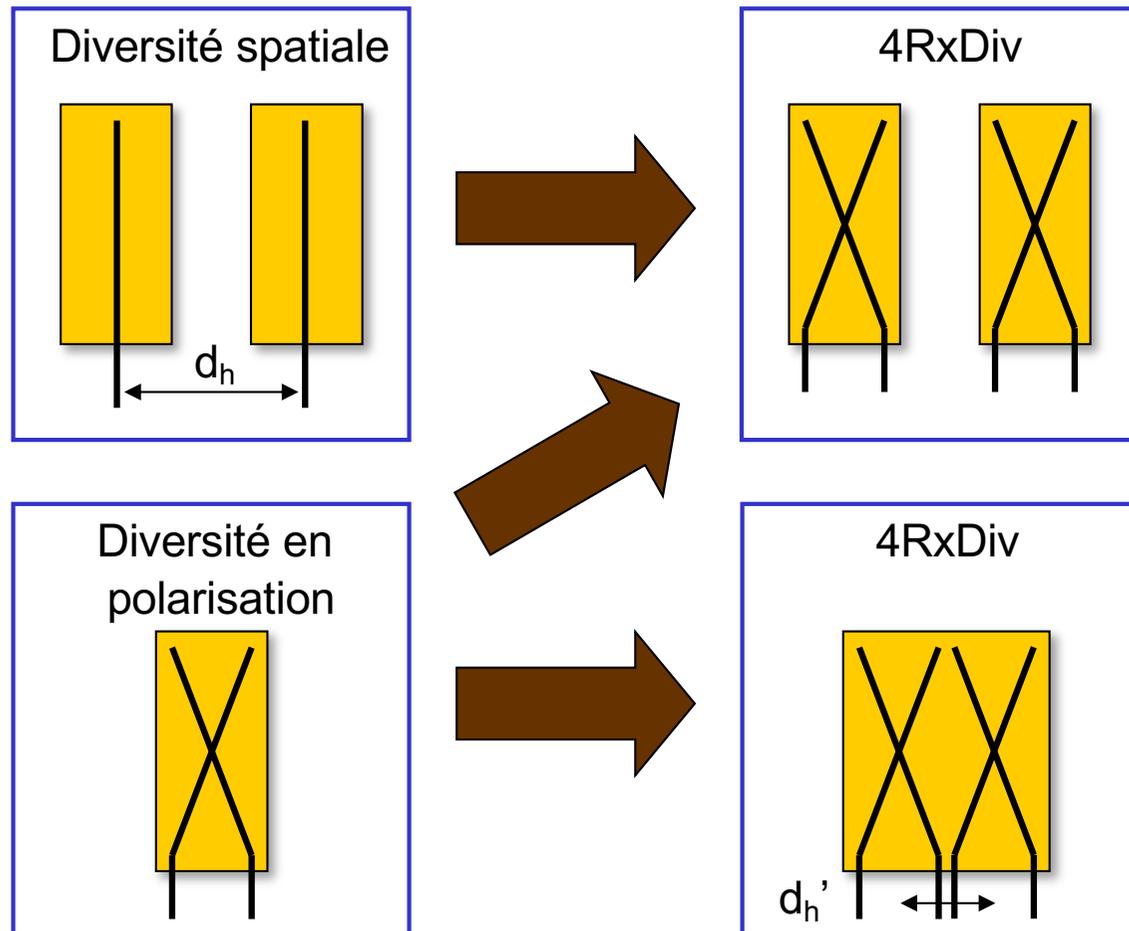
- Evolutions vers la **4RxDiv** :

- Contraintes spatiales :

- $d_h > 20\lambda = 3\text{m}$
- pour  $f = 2\text{GHz}$
- $\lambda = c/f = 15\text{cm}$

- [Laiho02] recommande :

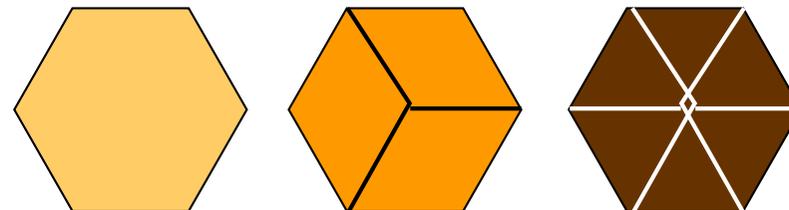
- $d_h = 1,5\text{m}$
- $d_h' = 0,3\text{m}$



# Concepts de base

## Antennes, diversité et sectorisation

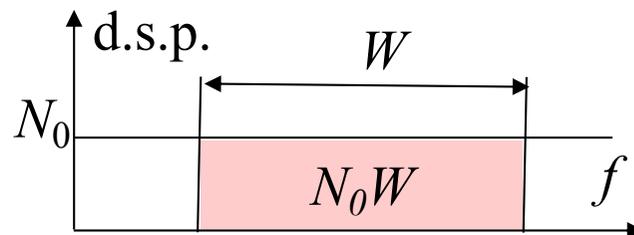
- Sectorisation : accroître le nombre de secteurs par site
- **Impact** sur le dimensionnement :
  - Le gain d'antenne est modifié (exemple à 900 MHz)
    - 1 secteur :  $360^\circ$  /12dBi
    - 3 secteurs :  $65^\circ$  /16dBi
    - 6 secteurs :  $33^\circ$  /18dBi
  - Accroissement de la capacité (densification)
- Plus de modules **hardware** sont nécessaires par site
  - Antennes
  - Amplificateurs
  - Capacités de traitement
- On observe généralement une légère dégradation du SINR quand on augmente le nombre de secteurs



# Concepts de base

## Bruit thermique et facteur de bruit

- Puissance du bruit ( $N$ ) = Bruit thermique (ou de fond) x Facteur de bruit de la station de base (BS) ou du mobile (MS)
- **Bruit de fond** (*background noise*)
  - $10\log(N_0)$  [dBm/Hz] = -174 dBm/Hz =  $10 \log(kT)$ , d.s.p.
  - $k = 1.38066 \cdot 10^{-23}$  J/K (constante de Boltzmann),  $T = 290$  K
  - Puissance du bruit dans la bande:  
 $10\log(N_0W)$  [dBm] = -174 +  $10 \log(W)$
- **Facteur de bruit**
  - Bruit introduit par les composants de la chaîne de réception
  - Valeur typique:  $10\log(NF)$  [dB] = 4-5 dB (BS) 6-8 dB (MS)

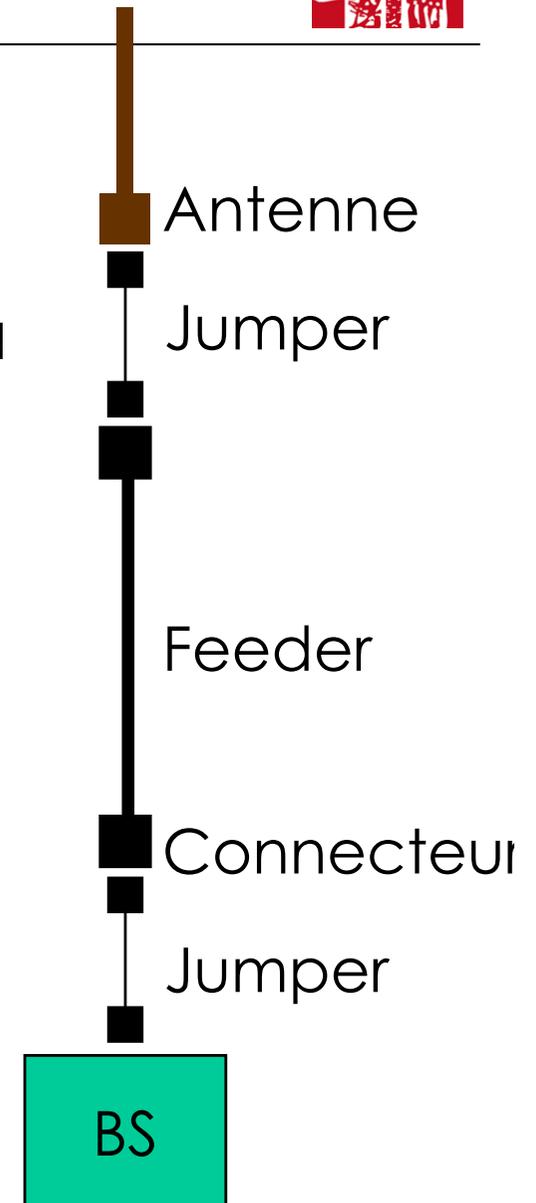


$$N = N_0 W \cdot NF \quad [\text{mW}]$$

# Concepts de base

## Pertes câble

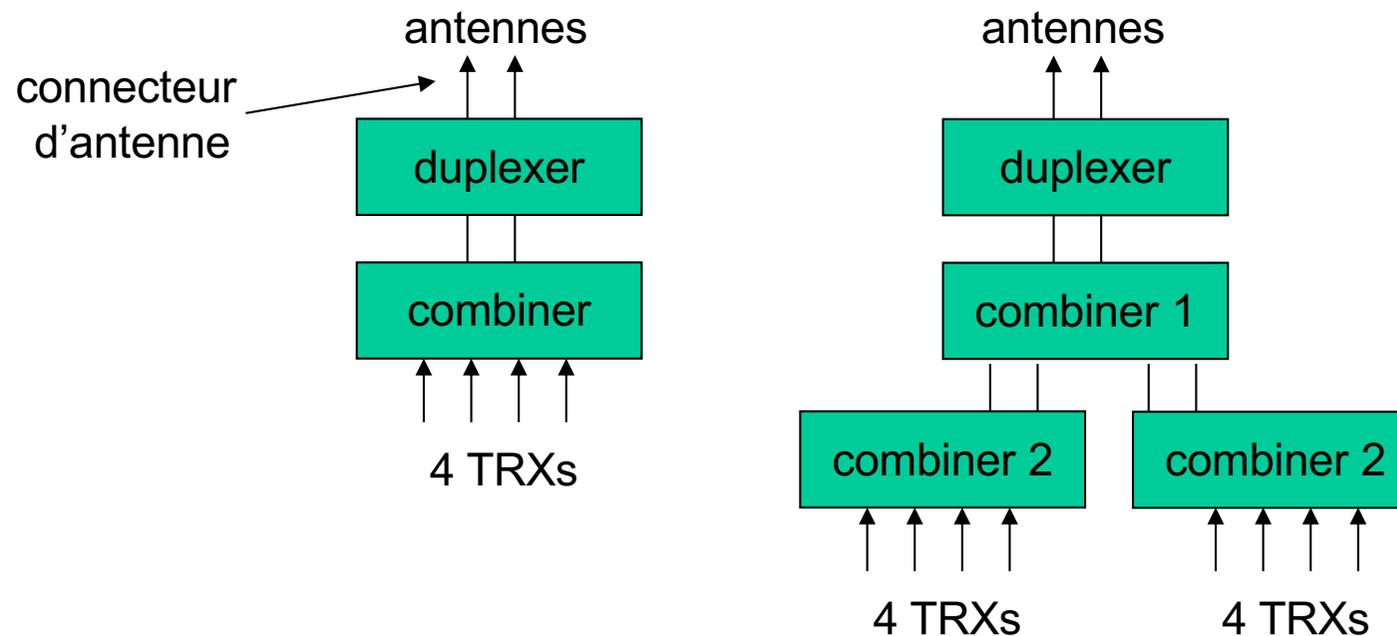
- **Pertes câbles** : feeder, jumper, connecteur
- Le système feeder est l'interface entre l'antenne et la BS.
- **Le feeder** est un gros câble rigide dont l'atténuation dépend du type, de la longueur et de la bande de fréquence.  
Exemple : LCF 7/8" 900 MHz 3.7dB/100m
- **Le jumper** est un câble souple qui est utilisé aux extrémités du feeder. Ses pertes sont plus importantes.  
Exemple : 0.15dB/1m
- **Les connecteurs** qui relient des câbles ensemble introduisent des pertes supplémentaires.
- D'autres composants peuvent intervenir en cas de partage de feeder (perte diplexer) ou de co-sitage (filtres).



# Concepts de base

## Pertes câble

- **Duplexer** : permet de combiner/séparer émission et réception sur une même bande de fréquence.
- **Combiner** : permet de combiner/séparer plusieurs fréquences d'une même bande de fréquences.

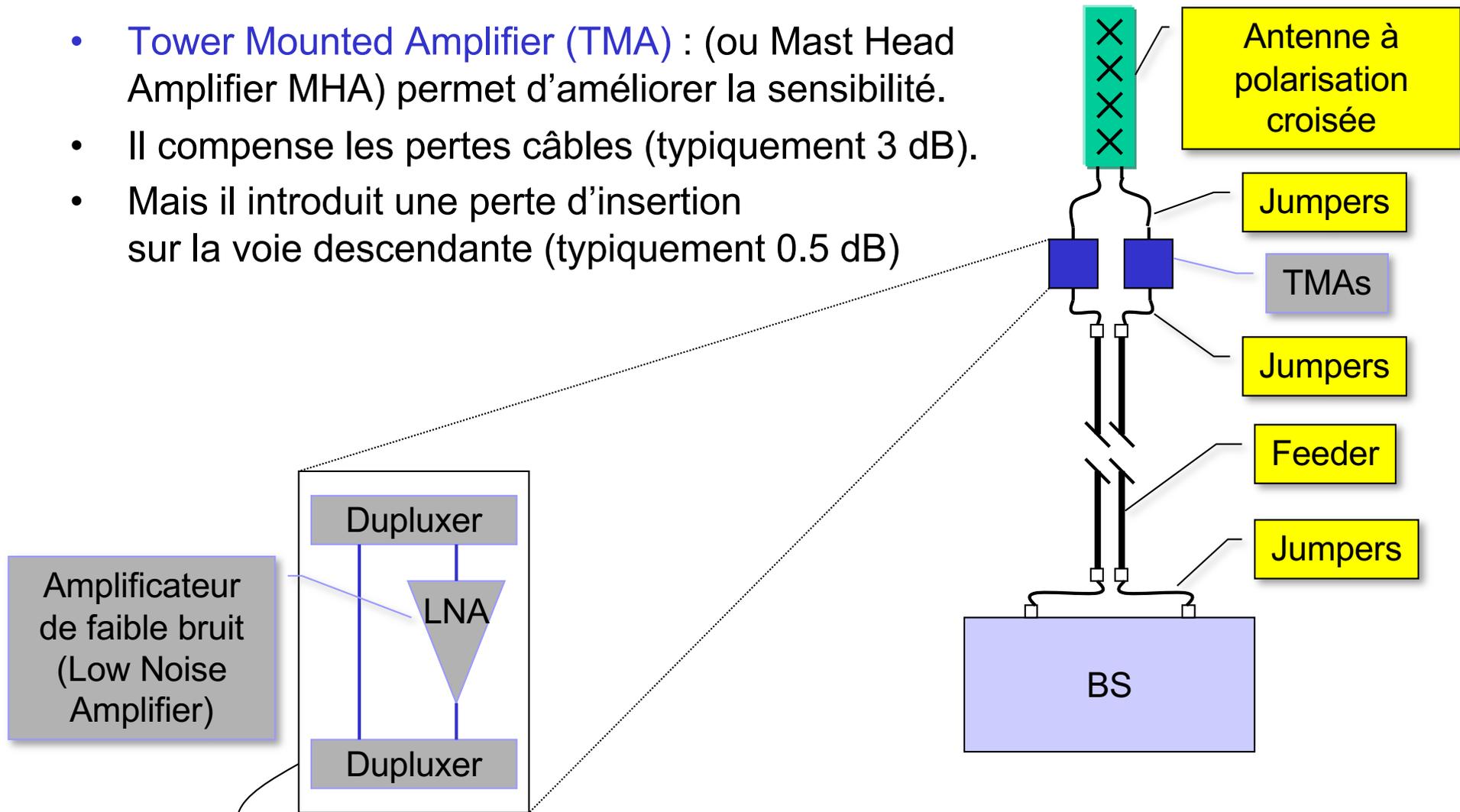


TRX = Chaîne de transmission - réception

# Concepts de base

## Pertes câble

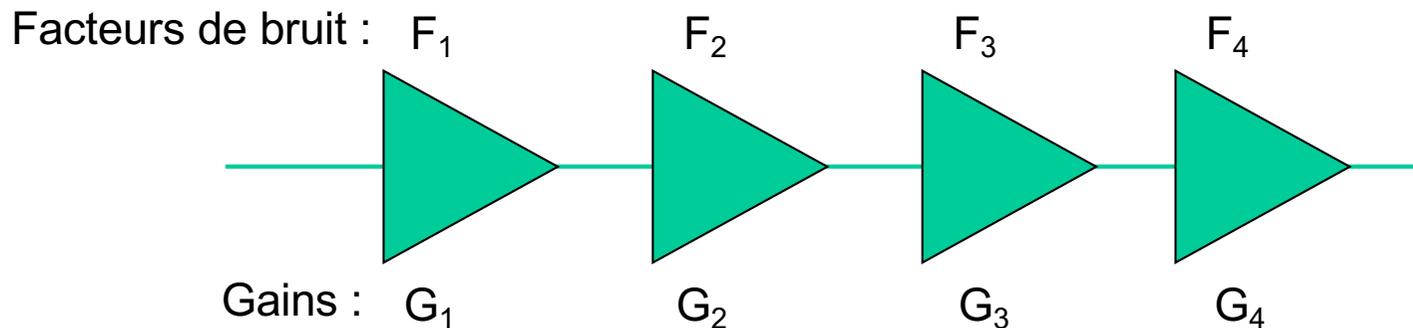
- **Tower Mounted Amplifier (TMA)** : (ou Mast Head Amplifier MHA) permet d'améliorer la sensibilité.
- Il compense les pertes câbles (typiquement 3 dB).
- Mais il introduit une perte d'insertion sur la voie descendante (typiquement 0.5 dB)



[Laiho02] alimentation

- Réduction du facteur de bruit : Le facteur de bruit global d'une cascade de composants actifs ou passifs est donné par la **formule de Friis** :

$$NF = NF_1 + \frac{NF_2 - 1}{G_1} + \frac{NF_3 - 1}{G_1 G_2} + \frac{NF_4 - 1}{G_1 G_2 G_3} + \dots$$



