

RE 342 - RÉSEAUX MOBILES ET SANS FIL PARTIE COUCHE PHYSIQUE

21/09/2009

Benoît ESCRIG
ENSEIRB-MATMECA / IRT

Bibliographie

2

- Rappaport : Wireless Communications, 2ème Edition, Ed Prentice Hall, 2002.
- Sklar : Digital Communications, Fundamentals And Applications, Ed. Prentice Hall, 2004.
- Proakis : Digital Communications, 4ème Edition, Ed Mac Graw Hill, 2001.
- Haykin, Moher : Modern Wireless Communications, Ed Prentice Hall, 2005.






Objectif général du cours

3




- Étudier les techniques de transmission utilisées dans les systèmes de communication sans fil.

Systemes de communication sans fil : réseaux sans fil

WLAN (Wireless Local Area Network)	WiFi (Wireless Fidelity)	IEEE 802.11 
WMAN (Wireless Metropolitan Area Network)	WiMAX (World-wide Interoperability for Microwave Access)	IEEE 802.16 
WPAN (Wireless Personal Area Network)	Bluetooth	IEEE 802.15 

Systèmes de communication sans fil : télédiffusion

5

Télévision câblée	DVB-C (Digital Video Broadcasting – Cable)	
Télévision par satellite	DVB-S (Digital Video Broadcasting – Satellite)	
TNT	DVB-T (Digital Video Broadcasting – Terrestrial)	

RE3 42 - BE - ENSEIRB-MATMECA / IRT 21/09/2009

Systèmes de communication sans fil : téléphonie mobile

2G	GSM (Global System for Mobile communications), IS-95 (Interim Standard-95)
2,5G	EDGE (Enhanced Data rates for GSM Evolution), GPRS (General Packet Radio Service)
3G	UMTS (Universal Mobile Telecommunications System), cdma2000

21/09/2009

RE3 42 - BE - ENSEIRB-MATMECA / IRT

Modèle de transmission sans fil

7

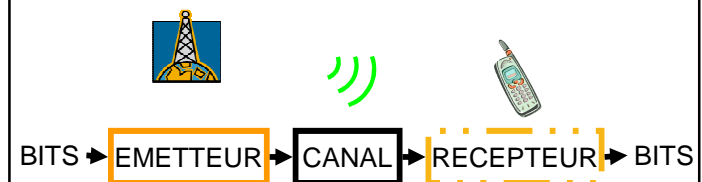
- Un émetteur (mobile ou fixe) avec un modem.
- Un récepteur (mobile ou fixe) avec un modem.
- Entre l'émetteur et le récepteur : le canal de transmission (l'air).



RE3 42 - BE - ENSEIRB-MATMECA / IRT 21/09/2009

Chaîne de transmission

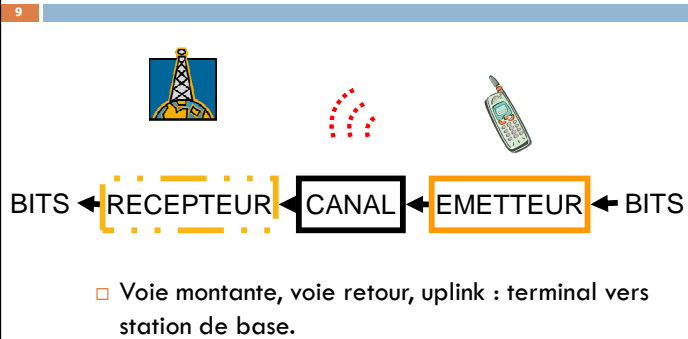
8



- Voie descendante, voie aller, downlink : station de base vers terminal.

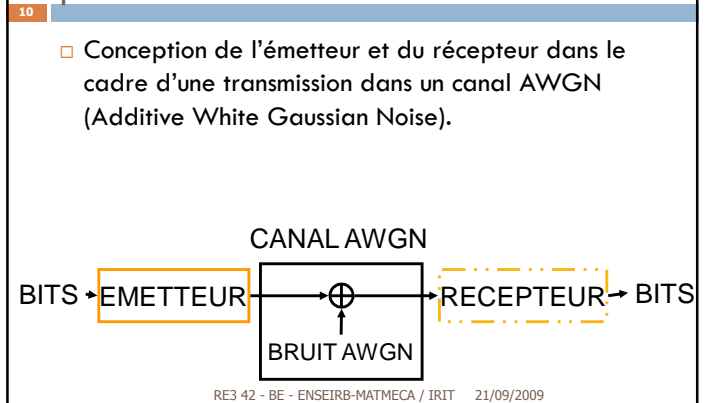
RE3 42 - BE - ENSEIRB-MATMECA / IRT 21/09/2009

Chaîne de transmission

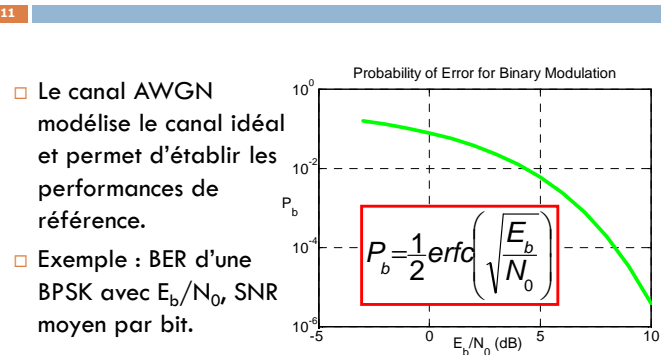


RE3 42 - BE - ENSEIRB-MATMECA / IRT 21/09/2009

Connaissances acquises durant les cours précédents

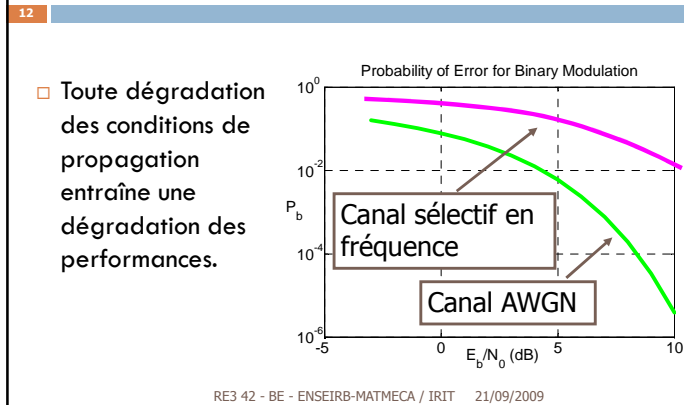


Intérêt du canal AWGN



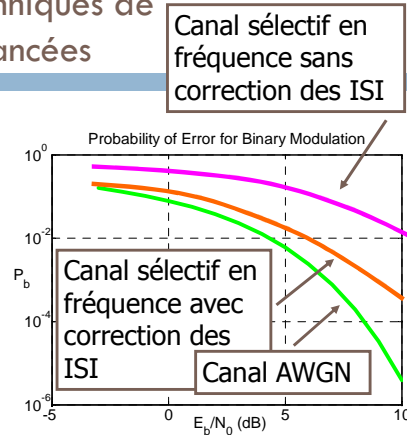
RE3 42 - BE - ENSEIRB-MATMECA / IRT 21/09/2009

Canaux de propagation réels



Apport des techniques de transmission avancées

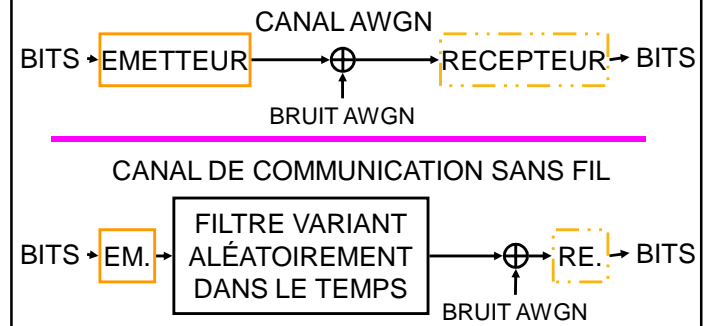
- Les techniques de transmission permettent de se rapprocher des performances des canaux AWGN en présence de canaux réels.



21/09/2009

RE3 42 - BE - ENSEIRB-MATMECA / IRIT

Canal AWGN vs canal de communication sans fil



RE3 42 - BE - ENSEIRB-MATMECA / IRIT 21/09/2009

Objectifs du cours

- CANAUX DE TRANSMISSION
 - Caractériser les canaux de transmission pour les systèmes de communication sans fil (mobiles ou fixes).
- TECHNIQUES DE TRANSMISSION
 - Présenter les techniques de transmission utilisées dans les systèmes de communications sans fil actuels.

RE3 42 - BE - ENSEIRB-MATMECA / IRIT 21/09/2009

Remarque : systèmes filaires

- Les techniques appliquées aux systèmes de communication sans fil sont applicables aux systèmes filaires (moins contraignants).
- Exemple : OFDM utilisé dans le WiFi, le WiMAX, le DVB-T et l'ADSL sous le nom de DMT (Discrete Multi-Tone).

RE3 42 - BE - ENSEIRB-MATMECA / IRIT 21/09/2009

Connaissances acquises à l'issue du cours

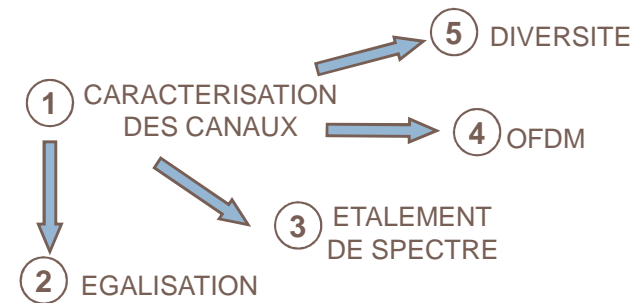
17

- CARACTERISATION DES CANAUX DE COMMUNICATION SANS FIL :
 - Trajets multiples, fading, slow et fast fading, sélectivité en fréquence et flat fading.
- TECHNIQUES DE TRANSMISSION :
 - Égalisation, étalement de spectre, OFDM, diversité.
- UTILISATION DES TECHNIQUES DANS LES SYSTEMES SANS FIL :
 - GSM, IS-95, DVB-T, WiMAX, UMTS.

RE3 42 - BE - ENSEIRB-MATMECA / IRT 21/09/2009

Plan du cours en 5 parties

18



RE3 42 - BE - ENSEIRB-MATMECA / IRT 21/09/2009

Pré-requis : COMMUNICATIONS NUMERIQUES

19

- Modulations numériques :
 - M-PSK pour M-ary Phase Shift Keying,
 - M-QAM pour M-ary Quadrature Amplitude Modulation,
- Canaux AWGN et récepteurs numériques,
- Chaîne passe-bas équivalente,
- Canaux à bande limitée, ISI (Inter-Symbol Interference).

RE3 42 - BE - ENSEIRB-MATMECA / IRT 21/09/2009

Plan du cours

20

- I. Caractérisation des canaux
- II. Égalisation
- III. Étalement de spectre
- IV. OFDM
- V. Diversité
- VI. Récapitulatif, conclusion et perspectives

RE3 42 - BE - ENSEIRB-MATMECA / IRT 21/09/2009

Plan du cours

21

- I. **Caractérisation des canaux**
- II. Égalisation
- III. Étalement de spectre
- IV. OFDM
- V. Diversité
- VI. Récapitulatif, conclusion et perspectives

RE3 42 - BE - ENSEIRB-MATMECA / IRT 21/09/2009

Justification de la caractérisation des canaux

22

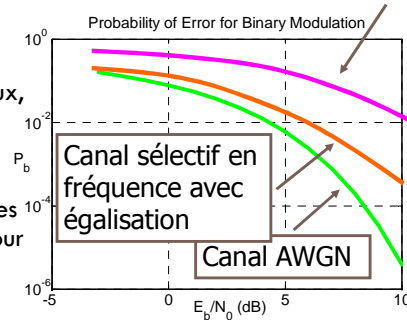
- Les canaux conditionnent l'utilisation des techniques de transmission.
- Pour chaque type de canal, un ensemble de techniques doit être mis en œuvre pour atteindre les performances établies avec le canal AWGN.

RE3 42 - BE - ENSEIRB-MATMECA / IRT 21/09/2009

Exemple

23

- Pour pallier la sélectivité en fréquence des canaux, il faut utiliser l'égalisation pour retrouver des performances proches de celles établies pour un canal AWGN.



RE3 42 - BE - ENSEIRB-MATMECA / IRT 21/09/2009

Démarche pour caractériser les canaux

24

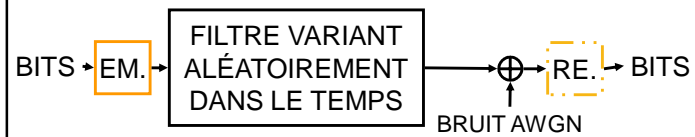
- Partir des conditions idéales de propagation : propagation en espace libre.
- Modéliser les distorsions subies par le signal dues au canal et en déduire les caractéristiques du canal en tant que filtre variant aléatoirement dans le temps.

RE3 42 - BE - ENSEIRB-MATMECA / IRT 21/09/2009

Chaîne de transmission

25

- Chaîne passe-bas équivalente.
- Filtre variant aléatoirement dans le temps : filtre passe-bas inconnu de l'émetteur et du récepteur.



RE3 42 - BE - ENSEIRB-MATMECA / IRT 21/09/2009

Modèle idéal : propagation en espace libre

26

- Hypothèses :
 - Le milieu entre l'émetteur et le récepteur est dépourvu d'obstacle.
 - L'atmosphère est un milieu uniforme et non absorbant.



RE3 42 - BE - ENSEIRB-MATMECA / IRT 21/09/2009

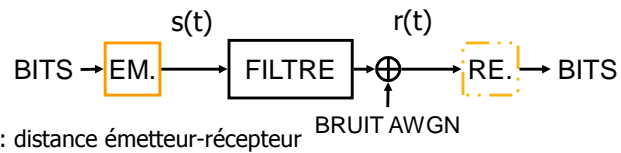
Atténuation en espace libre

27

- Atténuation de la puissance émise par un facteur $L_p(d)$: perte de trajet (path loss).

$$r(t) = \alpha s(t) + n(t)$$

$$\alpha = \frac{1}{L_p(d)}$$



RE3 42 - BE - ENSEIRB-MATMECA / IRT 21/09/2009

Exemple : cas d'une antenne isotropique

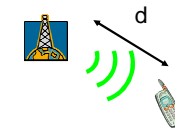
28

- $L_p(d)$ dépend de d et de la longueur d'onde du signal λ ($\lambda = c/f$).

- Rappel : $c = 3.10^8 \text{ m/s}$.

$$L_p(d) = \frac{(4\pi d)^2}{\lambda^2}$$

- Application numérique : GSM
 - Fréquence : 900 MHz
 - Affaiblissement entre une station de base et un portable situé à 100 m : 70 dB.



RE3 42 - BE - ENSEIRB-MATMECA / IRT 21/09/2009

Propagation réelle

29

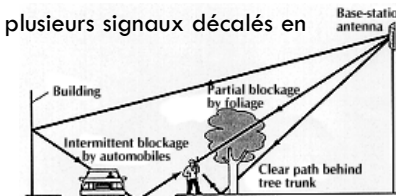
- Dans la pratique, le modèle en espace libre est inapproprié.
- Phénomène de trajets multiples (multipath) :
 - Existence de plusieurs chemins entre l'émetteur et le récepteur.
- Phénomène d'évanouissement (fading) :
 - Composition destructive de trajets très voisins en temps les uns des autres (opposition de phase).

RE3 42 - BE - ENSEIRB-MATMECA / IRT 21/09/2009

Phénomène de trajets multiples

30

- D'un point de vue macroscopique, les ondes électromagnétiques subissent des réflexions sur les obstacles entre l'émetteur et le récepteur.
- Le récepteur reçoit plusieurs signaux décalés en temps.



RE3 42 - BE - ENSEIRB-MATMECA / IRT 21/09/2009

Modélisation des trajets multiples

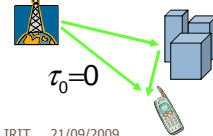
31

- Signal $r(t)$: somme de N versions retardées et pondérées de $s(t)$.
- Nombre N de trajets aléatoire.
- Coefficients $\alpha_i \exp(-j\phi_i)$ aléatoires mais fixes.
- Trajets séparables de retards τ_i .

EMISSION RECEPTION



$$r(t) = \sum_{i=0}^{N-1} \alpha_i e^{-j\phi_i} s(t - \tau_i) + n(t)$$

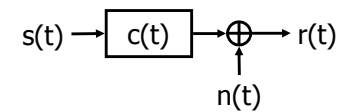


RE3 42 - BE - ENSEIRB-MATMECA / IRT 21/09/2009

Exemple de canal à trajets multiples : $c(t) = \delta(t) + 0,5\delta(t-T)$

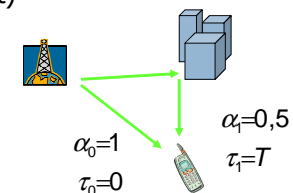
32

- T : période symbole



$$r(t) = c(t) * s(t) + n(t)$$

$$r(t) = s(t) + 0,5s(t-T) + n(t)$$



RE3 42 - BE - ENSEIRB-MATMECA / IRT 21/09/2009

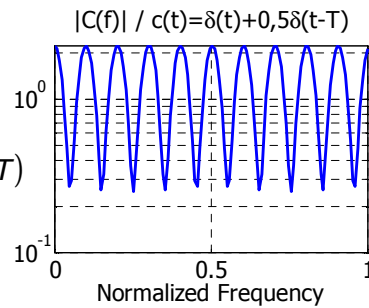
Exemple : fonction de transfert associée à $c(t)$

33

$$c(t) = \delta(t) + 0,5\delta(t-T)$$



$$C(f) = 1 + 0,5\exp(-j2\pi fT)$$

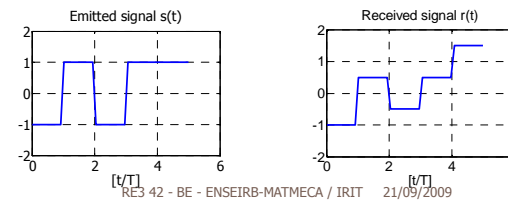


RE3 42 - BE - ENSEIRB-MATMECA / IRT 21/09/2009

Conséquence : sélectivité en fréquence

34

- La fonction de transfert $C(f)$ n'est pas constante et introduit des interférences entre symboles ou ISI (Inter-Symbols Interferences).

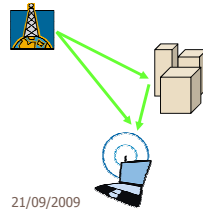


RE3 42 - BE - ENSEIRB-MATMECA / IRT 21/09/2009

Exemple : canaux SC WiMAX

35

- Canaux pour les transmissions mono-porteuse SC (Single Carrier).
- Trois types de canaux avec LOS (Line Of Sight) :
 - Type 0 : bonne transmission.
 - Type 1 et 2 : transmissions pratiques (1 meilleur que 2).



RE3 42 - BE - ENSEIRB-MATMECA / IRT 21/09/2009

Exemple : canaux SC WiMAX

36

$$H(j\omega) = C_1 \exp(-j\omega T_1) + C_2 \exp(-j\omega T_2) + C_3 \exp(-j\omega T_3)$$

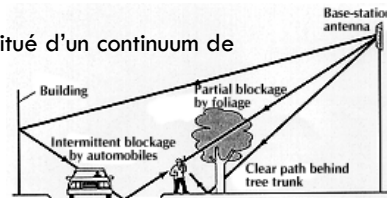
Propagation model	Tap number i	Tap amplitude C_i	Tap delay T_i
Type 0	1	1.0	0
Type 1	1	0.995	0
	2	$0.995\exp(-j0.75)$	400/R
Type 2	1	$0.286\exp(-j0.75)$	0
	2	0.953	400/R
	3	-0.095	800/R

RE3 42 - BE - ENSEIRB-MATMECA / IRT 21/09/2009 R en MBd

Phénomène de fading

37

- D'un point de vue microscopique, les ondes électromagnétiques subissent des diffractions et réfractions sur les obstacles entre l'émetteur et le récepteur.
- Chaque trajet est constitué d'un continuum de trajets multiples.

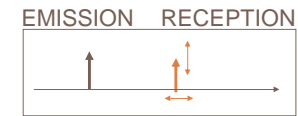


RE3 42 - BE - ENSEIRB-MATMECA / IRT 21/09/2009

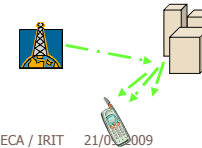
Modélisation du fading

38

- Signal reçu $r(t)$: signal $s(t)$ multiplié par un gain $\alpha(t)\exp[-j\varphi(t)]$ et retardé d'un retard $\tau(t)$ variant aléatoirement dans le temps.



$$r(t) = \alpha(t)e^{-j\varphi(t)}s[t-\tau(t)] + n(t)$$



RE3 42 - BE - ENSEIRB-MATMECA / IRT 21/09/2009

Différence entre trajets multiples et fading

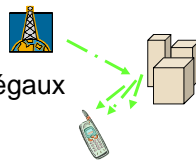
39

- Le modèle de trajets multiples est utilisé dès lors que les trajets sont séparables.
- Dans le cas contraire, c'est le modèle de fading qui est utilisé.

$$r(t) = \sum_{i=0}^{N-1} \alpha_i e^{-j\varphi_i} s(t-\tau_i) + n(t)$$

$\tau_i \approx$ égaux

$$r(t) = \alpha(t)e^{-j\varphi(t)}s[t-\tau(t)] + n(t)$$



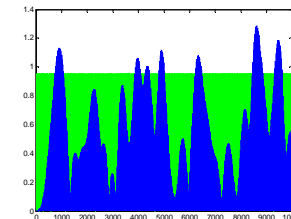
RE3 42 - BE - ENSEIRB-MATMECA / IRT 21/09/2009

Conséquence du fading : disparition du signal

40

- Visualisation de l'enveloppe des signaux émis et reçus.

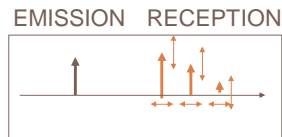
$$r(t) = \alpha(t)e^{-j\varphi(t)}s[t-\tau(t)] + n(t)$$



RE3 42 - BE - ENSEIRB-MATMECA / IRT 21/09/2009

Modèle réel : combinaison de trajets multiples et de fading

- Signal reçu $r(t)$: somme de N trajets issus de $s(t)$, affectés de gains et de retards variant aléatoirement dans le temps.



$$r(t) = \sum_{i=0}^{N-1} \alpha_i(t) e^{-j\phi_i(t)} s[t - \tau_i(t)] + n(t)$$

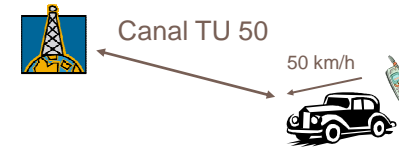
RE3 42 - BE - ENSEIRB-MATMECA / IRT 21/09/2009

Exemple : modèle TU 50

- Typical Urban 50 km/h.
- Modèle de propagation pour le GSM.



Delays (in ns)	0	200	500	1600	2300	5000
Powers (in dB)	-3.0	0.0	-3.0	-6.0	-8.0	-10.0



RE3 42 - BE - ENSEIRB-MATMECA / IRT 21/09/2009

Exemple : modèle TU50

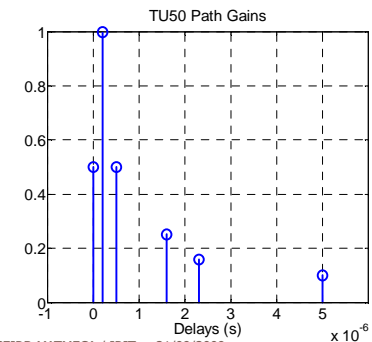
- Les retards sont fixes.
- Les modules des gains suivent des lois de Rayleigh.
- Les puissances indiquées donnent la différence (en dB) entre la puissance reçue par le trajet et la puissance émise.

$$\text{Power}_i(\text{dB}) = P_{\text{reçue}_i}(\text{dB}) - P_{\text{émise}} = |\alpha_i|^2(\text{dB})$$

RE3 42 - BE - ENSEIRB-MATMECA / IRT 21/09/2009

Exemple : modèle TU 50 Réponse impulsionnelle

- Débit = 270,83 kbit/s
- $T = 1/D = 36,92 \mu\text{s}$
- OvsF=8
- $T_e = T/\text{OvsF} = 4,62 \mu\text{s}$
- $f_c = 900 \text{ MHz}$
- $v = 50 \text{ km/s}$
- $c = 3e8 \text{ m/s}$
- $f_d = f_c * v/c$



RE3 42 - BE - ENSEIRB-MATMECA / IRT 21/09/2009

Conclusion

45

- Modèle de propagation en espace libre trop simple.
- Nécessité de caractériser les phénomènes de trajets multiples et de fading, ainsi que leurs incidences sur les caractéristiques des filtres variant aléatoirement dans le temps.

RE3 42 - BE - ENSEIRB-MATMECA / IRIT 21/09/2009

I. Caractérisation des canaux

46

1. Fading à long terme et à court terme
2. Loi des gains multiplicatifs
3. Étalement temporel du signal
4. Variation temporelle du canal

RE3 42 - BE - ENSEIRB-MATMECA / IRIT 21/09/2009

I. Caractérisation des canaux

47

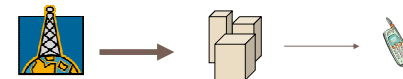
1. **Fading à long terme et à court terme**
2. Loi des gains multiplicatifs
3. Étalement temporel du signal
4. Variation temporelle du canal

RE3 42 - BE - ENSEIRB-MATMECA / IRIT 21/09/2009

Fading à long terme (shadowing)

48

- Causes : gros obstacles (collines, forêts, immeubles, ...).
- Conséquence : atténuation de la puissance émise.

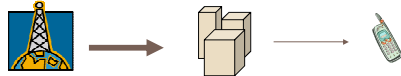


RE3 42 - BE - ENSEIRB-MATMECA / IRIT 21/09/2009

Caractéristiques statistiques du fading à long terme

49

- Perte moyenne de trajet : atténuation moyenne entre l'émetteur et le récepteur.
- Variations log-normales autour de la perte moyenne.

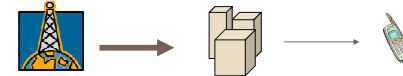


RE3 42 - BE - ENSEIRB-MATMECA / IRT 21/09/2009

Perte moyenne de trajet

50

- Perte exprimée par des relations proches de l'atténuation en espace libre.
- Atténuation en d^n où d représente la distance émetteur-récepteur.



RE3 42 - BE - ENSEIRB-MATMECA / IRT 21/09/2009

Remarques

51

- Exposant n dans $1/d^n$: plus il y a d'obstacles, plus n augmente. Plus l'onde est guidée (comme dans une rue), plus n diminue.
- Exemple de modèles : modèles de Okamura-Hata. Ils permettent de calculer l'atténuation moyenne en fonction de la fréquence, des hauteurs des antennes, ...

RE3 42 - BE - ENSEIRB-MATMECA / IRT 21/09/2009

Remarques sur les modèles du type Okamura-Hata

52

- Modèles empiriques fondés sur des mesures.
 - Valables pour un environnement donné, pour de grandes cellules (distance terminal/station de base > 1 km) et pour des fréquences de 150 MHz à 1,5 GHz (élimination des conditions locales).
 - Nécessité d'adapter le modèle à l'environnement considéré.
- Existence de modèles physiques : trop complexes.

RE3 42 - BE - ENSEIRB-MATMECA / IRT 21/09/2009

Variations log-normales autour de la perte moyenne

53

- L'atténuation due au fading à long terme est une variable (VA) aléatoire $L_s(d)$ composée d'une valeur moyenne et d'une fluctuation aléatoire X_σ de densité de probabilité (pdf pour probability density function) log-normale.

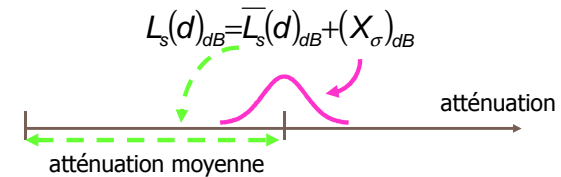
$$L_s(d) = \bar{L}_s(d) \times (X_\sigma)$$

RE3 42 - BE - ENSEIRB-MATMECA / IRT 21/09/2009

Justification du choix de la loi log-normale

54

- Si la fluctuation X_σ suit une loi log-normale, alors, en dB, X_σ suit une loi normale $N(0, \sigma^2)$.
- Dynamique : de 6 à 10 dB, voire plus.

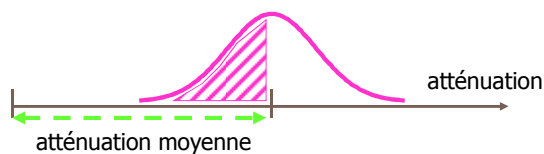


RE3 42 - BE - ENSEIRB-MATMECA / IRT 21/09/2009

Interprétation

55

- 50% du temps, l'atténuation est inférieure ou égale à l'atténuation moyenne.

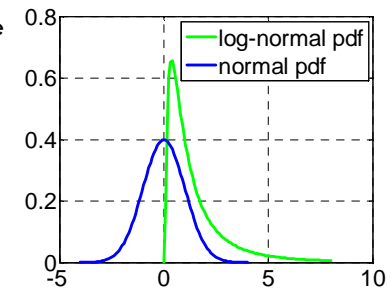


RE3 42 - BE - ENSEIRB-MATMECA / IRT 21/09/2009

Loi normale et loi log-normale

56

- Soit X une va normale de moyenne m et de variance σ^2 .
- Soit R , la va telle que $X = \ln R$.
- R suit une loi log-normale.

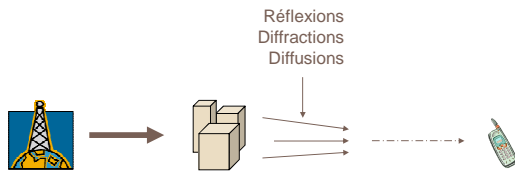


RE3 42 - BE - ENSEIRB-MATMECA / IRT 21/09/2009

Fading à court terme

57

- Causes : mouvements (aussi petits que $\lambda/2$) entre l'émetteur et le récepteur.
- Conséquences : distorsions sur le signal émis.

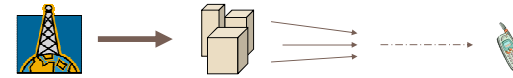


RE3 42 - BE - ENSEIRB-MATMECA / IRIT 21/09/2009

Caractéristiques statistiques du fading à court terme

58

- Type d'atténuation observé
 - Loi des gains multiplicatifs.
- Importance de l'ISI
 - Étalement temporel du signal.
- Vitesse à laquelle le canal varie
 - Variation temporelle du canal.



RE3 42 - BE - ENSEIRB-MATMECA / IRIT 21/09/2009

I. Caractérisation des canaux

59

1. Fading à long terme et à court terme
2. **Loi des gains multiplicatifs**
3. Étalement temporel du signal
4. Variation temporelle du canal

RE3 42 - BE - ENSEIRB-MATMECA / IRIT 21/09/2009

Hypothèses

60

- Signal reçu $r(t)$.
- Pas de retard, ni de trajets multiples.
- Étude du processus aléatoire $\alpha(t)\exp[-j\varphi(t)]$.

$$r(t) = \alpha(t)e^{-j\varphi(t)} s(t) + n(t)$$

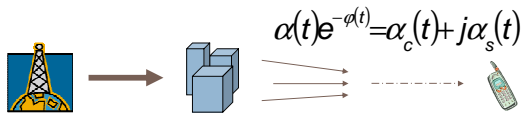
RE3 42 - BE - ENSEIRB-MATMECA / IRIT 21/09/2009

Génération du gain multiplicatif

$$\alpha(t)\exp[-j\varphi(t)]$$

61

- Génération à partir de bruits blancs gaussiens complexes.
- La statistique du gain va changer suivant la présence d'une ligne de mire (LOS pour Line Of Sight).



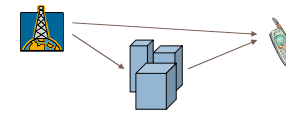
RE3 42 - BE - ENSEIRB-MATMECA / IRT 21/09/2009

Fading de Rice

(Rician fading)

62

- Signal reçu $r(t)$: plusieurs trajets et une composante LOS.
- $\alpha(t)$ suit une loi de Rice.
- $\varphi(t)$ est uniformément répartie sur $[0, 2\pi[$.



RE3 42 - BE - ENSEIRB-MATMECA / IRT 21/09/2009

Génération d'un fading de Rice

63

- Composition de bruits gaussiens non centrés $\alpha_c(t)$ et $\alpha_s(t)$, de moyenne m_c et m_s , et de même variance σ^2 .

$$\alpha(t)e^{-j\varphi(t)} = \alpha_c(t) + j\alpha_s(t)$$

RE3 42 - BE - ENSEIRB-MATMECA / IRT 21/09/2009

Fading de Rice

64

- Loi de $\alpha(t)$: loi de Rice.
- $I_0(x)$ fonction de Bessel modifiée de première espèce d'ordre 0.
- s paramètre de non-centralité.

$$\alpha(t)e^{-j\varphi(t)} = \alpha_c(t) + j\alpha_s(t) \quad s^2 = m_c^2 + m_s^2$$

$$\alpha(t) = \sqrt{\alpha_c^2(t) + \alpha_s^2(t)} \quad p_{\alpha(t)}(x) = \frac{x}{\sigma^2} \exp\left(-\frac{s^2 + x^2}{2\sigma^2}\right) I_0\left(\frac{x s}{\sigma^2}\right)$$

RE3 42 - BE - ENSEIRB-MATMECA / IRT 21/09/2009

Autres paramètres du fading de Rice

65

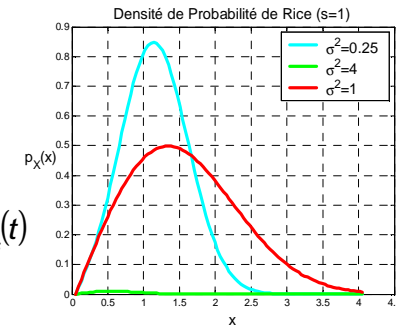
- Facteur K : rapport entre la puissance de la composante en ligne de mire s^2 et celle de la composante diffusée $2\sigma^2$.
- Puissance moyenne W : somme de la puissance de la composante en ligne de mire s^2 de mire et de la puissance diffusée $2\sigma^2$.

RE3 42 - BE - ENSEIRB-MATMECA / IRT 21/09/2009

Fading de Rice

66

$$\alpha(t)e^{-j\varphi(t)} = \alpha_c(t) + j\alpha_s(t)$$



RE3 42 - BE - ENSEIRB-MATMECA / IRT 21/09/2009

Exemple : modèles RAX

67



- Modèle de propagation en milieu rural.
- Le 'x' désigne la vitesse du terminal
- Source : 3GPP TS 05.05 (08/2003).



C.3.1 Typical case for rural area (RAX): (6 tap setting)

Tap number	Relative time (μs)		Average relative power (dB)		doppler spectrum
	(1)	(2)	(1)	(2)	
1	0,0	0,0	0,0	0,0	RICE
2	0,1	0,2	-4,0	-2,0	CLASS
3	0,2	0,4	-8,0	-10,0	CLASS
4	0,3	0,6	-12,0	-20,0	CLASS
5	0,4	-	-16,0	-	CLASS
6	0,5	-	-20,0	-	CLASS

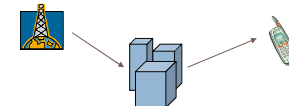
RE3 42 - BE - ENSEIRB-MATMECA / IRT 21/09/2009

Fading de Rayleigh (Rayleigh fading)

68

- Signal reçu $r(t)$: plusieurs trajets sans composante LOS.
- $\alpha(t)$ suit une loi de Rayleigh.
- $\varphi(t)$ est uniformément répartie sur $[0, 2\pi[$.

$$\alpha(t)e^{-j\varphi(t)} = \alpha_c(t) + j\alpha_s(t)$$

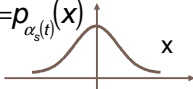


RE3 42 - BE - ENSEIRB-MATMECA / IRT 21/09/2009

Génération d'un fading de Rayleigh

69

- Composition de bruits gaussiens centrés $\alpha_c(t)$ et $\alpha_s(t)$, de même variance σ^2 .
- Pour un t fixé, les variables aléatoires $\alpha_c(t)$ et $\alpha_s(t)$ suivent des lois normales de moyenne nulle et de variance σ^2 .

$$p_{\alpha_c(t)}(x) = p_{\alpha_s(t)}(x)$$


$$\alpha(t)e^{-j\varphi(t)} = \alpha_c(t) + j\alpha_s(t)$$

RE3 42 - BE - ENSEIRB-MATMECA / IRT 21/09/2009

Fading de Rayleigh

70

- Loi de $\alpha(t)$: loi de Rayleigh.
- C'est le modèle de fading privilégié car il modélise les conditions les plus sévères avec l'expression la plus simple.

$$\alpha(t)e^{-j\varphi(t)} = \alpha_c(t) + j\alpha_s(t)$$

$$\alpha(t) = \sqrt{\alpha_c^2(t) + \alpha_s^2(t)}$$

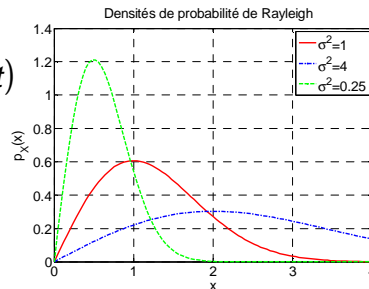
$$p_{\alpha(t)}(x) = \frac{x}{\sigma^2} \exp\left(-\frac{x^2}{2\sigma^2}\right)$$

RE3 42 - BE - ENSEIRB-MATMECA / IRT 21/09/2009

Fading de Rayleigh

71

$$\alpha(t)e^{-j\varphi(t)} = \alpha_c(t) + j\alpha_s(t)$$



RE3 42 - BE - ENSEIRB-MATMECA / IRT 21/09/2009

Exemple : modèles HTx

72

GSM

- Modèle de propagation en terrain avec collines.
 - Le 'x' désigne la vitesse du terminal
 - Source : 3GPP TS 05.05 (08/2003).
- C.3.2 Typical case for hilly terrain (HTx): (12 tap setting)

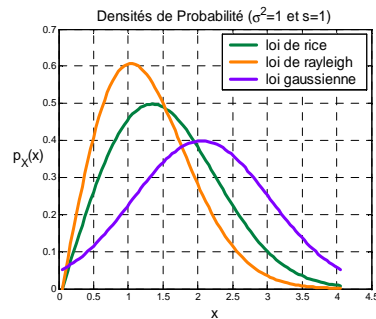
Tap number	Relative time (µs)		Average relative power (dB)		doppler spectrum
	(1)	(2)	(1)	(2)	
1	0,0	0,0	-10,0	-10,0	CLASS
2	0,1	0,2	-8,0	-8,0	CLASS
3	0,3	0,4	-6,0	-6,0	CLASS
4	0,5	0,6	-4,0	-4,0	CLASS
5	0,7	0,8	0,0	0,0	CLASS
6	1,0	2,0	0,0	0,0	CLASS
7	1,3	2,4	-4,0	-4,0	CLASS
8	15,0	15,0	-8,0	-8,0	CLASS
9	15,2	15,2	-9,0	-9,0	CLASS
10	15,7	15,8	-10,0	-10,0	CLASS
11	17,2	17,2	-12,0	-12,0	CLASS
12	20,0	20,0	-14,0	-14,0	CLASS

RE3 42 - BE - ENSEIRB-MATMECA / IRT 21/09/2009

Comparaison des lois normale, de Rice et de Rayleigh

73

- La loi de Rice est à mi-chemin entre la loi de Rayleigh (aucune LOS) et la loi normale (une LOS).