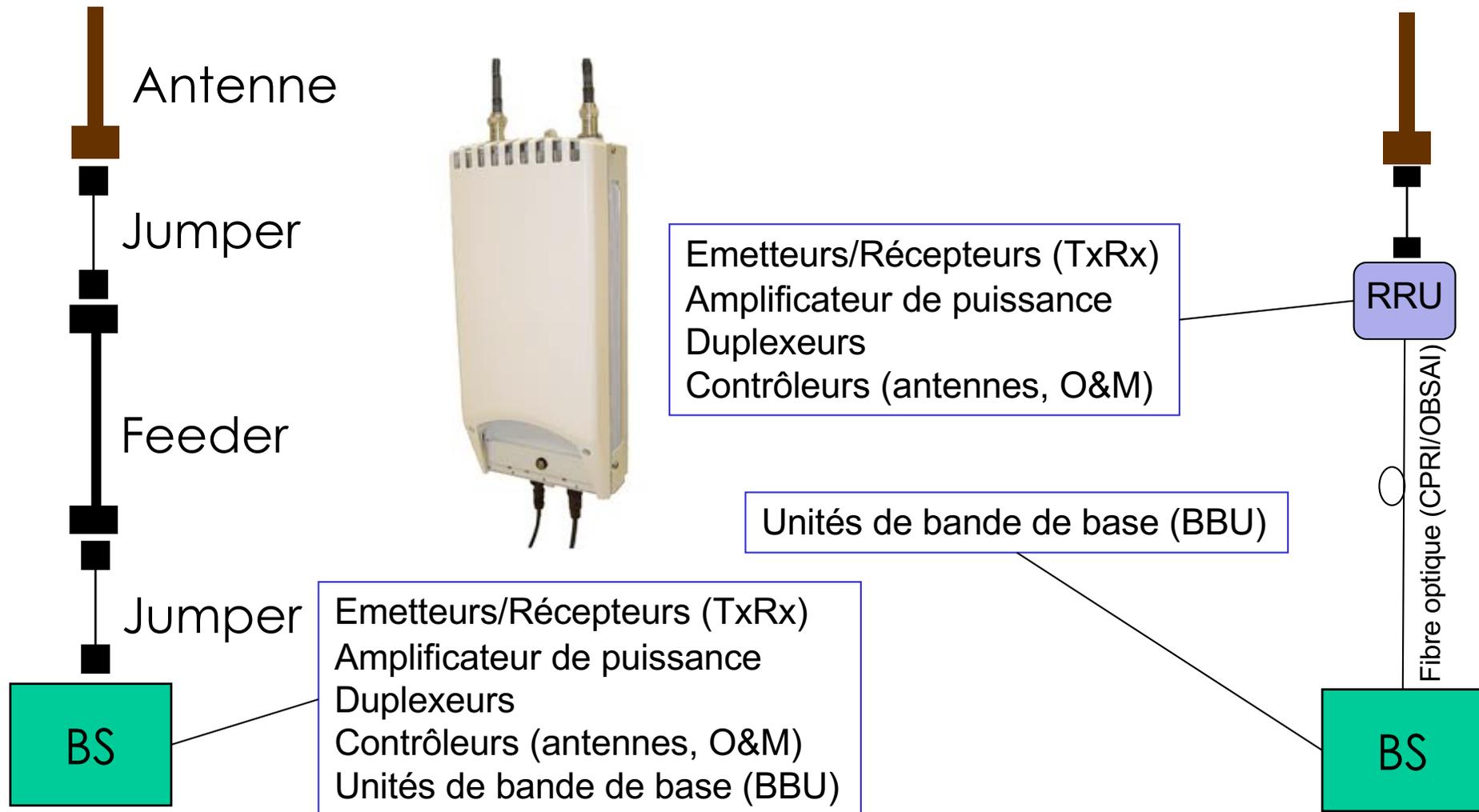
- Le nombre d'étages dépend de l'architecture du site
- Typiquement : TMA – Feeder – Connecteurs – BS si on néglige les jumpers
- L'impact du TMA est souvent modélisé par la suppression des pertes câbles et connecteurs sur la voie montante : intéressant pour les antennes hautes

- Exemple de calcul du facteur de bruit :
  - NB : les composants passifs ont un facteur de bruit égal à leur perte
  - Gain typique d'un TMA : 12dB
  - Facteur de bruit typique d'un TMA : 2dB

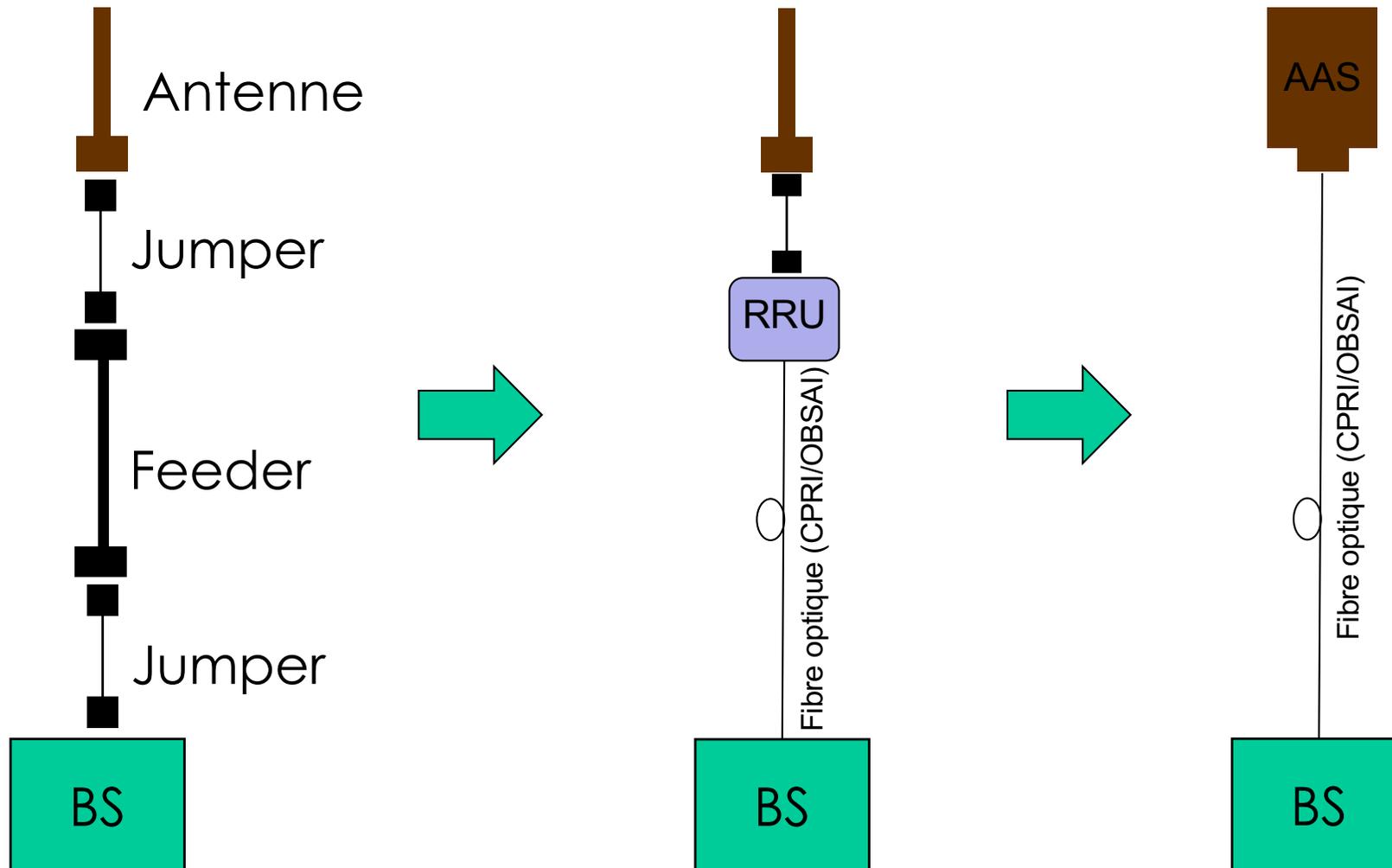
Élément	Gain	Facteur de bruit
TMA	12dB	2dB
Feeder	-2dB	2dB
Connecteurs	-0.3dB	0.3dB
BS	-	3dB

- Sans TMA : NF = 5.3dB
- Avec TMA : NF = 2.4dB
- Gain apporté par le TMA : 2.9dB

- RRU (Remote Radio Unit) ou RRH (Remote Radio Head) : permet de déporter certaines fonctions de la BS dans un module proche de l'antenne

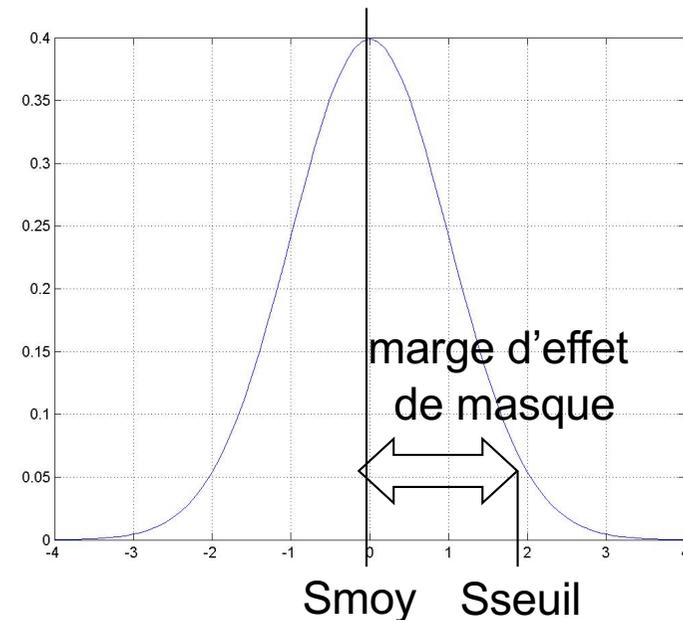


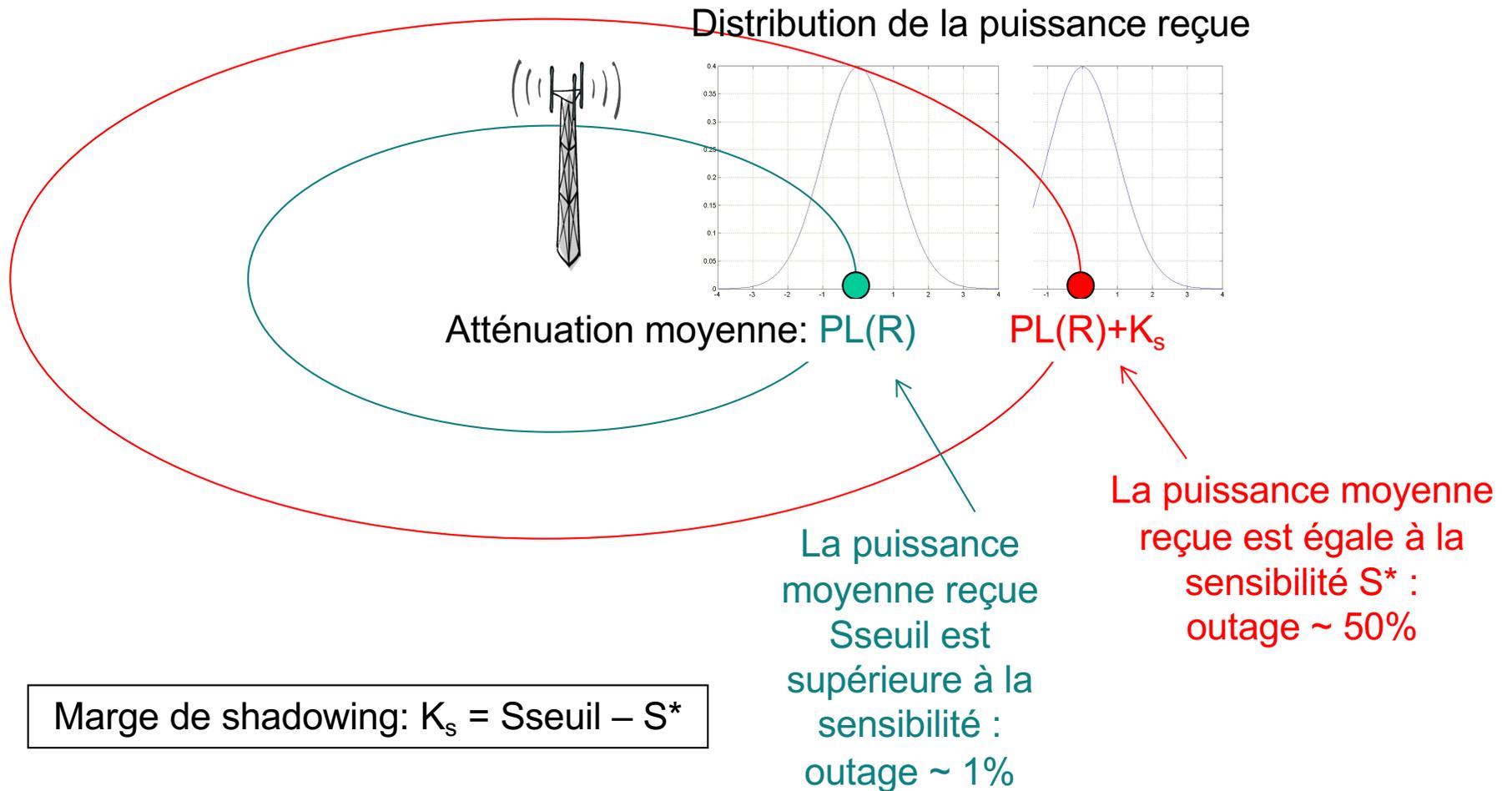
- Les évolutions de l'architecture de site. Avec antennes actives (Active Antenna System AAS), les amplificateurs de puissance sont intégrés à l'antenne.



- **Principales marges :**
  - Marge de l'effet de masque (*shadowing*)
  - Marge des évanouissements rapides (*fast fading*, pour l'UMTS)
  - Marge de pénétration dans les bâtiments
  - Marge d'interférence
  - Pertes dues au corps humain
  
- **Pertes dues au corps humain :** pertes introduites par la tête de l'utilisateur quand il téléphone. La valeur recommandée est 3 dB [GSM03.30]. 0dB pour la visiophonie ou les services de données.

- **Marge d'effet de masque :**
- L'effet de masque est modélisé par une loi log-normale ; la marge d'effet de masque assure un niveau de signal dans toute la cellule avec une probabilité de 90% - 95%.
- La marge d'effet de masque dépend de l'écart-type de la loi log-normale.
- L'écart-type dépend de l'environnement :
  - proche de 8 dB en milieu urbain dense,
  - proche de 6 dB en milieu rural.
- Deux approches :
  - sur l'ensemble de la cellule,
  - en bordure de cellule.





- L'effet de masque (en dB) est modélisé par une loi **log normale** (de moyenne nulle et d'écart type  $\sigma$  caractéristique de l'environnement)
  - On veut s'assurer une couverture à  $(1-P_{out})\%$  de la cellule
  - ou alternativement une couverture à  $(1-P_{out})\%$  en bordure de cellule
  - Dans les zones urbaines,  $(1-P_{out})=95\%$  ou plus
  - Dans les zones rurales,  $(1-P_{out})=90\%$  ou plus
- **Modèle** de propagation
  - L'atténuation du signal en dB suit une loi Gaussienne
  - de moyenne :  $A+B\log(r)$
  - de variance :  $\sigma^2$

$$Att(r) = PL(r) + s = A + B\log(r) + s$$
$$E[Att] = A + B\log(r)$$
$$E[Att^2] = \sigma^2$$

- On cherche la marge de *shadowing*  $K_s$
- On calcule la probabilité de dépasser cette marge à une distance  $r$

$$Q(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_x^{+\infty} e^{-t^2/2} dt$$

$$Q(x) = \frac{1}{2} \operatorname{erfc}(x/\sqrt{2})$$

Atténuation en  $r$

Atténuation provoquant  
un *outage*

$$\begin{aligned} P_{out}(r) &= \Pr(s + PL(r) > PL(R) + K_s) \\ &= \Pr(s > K_s - B \log(r/R)) \\ &= \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{\frac{K_s - B \log(r/R)}{\sigma}}^{+\infty} e^{-t^2/2} dt \\ &= Q\left(\frac{K_s - B \log(r/R)}{\sigma}\right) \end{aligned}$$

- En **bordure** de cellule :  $r=R$

$$P_{out}(R) = Q\left(\frac{K_s}{\sigma}\right) \quad (\text{Formule de Jakes})$$

- Avec une contrainte de 90% de couverture en bordure de cellule ( $P_{out}(R)=0.1$ ) et  $\sigma=8\text{dB}$ , la marge est de 7.8dB

- Pour éviter l'**effet ping-pong**, l'UE peut quitter la cellule au-delà du rayon  $R$ ,  $r=aR$  :

$$P_{out}(aR) = Q\left(\frac{K_s - B \log(a)}{\sigma}\right)$$

- Exemple : avec  $a=1.1$  et  $B=35$ , la marge doit être de 9.3dB
- En **moyenne** sur la cellule :

$$\bar{P}_{out} = \frac{1}{\pi R^2} \int_0^R P_{out}(r) 2\pi r dr$$

$$\bar{P}_{out} = 2 \int_0^1 Q\left(\frac{K_s - B \log(t)}{\sigma}\right) t dt$$

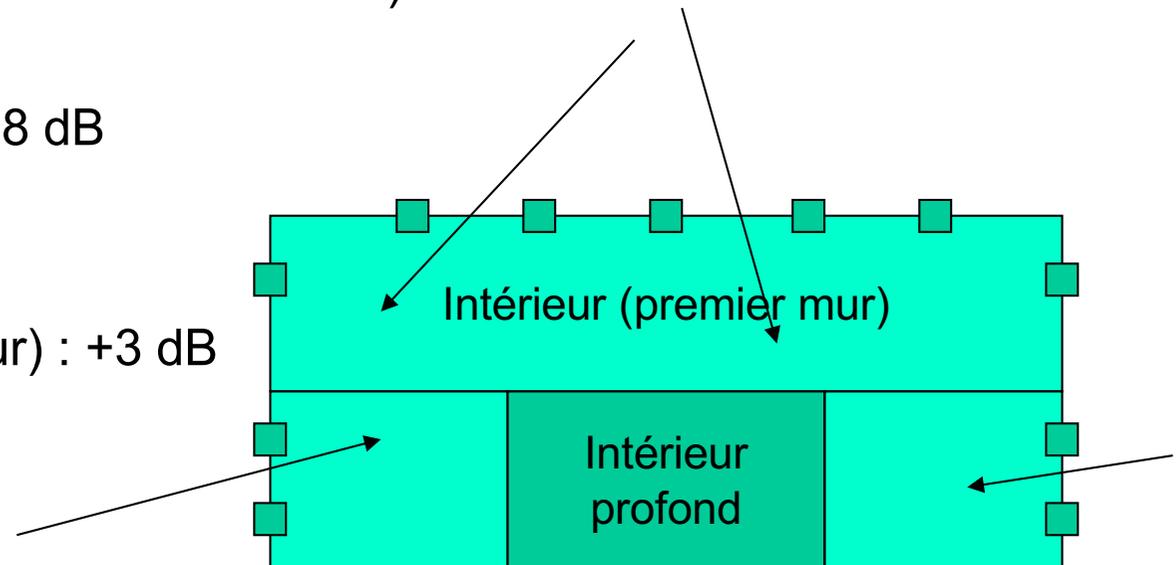
- Calcul de la marge de shadowing avec la formule de Jakes :

$$K_s = \sigma Q^{-1}(P_{out})$$

- Avec :

1-Pout	Marge [dB] / sigma [dB]	$\frac{K_s [\text{dB}]}{\sigma [\text{dB}]}$
0,9	1,28	
0,95	1,64	
0,99	2,33	

- **Marges de pénétration** : pertes dues à la traversée des murs, vitres ou parois ; à prendre en compte si l'on désire couvrir l'intérieur des bâtiments ou des voitures.
- Voiture sans kit : ~ 7 dB
- Voiture avec kit : 0 dB (l'antenne est sur le toit)
- Intérieur (premier mur) :
  - milieu urbain dense : ~ 18 dB
  - milieu urbain : ~ 15 dB
  - milieu rural : ~ 10-12 dB
- Intérieur profond (second mur) : +3 dB  
*deep indoor*



- **Marge d'interférence** : le bilan de liaison est fondée sur le calcul d'une sensibilité en présence de bruit. Pour prendre en compte l'interférence co-canal, on ajoute une marge d'interférence. On peut soit utiliser une valeur typique (3dB) ou bien faire des simulation systèmes (Monte Carlo).
- GSM/LTE/NR : valeur typique ou simulations systèmes
- UMTS : une approche différente car la marge d'interférence dépend de la charge à cause de l'interférence intra-cellulaire.

- **Marge d'interférence** : le cas GSM/LTE/NR.
- Soit  $S_0$  la sensibilité en absence d'interférences, i.e. la puissance reçue minimale pour atteindre un seuil de SNR,  $G_0$ .  
C'est  $S_0$  qui apparaît dans le bilan de liaison.
- Soit  $S_1$  la sensibilité en présence d'interférences, i.e. la puissance reçue minimale pour atteindre le même seuil mais en considérant les interférences.
- Prendre en compte les interférences revient à augmenter la sensibilité d'une valeur égale à la marge d'interférence.
- Marge d'interférence typique : 3 dB

- En absence d'interférence :

$$G_0 = \frac{S_0}{N}$$

- En présence d'interférence (le seuil  $G_0$  est identique) :

$$G_0 = \frac{S_1}{N + I} = \frac{S_1}{N} \times \frac{N}{N + I}$$

- En dB :  $G_0[dB] = S_1[dB] - N[dB] - 10 \log \frac{N + I}{N}$

- D'où :

$$S_1[dB] = S_0[dB] + \underbrace{10 \log \frac{N + I}{N}}_{\text{Marge d'interférence}}$$

# Bilan de liaison GSM

## Approche



	Voie montante	Voie descendante	
<b>Réception</b>	Sensibilité [dBm]	PRX_BTS	PRX_MS
	Gain de diversité d'antenne [dB]	GAD	
	Pertes câbles [dB]	Lcables	
	Gain TMA [dB]	GTMA	
	Gain antenne de réception [dBi]	Gr	
<b>Puissance isotropique [dBm]</b>	$Piso = PRX\_BTS - GAD + Lcables - GTMA - Gr$		
<b>Transmission</b>	Puissance d'émission [dBm]	PTX_MS	PTX_BTS
	Pertes câbles [dB]		Lcables
	Pertes d'insertion TMA [dB]		LTMA
	Gain antenne de transmission [dBi]		Ge
	<b>PIRE [dBm]</b>	$Pireul = PTX\_MS$	$Piredl = PTX\_BTS - Lcables - LTMA + Ge$
<b>Marges</b>	Marge d'effet de masque [dB]	Msf	Msf
	Marge d'interférence [dB]	Mif	Mif
	Pertes dues au corps [dB]	Mc	Mc
	Marge de pénétration [dB]	Mp	Mp
	<b>Total marges [dB]</b>	$Mul = Msf + Mif + Mc + Mp$	$Mdl = Msf + Mif + Mc + Mp$
<b>MAPL [dB]</b>	$MAPLul = Pireul - Piso - Mul$	$MAPLdl = Piredl - Piso - Mdl$	

# Bilan de liaison GSM

## Approche

- Exercice :

Voie montante
Milieu urbain
900 MHz
Sensibilité = -110 dBm
2 antennes de réception
50 m de feeder LCF 7/8 ”
2 jumpers de 1 m chacun
Pas de TMA
MS class 4
Sigma = 7.6dB, couverture à 95%
Couverture de l'intérieur des bâtiments
Affaiblissement de parcours = $A+B\log(d[\text{Km}])$
$A=122$ dB et $B=34$ (exposant d'affaiblissement = 3.4)

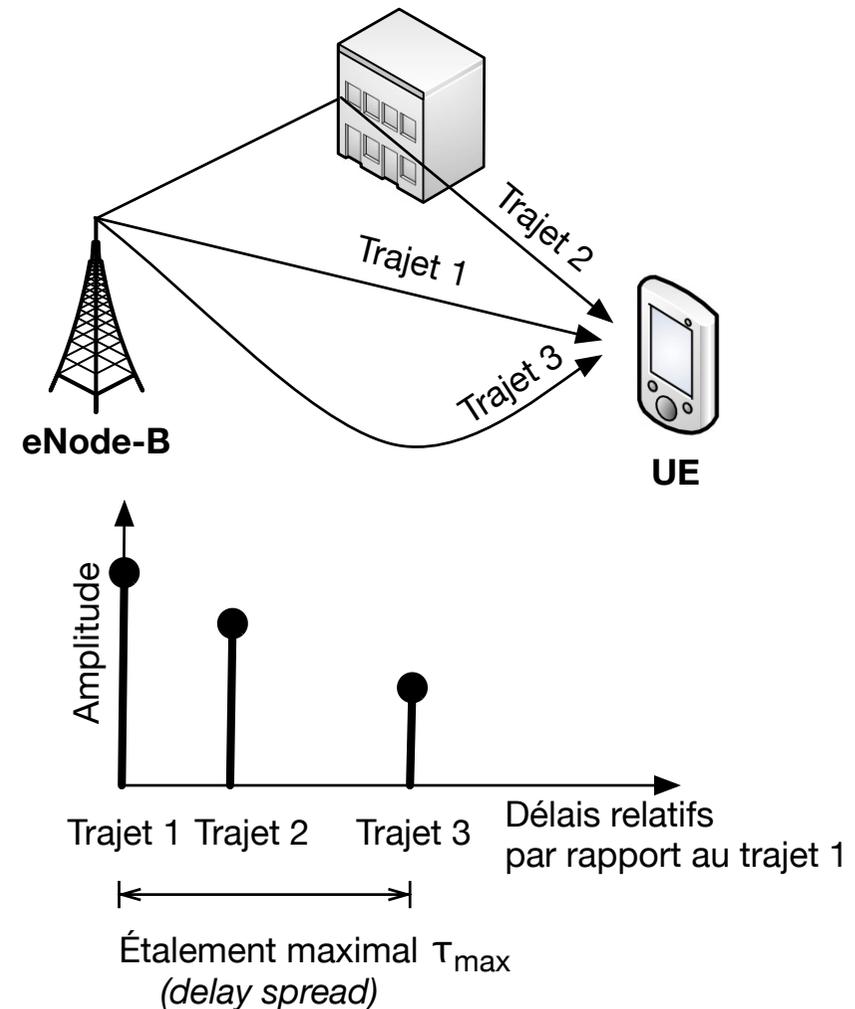
- **Puissance du mobile** : elle dépend de la classe du mobile et de la fréquence.
- Puissances typiques :
  - 850/900 MHz, Mobile power class=4 : 33dBm
  - 1800/1900 MHz, Mobile power class=1 : 30dBm
- On considère en général que le gain de l'antenne du mobile est 0dBi. Pour un kit de voiture, on peut supposer 2dBi.
- Aucune perte de câble n'est considérée pour un mobile (sauf si on considère un kit de voiture).

<b>Classe</b>	<b>GSM 900</b>	<b>DCS 1800</b>
1	-	<b>30 dBm</b>
2	39 dBm	24 dBm
3	37 dBm	36 dBm
4	<b>33 dBm</b>	-
5	29 dBm	-

[45.005]

- **Sensibilité** : puissance minimale de réception en présence de bruit.
- Remarque 1 : l'interférence n'est pas prise en compte.
- Remarque 2 : la sensibilité dépend de la qualité de la chaîne de réception. Elle peut être calculée en statique (les mobiles sont statiques !) ou en dynamique (modèle de canal : TU50) [GSM05.05].
- Valeur typique BTS : -110dBm, la norme [GSM05.05] requière -104dBm.
- Valeur typique MS : -102dBm [GSM05.05]
- Les constructeurs peuvent se différencier sur cette valeur.

- **Rappel** : canaux à évanouissements rapides multi-trajets (*fast fading*)
- Un canal est caractérisé par :
  - Le nombre de chemins
  - Leurs délais respectifs
  - Leurs puissances moyennes
  - La vitesse du mobile  
(c.-à-d. le spectre Doppler)
- L'amplitude des chemins suit une loi de Rayleigh (NLOS) ou de Rice (LOS)



- En GSM, la norme a défini trois types de canaux :
  - TUX = Typical Urban X Km/h (par exemple TU50 est pour 50Km/h)
  - RAX = Rural Area X Km/h
  - HTX = Hilly Terrain X Km/h

- Exemple : TUX

Chemin	Délai relatif ( $\mu\text{s}$ )	Puissance relative (dB)
1	0	0
2	0,1	-4
3	0,2	-8
4	0,3	-12
5	0,4	-16
6	0,5	-20

- Performances requises en GSM 900 (BER) sur le canal TCH :

	Statique	TU50	RA250	HT100
[45.005]	$10^{-5}$	2.5%	2%	5%

- En GSM, on ne prend pas généralement de marge supplémentaire pour les évanouissements rapides (*fast fading*) comme on le fait en UMTS. Les évanouissements rapides en effet pris en compte dans la valeur de la sensibilité du récepteur.

# Bilan de liaison GSM

## Rayons de cellule typiques

---

	GSM 900	GSM 1800
Urbain dense	1 km	500 m
Urbain	1.5 km	1 km
Suburbain	3 km	2 km
Rural	9 km	7 km

NB: Ordres de grandeur

NB : la norme permet un rayon de cellule de 35 Km

---

# Bilan de liaison LTE

## Paramètres généraux



- **Bandes d'opération** : la norme a défini de nombreuses bandes de fréquences pour le mode FDD (autour de 700, 800, 900, 1400, 1800, 2100, 2600 MHz).
  - Bandes typiques en Europe : 800, 1800, 2100, 2600 MHz
  - Bandes typiques aux Etats-Unis : 700, 1700, 2100 MHz
- **Largeurs de bande** : les ressources radio sont organisées en PRB (Physical Radio Block) constitués de 12 sous-porteuses de 15 KHz et de 7 symboles OFDM/SC-FDMA.

Largeur de bande	1,4 MHz	3 MHz	5 MHz	10 MHz	15 MHz	20 MHz
Sous-porteuses	72	180	300	600	900	1200
PRB	6	15	25	50	75	100

# Bilan de liaison LTE

## Paramètres généraux

---



- **Modes de transmission** : il y a 7 modes de transmission
  - TM1 : SIMO (unique port d'antenne)
  - TM2 : MIMO/TxDiv (diversité en transmission)
  - TM3 : MIMO/SM-OL (multiplexage spatial en boucle ouverte)
  - TM4 : MIMO/SM-CL (multiplexage spatial en boucle fermée)
  - TM5 : MU-MIMO (MIMO multi-utilisateur)
  - TM6 : Beamforming CL (formation de faisceaux en boucle fermée)
  - TM7 : Beamforming (formation de faisceaux)
- Les modes de transmission TM3 à TM6 nécessitent de bonnes conditions radio. TM7 n'est pas toujours disponible.
- Les modes TM1 et TM2 sont les solutions de repli à considérer dans le bilan de liaison.
- La diversité en transmission apporte un gain typique de 3dB.
- Si deux amplificateurs de puissance sont utilisés, on a un gain supplémentaire de 3dB.

- **Correspondance débit vs. SNR** : on cherche à atteindre un débit cible en bordure de cellule. Le lien entre débit et SNR peut être obtenu selon les deux étapes suivantes :
  - **Simulations de niveau lien** : on fixe un BLER cible (par exemple 10%), on simule les chaînes de transmission et de réception pour différentes modulations et taux de codage, on déduit le lien débit vs. SNR.
  - **Formule de Shannon approchée** : on cherche une approximation de la courbe débit vs. SINR (obtenue par simulations) de la forme :

$$C = \alpha W \log_2 \left( 1 + \frac{SNR}{\beta} \right)$$

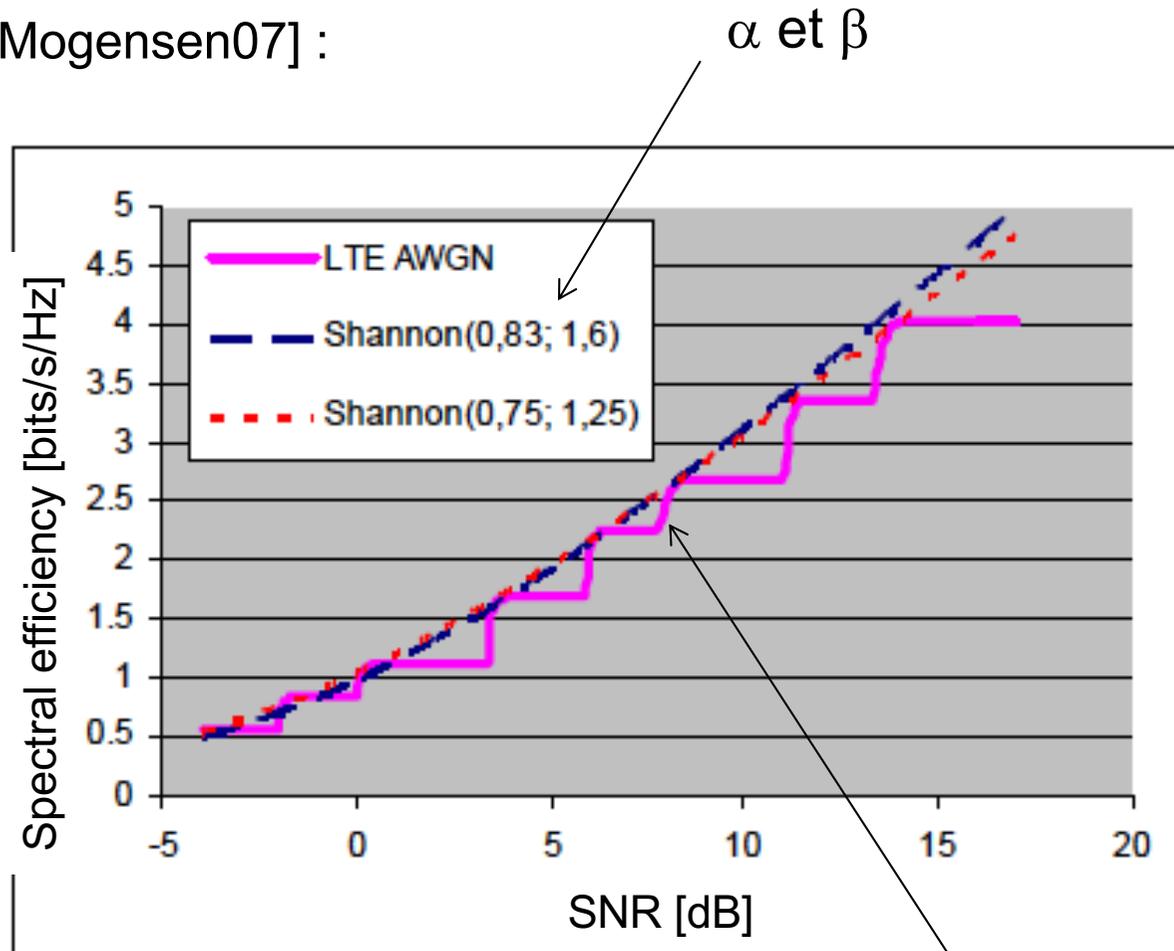
Ou de la forme :

$$C = \begin{cases} 0 & \text{si } SNR < SNR_{min} \\ \alpha W \log_2(1 + SNR) & \text{si } SNR_{min} \leq SNR \leq SNR_{max} \\ C_{max} & \text{si } SNR > SNR_{max} \end{cases}$$

# Bilan de liaison LTE

## Paramètres généraux

- Exemple 1 [Mogensen07] :



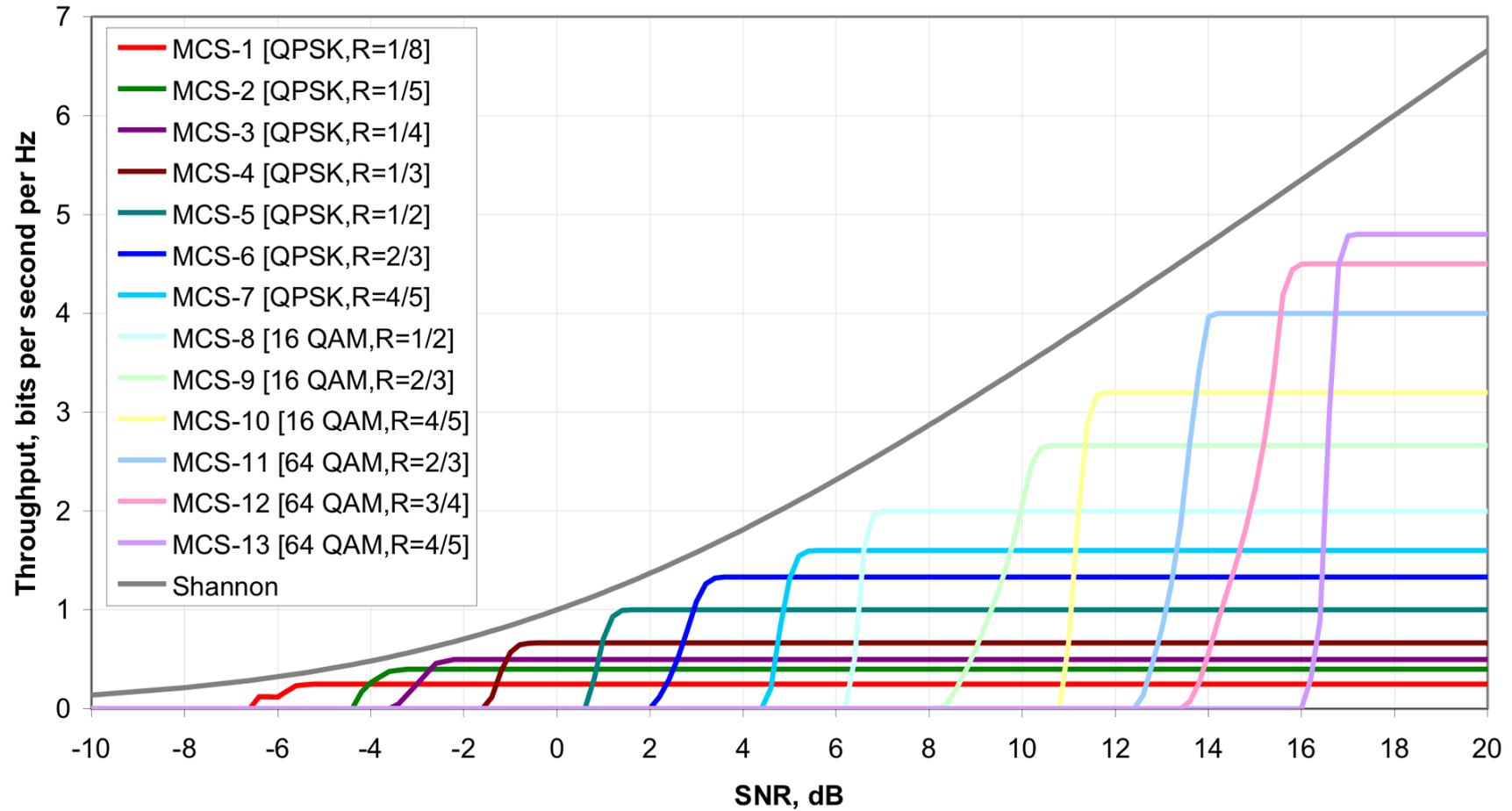
Voie descendante, TU10

QPSK: 1/6, 1/3, 1/2, 2/3
16QAM: 1/2, 2/3, 3/4
64QAM: 1/2, 2/3, 3/4, 4/5

# Bilan de liaison LTE

## Paramètres généraux

- Exemple 2 [36.942] :