RE3 42 - BE - ENSEIRB-MATMECA / IRIT 21/09/2009

Intérêt de la connaissance de la loi des coefficients

74

- La connaissance des lois des modules des gains permet de faire le bilan de liaison.
- Les autres caractéristiques permettent de qualifier et de quantifier les déformations apportées au signal et donc de choisir les techniques de transmission les plus adaptées.

RE3 42 - BE - ENSEIRB-MATMECA / IRIT 21/09/2009

Bilan de liaison (Link Budget)

75

- Bilan de puissance entre l'émetteur et le récepteur.
- Le bilan prend en compte les deux types de fading (long et court terme).
- En connaissant la puissance nécessaire à la réception et l'atténuation, il est possible de déterminer la puissance à émettre.

RE3 42 - BE - ENSEIRB-MATMECA / IRIT 21/09/2009

Prise en compte du fading dans le bilan de liaison

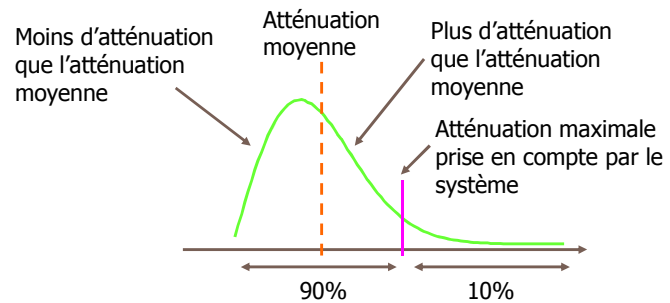
76

- Le système fixe des conditions d'utilisation, de disponibilité du système.
- Exemple : 90% des cas de fading. Le système doit fonctionner dans 90% des cas de fading (90% de la pdf couverte).

RE3 42 - BE - ENSEIRB-MATMECA / IRIT 21/09/2009

Exemple de prise en compte du fading à court terme

77

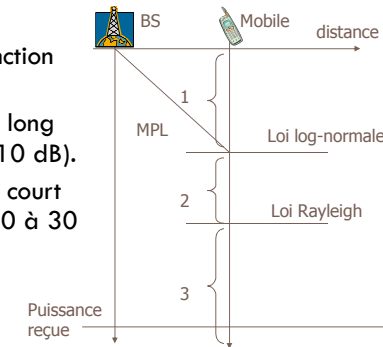


RE3 42 - BE - ENSEIRB-MATMECA / IRT 21/09/2009

Bilan de liaison

78

- 1 : perte moyenne, fonction de la distance.
- 2 : perte de fading à long terme (pire cas : 6 à 10 dB).
- 3 : perte de fading à court terme (pire cas : de 20 à 30 dB).



RE3 42 - BE - ENSEIRB-MATMECA / IRT 21/09/2009

I. Caractérisation des canaux

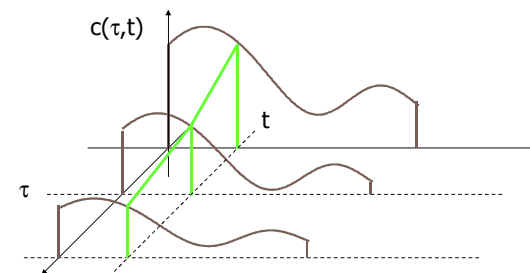
79

1. Fading à long terme et à court terme
2. Loi des gains multiplicatifs
3. **Étalement temporel du signal**
4. Variation temporelle du canal

RE3 42 - BE - ENSEIRB-MATMECA / IRT 21/09/2009

Réponse impulsionnelle $c(\tau, t)$ variant dans le temps

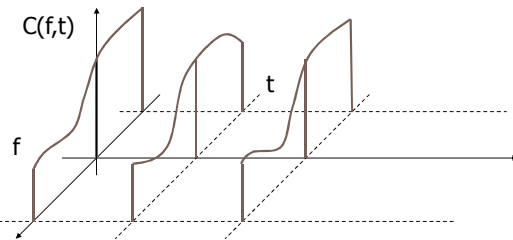
80



RE3 42 - BE - ENSEIRB-MATMECA / IRT 21/09/2009

Fonction de transfert $C(f,t)$ variant dans le temps

81



RE3 42 - BE - ENSEIRB-MATMECA / IRT 21/09/2009

Utilisation de $C(f,t)$

82

- Calcul de fonctions de corrélation en temps et en fréquence.
- Détermination de quantités permettant de classer les canaux.
- La classification permet d'orienter le choix des techniques de transmission.

RE3 42 - BE - ENSEIRB-MATMECA / IRT 21/09/2009

Bande de cohérence B_c

83

- La bande de cohérence B_c donne une approximation de la bande sur laquelle le canal se comporte comme un gain constant.
- La bande de cohérence B_c permet de caractériser l'étalement temporel du signal reçu dans le domaine des fréquences.
- Principe : comparer B_c à W , la bande occupée par le signal émis.

RE3 42 - BE - ENSEIRB-MATMECA / IRT 21/09/2009

Sélectivité en fréquence et flat fading

84

- $B_c < W$: canal sélectif en fréquence (frequency selective channel).
- $B_c > W$: canal non sélectif en fréquence (flat fading).
- Rappel : W est proportionnelle à D , débit symbole.

RE3 42 - BE - ENSEIRB-MATMECA / IRT 21/09/2009

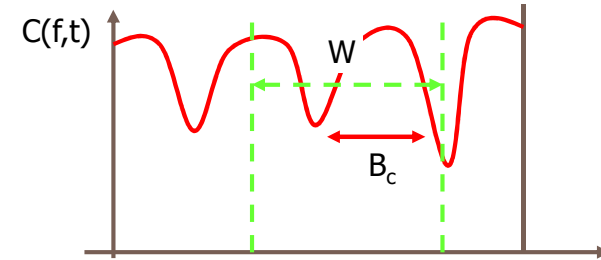
Sélectivité en fréquence si

$$B_c < W$$

- La bande dans laquelle le canal se comporte comme un gain constant est inférieure à la bande du signal émis.
- Interprétation : il y a des parties de W filtrées de façon différente et le canal introduit des gains différents en fonction de la fréquence.
- Solution : égalisation, cad compenser les différences de gain du canal pour arriver à un gain constant.

RE3 42 - BE - ENSEIRB-MATMECA / IRT 21/09/2009

Exemple : $C(f,t)$ à t fixé



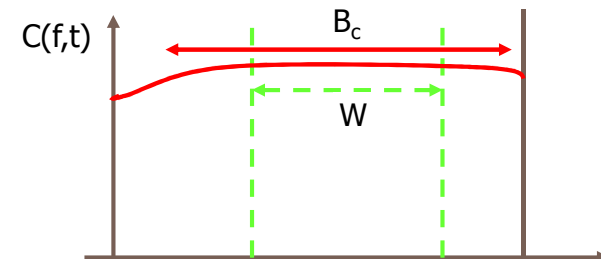
RE3 42 - BE - ENSEIRB-MATMECA / IRT 21/09/2009

Flat fading si $B_c > W$

- La bande dans laquelle le canal se comporte comme un gain constant est supérieure à la bande du signal émis.
- Interprétation : toute la bande W est filtrée avec un gain constant.
- Limitation : le gain peut être négatif (en dB).
- Conséquence : chute possible du SNR.
- Solution : augmenter la puissance émise ou diminuer la puissance requise à l'arrivée.

RE3 42 - BE - ENSEIRB-MATMECA / IRT 21/09/2009

Exemple : $C(f,t)$ à t fixé



RE3 42 - BE - ENSEIRB-MATMECA / IRT 21/09/2009

Étalement des trajets multiples T_m

89

- L'étalement des trajets multiples T_m donne une approximation du temps pendant lequel toute l'énergie servant à émettre un symbole va être consommée.
- L'étalement des trajets multiples T_m permet de caractériser l'étalement temporel du signal reçu dans le domaine temporel.
- Principe : comparer T_m à T , la période symbole.

RE3 42 - BE - ENSEIRB-MATMECA / IRT 21/09/2009

Sélectivité en fréquence et flat fading

- $T_m > T$: canal sélectif en fréquence (frequency selective channel).
- $T_m < T$: canal non sélectif en fréquence (flat fading).

$$B_c \approx \frac{1}{T_m}$$

21/09/2009

RE3 42 - BE - ENSEIRB-MATMECA / IRT

Sélectivité en fréquence si

$$T_m > T$$

91

- L'énergie émise pendant une durée T est récupérée sur une durée supérieure à T .
- Interprétation : dispersion de l'énergie transmise pour un symbole au delà de la durée d'un symbole.
- Conséquence : ISI (Inter Symbol Interference).
- Solution : égalisation, cad récupérer l'énergie dispersée sur les autres symboles.

RE3 42 - BE - ENSEIRB-MATMECA / IRT 21/09/2009

Flat fading si $T_m < T$

92

- L'énergie émise pendant une durée T est récupérée sur une durée inférieure à T .
- Interprétation : pas d'ISI mais un risque de combinaison destructive des trajets (opposition de phase).
- Conséquence : chute possible du SNR.
- Solution : augmenter la puissance émise ou diminuer la puissance requise à l'arrivée.

RE3 42 - BE - ENSEIRB-MATMECA / IRT 21/09/2009

Valeurs de T_m et de B_c

93

- Parfois, la seule valeur de T_m ne suffit pas et il faut utiliser l'écart type de T_m noté σ_τ .
- Les relations entre B_c et σ_τ sont souvent empiriques et dépendent du type de système étudié.

$$\begin{array}{l} \text{mobile} \quad B_c = \frac{0,276}{\sigma_\tau} \\ \text{iono} \quad B_c = \frac{1}{2\pi\sigma_\tau} \end{array}$$

RE3 42 - BE - ENSEIRB-MATMECA / IRIT 21/09/2009

Exemple : GSM

94

- $W=200\text{kHz}$.
- Écart-type des retards dans environnement urbain : $\sigma_\tau=2\mu\text{s}$.
- $B_c=138\text{kHz}$.
- $B_c < W$.
- Conclusion : canal sélectif en fréquence, présence d'ISI.

$$B_c = \frac{0,276}{\sigma_\tau}$$

RE3 42 - BE - ENSEIRB-MATMECA / IRIT 21/09/2009

I. Caractérisation des canaux

95

1. Fading à long terme et à court terme
2. Loi des gains multiplicatifs
3. Étalement temporel du signal
4. **Variation temporelle du canal**

RE3 42 - BE - ENSEIRB-MATMECA / IRIT 21/09/2009

Variation temporelle du canal

96

- B_c et T_m ne caractérisent pas la nature variant dans le temps du canal.
- La variation temporelle du canal est due aux mouvements de l'émetteur, du récepteur ou de tout obstacle entre les deux.
- Ces déplacements impliquent des changements de trajets et donc des changements du canal.

RE3 42 - BE - ENSEIRB-MATMECA / IRIT 21/09/2009

Temps de cohérence T_c

97

- Le temps de cohérence T_c donne une approximation du temps pendant lequel le comportement du canal est relativement constant.
- Le temps de cohérence T_c permet de caractériser la variation temporelle du canal dans le domaine temporel.
- Principe : comparer T_c à T , la période symbole.

RE3 42 - BE - ENSEIRB-MATMECA / IRIT 21/09/2009

Slow fading et fast fading

98

- $T_c > T$: canal slow fading.
- $T_c < T$: canal fast fading.

RE3 42 - BE - ENSEIRB-MATMECA / IRIT 21/09/2009

Slow fading si $T_c > T$

99

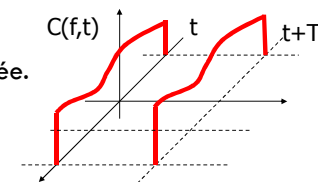
- Le temps pendant lequel le comportement du canal est identique est plus grand que la période symbole.
- Interprétation : le canal change mais lentement.
- Conséquence : il est possible d'adapter les techniques de réception aux changements du canal.
- Solution : re-actualisations des techniques de réception en fonction de l'évolution du canal.

RE3 42 - BE - ENSEIRB-MATMECA / IRIT 21/09/2009

Exemple

100

- Slow fading : sur une période symbole T , la fonction de transfert n'a pratiquement pas changée.



RE3 42 - BE - ENSEIRB-MATMECA / IRIT 21/09/2009

Exemple d'application : GSM

101

- Vitesse mobile : $v=50\text{km/h}$.
- Porteuse : $f_c=900\text{MHz}$.
- $T_c = c/(2vf_c) = 12 \text{ ms}$.
- $T_{\text{slot}}=0,577 \text{ ms}$, temps d'émission d'un utilisateur par trame TDMA.
- Donc, $T_c > 20 \times T_{\text{slot}}$.
- Le temps entre deux changements du canal est long par rapport à la durée d'émission.
- Donc fading lent et égalisation adaptative possible.

RE3 42 - BE - ENSEIRB-MATMECA / IRT 21/09/2009

Fast fading si $T_c < T$

102

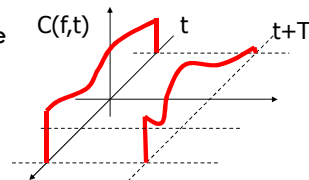
- Le temps pendant lequel le comportement du canal est identique est plus petit que la période symbole.
- Interprétation : le canal change très rapidement.
- Conséquence : il est impossible d'adapter les techniques de réception aux changements du canal.
- Solution : choisir des techniques robustes vis-à-vis de ce type de perturbations.

RE3 42 - BE - ENSEIRB-MATMECA / IRT 21/09/2009

Exemple

103

- Fast fading : la fonction de transfert à $t+T$ est complètement dé-corrélée de celle à t .



RE3 42 - BE - ENSEIRB-MATMECA / IRT 21/09/2009

Étalement Doppler f_d

104

- L'étalement Doppler f_d donne une approximation de la bande sur laquelle le canal étale les composantes spectrales.
- L'étalement Doppler f_d permet de caractériser la variation temporelle du canal dans le domaine des fréquences.
- Principe : comparer f_d à W , la bande occupée par le signal.

RE3 42 - BE - ENSEIRB-MATMECA / IRT 21/09/2009

Slow et fast fading

105

- $f_d < W$: canal slow fading.
- $f_d > W$: canal fast fading.

$$T_c \approx \frac{1}{f_d}$$

RE3 42 - BE - ENSEIRB-MATMECA / IRT 21/09/2009

Slow fading si $f_d < W$

106

- La bande sur laquelle le canal étale les composantes spectrales est inférieure à la bande occupée par le signal.
- Interprétation : le canal varie lentement dans le temps.
- Conséquence : il est possible d'adapter les techniques de réception aux changements du canal.
- Solution : re-actualisations des techniques de réception en fonction de l'évolution du canal.

RE3 42 - BE - ENSEIRB-MATMECA / IRT 21/09/2009

Fast fading si $f_d > W$

107

- La bande sur laquelle le canal étale les composantes spectrales est supérieure à la bande occupée par le signal.
- Interprétation : le canal varie rapidement dans le temps.
- Conséquence : il est impossible d'adapter les techniques de réception aux changements du canal.
- Solution : choisir des techniques robustes vis-à-vis de ce type de perturbations.

RE3 42 - BE - ENSEIRB-MATMECA / IRT 21/09/2009

Tableau récapitulatif

108

Étalement temporel du signal	Variation temporelle du canal
Canal sélectif en fréquence (ISI) $T_m > T$	Fading rapide (échec PLL, fort Doppler) $f_d > W$
Flat Fading (perte de SNR) $T_m < T$	Fading lent (perte de SNR) $f_d < W$
Canal sélectif en fréquence (ISI) $B_c < W$	Fading rapide (échec PLL, fort Doppler) $T_c < T$
Flat Fading (perte de SNR) $B_c > W$	Fading lent (perte de SNR) $T_c > T$

RE3 42 - BE - ENSEIRB-MATMECA / IRT 21/09/2009

Conclusion

109

- Deux types de fading pour les communications sans fil.
- Fading à long terme : atténuation de la puissance émise.
- Fading à court terme : déformation du signal émis.

RE3 42 - BE - ENSEIRB-MATMECA / IRIT 21/09/2009

Conclusion

110

- Compensation du fading à long terme :
 - ▣ Augmenter la puissance émise ou diminuer la puissance requise à l'arrivée (par des codes correcteurs par exemple).
- Compensation du fading à court terme :
 - ▣ Utiliser des techniques de transmission telles que l'égalisation, l'étalement de spectre, l'OFDM, les techniques de diversité en fonction du type de fading.

RE3 42 - BE - ENSEIRB-MATMECA / IRIT 21/09/2009

Plan du cours

111

- I. Caractérisation des canaux
- II. **Égalisation**
- III. Étalement de spectre
- IV. OFDM
- V. Diversité
- VI. Récapitulatif, conclusion et perspectives

RE3 42 - BE - ENSEIRB-MATMECA / IRIT 21/09/2009

Pourquoi commencer par l'égalisation ?

112

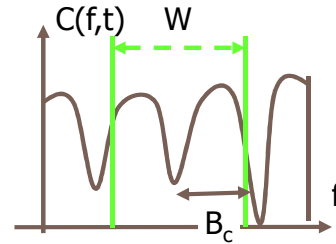
- Parmi les techniques présentées dans le cours, l'égalisation est la première technique à avoir été utilisée, dans les systèmes filaires, puis dans les systèmes sans fil.
- L'égalisation répond aux problèmes causés par les canaux sélectifs en fréquence.

RE3 42 - BE - ENSEIRB-MATMECA / IRIT 21/09/2009

Canaux sélectifs en fréquence

113

- $B_c < W$
 - ▣ B_c , bande de cohérence du canal,
 - ▣ W , bande occupée par le signal.
- Conséquence : ISI.

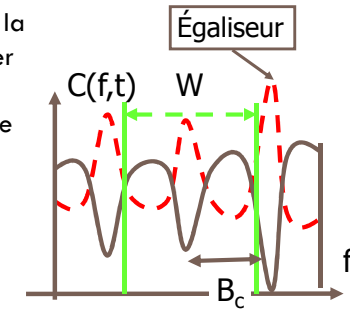


RE3 42 - BE - ENSEIRB-MATMECA / IRT 21/09/2009

Idée de base

114

- Un égaliseur est utilisé à la réception pour compenser les atténuations du canal dans certaines bandes de fréquences.



RE3 42 - BE - ENSEIRB-MATMECA / IRT 21/09/2009

Égalisation temporelle et égalisation en fréquence

115

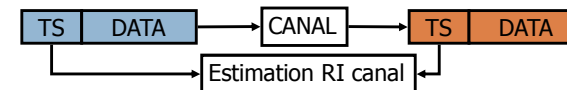
Égalisation	Application	Utilisation
Temporelle	$r(t)$	Canaux peu sélectifs (RI sur peu de symboles)
En fréquence	$R(f)$	Canaux très sélectifs

RE3 42 - BE - ENSEIRB-MATMECA / IRT 21/09/2009

Contrainte : connaissance de la RI du canal

116

- Pour compenser les distorsions causées par le canal, il faut connaître la réponse impulsionnelle (RI) du canal.
- Pour connaître la RI du canal, l'émetteur doit émettre une séquence de bits connue du récepteur : c'est la séquence d'apprentissage.