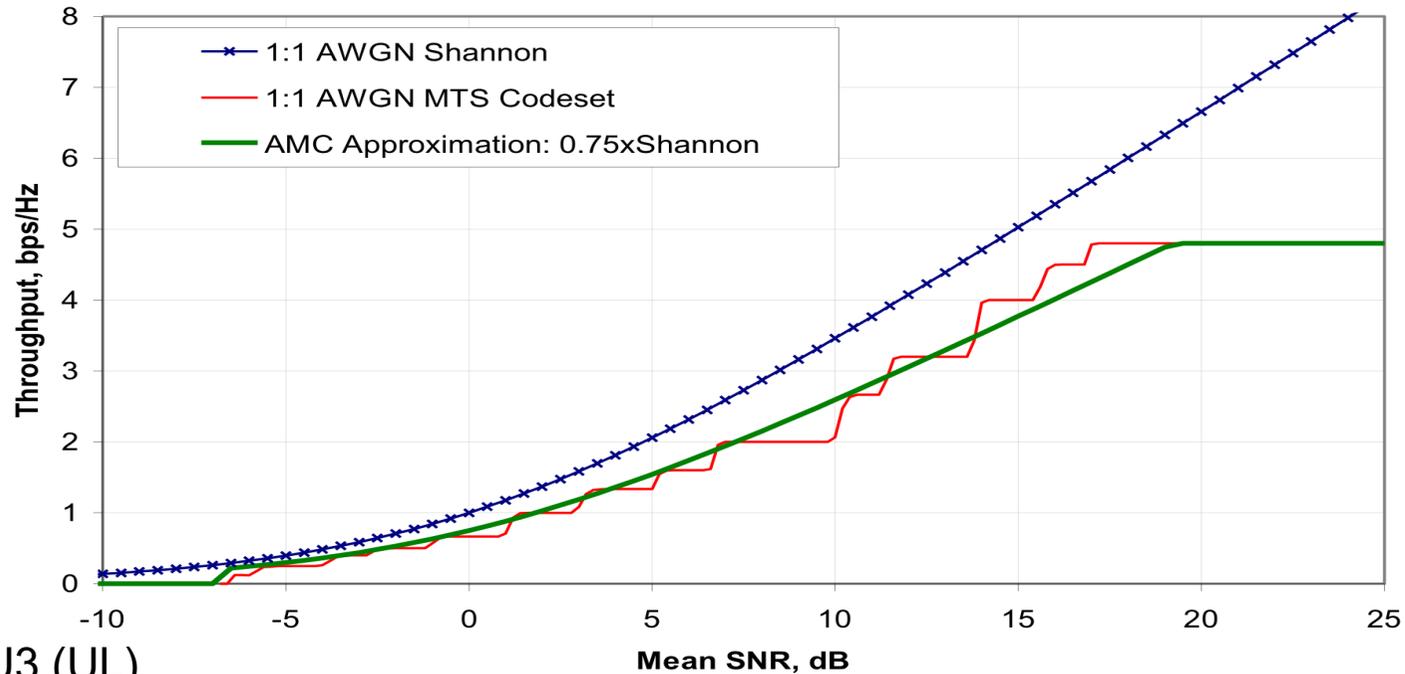


[36.942] TU10 (DL)

# Bilan de liaison LTE

## Paramètres généraux

- Exemple 2 [36.942] :



TU10 (DL), TU3 (UL)

	DL	UL	Note
$\alpha$	0,6	0,4	Perte d'implémentation
SNRmin	-10 dB	-10 dB	QPSK 1/8 (DL) 1/5 (UL)
SNRmax	22 dB	15 dB	64QAM 4/5 (DL)
Cmax/W	4,4 bits/s/Hz	2,0 bits/s/Hz	16QAM 3/4 (UL)

# Bilan de liaison LTE

## Paramètres généraux

---

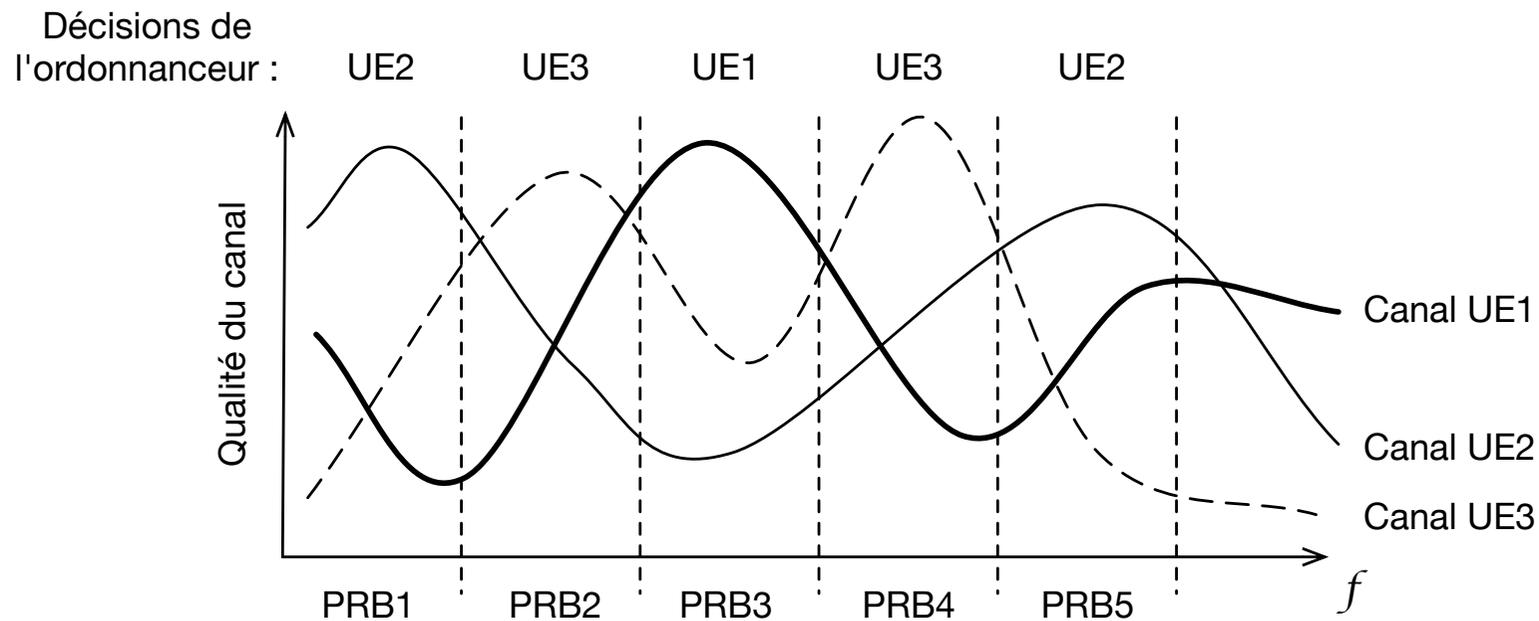


- Modèles de canaux à évanouissement : la norme a défini 3 nouveaux types de canaux [36.104]
  - Enhanced Typical Urban (**ETU**) : 9 chemins, étalement temporel important, environnement urbain et grandes cellules
  - Enhanced Vehicular A (**EVA**) : 9 chemins, étalement temporel intermédiaire, environnement urbain et grandes cellules
  - Enhanced Pedestrian A (**EPA**) : 7 chemins, étalement temporel faible, environnements intérieur et petites cellules

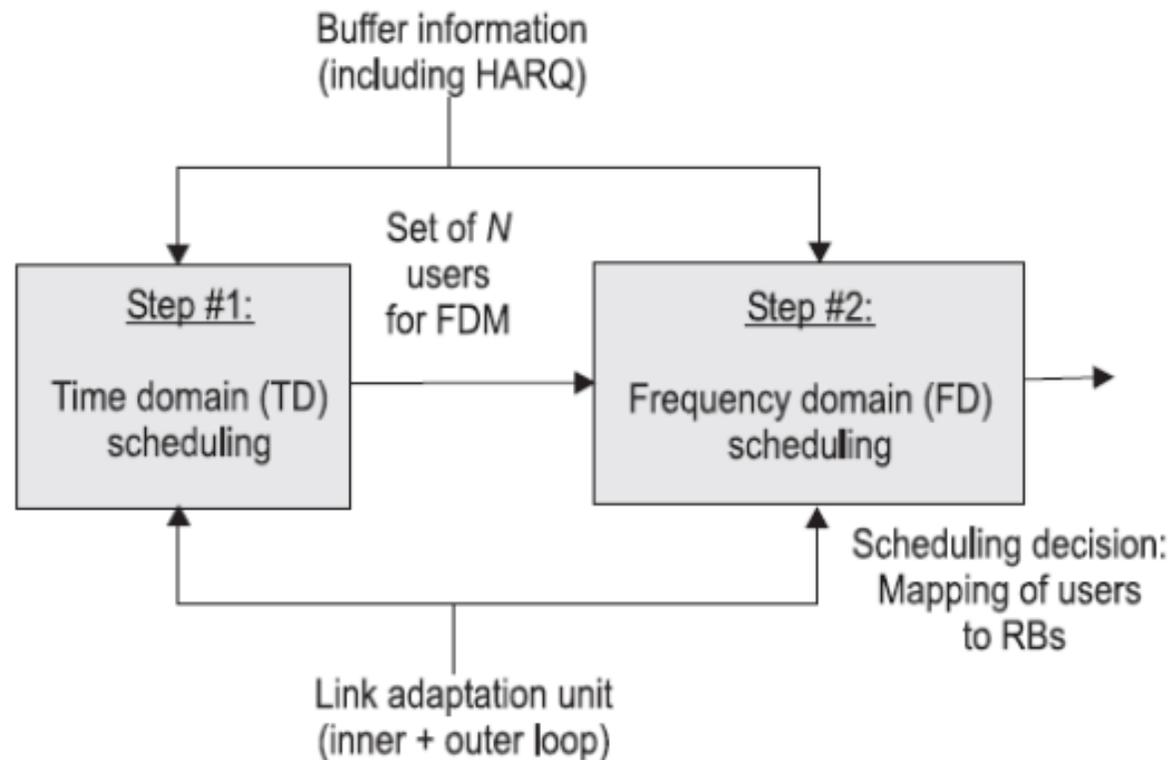
# Bilan de liaison LTE

## Paramètres généraux

- **Ordonnancement** : il est responsable de l'allocation dynamique des ressources radio aux UE dans les domaines fréquentiel et temporel.
- Prendre en compte l'état du canal dans ces deux domaines permet d'accroître les performances.
- Principe de l'ordonnancement dans le domaine fréquentiel :



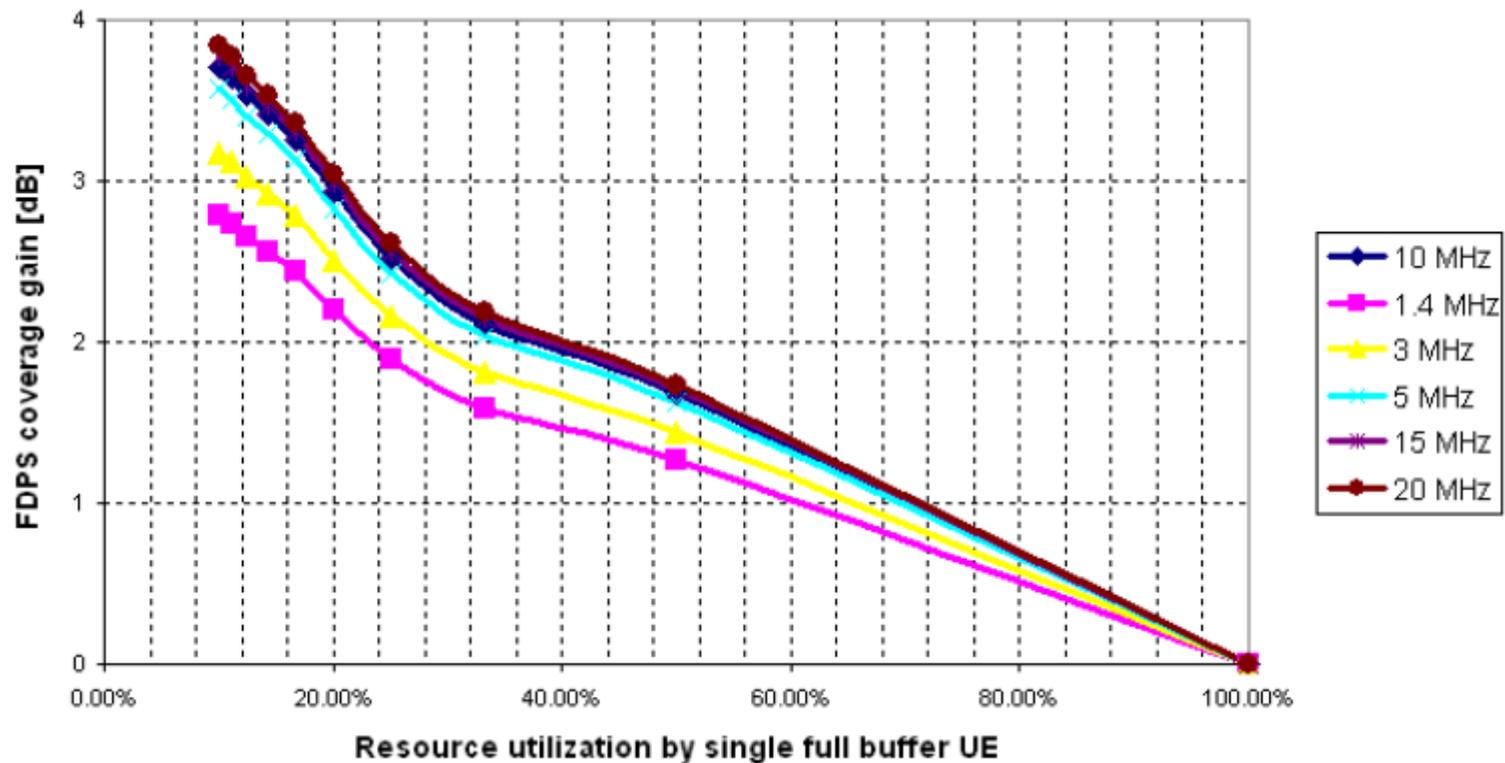
- Principe d'un ordonnanceur [NSN11] prenant en compte les variations du canal :
  - La partie TD sélectionne  $N$  utilisateurs en fonction des contraintes de délai, de la taille des mémoires, des retransmissions, etc.
  - La partie FD alloue les RBs selon un critère PF (Proportional Fairness).



# Bilan de liaison LTE

## Paramètres généraux

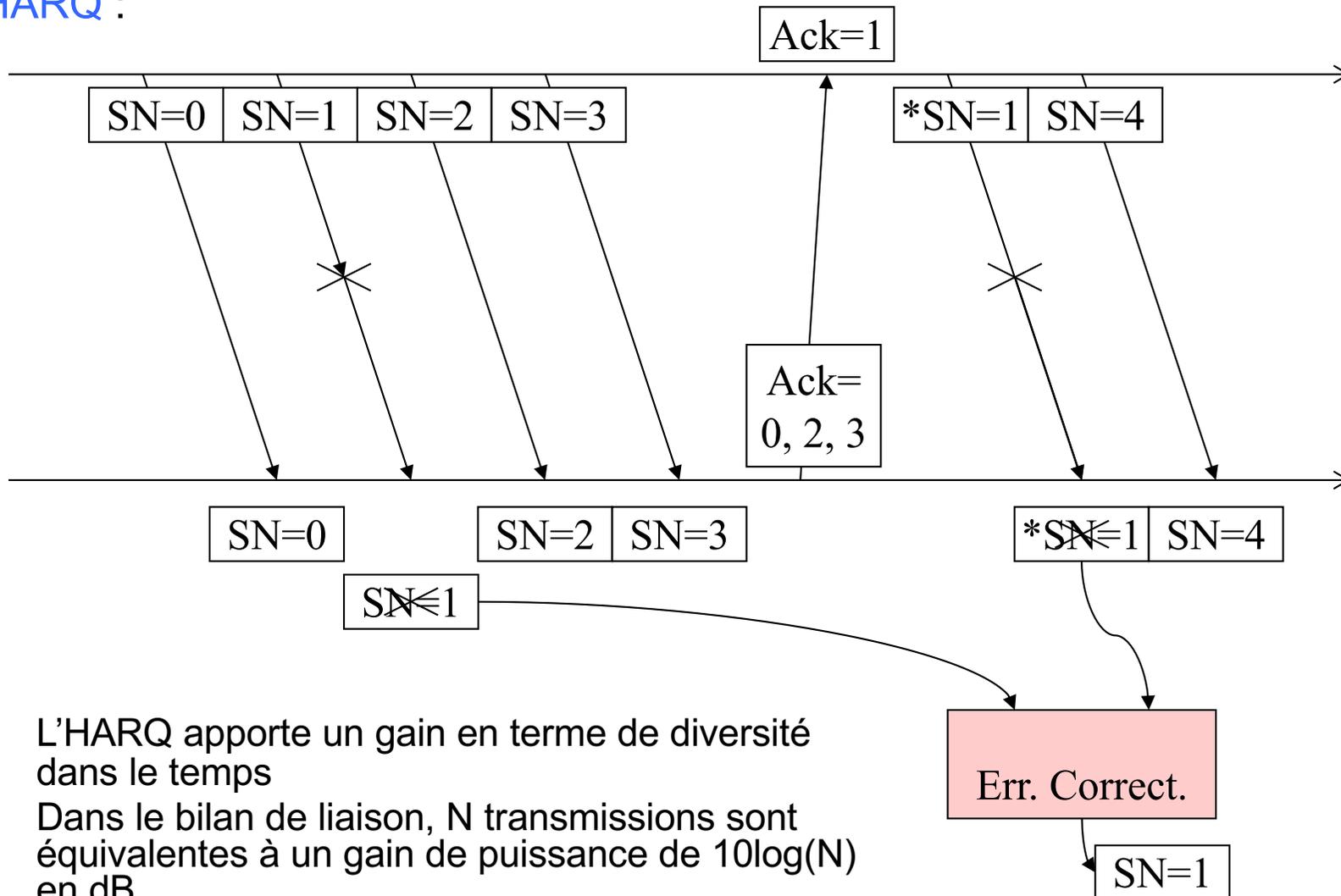
- Exemples [NSN11] de gains obtenus avec FDPS sur la méthode Round Robin (RR).
- Les gains sont plus importants quand :
  - La bande est grande
  - Le nombre d'utilisateurs est grand



# Bilan de liaison LTE

## Paramètres généraux

- HARQ :



- L'HARQ apporte un gain en terme de diversité dans le temps
- Dans le bilan de liaison, N transmissions sont équivalentes à un gain de puissance de  $10\log(N)$  en dB.