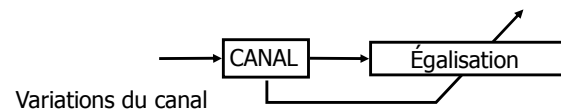


RE3 42 - BE - ENSEIRB-MATMECA / IRT 21/09/2009

Égalisation et slow fading

117

- Dans le cas des canaux slow fading, il est possible d'adapter les techniques d'égalisation aux variations temporelles du canal par **égalisation adaptative**.
- $T_c > T$ (T_c , temps de cohérence du canal, T , période symbole).



RE3 42 - BE - ENSEIRB-MATMECA / IRT 21/09/2009

Premiers développements

118

- 1965 : bases de l'égalisation et de l'égalisation adaptative par Lucky.
- 1972 : égalisation optimale MLSE par Forney (algorithme de Viterbi appliqué à l'égalisation).

RE3 42 - BE - ENSEIRB-MATMECA / IRT 21/09/2009

Solutions dans le cas de canaux idéaux

119

- Si le canal est connu a priori, fixe et constant : utilisation de filtres de mise en forme en racine de cosinus surélevé.
- Si le canal est connu a priori, fixe et non constant : compensation du canal à l'émission et à la réception.

RE3 42 - BE - ENSEIRB-MATMECA / IRT 21/09/2009

Trois approches

120

- Égaliseur MLSE (Maximum Likelihood Sequence Estimator) : égaliseur optimal mais dont la complexité peut être rédhibitoire.
- Égaliseurs linéaires (filtres linéaires) : égaliseurs sous-optimaux mais beaucoup moins complexes que le MLSE.
- Égaliseurs non linéaires : compromis entre les égaliseurs linéaires et le MLSE.

RE3 42 - BE - ENSEIRB-MATMECA / IRT 21/09/2009

II. Égalisation

121

1. Nouveau modèle de canal
2. Égaliseur MLSE
3. Trois égaliseurs
4. Egalisation adaptative

RE3 42 - BE - ENSEIRB-MATMECA / IRIT 21/09/2009

II. Égalisation

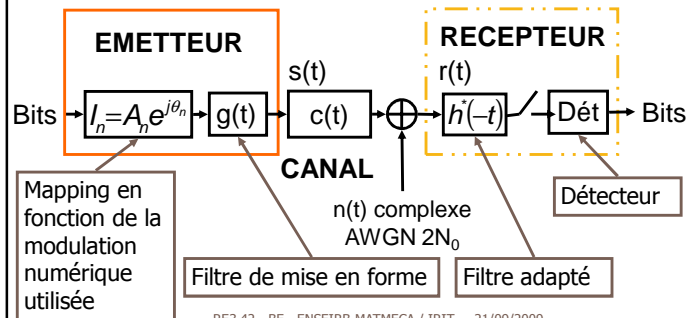
122

1. **Nouveau modèle de canal**
2. Égaliseur MLSE
3. Trois égaliseurs
4. Egalisation adaptative

RE3 42 - BE - ENSEIRB-MATMECA / IRIT 21/09/2009

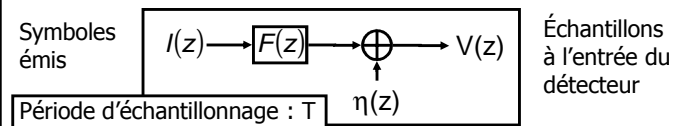
Modèle de chaîne passe-bas équivalente

123



Nouveau modèle de canal

124



- Bruit blanc complexe η_k de densité spectrale $2N_0$.
- Le filtre $F(z)$ comprend tous les filtres de la chaîne de transmission.
- Normalisation des coefficients f_n .

$$V_k = \sum_{n=0}^L f_n I_{n-k} + \eta_k$$

$$\sum_{n=0}^L |f_n|^2 = 1$$

RE3 42 - BE - ENSEIRB-MATMECA / IRIT 21/09/2009

II. Égalisation

125

1. Nouveau modèle de canal
2. **Égaliseur MLSE**
3. Trois égaliseurs
4. Egalisation adaptative

RE3 42 - BE - ENSEIRB-MATMECA / IRT 21/09/2009

Égaliseur MLSE

126

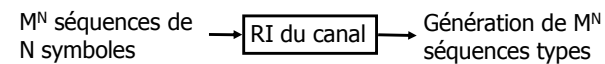
- Hypothèse : le récepteur a estimé la RI du canal, donc le récepteur sait calculer la valeur théorique des symboles qu'il peut recevoir.
- Estimateur séquentiel du maximum de vraisemblance (Maximum Likelihood Sequence Estimator) : l'égaliseur va comparer les séquences de symboles reçues aux séquences théoriques pré-calculées.

RE3 42 - BE - ENSEIRB-MATMECA / IRT 21/09/2009

Mise en œuvre de l'égaliseur

127

- Si le traitement des symboles se fait sur des séquences de N symboles (M symboles différents), le récepteur génère les M^N séquences possibles qu'il peut recevoir.

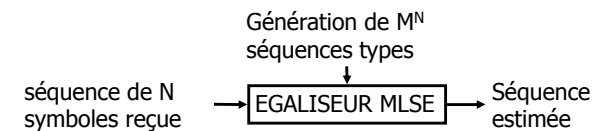


RE3 42 - BE - ENSEIRB-MATMECA / IRT 21/09/2009

Principe de l'égaliseur MLSE

128

- Calculer les distances euclidiennes entre la séquence reçue et M^N séquences possibles et à choisir la séquence donnant la plus petite distance.



RE3 42 - BE - ENSEIRB-MATMECA / IRT 21/09/2009

Avantages et inconvénient de l'égaliseur MLSE

129

- Avantages :
 - ▣ Égaliseur optimal en termes de probabilité d'erreur (cad en termes de performances) car de type ML.
 - ▣ Fait l'égalisation et la détection en même temps.
- Inconvénient : à chaque séquence de N symboles reçue, il faut calculer M^N distances.

RE3 42 - BE - ENSEIRB-MATMECA / IRIT 21/09/2009

Amélioration de l'égaliseur MLSE

130

- Existence d'un algorithme équivalent en termes de performances et moins complexe : algorithme de Viterbi (aussi utilisé dans le décodage des codes correcteurs).
- Cependant, cette solution n'est envisageable que pour $L < 10$.
- Dans le cas contraire, il faut se résoudre à choisir des égaliseurs encore moins complexes mais sous-optimaux.

RE3 42 - BE - ENSEIRB-MATMECA / IRIT 21/09/2009

II. Égalisation

131

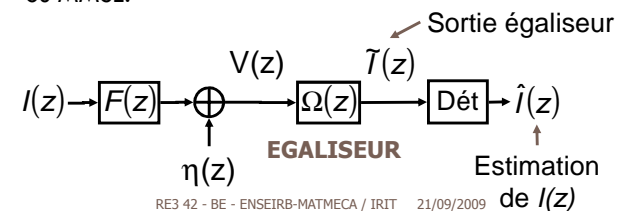
1. Nouveau modèle de canal
2. Égaliseur MLSE
3. **Trois égaliseurs**
4. Egalisation adaptative

RE3 42 - BE - ENSEIRB-MATMECA / IRIT 21/09/2009

Égalisation linéaire

132

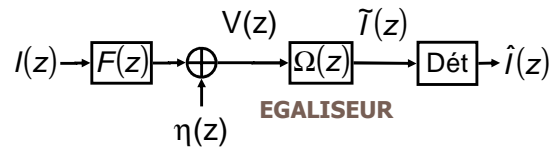
- L'égaliseur est un filtre (opération linéaire).
- Synthèse du filtre égaliseur : les coefficients du filtre sont calculés en fonction d'un critère à optimiser : ZFE ou MMSE.



Égaliseur ZFE

133

- ZFE : Zero Forcing Equalizer.
- Le critère à optimiser pour calculer les coefficients du filtre est l'absence d'ISI, cad le critère de Nyquist.



RE3 42 - BE - ENSEIRB-MATMECA / IRIT 21/09/2009

Synthèse de l'égaliseur ZFE

134

- Trouver les coefficients de l'égaliseur de sorte que la cascade des filtres de la chaîne soit un filtre qui respecte le critère de Nyquist : $Q(z)=1$.

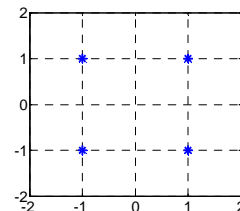
$$Q(z) = F(z)\Omega(z) = 1 \Rightarrow \Omega(z) = \frac{1}{F(z)}$$

RE3 42 - BE - ENSEIRB-MATMECA / IRIT 21/09/2009

Exemples : émission d'une modulation QPSK

135

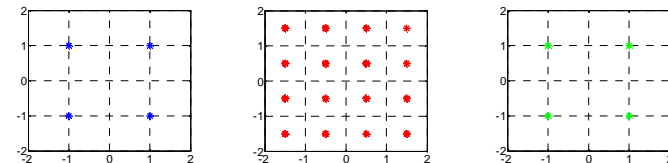
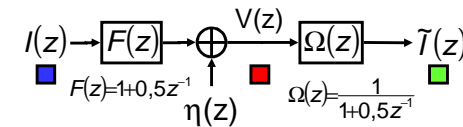
- Période d'échantillonnage : T , période symbole.
- Visualisation des constellations.



RE3 42 - BE - ENSEIRB-MATMECA / IRIT 21/09/2009

Exemple : $L=1 / N_0=0$

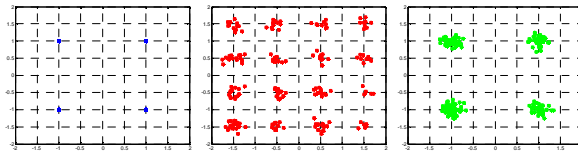
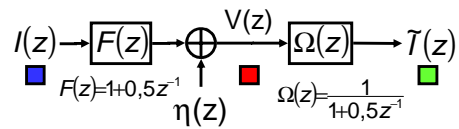
136



RE3 42 - BE - ENSEIRB-MATMECA / IRIT 21/09/2009

Exemple : $L=1 / N_0=0,01$

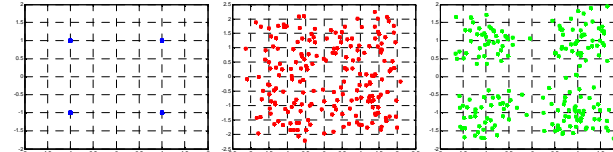
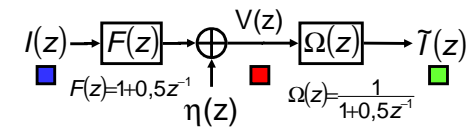
137



RE3 42 - BE - ENSEIRB-MATMECA / IRIT 21/09/2009

Exemple : $L=1 / N_0=0,1$

138



RE3 42 - BE - ENSEIRB-MATMECA / IRIT 21/09/2009

Inconvénients du ZFE

139

- Filtres RII (Réponse Impulsionnelle Infinie) : risque de pôles hors du cercle unité, entraînant un filtre instable.
- Filtres de la forme $1/F(z)$: les 0 de $F(z)$ génèrent des gains infinis.
- En présence de bruit : les atténuations du canal demandent des gains supérieurs à 1 (amplification du bruit).

RE3 42 - BE - ENSEIRB-MATMECA / IRIT 21/09/2009

Synthèse de filtres ZFE de forme RIF

140

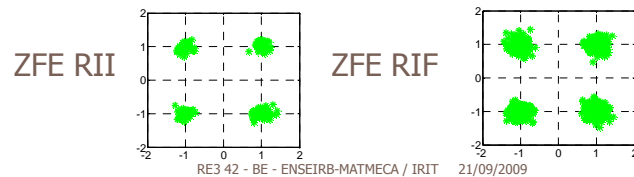
- RIF : Réponse Impulsionnelle finie.
- Le fait de tronquer la RI de l'égaliseur induit une perte de performances : présence d'une ISI résiduelle après égalisation.
- La relation $\Omega(z)=1/F(z)$ se transforme en un système d'équations.

RE3 42 - BE - ENSEIRB-MATMECA / IRIT 21/09/2009

Exemple : $L=1$ / $2K+1=5$ / $N_0=0,01$

141

$$F(z) = 1 + 0,5z^{-1}$$

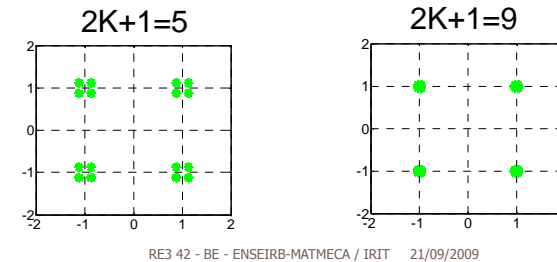


RE3 42 - BE - ENSEIRB-MATMECA / IRT 21/09/2009

Lorsque la taille de l'égaliseur croît, l'ISI diminue

142

- Pour mieux réduire l'ISI résiduelle après égalisation, il faut augmenter l'ordre du filtre.

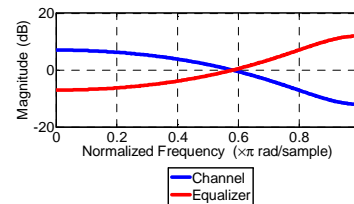


RE3 42 - BE - ENSEIRB-MATMECA / IRT 21/09/2009

Conclusion sur le ZFE

143

- Avantage : très simple.
- Inconvénients :
 - Présence d'une ISI résiduelle.
 - L'égaliseur amplifie le bruit dans les bandes atténuées par le canal.



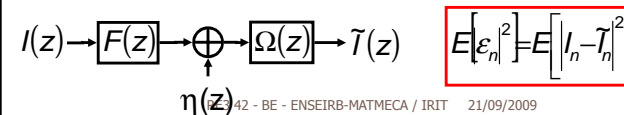
$$\Omega(z) = \frac{1}{F(z)}$$

RE3 42 - BE - ENSEIRB-MATMECA / IRT 21/09/2009

Égaliseur MMSE

144

- MMSE : Minimum Mean Square Error.
- Le critère à optimiser pour calculer les coefficients du filtre est l'erreur moyenne quadratique entre les symboles émis et les symboles à la sortie de l'égaliseur.

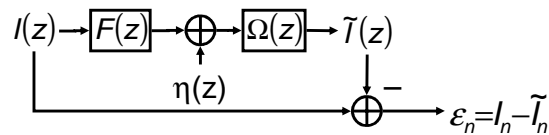


RE3 42 - BE - ENSEIRB-MATMECA / IRT 21/09/2009

Mode supervisé

145

- Pour calculer les coefficients du filtre égaliseur, le récepteur doit connaître une séquence de symbole émis : c'est le mode supervisé.



RE3 42 - BE - ENSEIRB-MATMECA / IRT 21/09/2009

MMSE sous la forme de RII

146

- Compromis entre compensation du canal et atténuation du bruit.
- Quand le bruit est prépondérant, l'égaliseur atténue le bruit. Sinon, il compense le canal.
- Même inconvénient dû à l'instabilité des filtres.

$$\Omega(z) = \frac{F^*(z^{-1})}{X(z) + \frac{2N_0}{\sigma_I^2}}$$

RE3 42 - BE - ENSEIRB-MATMECA / IRT 21/09/2009

Filtres égaliseurs MMSE RIF

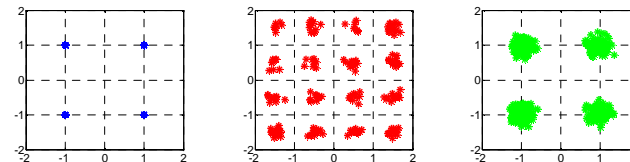
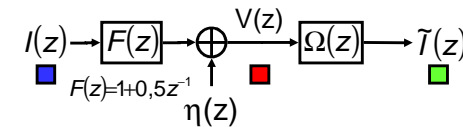
147

- Il est possible de synthétiser les filtres égaliseurs MMSE sous la forme de RIF.
- La troncature de la RI dégrade, ici aussi, les performances.

RE3 42 - BE - ENSEIRB-MATMECA / IRT 21/09/2009

Exemple : $L=1 / 2K+1=5 / N_0=0,01$

148

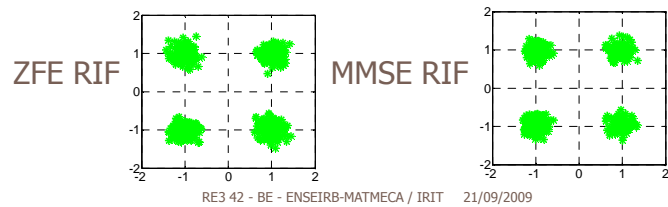


RE3 42 - BE - ENSEIRB-MATMECA / IRT 21/09/2009

Comparaison MMSE / ZFE

149

- Exemple : $L=1 / 2K+1=5 / N_0=0,01$.
- Meilleures performances pour le MMSE.



Conclusion sur le MMSE fini

150

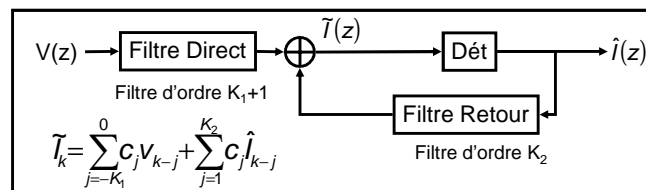
- Avantage : meilleur que le ZFE en présence de bruit.
- Inconvénient : ne fonctionne pas pour les canaux très sélectifs en fréquence.

RE3 42 - BE - ENSEIRB-MATMECA / IRT 21/09/2009

Egalisation non linéaire

151

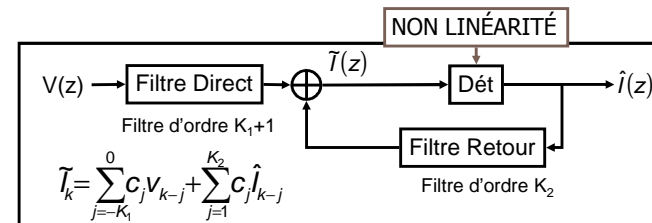
- Egaliseur à retour de décision : Decision Feedback Equalizer (DFE).



Égalisation non linéaire

152

- Deux filtres égaliseurs (de type MMSE).
- Le détecteur introduit la non linéarité.



Justification de l'architecture de l'égaliseur DFE

153

$$\tilde{T}_k = \sum_{j=-K}^0 c_j V_{k-j} + \sum_{j=1}^K c_j V_{k-j}$$

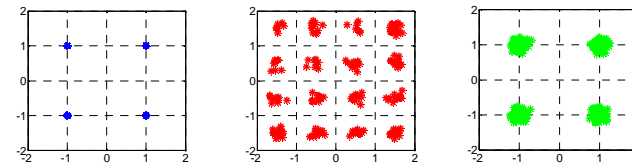
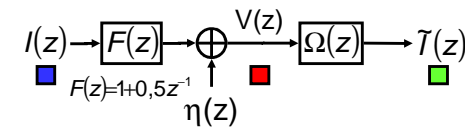
$$V(z) \rightarrow \Omega(z) \rightarrow \tilde{T}(z)$$

A l'instant k, le détecteur a déjà estimé les symboles I_{k-j} ($j > 0$). Autant en tirer partie dans l'égalisation.

RE3 42 - BE - ENSEIRB-MATMECA / IRIT 21/09/2009

Exemple : $L=1$ / $K_1+K_2=5$ / $N_0=0,01$

154

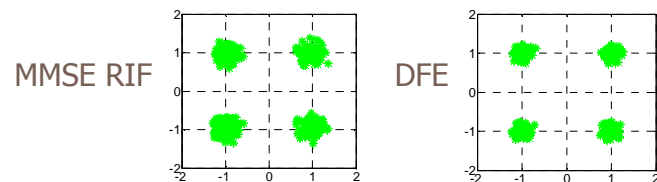


RE3 42 - BE - ENSEIRB-MATMECA / IRIT 21/09/2009

Comparaison DFE / MMSE

155

- Exemple : $L=1$ / $N_0=0,01$.
- Meilleures performances pour le DFE.



RE3 42 - BE - ENSEIRB-MATMECA / IRIT 21/09/2009

Conclusion sur le DFE fini

156

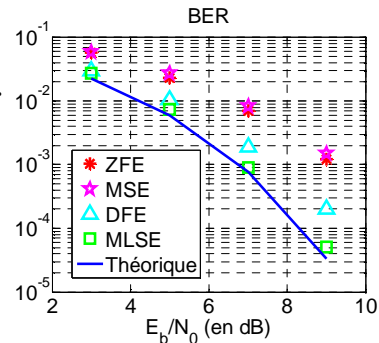
- Meilleur égaliseur que le ZFE et le MMSE en termes de suppression de l'ISI.
- Mais n'atteint pas le niveau de performances que le MLSE en termes de probabilité d'erreur.

RE3 42 - BE - ENSEIRB-MATMECA / IRIT 21/09/2009

Performances sur canal $1+0,5z^{-1}$ en termes de BER

157

- BPSK : +1/-1.
- BER : Bit Error Rate.



RE3 42 - BE - ENSEIRB-MATMECA / IRT 21/09/2009

Conclusion sur les trois égaliseurs

158

- MLSE > DFE MMSE > ZFE
- Contraintes de mise en œuvre :
 - connaissance de la RI du canal.
 - pour MMSE et DFE, connaissance des bits émis (mode supervisé) : utilisation d'une séquence d'apprentissage.

RE3 42 - BE - ENSEIRB-MATMECA / IRT 21/09/2009

Complément : estimation de canaux

159

- Hypothèse : connaissance de $F(z)$.
- Comment estimer $F(z)$?
- Principe : soit un filtre de RI $h(t)$, $x(t)$ l'entrée et $y(t)$ la sortie.

- Exemples :
 - Bruit blanc
 - Séquence ML

$$R_{yx}(\tau) = h(\tau) * R_{xx}(\tau)$$

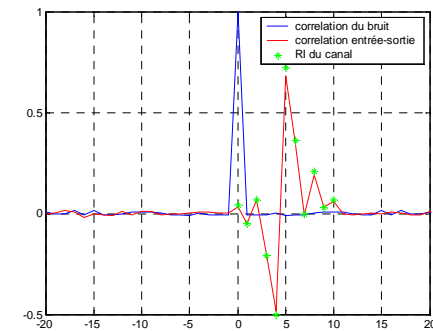
$$R_{xx}(\tau) = \delta(\tau) \Rightarrow R_{yx}(\tau) = h(\tau)$$

$$x(t) \rightarrow \boxed{h(t)} \rightarrow y(t)$$

RE3 42 - BE - ENSEIRB-MATMECA / IRT 21/09/2009

Exemple : séquence ML de 100 points dans canal A

160

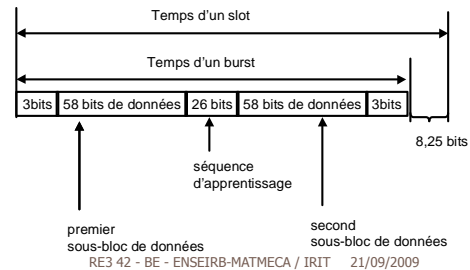


RE3 42 - BE - ENSEIRB-MATMECA / IRT 21/09/2009

Exemple d'application

161

- Séquence d'apprentissage dans les trames TDMA du GSM (midamble).



RE3 42 - BE - ENSEIRB-MATMECA / IRIT 21/09/2009

II. Égalisation

162

1. Nouveau modèle de canal
2. Égaliseur MLSE
3. Trois égaliseurs
4. **Egalisation adaptative**

RE3 42 - BE - ENSEIRB-MATMECA / IRIT 21/09/2009

Cas des canaux slow fading

163

- Contrainte supplémentaire : la RI du canal varie dans le temps.
- Contraintes pour les égaliseurs
 - ▣ estimer la RI du canal et
 - ▣ s'adapter aux variations temporelles de la RI du canal.
- Solution : égalisation adaptative.

RE3 42 - BE - ENSEIRB-MATMECA / IRIT 21/09/2009

Egalisation adaptative

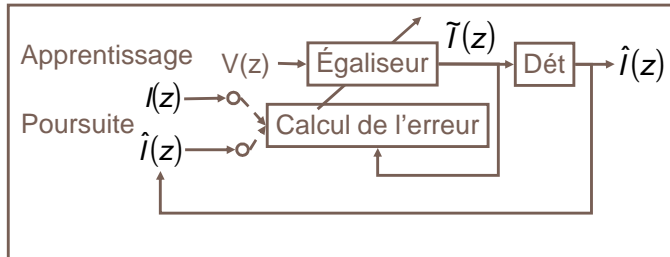
164

- Apprentissage (acquisition) : le récepteur synthétise le filtre égaliseur à partir d'une séquence d'apprentissage.
- Poursuite (tracking) : le récepteur met à jour les coefficients de l'égaliseur au fur et à mesure que de nouvelles informations lui parviennent.

RE3 42 - BE - ENSEIRB-MATMECA / IRIT 21/09/2009

Architecture du récepteur

165



RE3 42 - BE - ENSEIRB-MATMECA / IRT 21/09/2009

Principe de l'égalisation adaptative

166

- L'idée est d'estimer la RI du canal après réception complète d'une séquence d'apprentissage.
- Ensuite, les coefficients du filtre sont régulièrement mis à jour à l'aide d'un terme correcteur.

RE3 42 - BE - ENSEIRB-MATMECA / IRT 21/09/2009

Principe de l'égalisation adaptative de type LMS

167

- LMS : Least Mean Square.
- Le terme correcteur dépend de l'erreur ε_k et d'un facteur d'échelle Δ .

$$\mathbf{C}_{k+1} = \mathbf{C}_k + \Delta \varepsilon_k \mathbf{V}_k^*$$

Vecteur des coefficients du filtre égaliseur

$$\varepsilon_k = I_k - \tilde{I}_k$$

RE3 42 - BE - ENSEIRB-MATMECA / IRT 21/09/2009

Mise en oeuvre

168

- Apprentissage : correction des coefficients par la séquence d'apprentissage.
- Poursuite : correction des coefficients par les estimations des symboles (decision-oriented mode).

$$\mathbf{C}_{k+1} = \mathbf{C}_k + \Delta \varepsilon_k \mathbf{V}_k^*$$

$$\varepsilon_k = I_k - \tilde{I}_k$$

$$\hat{\mathbf{C}}_{k+1} = \hat{\mathbf{C}}_k + \Delta \hat{\varepsilon}_k \mathbf{V}_k^*$$

$$\hat{\varepsilon}_k = \hat{I}_k - \tilde{I}_k$$

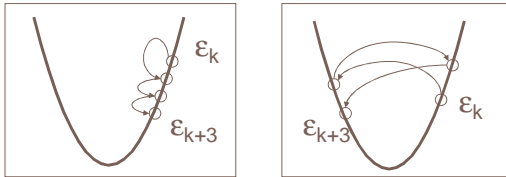
Risque de désadaptation si les estimations sont mauvaises

RE3 42 - BE - ENSEIRB-MATMECA / IRT 21/09/2009

Convergence de l'algorithme LMS et choix du facteur Δ

169

- Si trop petit, convergence très lente.
- Si trop grand, oscillation autour de la solution optimale.

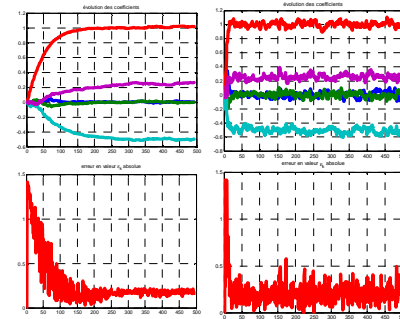


RE3 42 - BE - ENSEIRB-MATMECA / IRT 21/09/2009

Exemple : $\Delta=0,01$ et $\Delta=0,1$

170

- Haut : évolution des coefficients du filtre.
- Bas : erreur ϵ_k (en valeur absolue)



RE3 42 - BE - ENSEIRB-MATMECA / IRT 21/09/2009

Limitations du LMS

171

- LMS adapté aux lentes variations du canal.
- Inapproprié dans le cas de variations rapides.
- Solution : algorithme plus performant mais plus complexe.

RE3 42 - BE - ENSEIRB-MATMECA / IRT 21/09/2009

Autres approches

172

- Algorithmes plus sophistiqués de type RLS (Recursive Least Square).
 - Optimisation de la vitesse de convergence en fonction des coefficients.
- Égalisation MLSE Adaptative.

RE3 42 - BE - ENSEIRB-MATMECA / IRT 21/09/2009

Exemple : B_c et T_c pour le GSM

173

$W=200$ kHz	$B_c = 138$ kHz	$B_c < W$	Égalisation nécessaire
$T_{slot} = 0,5$ ms	$T_c = 12$ ms	$T_c > T_{slot}$	Égalisation adaptative possible

RE3 42 - BE - ENSEIRB-MATMECA / IRT 21/09/2009

Conclusion

174

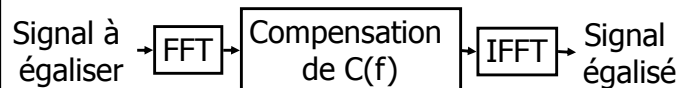
- Égalisation : supprimer l'ISI due aux canaux sélectifs en fréquence.
- Égalisation fixe : MLSE > DFE > MMSE > ZFE.
- Égalisation adaptative : LMS, RLS.
- Nécessité de connaître RI du canal et de disposer de séquences d'apprentissage (sinon, méthodes autodidactes).

RE3 42 - BE - ENSEIRB-MATMECA / IRT 21/09/2009

Perspectives (1/2) : égalisation en fréquence

175

- FDE (Frequency Domain Equalization) pour les canaux très sélectifs en fréquence (cf. OFDM).
- Une piste pour le LTE (Long Term Evolution) de la 3G.



RE3 42 - BE - ENSEIRB-MATMECA / IRT 21/09/2009

Perspectives (2/2) : turbo-égalisation

176

- Technique de réception itérative issue des turbo-codes et appliquée à l'égalisation.
- Principe : les données de bonne qualité obtenues en fin de récepteur sont ré-injectées au début du récepteur et les données sont une nouvelle fois traitées.

RE3 42 - BE - ENSEIRB-MATMECA / IRT 21/09/2009

Plan du cours

177

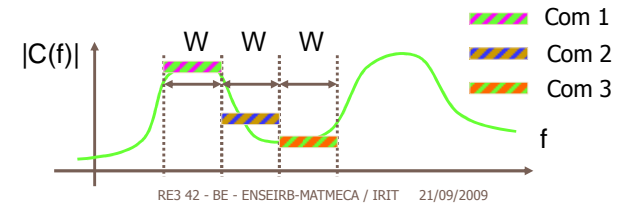
- I. Caractérisation des canaux
- II. Égalisation
- III. **Étalement de spectre**
- IV. OFDM
- V. Diversité
- VI. Récapitulatif, conclusion et perspectives

RE3 42 - BE - ENSEIRB-MATMECA / IRT 21/09/2009

Systèmes FDMA : Frequency Division Multiple Access

178

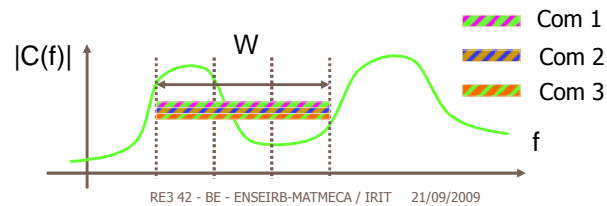
- Cas des canaux slow fading peu ou pas sélectifs en fréquence.
- Toutes les communications ne sont pas égales face au canal : problème d'équité entre les communications.



Étalement de spectre (Spread Spectrum – SS)

179

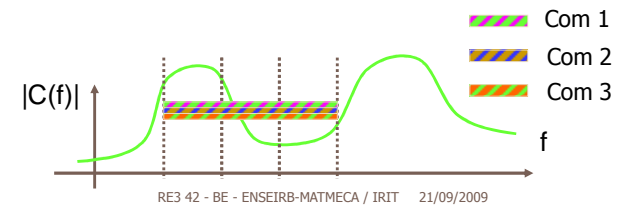
- Utiliser, pour toutes les communications, toute la bande de fréquences disponible.



Conséquences de l'étalement de spectre (1/2)

180

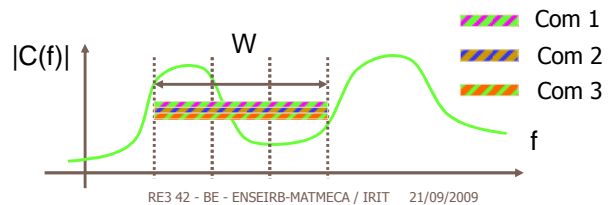
- Toutes les communications utilisent toute la bande de fréquence, tout le temps : nécessité d'assurer l'orthogonalité entre les communications.



Conséquences de l'étalement de spectre (2/2)

181

- Le canal devient sélectif en fréquence : nécessité d'implanter des techniques d'égalisation (récepteur RAKE).



Deux types d'étalement de spectre : FH-SS et DS-SS

182

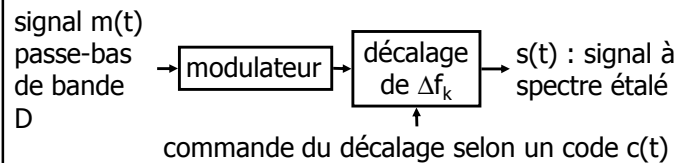
- Sauts de fréquence : Frequency Hopping Spread Spectrum (FH-SS)
 - ▣ Sauts de fréquences porteuses selon un code.
- Séquence directe : Direct Sequence Spread Spectrum (DS-SS)
 - ▣ Multiplication du signal émis par un code.

RE3 42 - BE - ENSEIRB-MATMECA / IRT 21/09/2009

FH-SS

183

- Soit un signal passe-bas de bande D modulé autour d'une porteuse f_c .
- La porteuse f_c change avec des incréments Δf_k pilotés par un code $c(t)$.



Code pseudo aléatoire $c(t)$

184

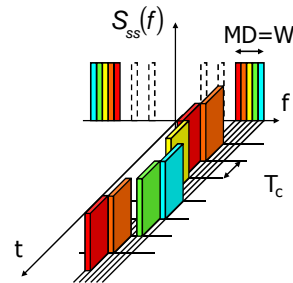
- Code ayant les propriétés statistiques d'une séquence aléatoire mais généré de façon déterministe.
- PN : Pseudo-Noise.
- PRBS : Pseudo Random Binary Sequence.

RE3 42 - BE - ENSEIRB-MATMECA / IRT 21/09/2009

Densité spectrale de puissance d'un signal FH-SS

185

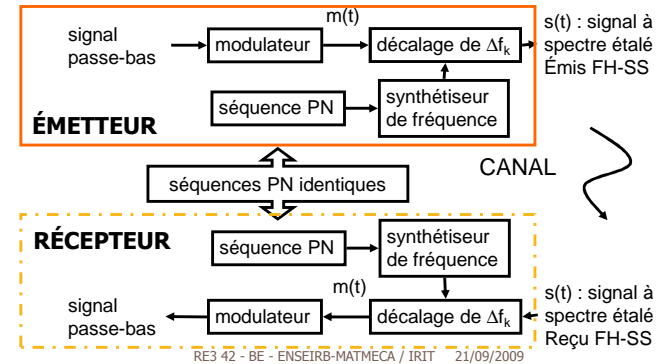
- PSD : Power Spectral Density.
- D : bande du signal $m(t)$.
- M : nombre de bandes où est dispersée l'énergie.
- T_c : durée d'un saut de fréquence (c pour chip).



RE3 42 - BE - ENSEIRB-MATMECA / IRT 21/09/2009

Réception et dés-étalement

186

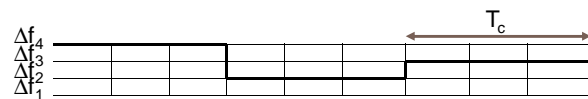


RE3 42 - BE - ENSEIRB-MATMECA / IRT 21/09/2009

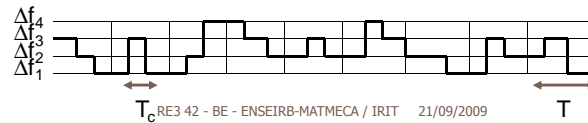
Slow et Fast FH

187

- T_c : durée d'un saut de fréquence
- SFH : Slow Frequency Hopping : $T_c > T$



- FH : Fast Frequency Hopping : $T_c < T$

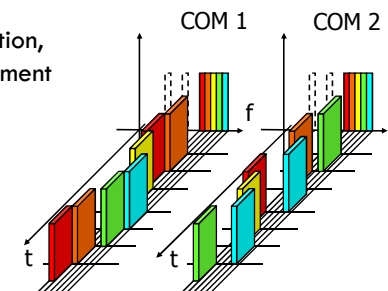


RE3 42 - BE - ENSEIRB-MATMECA / IRT 21/09/2009

Contexte multi-utilisateurs

188

- À chaque communication, une séquence d'étalement particulière.



RE3 42 - BE - ENSEIRB-MATMECA / IRT 21/09/2009

Enjeu : absence de MUI

189

- MUI : Multi-User Interference.
- Chaque séquence d'étalement doit être orthogonale avec les autres séquences pour éviter que deux émetteurs émettent en même temps dans la même bande de fréquences.

RE3 42 - BE - ENSEIRB-MATMECA / IRT 21/09/2009

FH-CDMA

190

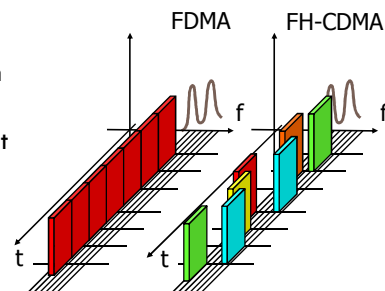
- CDMA : Code Division Multiple Access.
- En FDMA, une bande de fréquence particulière à chaque communication.
- En FH-CDMA, une séquence d'étalement particulière à chaque communication.

RE3 42 - BE - ENSEIRB-MATMECA / IRT 21/09/2009

Résistance à la sélectivité en fréquence

191

- La période d'alignement avec un trou spectral est diminuée par rapport aux systèmes FDMA.

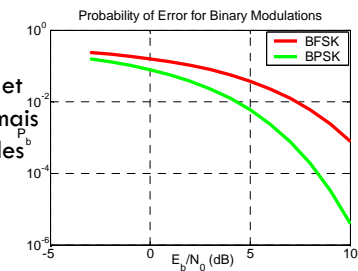


RE3 42 - BE - ENSEIRB-MATMECA / IRT 21/09/2009

Choix de la modulation : BFSK

192

- Utilisation de techniques non cohérentes de réception (sans connaissance des décalages de fréquence et de phase) plus robustes mais moins performantes que les techniques cohérentes.



RE3 42 - BE - ENSEIRB-MATMECA / IRT 21/09/2009

Inconvénient du FH-SS

193

- Détection hostile possible (pas de confidentialité comme en DS-SS) quoique difficile si le rythme de changement des fréquences est très rapide.

RE3 42 - BE - ENSEIRB-MATMECA / IRT 21/09/2009

Performances d'une transmission FH-SS

194

- K utilisateurs, M fréquences.
- E_b , énergie moyenne transmise par bit.
- $N_0/2$ densité spectrale de puissance du bruit AWGN.
- Hypothèse : sauts de fréquence synchrones.
- Modulation BFSK.