# Bilan de liaison LTE

## Voie descendante

Paramètres	
Débit en bordure de cellule [Mbps]	1,0
Fréquence porteuse [MHz]	2600,00
Largeur de bande [MHz]	10,00
Paramètre efficacité spectrale 1	1,25
Paramètre efficacité spectrale 2	0,75
Hauteur d'antenne eNB [m]	30,00
Hauteur d'antenne UE [m]	1,50
Fiabilité de la couverture	0,99
Ecart type du shadowing [dB]	8,00
Charge	1,00
Nombre de transmissions HARQ	4,0
Emission	
Puissance d'émission / antenne [dBm]	46,00
Nombre d'antennes de transmission	2,00
Puissance totale eNB [dB]	49,01
Gain d'antenne eNB [dBi]	19,00
Pertes câbles et connecteurs [dB]	1,30
Perte d'insertion du TMA [dB]	0,50
PIRE [dBm]	66,21
Réception	
Required SINR [dB]	-9,17
Densité du bruit thermique [dBm/Hz]	-174,00
Puissance du bruit [dBm]	-104,00
Facteur de bruit UE [dB]	8,00
Gain d'antenne UE [dBi]	0,00
Gain de diversité d'antenne [dB]	3,00
Gain d'ordonnancement [dB]	3,00
Gain HARQ [dB]	6,02
Surcharge protocolaire [%]	29,00
Surcharge protocolaire [dB]	1,49
Sensibilité [dBm]	-109,70
Marges	
SIRmin [dB]	-3,00
Marge d'interférence [dB]	1,20
Marge de shadowing [dB]	18,64
Perte due au corps humain [dB]	0,00
Marge de pénétration [dB]	20,00
Total marges [dB]	39,84
Rayon de cellule	
Affaiblissement maximal [dB]	136,07
Environnement	Suburbain
Hata A	141,65
Hata B	35,22
Correction factor	0,06
Rayon de cellule [Km]	0,70

Débit cible en bordure de cellule

Paramètres efficacité spectrale

Hauteurs d'antenne utilisées par le modèle de propagation

Fiabilité : pour la marge de shadowing et le SIRmin

Ecart-type du shadowing utilisé par la formule de Jakes pour le calcul de la marge de shadowing

Charge = proportion des ressource radio utilisées (utilisée pour le calcul de la marge d'interférence)

Les retransmissions HARQ induisent un gain en diversité

# Bilan de liaison LTE

## Voie descendante

Paramètres	
Débit en bordure de cellule [Mbps]	1,0
Fréquence porteuse [MHz]	2600,00
Largeur de bande [MHz]	10,00
Paramètre efficacité spectrale 1	1,25
Paramètre efficacité spectrale 2	0,75
Hauteur d'antenne eNB [m]	30,00
Hauteur d'antenne UE [m]	1,50
Fiabilité de la couverture	0,99
Ecart type du shadowing [dB]	8,00
Charge	1,00
Nombre de transmissions HARQ	4,0
Emission	
Puissance d'émission / antenne [dBm]	46,00
Nombre d'antennes de transmission	2,00
Puissance totale eNB [dB]	49,01
Gain d'antenne eNB [dBi]	19,00
Pertes câbles et connecteurs [dB]	1,30
Perte d'insertion du TMA [dB]	0,50
PIRE [dBm]	66,21
Réception	
Required SINR [dB]	-9,17
Densité du bruit thermique [dBm/Hz]	-174,00
Puissance du bruit [dBm]	-104,00
Facteur de bruit UE [dB]	8,00
Gain d'antenne UE [dBi]	0,00
Gain de diversité d'antenne [dB]	3,00
Gain d'ordonnancement [dB]	3,00
Gain HARQ [dB]	6,02
Surcharge protocolaire [%]	29,00
Surcharge protocolaire [dB]	1,49
Sensibilité [dBm]	-109,70
Marges	
SIRmin [dB]	-3,00
Marge d'interférence [dB]	1,20
Marge de shadowing [dB]	18,64
Perte due au corps humain [dB]	0,00
Marge de pénétration [dB]	20,00
Total marges [dB]	39,84
Rayon de cellule	
Affaiblissement maximal [dB]	136,07
Environnement	Suburbain
Hata A	141,65
Hata B	35,22
Correction factor	0,06
Rayon de cellule [Km]	0,70

2 antennes d'émission avec diversité en transmission

= Puissance par antenne +  $10\text{Log}(\#\text{antennes})$

Le gain d'antenne dépend de la bande de fréquence et du nombre de secteurs (ici sites tri-sectorisés)

PIRE = Puissance totale + Gain d'antenne – Pertes câbles – Insertion du TMA

# Bilan de liaison LTE

## Voie descendante

Paramètres	
Débit en bordure de cellule [Mbps]	1,0
Fréquence porteuse [MHz]	2600,00
Largeur de bande [MHz]	10,00
Paramètre efficacité spectrale 1	1,25
Paramètre efficacité spectrale 2	0,75
Hauteur d'antenne eNB [m]	30,00
Hauteur d'antenne UE [m]	1,50
Fiabilité de la couverture	0,99
Ecart type du shadowing [dB]	8,00
Charge	1,00
Nombre de transmissions HARQ	4,0
Emission	
Puissance d'émission / antenne [dBm]	46,00
Nombre d'antennes de transmission	2,00
Puissance totale eNB [dB]	49,01
Gain d'antenne eNB [dBi]	19,00
Pertes câbles et connecteurs [dB]	1,30
Perte d'insertion du TMA [dB]	0,50
PIRE [dBm]	66,21
Réception	
Required SINR [dB]	-9,17
Densité du bruit thermique [dBm/Hz]	-174,00
Puissance du bruit [dBm]	-104,00
Facteur de bruit UE [dB]	8,00
Gain d'antenne UE [dBi]	0,00
Gain de diversité d'antenne [dB]	3,00
Gain d'ordonnancement [dB]	3,00
Gain HARQ [dB]	6,02
Surcharge protocolaire [%]	29,00
Surcharge protocolaire [dB]	1,49
Sensibilité [dBm]	-109,70
Marges	
SIRmin [dB]	-3,00
Marge d'interférence [dB]	1,20
Marge de shadowing [dB]	18,64
Perte due au corps humain [dB]	0,00
Marge de pénétration [dB]	20,00
Total marges [dB]	39,84
Rayon de cellule	
Affaiblissement maximal [dB]	136,07
Environnement	Suburbain
Hata A	141,65
Hata B	35,22
Correction factor	0,06
Rayon de cellule [Km]	0,70

SINR obtenu en fonction du débit cible et de la formule de l'efficacité spectrale

En LTE, les UEs ont deux antennes de réception

Valeur typique obtenue par simulation (dépend du nombre d'UEs et de la bande)

Gain HARQ =  $10\text{LOG}(\#\text{transmissions HARQ})$

Surcharge due aux canaux communs

$S = \text{SINR} + N + \text{NF} - \text{Gains} + \text{Surcharge protocolaire}$

- **SINR cible** : on inverse la formule de Shannon approchée donnant l'efficacité spectrale en fonction du SNR.

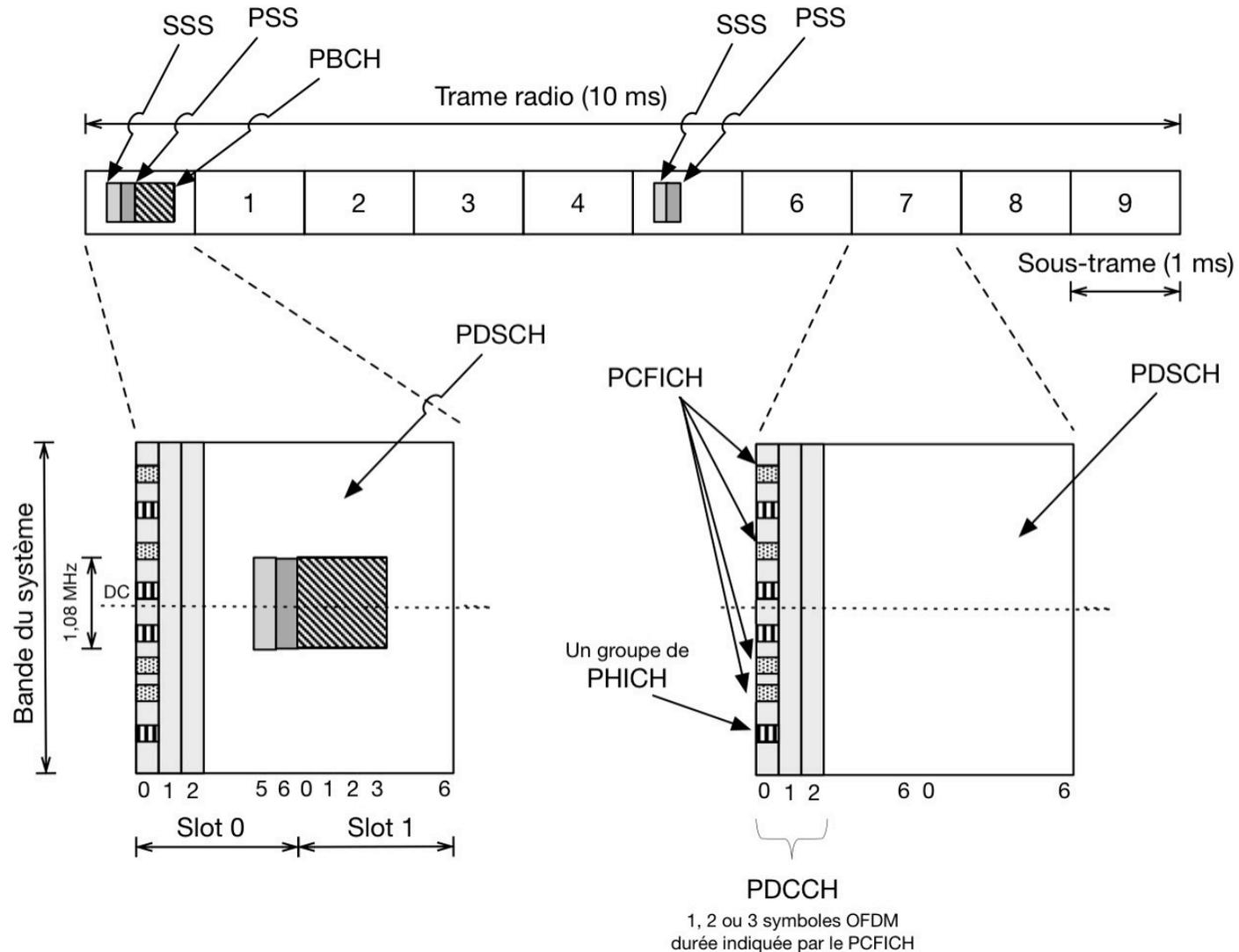
$$SNR_{cible} = 10 \log_{10} \left( \beta \left( 2^{\frac{C_{cible}}{\alpha W}} - 1 \right) \right)$$

- **Surcharge protocolaire** : elle est due à la transmission des PDCCH, SSS/PSS, PBCH et à la transmission des signaux de référence (RS Reference Signals).
  - Plus la largeur de bande est faible, plus la surcharge est importante
  - Ordre de grandeur : 30%
  - Exemple : 30% induit une perte en puissance de  $10\text{LOG}(1-0.3)=-1,5$  dB
- PDCCH : 1, 2, ou 3 (ou 4 pour 1,4 MHz) symboles OFDM par sous-trame
- PBCH : 4 symboles OFDM x 72 sous-porteuses dans le second slot de chaque trame
- SSS/PSS : 4 symboles OFDM x 62 sous-porteuses par trame
- RS : 4 (1 antenne), 8 (2 antennes) ou 12 (4 antennes) RE par RB

# Bilan de liaison LTE

## Voie descendante

- Canaux de contrôle :



# Bilan de liaison LTE

## Voie descendante

---



- Ordres de grandeur :

BW [MHz]	Surcharge DL (%)
1,4	34
3	31
5	30
10	29
15	29
20	29

# Bilan de liaison LTE

## Voie descendante

Paramètres	
Débit en bordure de cellule [Mbps]	1,0
Fréquence porteuse [MHz]	2600,00
Largeur de bande [MHz]	10,00
Paramètre efficacité spectrale 1	1,25
Paramètre efficacité spectrale 2	0,75
Hauteur d'antenne eNB [m]	30,00
Hauteur d'antenne UE [m]	1,50
Fiabilité de la couverture	0,99
Ecart type du shadowing [dB]	8,00
Charge	1,00
Nombre de transmissions HARQ	4,0
Emission	
Puissance d'émission / antenne [dBm]	46,00
Nombre d'antennes de transmission	2,00
Puissance totale eNB [dB]	49,01
Gain d'antenne eNB [dBi]	19,00
Pertes câbles et connecteurs [dB]	1,30
Perte d'insertion du TMA [dB]	0,50
PIRE [dBm]	66,21
Réception	
Required SINR [dB]	-9,17
Densité du bruit thermique [dBm/Hz]	-174,00
Puissance du bruit [dBm]	-104,00
Facteur de bruit UE [dB]	8,00
Gain d'antenne UE [dBi]	0,00
Gain de diversité d'antenne [dB]	3,00
Gain d'ordonnancement [dB]	3,00
Gain HARQ [dB]	6,02
Surcharge protocolaire [%]	29,00
Surcharge protocolaire [dB]	1,49
Sensibilité [dBm]	-109,70
Marges	
SIRmin [dB]	-3,00
Marge d'interférence [dB]	1,20
Marge de shadowing [dB]	18,64
Perte due au corps humain [dB]	0,00
Marge de pénétration [dB]	20,00
Total marges [dB]	39,84
Rayon de cellule	
Affaiblissement maximal [dB]	136,07
Environnement	Suburbain
Hata A	141,65
Hata B	35,22
Correction factor	0,06
Rayon de cellule [Km]	0,70

$$MI = -10\text{LOG}(1 - \text{charge} * \text{SINR} / \text{SIRmin})$$

Formule de Jakes

Marges = MI + Shadowing +  
Corps humain + Penetration

# Bilan de liaison LTE

## Voie descendante



- **Marge d'interférence** : On obtient par simulation le SIRmin en fonction de la fiabilité de couverture requise. On déduit ensuite la marge d'interférence de SIRmin et du SINR cible de la façon suivante :

$$SINR = \frac{S}{\eta I + N} = \frac{1}{\frac{\eta}{SIR} + \frac{1}{SNR}} \quad Pr[SIR \leq SIR_{min}] = P_{out}$$

$$MI = \frac{SNR}{SINR} = \frac{1}{1 - \eta \frac{SINR}{SIR}} \quad Pr[SINR \leq SINR_{cible}] = P_{out}$$

$$SINR = \frac{1}{\eta} \left( 1 - \frac{1}{MI} \right) SIR \quad \text{Si } MI = \frac{1}{1 - \eta \frac{SINR_{cible}}{SIR_{min}}}$$

Fiabilité requise

Hauteur d'antenne du Node-B	hb (m) / SIRmin DL (dB)	Fiabilité requise		
		0,9	0,95	0,99
30	30	-1,3	-2	-3
	45	-1,5	-2,1	-3,1
	55	-1,6	-2,2	-3,2

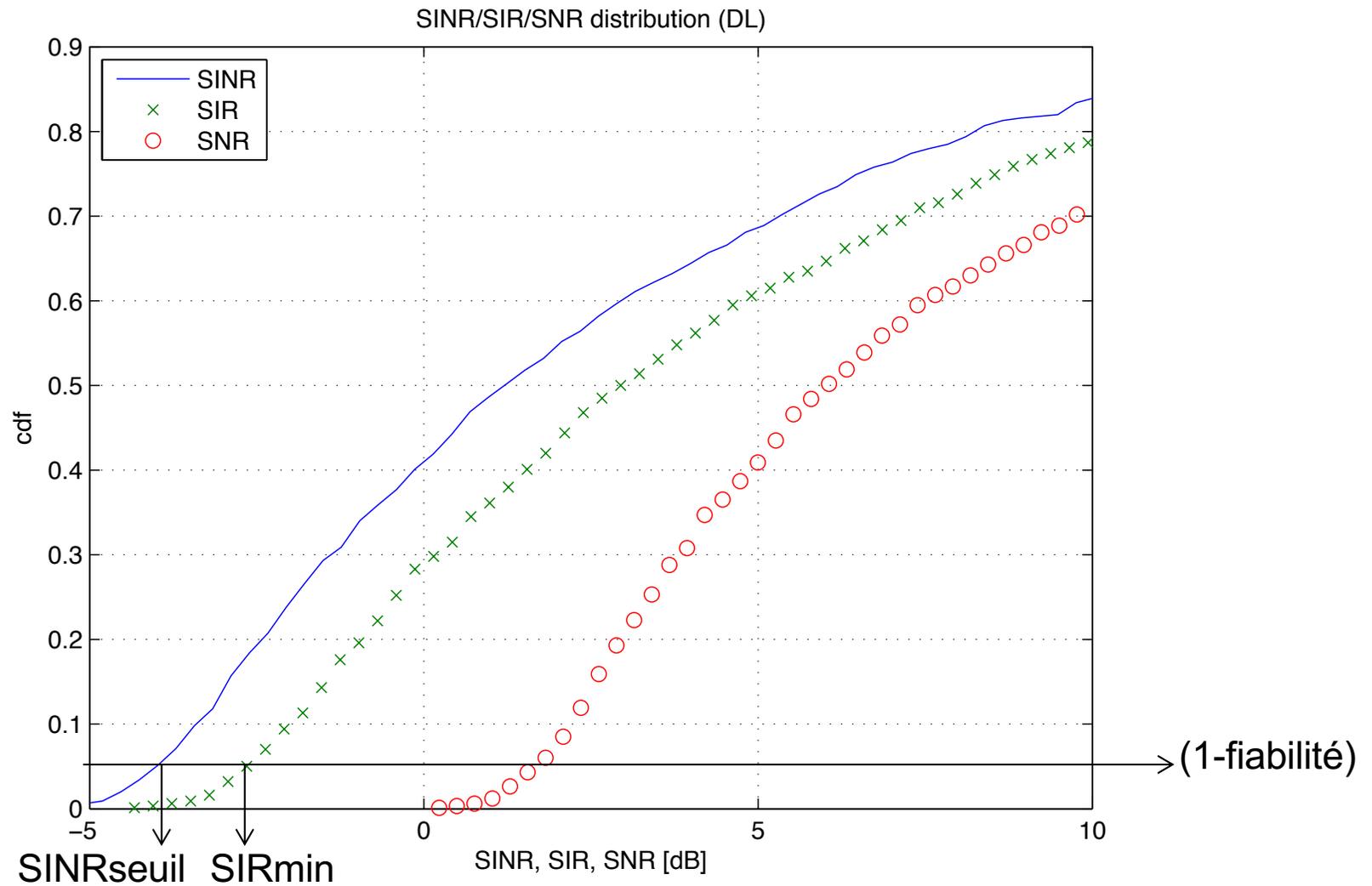
Note 1 : SIRmin ne dépend que du modèle de propagation et de la fiabilité requise

Note 2 : avec le modèle COST231-Hata, SIRmin ne dépend que de B (i.e., de hb) et de la fiabilité

# Bilan de liaison LTE

## Voie descendante

- Exemple : environnement urbain,  $h_b=55\text{m}$ , fiabilité = 0,95



# Bilan de liaison LTE

## Voie montante

Paramètres	
Débit en bordure de cellule [Mbps]	0,500
Nombre de PRB alloués	50,0
Fréquence porteuse [MHz]	2600,00
Largeur de bande [MHz]	10,00
Paramètre efficacité spectrale 1	1,25
Paramètre efficacité spectrale 2	0,75
Hauteur d'antenne eNB [m]	30,00
Hauteur d'antenne UE [m]	1,50
Fiabilité de la couverture	0,95
Ecart type du shadowing [dB]	8,00
Charge	1,00
Nombre de transmissions HARQ	4,0
Emission	
Puissance d'émission / antenne [dBm]	24,00
Nombre d'antennes de transmission	1,00
Puissance totale UE [dB]	24,00
Gain d'antenne UE [dBi]	0,00
PIRE [dBm]	24,00
Réception	
Required SINR [dB]	-11,81
Densité du bruit thermique [dBm/Hz]	-174,00
Puissance du bruit [dBm]	-104,46
Facteur de bruit eNB [dB]	2,00
Gain d'antenne eNB [dBi]	19,00
Pertes câbles et connecteurs [dB]	1,30
Gain de diversité d'antenne [dB]	3,00
Gain d'ordonnement [dB]	3,00
Gain HARQ [dB]	6,02
Gain TMA [dB]	1,30
Surcharge canaux communs [%]	24,00
Surcharge protocolaire [dB]	1,19
Sensibilité [dBm]	-138,10
Marges	
SIRmin [dB]	-1,30
Marge d'interférence [dB]	0,40
Marge de shadowing [dB]	13,12
Perte due au corps humain [dB]	0,00
Marge de pénétration [dB]	18,00
Total marges [dB]	31,52
Rayon de cellule	
Affaiblissement maximal [dB]	130,58
Environnement	Suburbain
Hata A	141,65
Hata B	35,22
Correction factor	0,06
Rayon de cellule [Km]	0,49

Seule une sous-partie de la bande peut-être allouée à l'UE

Utilise la bande allouée à l'UE :  

$$C = \alpha W_{\text{alloc}} \log_2(1 + \text{SINR}/\beta)$$
 Avec  $W_{\text{alloc}} = \#\text{PRB} \times 12 \times 15 \text{ KHz}$

Utilise la bande allouée à l'UE :  

$$N = N_0 W_{\text{alloc}}$$

# Bilan de liaison LTE

## Voie montante



- **Surcharge protocolaire :**
  - Signaux de référence : 1 symbole OFDM par slot
  - PUCCH : 4 RBs par slot
  - PRACH : 6 RBs par trame (dépend de la configuration PRACH choisie)
- Ordres de grandeur sur la voie montante :

BW [MHz]	Surcharge UL (%)
1,4	39
3	32
5	26
10	24
15	23
20	22

# Bilan de liaison LTE

## Voie montante

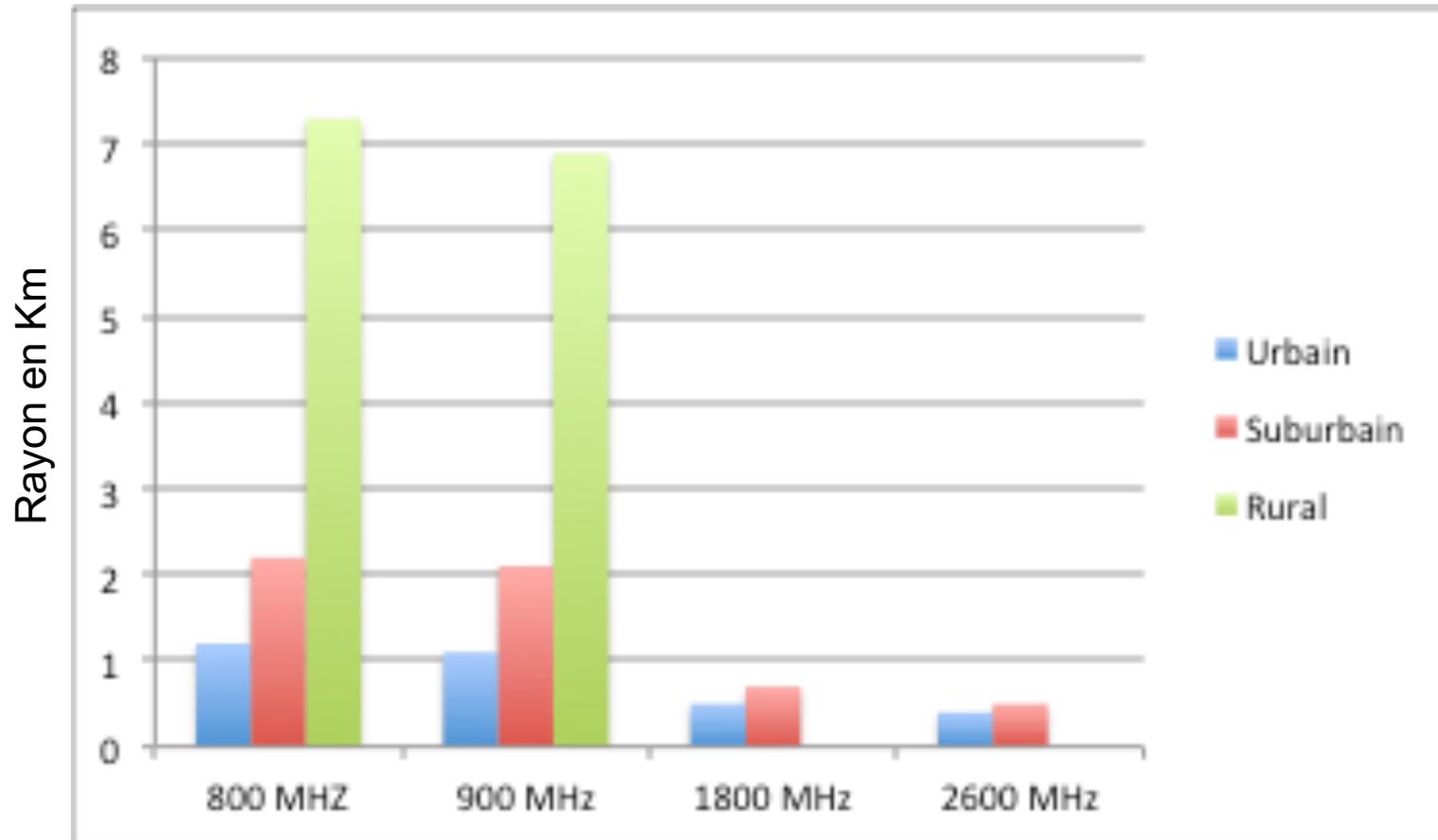


- Ordre de grandeur du SIRmin (COST231-Hata) sur la voie montante :

hb (m) / SIRmin UL (dB)	0,9	0,95	0,99
30	-0,1	-1,3	-2,8
45	-0,4	-1,4	-3
55	-0,6	-1,5	-3,1

# Bilan de liaison LTE

## Rayons de cellule typiques



### Quelques définitions:

- Élément d'antenne (AE): élément rayonnant ayant un diagramme de rayonnement fixe.
- Réseau d'antennes: un groupe d'éléments d'antenne caractérisée par une certaine géométrie et les propriétés des éléments d'antenne.
- TXRU:
  - un émetteur-récepteur qui contient le traitement OFDM, un convertisseur analogique/numérique, un amplificateur et permet le passage de la bande de base à la fréquence porteuse.
  - Un TXRU peut contrôler la phase et l'amplitude des signaux indépendamment des autres.
  - Un TXRU est associé, à droite, à un groupe d'éléments d'antennes qui transmettent ou reçoivent le même symbole de donnée et, à gauche, au traitement en bande de base.

# Bilan de liaison NR

## Full Dimension MIMO et Massive MIMO

---



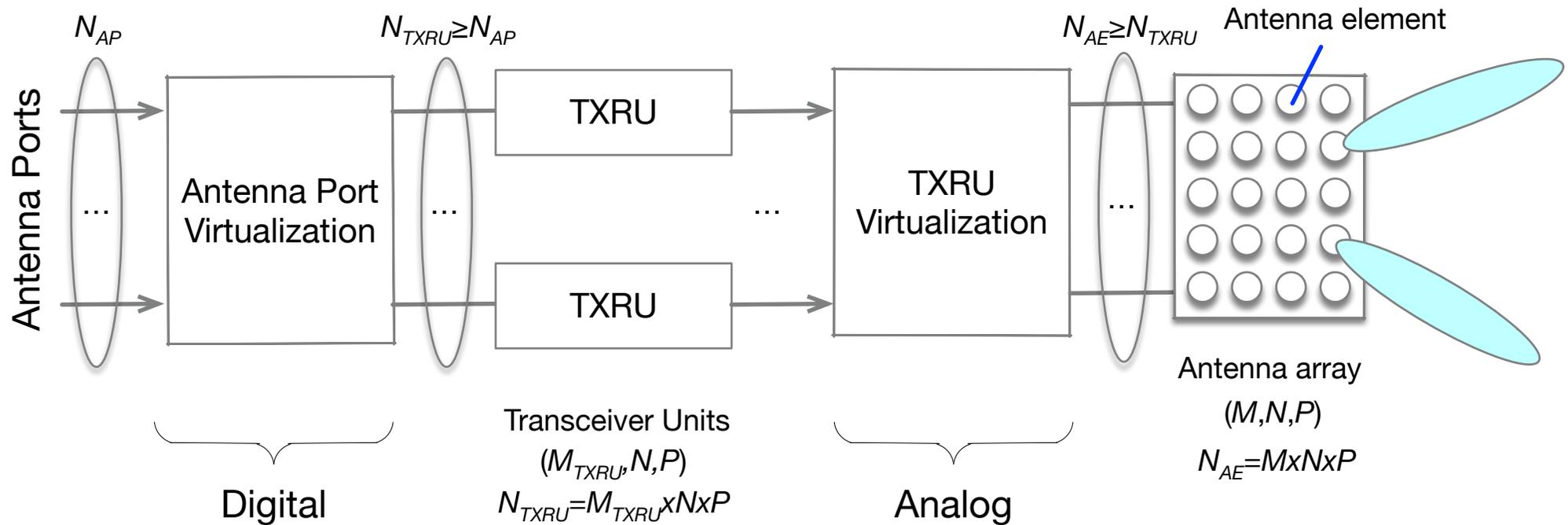
### Quelques définitions:

- Active Antenna System (AAS): un système qui combine un réseau d'antennes passives avec un réseau de TXRU actifs.
- Port d'antenne: antenne logique ou virtuelle d'une BS telle que perçue par un UE (chaque port d'antenne est associé à un signal de référence).
- Virtualisation des TXRU: association des TRXU aux AE.
- Virtualisation des ports d'antennes: association des ports aux TXRU.

# Bilan de liaison NR

## Full Dimension MIMO et Massive MIMO

Architecture radio AAS:



# Bilan de liaison NR

## Full Dimension MIMO et Massive MIMO

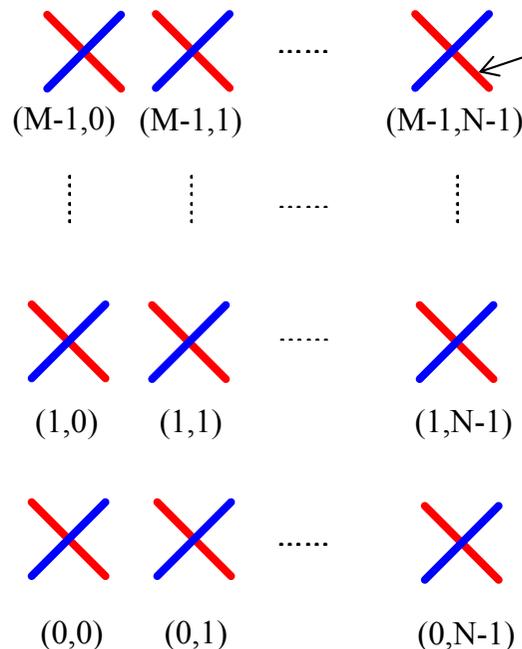
Modèle de réseau d'antennes (M,N,P)

M: nombre de lignes, N: nombre de colonnes, P: nombre de polarisation

Le nombre d'AE est:  $N_{AE} = M \times N \times P$

Généralement,  $P=2$  (+/-45° ou 0-90°).

Espacement horizontal:  $0.5\lambda$ , vertical:  $0.5\lambda-0.8\lambda$ .



Un élément d'antenne (AE)  
Gain = 8 dBi  
Ouverture à 3dB verticale et  
horizontale = 65°

# Bilan de liaison NR

## Full Dimension MIMO et Massive MIMO

---



Modèle de configuration TXRU ( $M_{\text{TXRU}}, N, P$ )

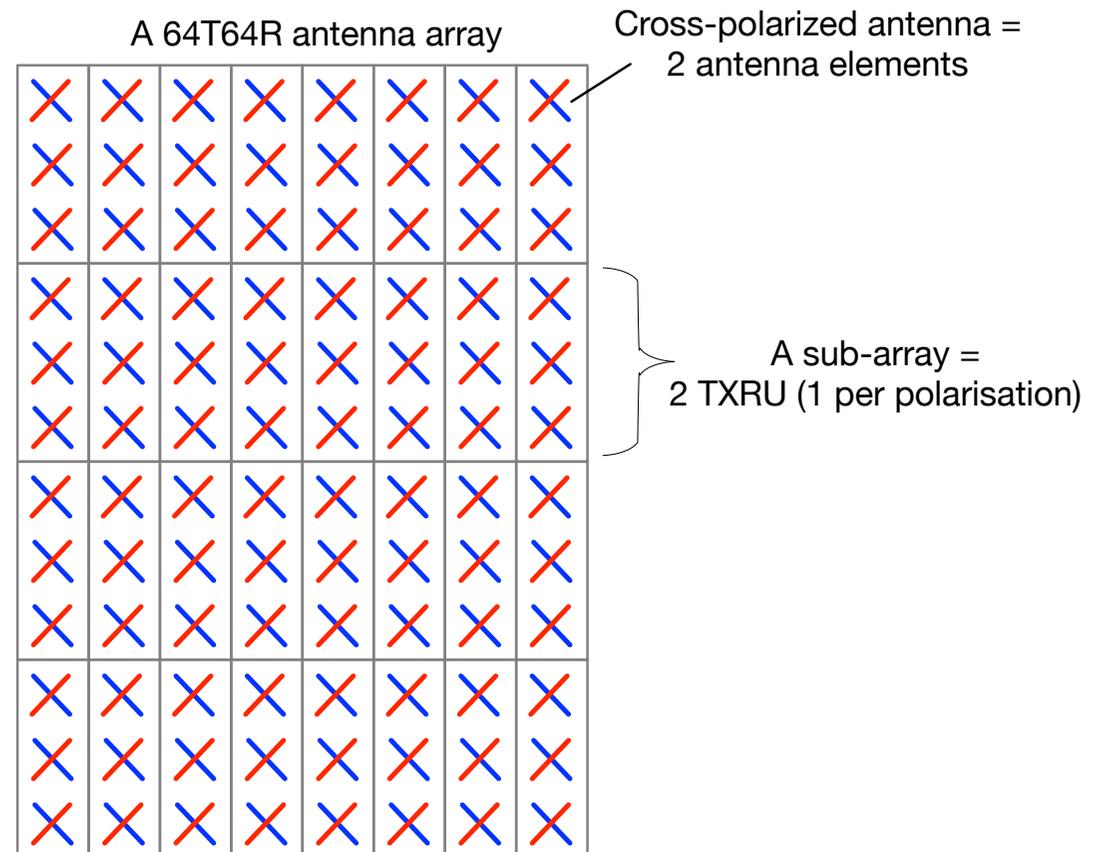
- Un TXRU n'est associé qu'à des AE de même polarisation.
- $M_{\text{TXRU}}$ : nombre de TXRU par colonne et par polarisation  $M_{\text{TXRU}} \leq M$ .
- $K = M / M_{\text{TXRU}}$ : nombre d'AE par TXRU
- Le nombre total de TXRU est  $N_{\text{TXRU}} = M_{\text{TXRU}} \times N \times P$ .
- Plus  $M_{\text{TXRU}}$  est grand, plus on a de liberté pour la formation de faisceaux en élévation.
- Plus  $N$  est grand, plus on a de liberté en azimuth.
- En général, plus le nombre de sub-arrays est grand, plus on a de liberté dans l'orientation des faisceaux.

# Bilan de liaison NR

## Full Dimension MIMO et Massive MIMO

Modèle de configuration TXRU ( $M_{\text{TXRU}}, N, P$ )

- Exemple: avec  $M=12$ ,  $N=8$ ,  $P=2$ ,  $M_{\text{TXRU}}=4$
- $N_{\text{AE}} = 192$ ,  $K=M/ M_{\text{TXRU}}=3$ ,  $N_{\text{TXRU}}=64$
- On écrit 64T64R.



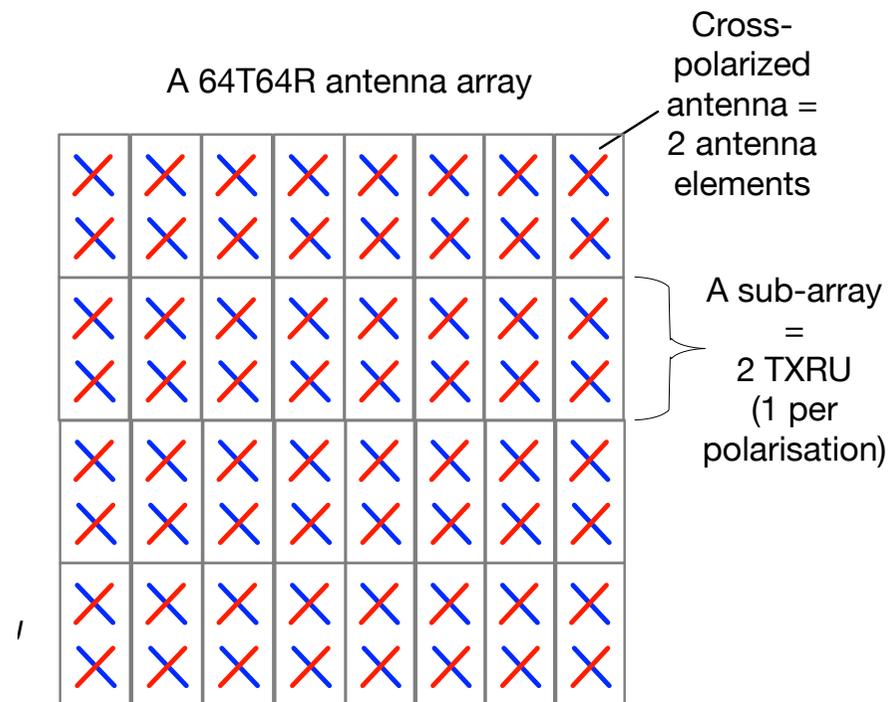
[36.897]

# Bilan de liaison NR

## Full Dimension MIMO et Massive MIMO

Modèle de configuration TXRU ( $M_{\text{TXRU}}, N, P$ )

- Un autre exemple: avec  $M=8$ ,  $N=8$ ,  $P=2$ ,  $M_{\text{TXRU}}=4$
- $N_{\text{AE}} = 128$ ,  $K=2$ ,  $N_{\text{TXRU}}=64$
- On écrit aussi 64T64R.