RE3 42 - BE - ENSEIRB-MATMECA / IRT 21/09/2009

P_b pour une FH-SS BFSK

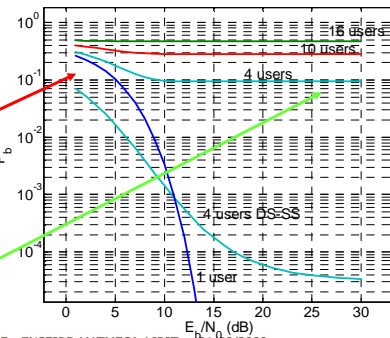
195

- Si $K=1$, erreur en exp.

$$P_b = \frac{1}{2} \exp\left(-\frac{E_b}{2N_0}\right)$$

- Quand E_b/N_0 tend vers l'infini, erreur plancher.

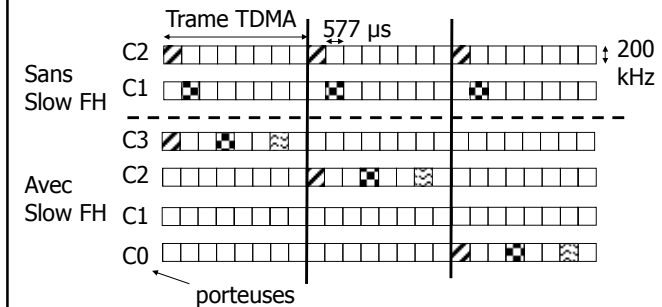
$$P_b = \frac{1}{2} \frac{K-1}{M}$$



RE3 42 - BE - ENSEIRB-MATMECA / IRT 21/09/2009

Exemple : Slow FH pour GSM

196

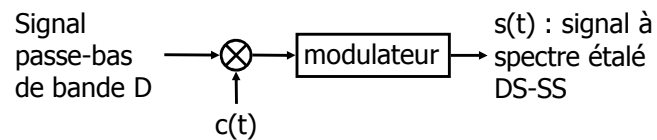


RE3 42 - BE - ENSEIRB-MATMECA / IRT 21/09/2009

DS-SS

197

- Soit un signal passe-bas de bande D modulé autour d'une porteuse f_c .
- Multiplication du signal par un code $c(t)$.

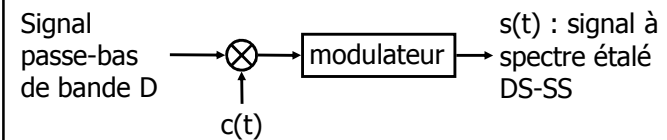


RE3 42 - BE - ENSEIRB-MATMECA / IRT 21/09/2009

Code d'étalement $c(t)$

198

- Séquence pseudo aléatoire (+/-1) de période T_c (c pour chip) telle que $QT_c=T$, où T est la période symbole.
- Q est le facteur d'étalement.

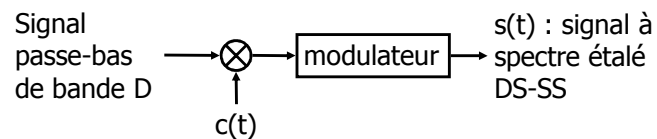


RE3 42 - BE - ENSEIRB-MATMECA / IRT 21/09/2009

Choix des codes d'étalement

199

- Le choix des codes d'étalement est beaucoup plus critique que dans le cas des systèmes FH-SS car, ici, le code multiplie directement le signal émis.

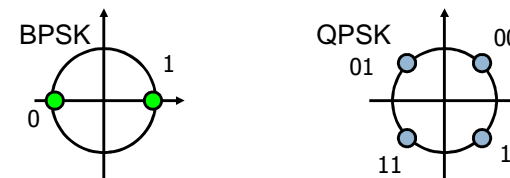


RE3 42 - BE - ENSEIRB-MATMECA / IRT 21/09/2009

Choix de la modulation

200

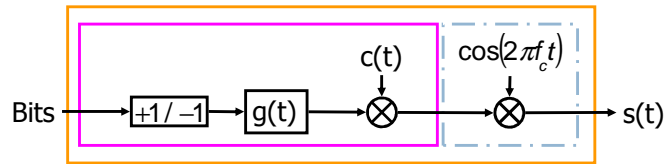
- BPSK, Binary Phase Shift Keying.
- QPSK, Quaternary Phase Shift Keying.



RE3 42 - BE - ENSEIRB-MATMECA / IRT 21/09/2009

BPSK + DS-SS

201

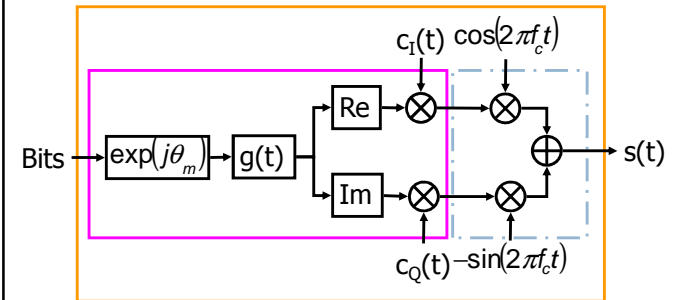


- Remarque : la multiplication par $c(t)$ peut être placée après le cosinus.

RE3 42 - BE - ENSEIRB-MATMECA / IRT 21/09/2009

QPSK + DS-SS

202

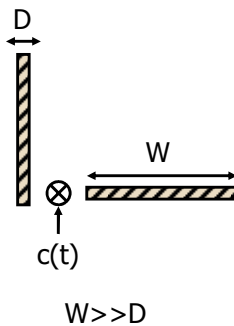


RE3 42 - BE - ENSEIRB-MATMECA / IRT 21/09/2009

Effet sur la densité spectrale de puissance

203

- Soit un signal passe-bas de bande D .
- Code $c(t)$ au débit $D_c \gg D$ (c pour chip) de forme NRZ.
- La psd du signal étalé a un niveau beaucoup plus bas que celui de la psd du signal non étalé.

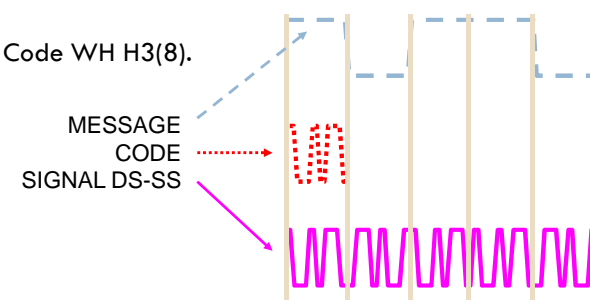


RE3 42 - BE - ENSEIRB-MATMECA / IRT 21/09/2009

Exemple : étalement de spectre avec des codes WH

204

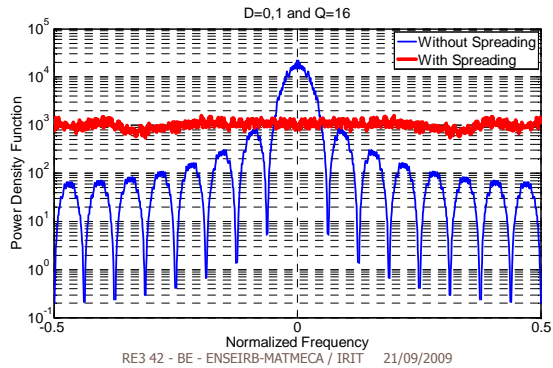
- Code WH H3(8).



RE3 42 - BE - ENSEIRB-MATMECA / IRT 21/09/2009

PSD d'un signal DS-SS

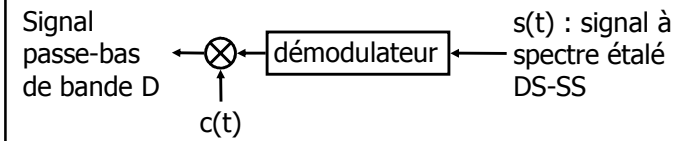
205



Réception d'un signal DS-SS

206

- Multiplication du signal par $c(t)$ après le démodulateur.
- Comme $c(t) \times c(t) = 1$, retour au signal initial avant étalement (opération réversible).

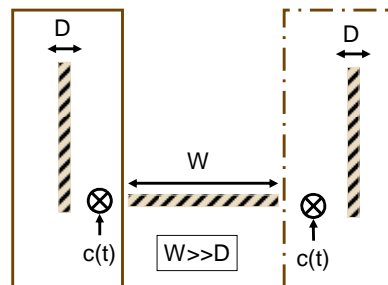


RE3 42 - BE - ENSEIRB-MATMECA / IRIT 21/09/2009

Réception

207

- Multiplication du signal reçu par le même code $c(t)$.

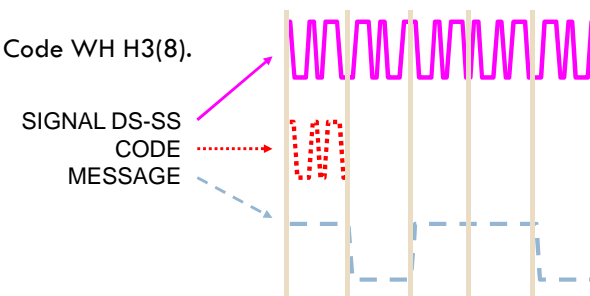


RE3 42 - BE - ENSEIRB-MATMECA / IRIT 21/09/2009

Exemple : étalement de spectre avec des codes WH

208

- Code WH H3(8).



RE3 42 - BE - ENSEIRB-MATMECA / IRIT 21/09/2009

DS-CDMA

209

- CDMA : Code Division Multiple Access.
- En FDMA, une bande de fréquence particulière à chaque communication.
- En DS-CDMA, un code d'étalement particulier à chaque communication.

RE3 42 - BE - ENSEIRB-MATMECA / IRT 21/09/2009

Contexte multi-utilisateurs

210

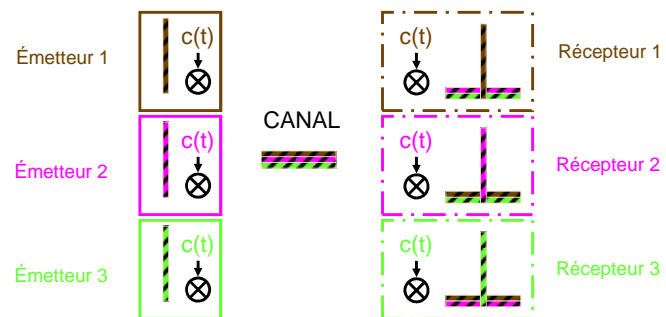
- Réception : mélange de plusieurs signaux étalés.
- Si le signal reçu n'est pas multiplié par le bon code, le signal reste étalé.



RE3 42 - BE - ENSEIRB-MATMECA / IRT 21/09/2009

Communications multi-utilisateurs

211

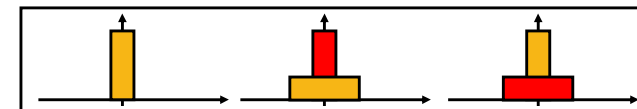


RE3 42 - BE - ENSEIRB-MATMECA / IRT 21/09/2009

Avantages du DS-SS

212

- Étalement de spectre : le signal étalé ressemble à du bruit blanc (discrétion).
- Robustesse vis-à-vis des interférences : tout brouilleur à bande étroite est étalé à la réception (sa puissance est divisée par Q).



RE3 42 - BE - ENSEIRB-MATMECA / IRT 21/09/2009

Inconvénient du DS-SS

213

- Besoin d'une synchronisation parfaite.
- Si le signal reçu est multiplié par $c(t-\tau)$ et que $c(t) \times c(t-\tau) = 0$, le signal reste étalé.
- Exemple : contexte multi-utilisateurs où les codes d'étalement sont générés par décalage d'un même code.

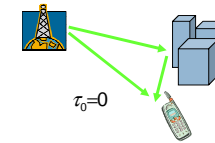
RE3 42 - BE - ENSEIRB-MATMECA / IRT 21/09/2009

Résistance à la sélectivité en fréquence

214

- Sélectivité due aux trajets multiples.
- Si $c(t) \times c(t-\tau) = 0$, les trajets multiples restent étalés.

$$r(t) = \sum_{i=0}^{N-1} \alpha_i e^{j\theta_i} m(t-\tau_i) c(t-\tau_i) + n(t)$$



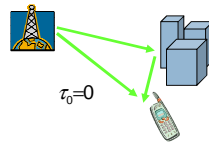
$$r(t)c(t) = \alpha_0 e^{j\theta_0} m(t) + \sum_{i=1}^{N-1} \alpha_i e^{j\theta_i} m(t-\tau_i) c(t-\tau_i) c(t) + n(t)c(t)$$

RE3 42 - BE - ENSEIRB-MATMECA / IRT 21/09/2009

Contribution constructive des trajets multiples

215

- Le récepteur peut se caler sur n'importe quel trajet.
- Conséquence : possibilité de récupérer plusieurs trajets.



$$r(t) = \sum_{i=0}^{N-1} \alpha_i e^{j\theta_i} m(t-\tau_i) c(t-\tau_i) + n(t)$$

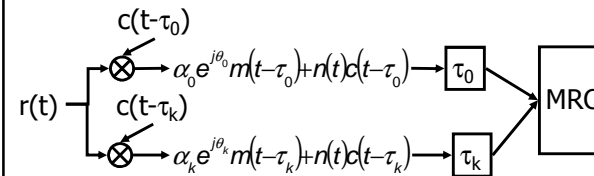
$$r(t)c(t-\tau_k) = \alpha_k e^{j\theta_k} m(t-\tau_k) + \sum_{i=0, i \neq k}^{N-1} \alpha_i e^{j\theta_i} m(t-\tau_i) c(t-\tau_i) c(t-\tau_k) + n(t)c(t-\tau_k)$$

RE3 42 - BE - ENSEIRB-MATMECA / IRT 21/09/2009

Récepteur RAKE

216

- Le récepteur récupère plusieurs trajets et les combine de façon constructive avec le MRC (Maximum Ratio Combiner).



RE3 42 - BE - ENSEIRB-MATMECA / IRT 21/09/2009

Performances d'un DS-SS

217

- K utilisateurs, $QT_c = T$
- E_b , énergie moyenne reçue par bit
- Bruit AWGN $N_0/2$
- Modulation BPSK
- Hypothèse : la puissance reçue est égale pour tous les utilisateurs.

RE3 42 - BE - ENSEIRB-MATMECA / IRT 21/09/2009

P_b pour une DS-SS BPSK

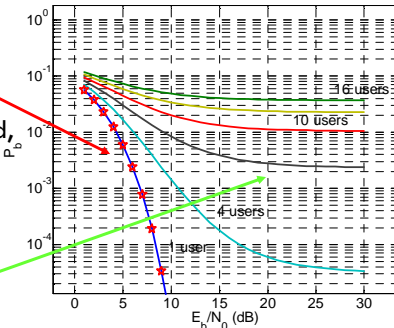
218

- Si $K=1$, BPSK.

$$P_b = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left(\sqrt{\frac{E_b}{N_0}} \right)$$

- Quand E_b/N_0 grand, P_b erreur plancher.

$$P_b = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left(\frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{\frac{3Q}{K-1}} \right)$$

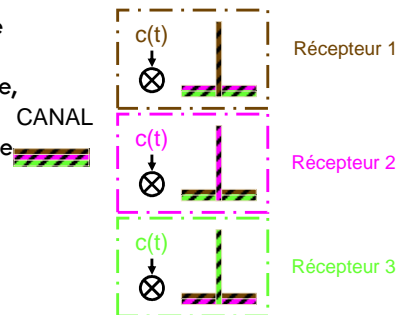


RE3 42 - BE - ENSEIRB-MATMECA / IRT 21/09/2009

Problème de l'effet near-far

219

- Si la puissance reçue depuis chaque émetteur est la même, l'interférence multi-utilisateurs a le même niveau dans chaque récepteur.

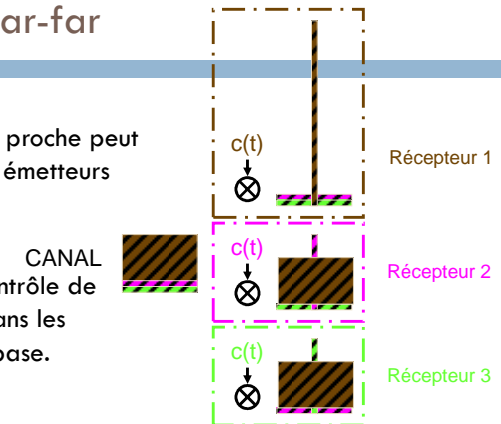


RE3 42 - BE - ENSEIRB-MATMECA / IRT 21/09/2009

Effet near-far

220

- Un émetteur proche peut masquer les émetteurs lointains.
- Solution : contrôle de puissance dans les stations de base.



RE3 42 - BE - ENSEIRB-MATMECA / IRT 21/09/2009

Orthogonalité des utilisateurs

221

- Orthogonalité des utilisateurs assurée si codes orthogonaux entre eux : interférence générée très faible entre utilisateurs.
- Soit $c_i(t)$ affecté à la communication i et $c_j(t)$ à la communication j .
- L'inter-corrélation entre les codes doit être quasi-nulle.

$$R_{c_i c_j}(\tau) \approx 0$$

RE3 42 - BE - ENSEIRB-MATMECA / IRT 21/09/2009

Propriété supplémentaire

222

- Certains codes d'étalement (codes à longueur maximale, séquence PN, codes de Gold, de Kasami) sont générés par décalage temporel d'un code unique.

$$c_i(t) = c(t-t_i) \text{ et } c_j(t) = c(t-t_j)$$

$$R_{c_i c_j}(\tau) \approx \delta(\tau)$$

- L'auto-corrélation du code de référence doit être la plus proche d'un Dirac.

RE3 42 - BE - ENSEIRB-MATMECA / IRT 21/09/2009

Exemple : codes de Walsh Hadamard (WH)

223

- Avantage : les codes sont parfaitement orthogonaux s'ils sont parfaitement synchrones (inter-corrélation nulle).
- Inconvénients : propriétés d'auto-corrélation et d'inter-corrélation médiocres si les codes sont asynchrones.

RE3 42 - BE - ENSEIRB-MATMECA / IRT 21/09/2009

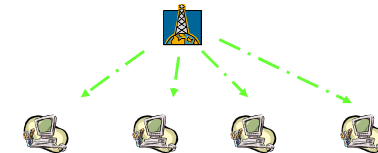
Application des codes WH sur les liaisons descendantes

224

- Réception du signal véhiculant tous les utilisateurs (synchronisés).
- Récupération de la communication j sans interférence multi-utilisateurs.

$$r(t) = \sum_{i=0}^{N-1} m_i(t) c_i(t) + n(t)$$

$$r(t) c_j(t) = m_j(t) + \sum_{i=0, i \neq j}^{N-1} m_i(t) c_i(t) c_j(t) + n(t) c_j(t)$$



RE3 42 - BE - ENSEIRB-MATMECA / IRT 21/09/2009

Inconvénients des codes WH

225

- Il y a présence d'interférences non négligeables, dès qu'il y a réception en présence de multi-trajets ou réception de plusieurs utilisateurs asynchrones (cas de la voie montante).
- Utilisation : codes WH utilisés en combinaison avec d'autres codes (IS-95/UMTS).

RE3 42 - BE - ENSEIRB-MATMECA / IRIT 21/09/2009

Applications du DS-SS CDMA

226

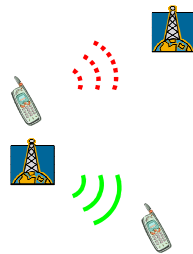
- Système de téléphonie cellulaire américain 2G : IS-95.
- GPS par satellite : GPSS.
- Téléphonie cellulaire CDMA Large Bande WCDMA : UMTS.
- Réseaux WiFi : IEEE 802.11b.

RE3 42 - BE - ENSEIRB-MATMECA / IRIT 21/09/2009

IS-95 : Interim Standard 95

227

- Qualcomm Corporation.
- DS-SS et FDD.
- Voie uplink : 25 MHz dans la bande 869-894 MHz.
- Voie downlink : 25 MHz dans la bande 824-849 MHz.
- Bande allouée à chaque communication : 1,25 MHz.
- Base des systèmes CDMA 3G américains.