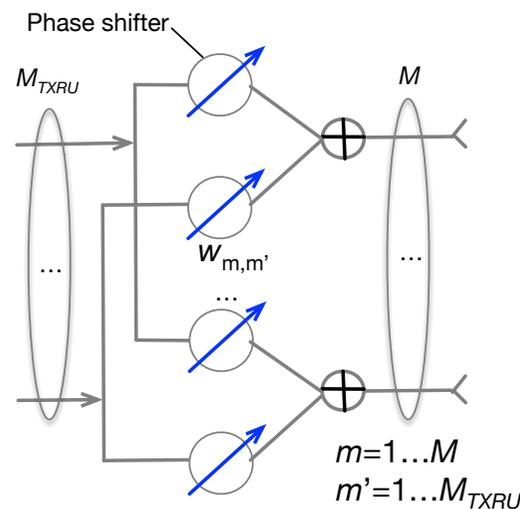
#AE = 128  
#TXRU = 64  
#AP = 2

# Bilan de liaison NR

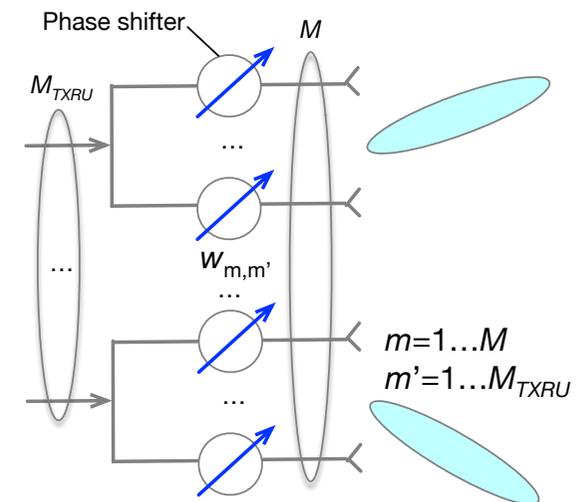
## Full Dimension MIMO et Massive MIMO

### Modèles de virtualisation TXRU

- À partir d'un TXRU, le même signal est distribué à tous les AE qui lui sont connectés; à chaque AE est appliqué un déphasage  $w$ .
- Le diagramme de radiation de chaque TXRU dépend du nombre d'AE, de l'espacement entre les AE et des poids appliqués à chaque AE.
- En particulier, il y a un gain de beamforming de  $10\log(K)$  par rapport à un AE.
- Dans une antenne passive, les poids sont fixes. On ne peut faire du beamforming qu'au niveau des TXRU. Dans un AAS, les poids sont ajustables de manière dynamique



full-connection model

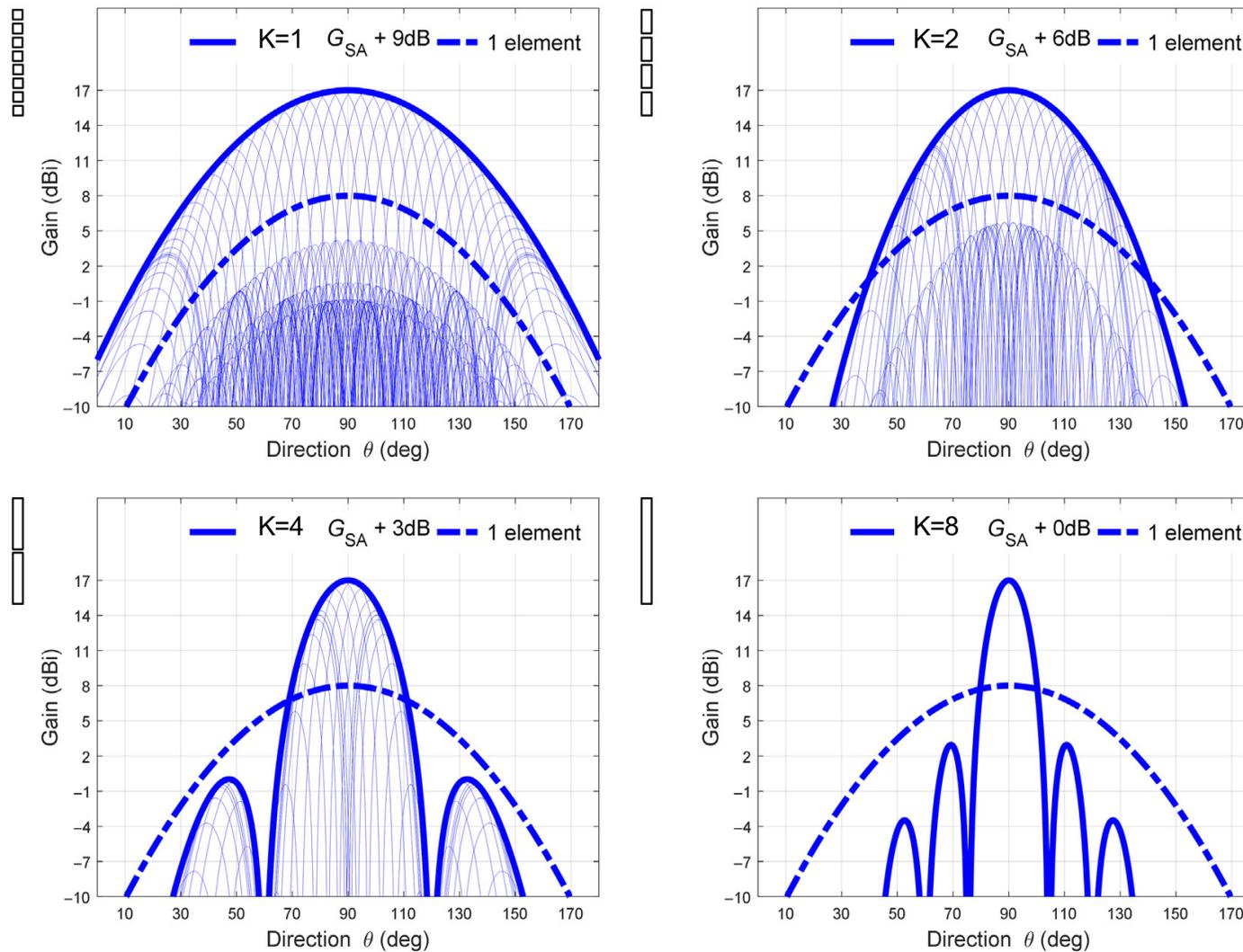


sub-array partition model

# Bilan de liaison NR

## Full Dimension MIMO et Massive MIMO

- Compromis liés à la conception des subarrays



# Bilan de liaison NR

## Full Dimension MIMO et Massive MIMO

---



### Virtualisation de ports d'antenne

- Il s'agit d'un précodage numérique en bande de base
- Il peut permettre de faire du multiplexage spatial ou du MU-MIMO en transmettant plusieurs couches MIMO simultanément (les TXRU émettent des signaux a priori différents),
- Ou bien d'effectuer de la formation de faisceau (plusieurs TXRU transmettent le même signal).
- Ou une combinaison des deux.

# Bilan de liaison NR

## Modèles de propagation 5G

---



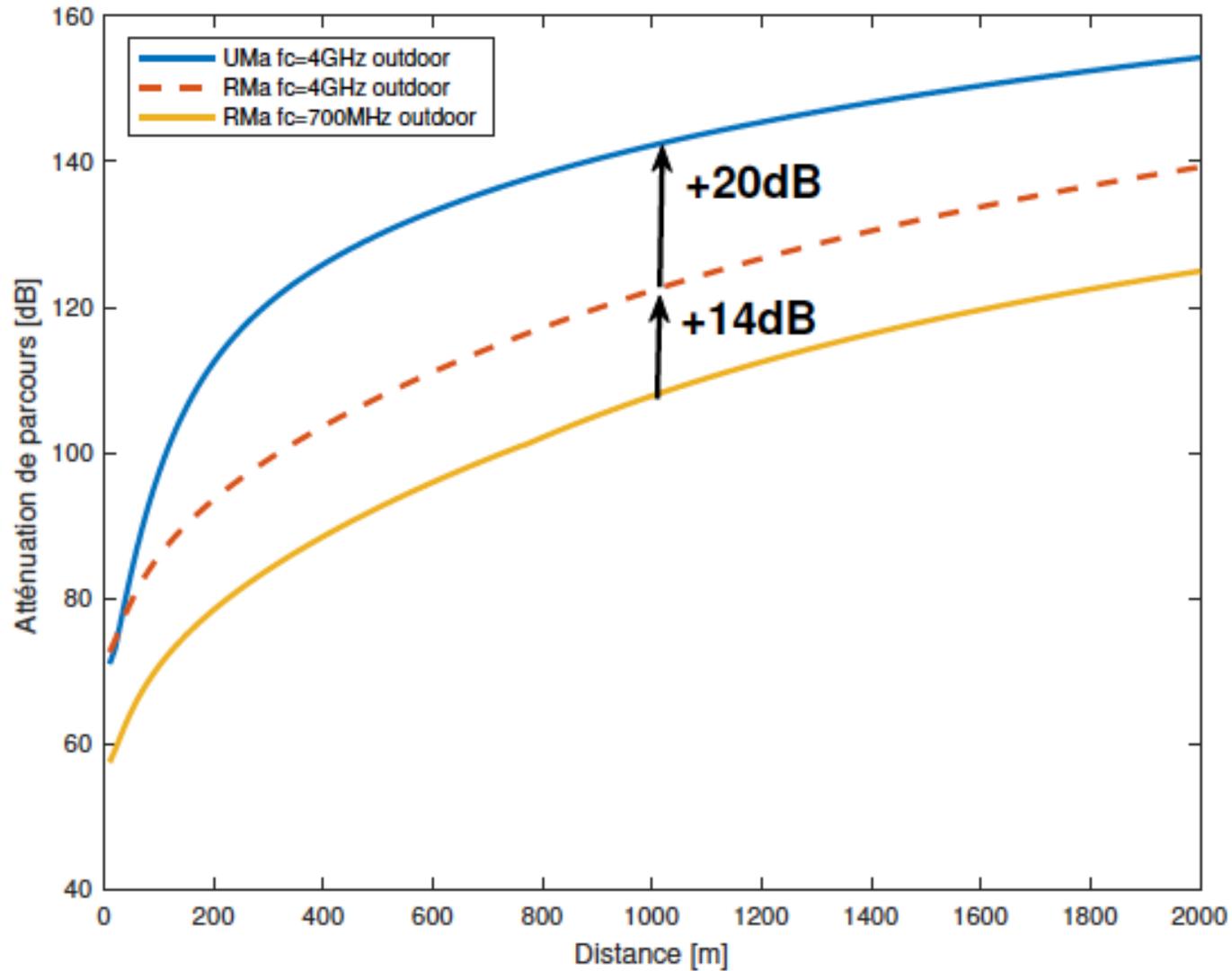
- L'UIT a défini 5 environnements de test:
  1. Indoor Hotspot eMBB
  2. Dense Urban eMBB
  3. Rural eMBB
  4. Urban macro mMTC
  5. Urban macro URLCC
- L'UIT a défini plusieurs modèles de canal dont
  1. UMa\_A pour Dense Urban eMBB 4GHz
  2. RMa\_A pour Rural eMBB 700MHz
  3. RMa\_B pour Rural eMBB 4GHz
- Le 3GPP a défini 3 types de scénario pour la R15 (sous-ensemble UIT):
  1. UMi pour les micro-cellules
  2. UMa pour les macro-cellules
  3. InH pour l'intérieur des bâtiments
  4. RMa pour le déploiement rural

[ITU-R M2412] [3GPP TR 38.901]

---

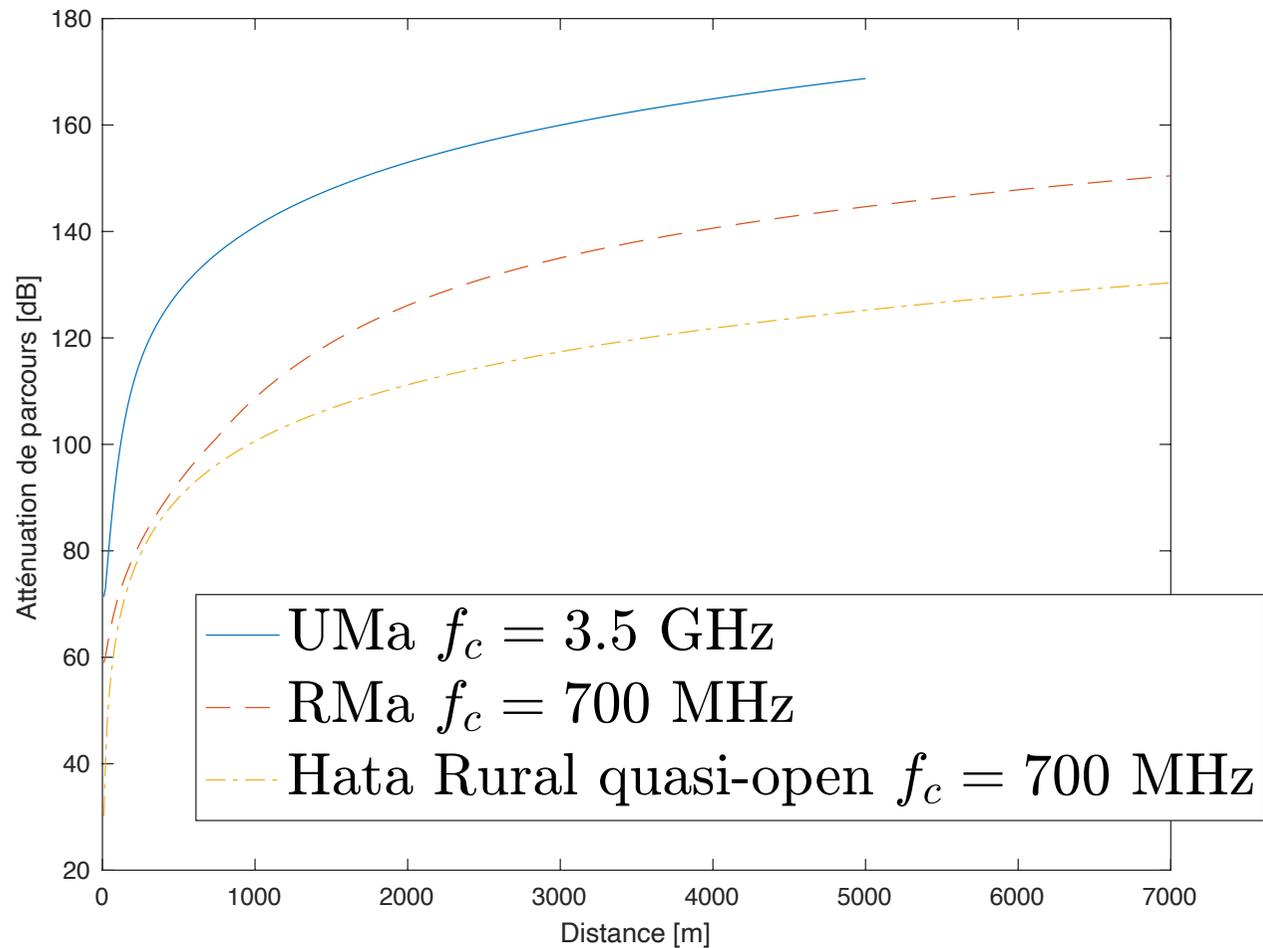
# Bilan de liaison NR

## Modèles de propagation 5G



# Bilan de liaison NR

## Modèles de propagation 5G



NB : le modèle Hata Quasi Open fournit des valeurs plus réalistes en France pour le rural

# Bilan de liaison NR

## Correspondance débit-SINR

- Méthodologie:
  - On part de courbes de simulations de couche PHY
  - On sélectionne pour chaque SNR la meilleure combinaison MCS/nombre de flux MIMO
  - On lisse la courbe (local regression smoothing)
  - On approxime l'enveloppe avec deux courbes de type  $a \log_2(1 + \text{SNR}/b)$  avant et après un certain seuil de SNR.

TABLE 1. Approximations des correspondances débit - SNR  
( $\mu = 1$ , PedA3, DL)

$W$	MIMO	$p_{DL}$	$a_1$	$b_1$	$a_2$	$b_2$	$\gamma_t$ [dB]	$D_{max}$ [Mbps]
10 MHz	$2 \times 2$	1	6.5	2.6	9.0	9.8	25	111.3
20 MHz	$2 \times 2$	1	13.8	2.6	19.2	9.8	25	226.9
30 MHz	$2 \times 2$	1	21.0	2.6	29.3	9.8	25	342.4
50 MHz	$4 \times 4$	0.74	50.3	5.7	76.7	24.7	25	842.5
100 MHz	$4 \times 4$	0.74	103.3	5.7	157.5	24.7	25	1729.4

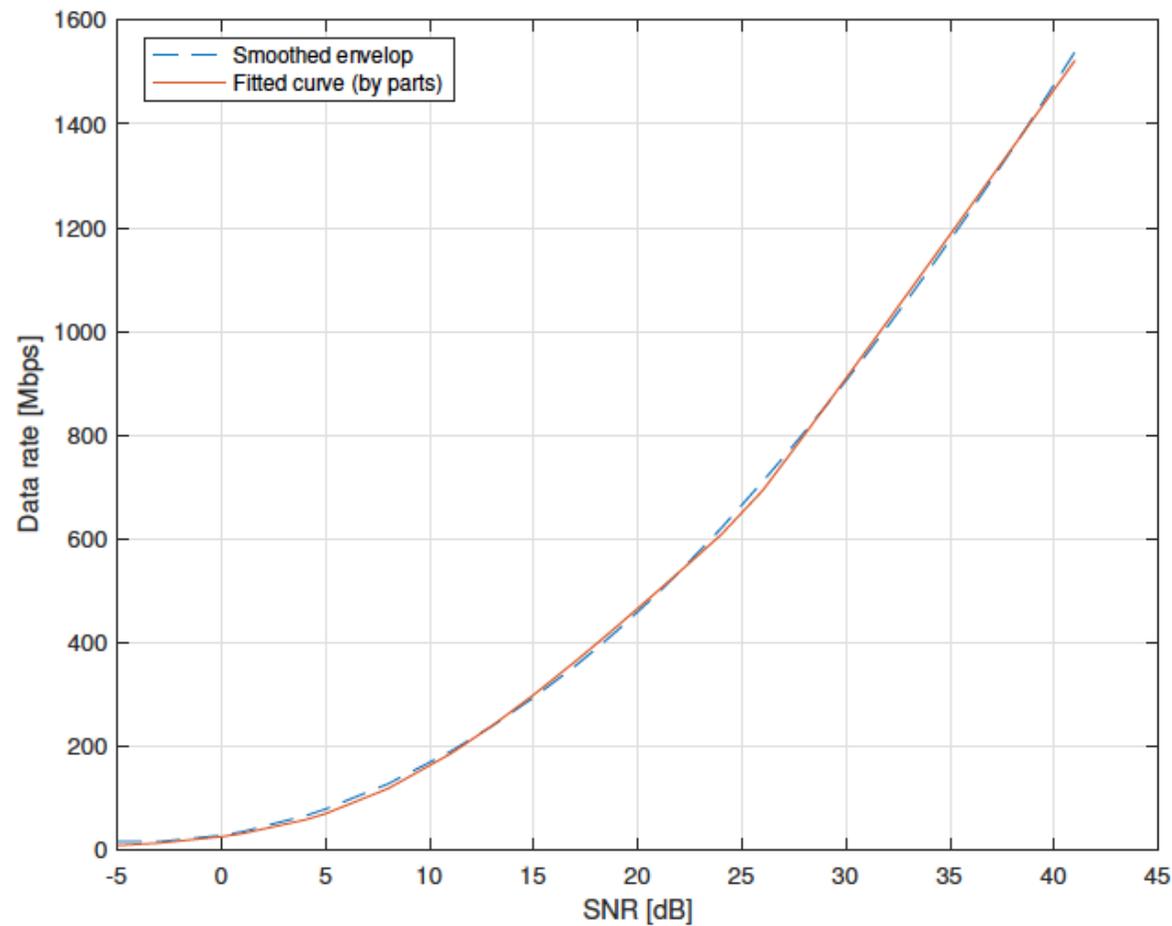
TABLE 2. Approximations des correspondances débit - SNR  
( $\mu = 1$ , PedA3, UL)

MIMO	$a_1$	$b_1$	$a_2$	$b_2$	$\gamma_t$ [dB]	$D_{max}$ [bits/RE]
rangs 1 et 2	0.8697	1.2956	1.1326	2.9125	15	11.1

# Bilan de liaison NR

## Correspondance débit-SINR

Hyp :  $\mu = 1$ ,  $W = 80$  MHz. 2nd modèle de fit avec  $a_1 = 110.9$ ,  $b_1 = 5.7$ ,  $a_2 = 169.2$ ,  $b_2 = 24.6$ ,  $\gamma_t = 25$  dB



# Bilan de liaison NR

## Voie montante

Exemple de bilan de liaison à 3.5GHz: 128 AE, 64 TXRU, 2AP, 4 antennes à l'UE

Parameters	UL
DL ratio	0,23
Cell edge throughput [Mbps]	2,0
Carrier frequency [MHz]	3500,00
Bandwidth [MHz]	40,00
BS antenna height [m]	30,00
UE antenna height [m]	1,50
Cell load	1,00
Coverage probability	0,90
Shadowing standard deviation [dB]	6,00
Number of HARQ retransmissions	4,0
Transmission	
Transmit power per antenna [dBm]	23,00
Number of transmit antennas	2,00
Number of transmit antenna ports	2,00
Total transmit power [dB]	23,00
Transmitter antenna gain [dBi]	0,00
Transmitter array gain [dB]	0,00
Transmit diversity [dB]	3,01
Cable losses [dB]	0,00
<b>EIRP [dBm]</b>	<b>26,01</b>

TDD

Exemple de bande allouée à l'UE sur la voie montante

La puissance de l'UE est indépendante du nombre d'antennes

Seules 2 antennes sur 4 émettent en UL

Diversité en transmission

$10 \cdot \log_{10}(NbAP)$

# Bilan de liaison NR

## Voie montante

Reception	
Required SINR [dB]	-4,56
Thermal noise density [dBm/Hz]	-174,00
Noise power [dBm]	-97,98
Receiver noise factor [dB]	3,00
Number of AE	128,00
Number of TXRU	64,00
Number of receive antenna ports	2,00
Receive antenna gain [dBi]	8,00
Receiver array gain [dB]	18,06
Cable losses [dB]	0,00
Receive diversity [dB]	3,01
Scheduling gain [dB]	3,00
HARQ gain [dB]	6,02
<b>Sensitivity [dBm]</b>	<b>-137,63</b>
Margins	
Interference margin [dB]	3,00
Shadowing margin [dB]	7,68
Body loss [dB]	1,00
Indoor penetration margin [dB]	25,00
<b>Total margins [dB]</b>	<b>36,68</b>
Cell range	
<b>MAPL [dB]</b>	<b>126,96</b>
Environment	UMa
<b>Cell range [m]</b>	<b>450,00</b>

Obtenu par des simulations de couche PHY

Nombre d'AE  
Nombre d'AP

Gain d'un AE

$10 \cdot \log(NbAE/NbAP)$

On utilise les AP en diversité

La pénétration indoor à 3.5GHz est très mauvaise

# Bilan de liaison NR

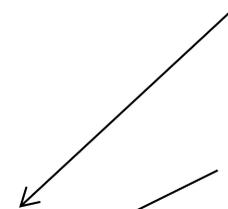
## Voie descendante

Parameters	DL
DL ratio	0,74
Cell edge throughput [Mbps]	20,0
Carrier frequency [MHz]	3500,00
Bandwidth [MHz]	100,00
BS antenna height [m]	30,00
UE antenna height [m]	1,50
Cell load	1,00
Coverage probability	0,90
Shadowing standard deviation [dB]	6,00
Number of HARQ retransmissions	4,0
Transmission	
Transmit power per TXRU [dBm]	23,00
Number of transmit antennas	128,00
Number of TXRU	64,00
Number of transmit antenna ports	2,00
Total transmit power [dBm]	41,06
Transmitter antenna gain [dBi]	8,00
Transmitter array gain [dB]	18,06
Transmit diversity [dB]	3,01
Cable losses [dB]	0,00
<b>EIRP [dBm]</b>	<b>70,13</b>

TDD



Utilisés pour la diversité en transmission



$23+10*\log(NbTXRU)$



$10\log(NbAE/NbAP)$



$10\log(NbAP)$



Avec AAS, les amplificateurs de puissance sont intégrés au réseau d'antenne



# Bilan de liaison NR

## Voie descendante

Reception	
Required SINR [dB]	-0,87
Thermal noise density [dBm/Hz]	-174,00
Noise power [dBm]	-94,00
Receiver noise factor [dB]	7,00
Number of receive antennas	4,00
Number of receive antenna ports	2,00
Receive antenna gain [dBi]	0,00
Receiver array gain [dB]	3,01
Cable losses [dB]	0,00
Receive diversity [dB]	3,01
Scheduling gain [dB]	3,00
HARQ gain [dB]	6,02
<b>Sensitivity [dBm]</b>	<b>-102,91</b>
Margins	
Interference margin [dB]	3,00
Shadowing margin [dB]	7,68
Body loss [dB]	1,00
Indoor penetration margin [dB]	25,00
<b>Total margins [dB]</b>	<b>36,68</b>
Cell range	
<b>MAPL [dB]</b>	<b>136,36</b>
Environment	UMa
<b>Cell range [m]</b>	<b>770,00</b>

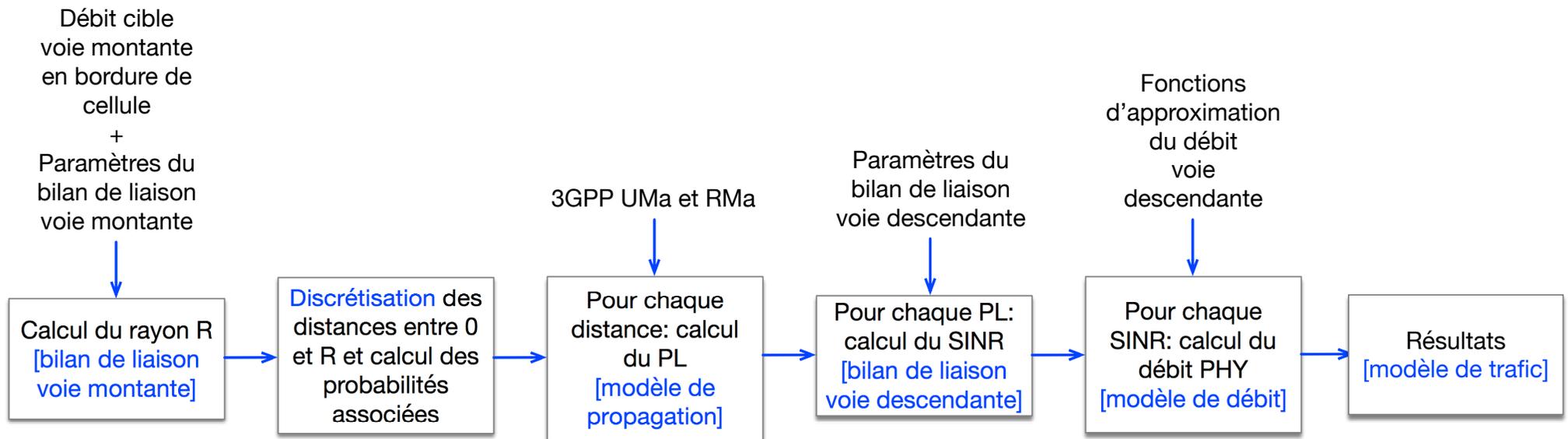
← Obtenue par simulation de couche PHY

←  $10\log(NbAE/NbAP)$

←  $10\log(NbAP)$

# Bilan de liaison NR

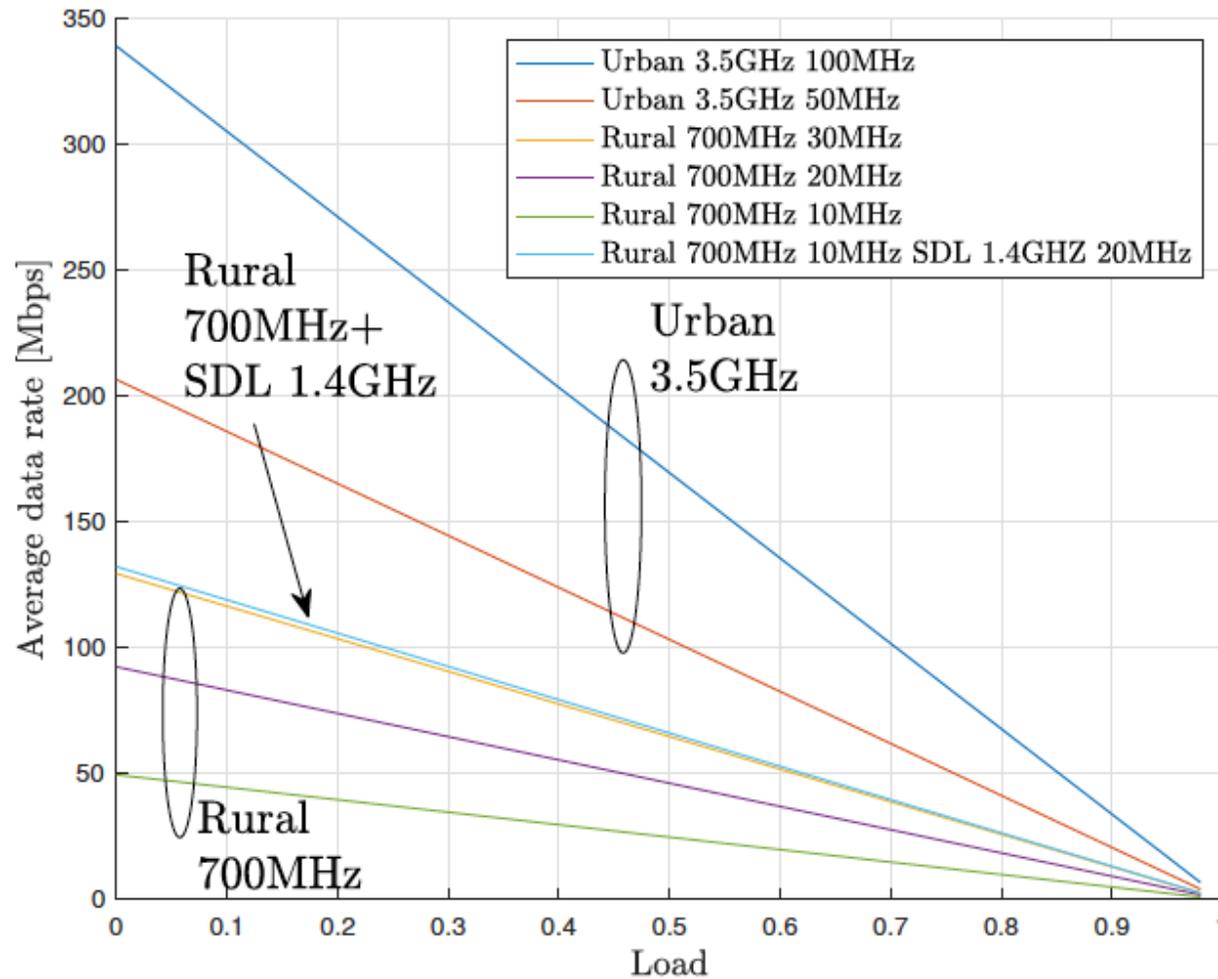
## Processus de dimensionnement



# Bilan de liaison NR

## Exemple d'étude de dimensionnement

- Comparaison des débits utilisateurs moyens en zones rurales et urbaines



# Conclusion

---

- Quatre technologies, trois approches :
  - **GSM** : on vise une sensibilité donnée pour le service de voix
  - **UMTS** (non présentée dans ce cours) : on fait un bilan de liaison par service. Sur la voie montante, le bilan de liaison d'un service est similaire à celui du GSM. Sur la voie descendante, il faut faire un bilan de puissance pour l'ensemble des utilisateurs. Particularités de l'UMTS : les interférences intra-cellulaires, le soft-handover, le contrôle de puissance
  - **LTE/NR** : on vise un débit cible en bordure de cellule. Nouvelles techniques, nouveaux gains : TxDiv, ordonnancement, HARQ, FD-MIMO, etc. Approche valable également pour HSPA.
- Limites de l'approche bilan de liaison :
  - Ne prend pas en compte les interférences et la réutilisation fréquentielle de manière précise
  - Ne prend pas en compte la dynamique du système en termes de trafic utilisateur

# Références

---

- [GSM05.05] Radio Transmission and Reception
- [GSM03.30] Radio Network Planning Aspects
- [Viterbi95] A. J. Viterbi, « CDMA - Principles of Spread Spectrum Communications », Addison-Wesley, 1995
- [\[Viterbi93\]](#) A. M. Viterbi and A. J. Viterbi, « Erlang Capacity of a Power Controlled CDMA System », IEEE JSAC, August 1993
- [\[Gilhousen91\]](#) K. S. Gilhousen et al., « On the Capacity of a Cellular CDMA System », IEEE Trans. on Vehicular Technology, May 1991
- [\[Chan01\]](#) C. C. Chan and S. V. Hanly, « Calculating the Outage Probability in a CDMA Network with Spatial Poisson Traffic », IEEE Trans. on Vehicular Technology, Jan. 2001
- [\[Evans99\]](#) J. S. Evans and D. Everitt, « On the Teletraffic Capacity of CDMA Cellular Networks », IEEE Trans. on Vehicular Technology, Jan. 1999
- [\[Baccelli05\]](#) F. Baccelli et al., « Blocking Rates in Large CDMA Networks via a Spatial Erlang Formula », INFOCOM, 2005
- [Godlewski04] P. Godlewski, « La formule de la capacité cellulaire CDMA revisitée au second ordre », rapport ENST, 2004
- [Goldsmith05] A. Goldsmith, « Wireless Communications », Cambridge University Pres, 2005

# Références

---

- [Sipilä00] Sipilä et al., « Estimation of Capacity and Required Transmission Power of WCDMA Downlink Based on a Downlink Pole Equation », Sipilä et al. VTC 2000
- [Holma04] « WCDMA for UMTS », Edited by H. Holma and A. Toskala, 3rd Edition, Wiley 2004
- [Veeravalli99] Veeravalli et al., « The Coverage-Capacity Tradeoff in Cellular CDMA Systems » Trans. on Vehicular Technology, 48, 1999
- [Viterbi94] « Soft Handoff Extends CDMA Cell Coverage and Increase Reverse Link Capacity », IEEE JSAC, Oct. 1994
- [Sipilä99a] Sipilä et al. « Modeling the Impact of the Fast Power Control on the WCDMA Uplink », IEEE VTC'99
- [Sipilä99b] Sipilä et al., « Soft Hand-over Gains in a Fast Power Controlled WCDMA Uplink », IEEE VTC'99
- [Laiho02] « Radio Network Planning and Optimisation for UMTS », Edited by J. Laiho, A. Wacker and T. Novosad, Wiley 2002
- [Lempiäinen03] « UMTS Radio Network Planning, Optimization and QoS Management », Edited by J. Lempiäinen and M. Manninen, Kluwer Academic Publisher 2003
- [25.942] 3GPP TR 25.942 « RF System Scenarios »
- [25.104] 3GPP TR 25.104 « Base Station radio transmission and reception (FDD) »
- [25.101] 3GPP TR 25.101 « User Equipment radio transmission and reception (FDD) »
- [Baccelli01] Baccelli et al., « Spatial Averages of Coverage Characteristics in Large CDMA Networks », Rapport INRIA N° 4196, Juin 2001
- [Baccelli03] Baccelli et al. « Downlink Admission/Congestion Control and Maximal Load in Large CDMA Networks », Rapport INRIA N° 4702, Jan. 2003
- [Mogensen07] Mogensen et al. « LTE Capacity Compared to the Shannon Bound », VTC 2007.
- [NSN11] Nokia Siemens Networks, « Air Interface Dimensioning » 2011.

# Licence de droits d'usage



Contexte public } sans modifications

***Par le téléchargement ou la consultation de ce document, l'utilisateur accepte la licence d'utilisation qui y est attachée, telle que détaillée dans les dispositions suivantes, et s'engage à la respecter intégralement.***

La licence confère à l'utilisateur un droit d'usage sur le document consulté ou téléchargé, totalement ou en partie, dans les conditions définies ci-après et à l'exclusion expresse de toute utilisation commerciale.

Le droit d'usage défini par la licence autorise un usage à destination de tout public qui comprend :

- Le droit de reproduire tout ou partie du document sur support informatique ou papier,
- Le droit de diffuser tout ou partie du document au public sur support papier ou informatique, y compris par la mise à la disposition du public sur un réseau numérique.

Aucune modification du document dans son contenu, sa forme ou sa présentation n'est autorisée.

Les mentions relatives à la source du document et/ou à son auteur doivent être conservées dans leur intégralité.

Le droit d'usage défini par la licence est personnel, non exclusif et non transmissible.

Tout autre usage que ceux prévus par la licence est soumis à autorisation préalable et expresse de l'auteur : [sitepedago@enst.fr](mailto:sitepedago@enst.fr)

30/03/2007

Marceau Coupechoux



Licence de droits d'usage