RE3 42 - BE - ENSEIRB-MATMECA / IRIT 21/09/2009

Canaux et débits

228

- Nombre de canaux : 64.
- 6 types de canaux.
- Supervision : pilot (downlink), sync (downlink), access (uplink).
- Trafic : paging (downlink), downlink traffic channel, uplink traffic channel.
- Débit nominal de données (Rate Set 1) : 9,6 kbit/s.

RE3 42 - BE - ENSEIRB-MATMECA / IRIT 21/09/2009

Caractéristiques IS-95

229

- Modulations BPSK et QPSK (même information sur I(t) et Q(t)).
- Codage canal : codage convolutif 1/2 .
- Récepteur RAKE.

RE3 42 - BE - ENSEIRB-MATMECA / IRT 21/09/2009

Codes d'étalement

230

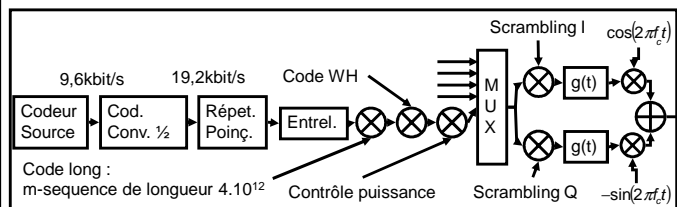
- Channelization codes pour différencier les canaux : codes WH à 1,2288 Mchip/s (64 codes), facteur d'étalement de 64.
- Scrambling codes pour différencier les stations de base (BS pour Base Station): séquences à longueur maximale.

RE3 42 - BE - ENSEIRB-MATMECA / IRT 21/09/2009

Canal Downlink

231

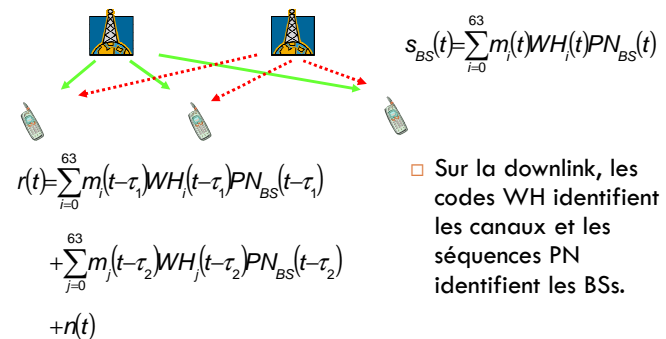
- 64 canaux dont un pilote, un canal de synchronisation et un canal de pager.



RE3 42 - BE - ENSEIRB-MATMECA / IRT 21/09/2009

Réception de plusieurs BS

232



- Sur la downlink, les codes WH identifient les canaux et les séquences PN identifient les BSs.

RE3 42 - BE - ENSEIRB-MATMECA / IRT 21/09/2009

Réception du canal pilote WH_0

233

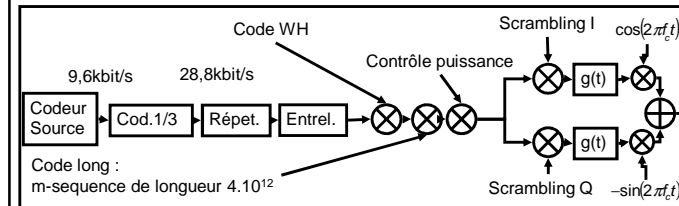
$$\begin{aligned}
 & r(t)WH_0(t-\tau_1)PN_{BS}(t-\tau_1) \\
 & = m_0(t-\tau_1) + \sum_{i=1}^{63} m_i(t-\tau_1) WH_i(t-\tau_1) WH_0(t-\tau_1) PN_{BS}^2(t-\tau_1) \\
 & + \sum_{j=0}^{63} m_j(t-\tau_2) WH_j(t-\tau_2) WH_0(t-\tau_2) PN_{BS}(t-\tau_2) PN_{BS}(t-\tau_1) \\
 & + n(t)WH_0(t-\tau_1)PN_{BS}(t-\tau_1)
 \end{aligned}$$

RE3 42 - BE - ENSEIRB-MATMECA / IRIT 21/09/2009

Canal uplink

234

- Utilisateurs asynchrones.
- Code 1/3 et Offset QPSK.



RE3 42 - BE - ENSEIRB-MATMECA / IRIT 21/09/2009

WCDMA

235

- Wideband CDMA : UMTS.
- Porteuse à 1,9 GHz.
- Bande passante de 5 MHz.
- Débits jusqu'à 2 Mbit/s.
- Codes à 3,84 Mchip/s.
- Taille trame : 10 ms.
- Facteur d'étalement jusqu'à 512.
- Codes convolutifs et turbo-codes.



RE3 42 - BE - ENSEIRB-MATMECA / IRIT 21/09/2009

Conclusion

236

- Techniques FH-SS et DS-SS.
- Codes : WH, à longueur maximale.
- Accès multiple : CDMA.
- Systèmes concurrencés par les systèmes OFDM.

RE3 42 - BE - ENSEIRB-MATMECA / IRIT 21/09/2009

Plan du cours

237

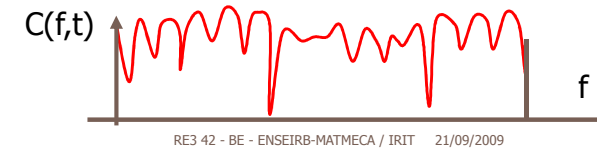
- I. Caractérisation des canaux
- II. Égalisation
- III. Étalement de spectre
- IV. **OFDM**
- V. Diversité
- VI. Récapitulatif, conclusion et perspectives

RE3 42 - BE - ENSEIRB-MATMECA / IRT 21/09/2009

Cas des canaux très sélectifs en fréquence

238

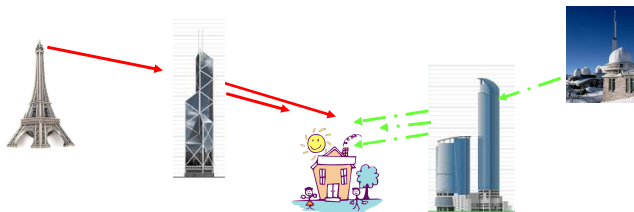
- L'égalisation temporelle ne suffit plus à compenser le phénomène d'ISI.
- Causes :
 - les retards très longs induisent des bandes de cohérence très petites.
 - Augmentation de W .



Exemple : TNT

239

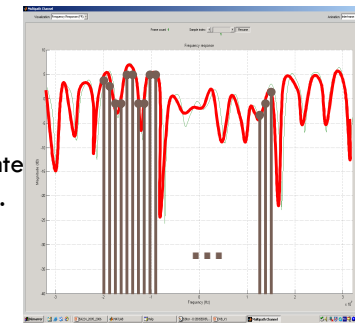
- TNT : Télévision Numérique Terrestre.
- Réception de trajets multiples provenant de plusieurs émetteurs.



OFDM : Orthogonal Frequency Division Multiplex

240

- Transmettre de multiples porteuses de façon à pouvoir considérer la fonction de transfert du canal comme une constante dans chaque sous-bande.



Passage à une transmission multi-porteuses OFDM

241

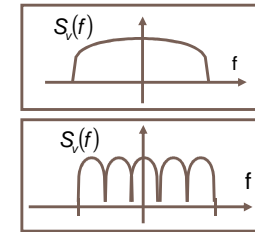
- Système mono-porteuse : un flux de données haut débit sur une seule porteuse.
- Système multi-porteuses : plusieurs flux de données bas débit sur plusieurs sous-porteuses.

RE3 42 - BE - ENSEIRB-MATMECA / IRT 21/09/2009

Application : IEEE 802.11a

242

- Débit maximal : 54 Mbit/s.
- Débit pratique : 36 Mbit/s, soit 48 Mbit/s avec les FECs.
- Bande passante : 20 MHz.
- Solution de base : une seule porteuse à 36 Mbit/s.
- Solution OFDM : 48 porteuses à 0,75 Mbit/s.



RE3 42 - BE - ENSEIRB-MATMECA / IRT 21/09/2009

Système mono-porteuse

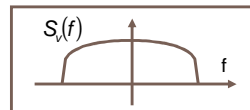
243

- Signal passe-bas $v(t)$ à amplitudes complexes b_k

$$v(t) = \sum_k b_k g(t - kT)$$

- Signal passe-bande $s(t)$ modulé autour d'une porteuse f_c .

$$s(t) = \text{Re}[v(t) \exp(j2\pi f_c t)]$$



RE3 42 - BE - ENSEIRB-MATMECA / IRT 21/09/2009

Système multi-porteuses

244

- Transformation d'un flux de symboles b_k en N flux de symboles $b_{k,i}$ où i est l'indice de la porteuse.
- Période des symboles $b_{k,i}$ est N fois plus grande que celle des b_k .

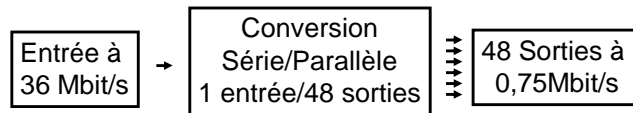
$$v(t) = \sum_k b_k h(t - kT) \rightarrow \begin{array}{c} T_{OFDM} = NT \\ \text{Conversion} \\ \text{Série/Parallèle} \end{array} \begin{array}{c} \updownarrow \\ \updownarrow \\ \updownarrow \\ \updownarrow \end{array} \sum_k b_{k,i} h(t - kT_{OFDM})$$

RE3 42 - BE - ENSEIRB-MATMECA / IRT 21/09/2009

Application IEEE 802.11a

245

- Division du flux effectif à 36 Mbit/s en N=48 flux de 0,75 Mbit/s.
- Porteuses de f_1 à f_{48} .

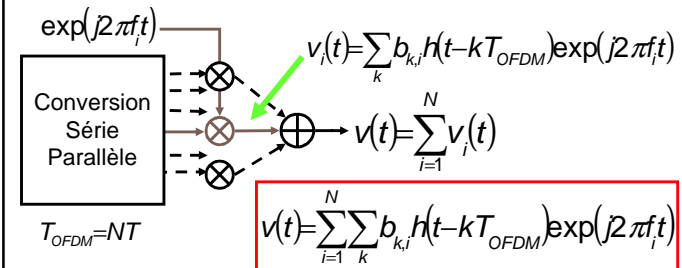


RE3 42 - BE - ENSEIRB-MATMECA / IRT 21/09/2009

Expression du multiplex OFDM

246

- Modulation des N flux bas débits.



RE3 42 - BE - ENSEIRB-MATMECA / IRT 21/09/2009

Synthèse des N modulateurs

247

$$v(t) = \sum_{i=1}^N \sum_k b_{k,i} h(t - kT_{OFDM}) \exp(j2\pi f_i t)$$

- Étude sur un intervalle particulier $[KT_{OFDM}, (K+1)T_{OFDM}]$.
- $h(t)$, porte rectangulaire d'amplitude 1.

$$v(t) = \sum_{i=1}^N b_{k,i} \exp(j2\pi f_i t)$$

RE3 42 - BE - ENSEIRB-MATMECA / IRT 21/09/2009

Synthèse des N modulateurs

248

- Échantillonnage de la période T_{OFDM} en M échantillons (période d'échantillonnage de T_{OFDM}/M)

$$v(t) = \sum_{i=1}^N b_{k,i} \exp(j2\pi f_i t)$$

$$v(n) = \sum_{i=1}^N b_{k,i} \exp\left(j2\pi f_i n \frac{T_{OFDM}}{M}\right) \quad n=0, 1, \dots, M-1$$

RE3 42 - BE - ENSEIRB-MATMECA / IRT 21/09/2009

Synthèse des N modulateurs

249

- Contrainte forte : fréquences porteuses de la forme $f_i = i/(T_{\text{OFDM}})$ $i=1,2,\dots,N$

$$v(n) = \sum_{i=1}^N b_{K,i} \exp\left(j2\pi f_i n \frac{T_{\text{OFDM}}}{M}\right) \quad n=0,1,\dots,M-1$$

$$v(n) = \sum_{i=1}^N b_{K,i} \exp\left(j2\pi \frac{in}{M}\right) \quad n=0,1,\dots,M-1$$

RE3 42 - BE - ENSEIRB-MATMECA / IRT 21/09/2009

Synthèse des N modulateurs

250

- Comment obtenir la modulation des N porteuses en une seule opération ?

$$v(n) = \sum_{i=1}^N b_{K,i} \exp\left(j2\pi \frac{in}{M}\right) \quad n=0,1,\dots,M-1$$

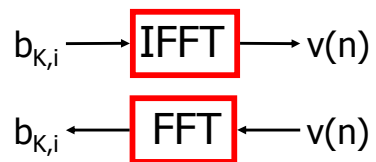


RE3 42 - BE - ENSEIRB-MATMECA / IRT 21/09/2009

Réception OFDM

251

- Émission : IFFT pour moduler.
- Réception : FFT pour démoduler.

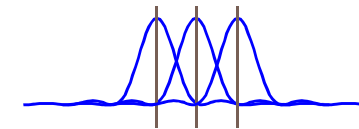


RE3 42 - BE - ENSEIRB-MATMECA / IRT 21/09/2009

Caractère orthogonal du multiplex FDM

252

- Les sous-porteuses sont orthogonales entre elles au sens du critère de Nyquist.
- Les sous-porteuses sont espacées d'un multiple de $1/T_{\text{OFDM}}$: $f_i = i/(T_{\text{OFDM}})$ $i=1,2,\dots,N$.
- $h(t)$, porte rectangulaire de durée T_{OFDM} .



RE3 42 - BE - ENSEIRB-MATMECA / IRT 21/09/2009

Préfixe cyclique

253

- CP : Cyclic Prefix.
- Complément à la transmission OFDM.
- Le préfixe cyclique permet de diminuer l'ISI due aux trajets multiples.

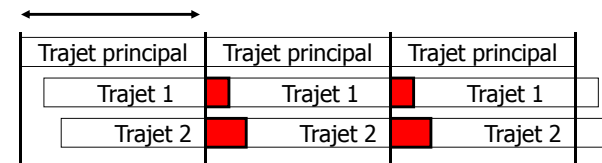
RE3 42 - BE - ENSEIRB-MATMECA / IRT 21/09/2009

Sélectivité en fréquence due aux trajets multiples

254

- Conséquence : ISI difficile à supprimer lors d'un traitement par trames.

Trame OFDM

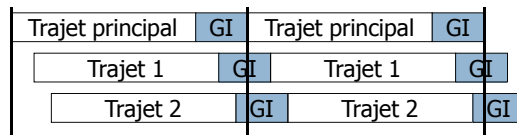


RE3 42 - BE - ENSEIRB-MATMECA / IRT 21/09/2009

Intervalle de garde

255

- GI : Guard Interval.
- Insertion d'un intervalle de garde pour récupérer le maximum de puissance.
- Perte d'efficacité spectrale.

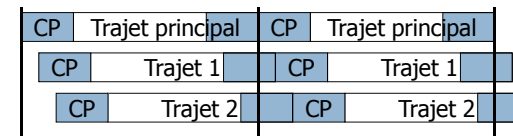


RE3 42 - BE - ENSEIRB-MATMECA / IRT 21/09/2009

Préfixe cyclique

256

- L'intervalle de garde est placé en début de trame : préfixe.
- Il est rempli d'une copie de la fin de la trame OFDM (utile pour la synchronisation).

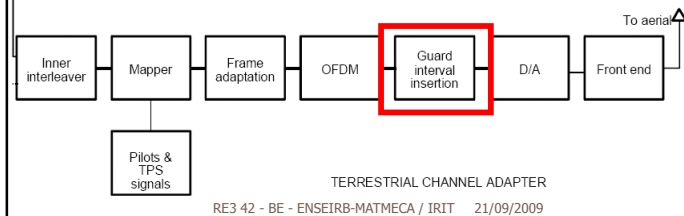


RE3 42 - BE - ENSEIRB-MATMECA / IRT 21/09/2009

Implantation du préfixe cyclique

257

- Préfixe introduit à la sortie du convertisseur P/S et retiré à l'entrée du convertisseur S/P dans le récepteur.



Égalisation pour OFDM

258

- Dans chaque sous-bande k , le canal est constant avec un gain complexe H_k .
- Égalisation : multiplier la sortie k par un coefficient correcteur.

$$\text{ZFE} \quad \frac{1}{H_k}$$

$$\text{MMSE} \quad \frac{H_k}{|H_k|^2 + \frac{\sigma_n^2}{\sigma_b^2}}$$

RE3 42 - BE - ENSEIRB-MATMECA / IRT 21/09/2009

Problème de PAPR

259

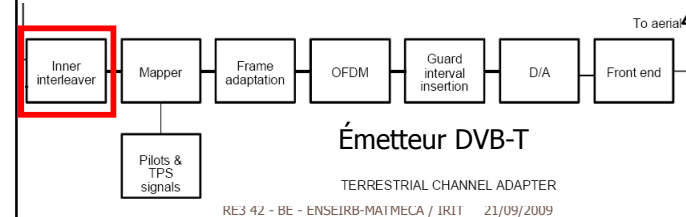
- PAPR : Peak to Average Power Ratio.
- Par rapport à un système mono-porteuse, un système OFDM présente de plus grandes fluctuations entre la puissance moyenne et la puissance crête.
- Les rendements des amplificateurs de puissance (partie RF) sont moins bons.

RE3 42 - BE - ENSEIRB-MATMECA / IRT 21/09/2009

Solution au problème de PAPR : entrelacement ou interleaving

260

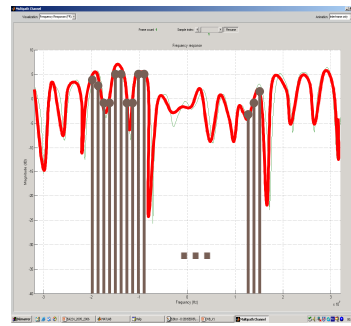
- Mélanger les données de façon à ce que toutes les sous-porteuses transmettent la même puissance tout le temps.



Signaux pilotes pour l'estimation de canal

261

- Toutes les sous-porteuses ne transportent pas de l'information.
- Certaines d'entre elles sont dédiées à l'estimation de la fonction de transfert du canal : porteuses pilotes.



RE3 42 - BE - ENSEIRB-MATMECA / IRIT 21/09/2009

Répartition des signaux pilotes dans le multiplex OFDM

262

- Certains signaux pilotes ont des positions constantes : pilotes continus.
- D'autres signaux pilotes ont des positions qui varient au cours du temps : pilotes dispersés.

RE3 42 - BE - ENSEIRB-MATMECA / IRIT 21/09/2009

Exemple : Mode 2K DVB-T (TNT)

263

- 1705 porteuses dont 193 signaux pilote.
- 45 continus, 143 dispersés (12 positions communes) et 17 signaux TPS.

- 12 pilotes continus communs avec les pilotes dispersés

2K mode						
0	48	54	87	141	156	192
201	255	279	282	333	432	450
483	525	531	618	636	714	759
765	780	804	873	888	918	939
942	969	984	1 050	1 101	1 107	1 110
1 137	1 140	1 146	1 206	1 269	1 323	1 377
1 491	1 683	1 704				

RE3 42 - BE - ENSEIRB-MATMECA / IRIT 21/09/2009

Applications de l'OFDM

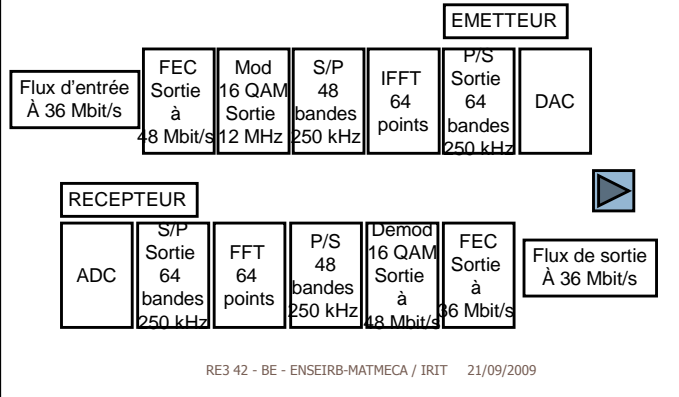
264

- WiFi (IEEE 802.11a/g/n)
- WiMAX (IEEE 802.16)
- TNT (DVB-T)
- ADSL

RE3 42 - BE - ENSEIRB-MATMECA / IRIT 21/09/2009

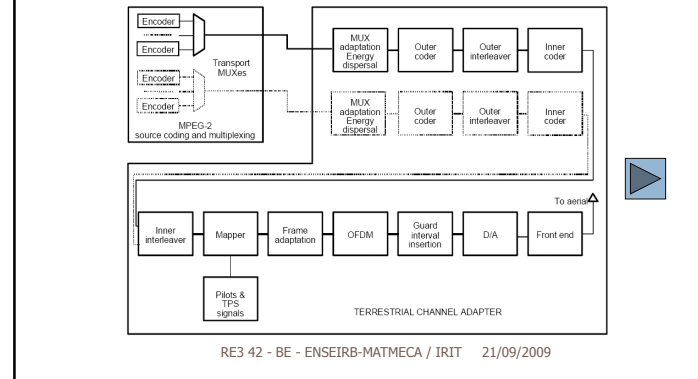
Émetteur et récepteur WiFi

265



Émetteur TNT

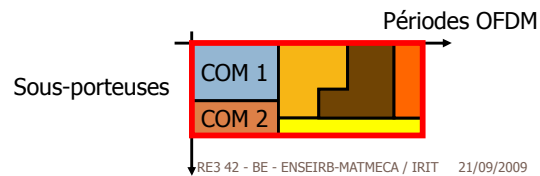
266



Accès multiple OFDMA

267

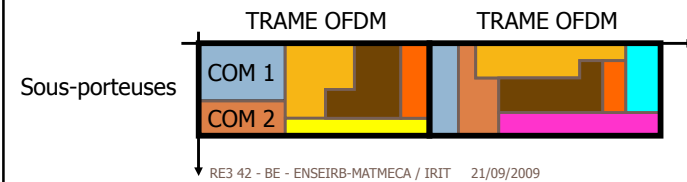
- OFDMA : Orthogonal Frequency Multiple Access.
- Agencement des communications sur un ensemble de périodes OFDM et de sous-porteuses.



Exemple : WiMAX / Downlink

268

- À chaque trame OFDM, les sous-porteuses et les périodes OFDM sont re-affectées aux communications suivant leurs besoins.



Conclusion

269

- Canaux très sélectifs en fréquence.
- OFDM : transmission multi-porteuses.
- CP contre l'ISI.
- Signaux pilotes pour l'estimation de canaux.
- Accès multiple : OFDMA.
- Perspective systèmes 4G : mélanger le CDMA et l'OFDM(A).

RE3 42 - BE - ENSEIRB-MATMECA / IRIT 21/09/2009

Plan du cours

270

- I. Caractérisation des canaux
- II. Égalisation
- III. Étalement de spectre
- IV. OFDM
- V. **Diversité**
- VI. Récapitulatif, conclusion et perspectives

RE3 42 - BE - ENSEIRB-MATMECA / IRIT 21/09/2009

Canaux de propagation

271

- Les canaux de propagation dispersent l'énergie transmise de façon aléatoire.
- Conséquence : chute du rapport signal à bruit à la réception et dégradation des performances en termes de BER.

RE3 42 - BE - ENSEIRB-MATMECA / IRIT 21/09/2009

Trajets multiples dé-corrélés

272

- Les trajets multiples ont des gains dé-corrélés :
 - Certains trajets donnent lieu à un faible SNR à la réception.
 - D'autres trajets donnent lieu à un fort SNR à la réception.
- Ce phénomène s'appelle la diversité.

RE3 42 - BE - ENSEIRB-MATMECA / IRIT 21/09/2009

Principe général des techniques de diversité

273

- Les techniques de diversité sont des techniques d'émission et/ou de réception permettant de tirer profit de la diversité produite par les canaux de propagation.

RE3 42 - BE - ENSEIRB-MATMECA / IRT 21/09/2009

Techniques de diversité à la réception

274

- Techniques permettant de récupérer l'énergie dispersée.
- Exemple :
 - L'égalisation récupère l'énergie dispersée vers les autres symboles.
 - Le récepteur RAKE récupère l'énergie dispersée sur les trajets multiples.

RE3 42 - BE - ENSEIRB-MATMECA / IRT 21/09/2009

Techniques de diversité à l'émission

275

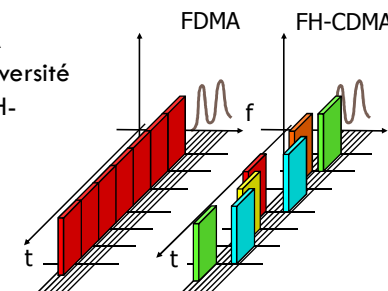
- Transmission d'un signal constitué de composantes dé-corrélées.
- Intérêt : les composantes ne seront pas toutes affectées de la même façon en présence d'une perturbation.
- La probabilité de récupérer une partie du signal est accrue.

RE3 42 - BE - ENSEIRB-MATMECA / IRT 21/09/2009

Exemple

276

- Les systèmes FDMA offrent moins de diversité que les systèmes FH-CDMA.



RE3 42 - BE - ENSEIRB-MATMECA / IRT 21/09/2009

Techniques de diversité

277

- Diversité en fréquence.
- Diversité en temps.
- Diversité spatiale.

RE3 42 - BE - ENSEIRB-MATMECA / IRIT 21/09/2009

Diversité en fréquence

278

- Étalement de spectre :
 - ▣ Choix d'une sélectivité moyenne pour tous plutôt que d'une forte sélectivité sur une communication particulière.
- OFDM :
 - ▣ Des sous-bandes séparées d'au moins la bande de cohérence d'un canal ne subiront pas la même atténuation.

RE3 42 - BE - ENSEIRB-MATMECA / IRIT 21/09/2009

Diversité en temps

279

- Répétition de l'information.
 - ▣ Répéter les émissions à des instants séparés d'au moins le temps de cohérence du canal T_c .
 - ▣ Très peu efficace spectralement.
- Entrelacement.
 - ▣ Mélanger les données avant l'émission.
 - ▣ Les re-mélanger à la réception.
 - ▣ Les gros blocs d'erreur deviennent de petits blocs d'erreurs qui sont plus facilement corrigés.

RE3 42 - BE - ENSEIRB-MATMECA / IRIT 21/09/2009

Diversité spatiale

280

- Cas de plusieurs antennes à l'émission et/ou à la réception.
- SISO : Single Input Single Output.
- SIMO : Single Input Multiple Output.
- MISO : Multiple Input Single Output.
- MIMO : Multiple Input Multiple Output.

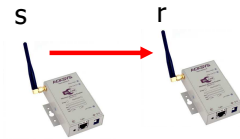
RE3 42 - BE - ENSEIRB-MATMECA / IRIT 21/09/2009

Single Input Single Output

281

- Une antenne à l'émission, une antenne à la réception.
- Un trajet de Rayleigh reçu.
- Hypothèses :
 - ▣ Gain constant et connu.
 - ▣ Modulation M-PSK.

$$r = hs + n$$

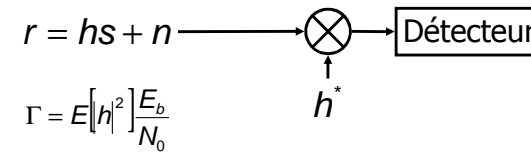


RE3 42 - BE - ENSEIRB-MATMECA / IRIT 21/09/2009

Méthode de réception

282

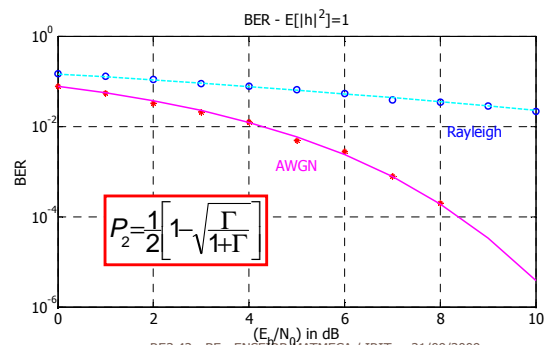
- Estimation du canal : estimation du gain multiplicatif.
- Compensation de la phase.



RE3 42 - BE - ENSEIRB-MATMECA / IRIT 21/09/2009

Performances d'une BPSK

283



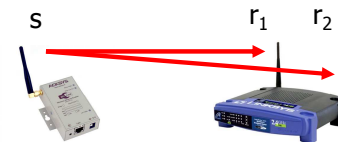
RE3 42 - BE - ENSEIRB-MATMECA / IRIT 21/09/2009

Single Input Multiple Output

284

- Une antenne à l'émission, plusieurs antennes à la réception.
- Trajets de Rayleigh.
- Hypothèses :
 - ▣ Gains constants.
 - ▣ Gains connus.
 - ▣ Modulation M-PSK.

$$r_k = h_k s + n_k$$



RE3 42 - BE - ENSEIRB-MATMECA / IRIT 21/09/2009

Diversité spatiale

285

- Diversité garantie si les antennes sont espacées d'au-moins une demi longueur d'onde (les signaux émis/reçus sur chacune des antennes subissent des perturbations dé-corrélées).



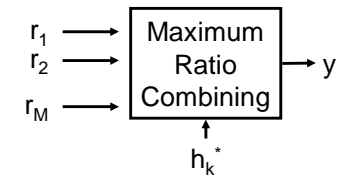
RE3 42 - BE - ENSEIRB-MATMECA / IRIT 21/09/2009

Maximal Ratio Combining (MRC)

286

- Réception de tous les canaux et combinaison linéaire.
- Les coefficients du MRC sont changés à intervalles de temps réguliers.

$$y = \sum_{k=1}^M h_k^* r_k$$



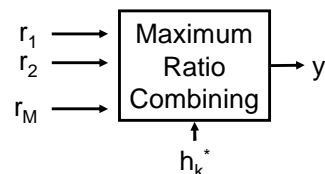
RE3 42 - BE - ENSEIRB-MATMECA / IRIT 21/09/2009

Calcul des coefficients du MRC

287

- Chaque gain h_k est compensé par h_k^* :
 - Compensation de la phase.
 - Les canaux interviennent en fonction de leur puissance.

$$V_{MRC} = \left(\frac{E_b}{N_0} \right) \sum_{k=1}^M |h_k|^2$$



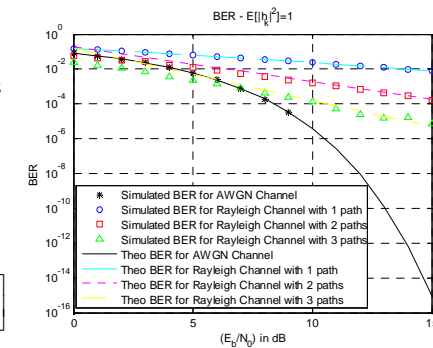
RE3 42 - BE - ENSEIRB-MATMECA / IRIT 21/09/2009

Performances d'une BPSK

- Expression valide pour les forts E_b/N_0 .

$$P_2 = \left(\frac{1}{4\Gamma} \right)^M C_{2M-1}^M$$

$$\Gamma = \left(\frac{E_b}{N_0} \right) E \left[\sum_{k=1}^M |h_k|^2 \right]$$



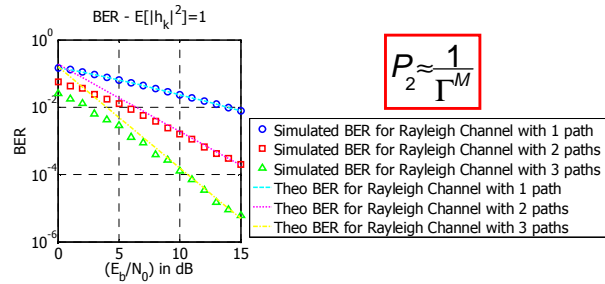
21/09/2009

RE3 42 - BE - ENSEIRB-MATMECA / IRIT

Ordre de diversité : M

289

- La probabilité d'erreur varie en $1/\text{SNR}^M$.



RE3 42 - BE - ENSEIRB-MATMECA / IRT 21/09/2009

Interprétation

$$\Gamma = \left(\frac{E_b}{N_0} \right) E \left[\sum_{k=1}^M |h_k|^2 \right]$$

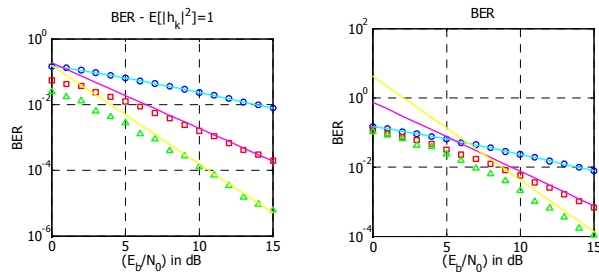
290

- Plus M augmente, meilleures sont les performances.
- Deux raisons à cela :
 - Le SNR reçu augmente car plus d'énergie est reçue.
 - L'apport de la diversité : le fait de pouvoir disposer de plusieurs canaux.
- Pour visualiser l'apport de la diversité, il faut raisonner à Γ constant quel que soit le nombre d'antennes.

RE3 42 - BE - ENSEIRB-MATMECA / IRT 21/09/2009

Comparaison

291

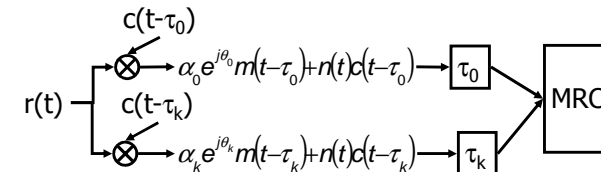


RE3 42 - BE - ENSEIRB-MATMECA / IRT 21/09/2009

Récepteur RAKE et MRC

292

- Le MRC est utilisé dans le récepteur RAKE pour les systèmes DS/SS afin de combiner les trajets multiples récupérés sur chaque « doigt ».



RE3 42 - BE - ENSEIRB-MATMECA / IRT 21/09/2009

Variantes sous-optimales

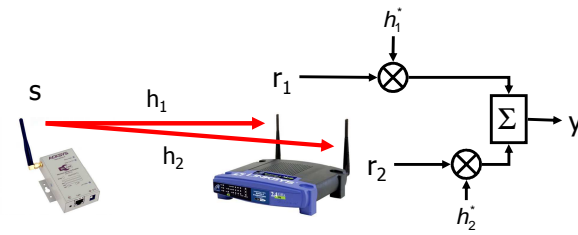
293

- Selection Combining : à chaque T, sélection du trajet avec le plus fort SNR instantané γ_k .
- Equal Gain Combining : MRC avec un gain constant pour tous les trajets (compensation de la phase).

RE3 42 - BE - ENSEIRB-MATMECA / IRIT 21/09/2009

Exemple : 2 antennes

294



$$r_1 = h_1 s + n_1$$

$$r_2 = h_2 s + n_2$$

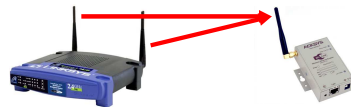
$$SNR_y = \frac{E_b}{N_0} [|h_1|^2 + |h_2|^2]$$

RE3 42 - BE - ENSEIRB-MATMECA / IRIT 21/09/2009

Multiple Input Single Output

295

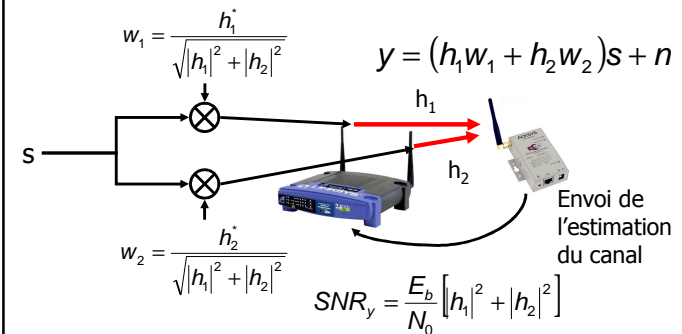
- Plusieurs antennes à l'émission et une antenne à la réception.
- Trajets de Rayleigh.
- Hypothèses :
 - Gains constants.
 - Gains connus.
 - Modulation M-PSK.



RE3 42 - BE - ENSEIRB-MATMECA / IRIT 21/09/2009

Exemple : 2 antennes avec diversité par voie retour

296



$$w_1 = \frac{h_1^*}{\sqrt{|h_1|^2 + |h_2|^2}}$$

$$w_2 = \frac{h_2^*}{\sqrt{|h_1|^2 + |h_2|^2}}$$

$$y = (h_1 w_1 + h_2 w_2) s + n$$

$$SNR_y = \frac{E_b}{N_0} [|h_1|^2 + |h_2|^2]$$

RE3 42 - BE - ENSEIRB-MATMECA / IRIT 21/09/2009

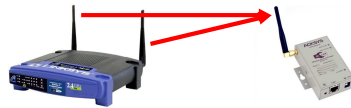
STC (Space Time Coding)

297

- Codage espace-temps.
- Exemple : code d'Alamouti (2,1)
 - L'antenne 0 émet s_0 puis $-s_1^*$
 - L'antenne 1 émet s_1 puis s_0^* .

$$\hat{s}_0 = h_0^* r_0 + h_1 r_1^*$$

$$\hat{s}_1 = h_1^* r_0 - h_0 r_1^*$$

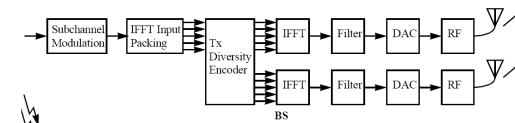


RE3 42 - BE - ENSEIRB-MATMECA / IRIT 21/09/2009

Applications

298

- Technique utilisée lorsque les stations de base peuvent se munir de plusieurs antennes, contrairement aux terminaux des utilisateurs.
- Exemple d'utilisation : WiMAX.

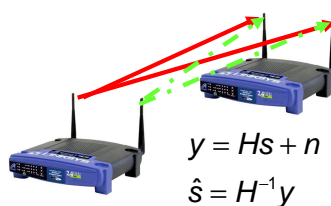


RE3 42 - BE - ENSEIRB-MATMECA / IRIT 21/09/2009

Multiple Input Multiple Output

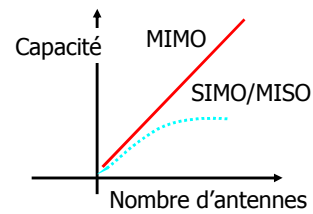
299

- Synthèse des approches MRC + STC.
- Approche supérieure au SIMO/MISO.



$$y = Hs + n$$

$$\hat{s} = H^{-1}y$$



RE3 42 - BE - ENSEIRB-MATMECA / IRIT 21/09/2009

Conclusion

300

- Diversité en fréquence, en temps, spatiale.
- Diversité spatiale : MRC, STC, MIMO.

RE3 42 - BE - ENSEIRB-MATMECA / IRIT 21/09/2009

Plan du cours

301

- I. Caractérisation des canaux
- II. Égalisation
- III. Étalement de spectre
- IV. OFDM
- V. Diversité
- VI. **Récapitulatif, conclusion et perspectives**

RE3 42 - BE - ENSEIRB-MATMECA / IRT 21/09/2009

Objectifs du cours

302

- CANAUX DE TRANSMISSION
 - Caractériser les canaux de transmission pour les systèmes de communication sans fil (mobiles ou fixes).
- TECHNIQUES DE TRANSMISSION
 - Présenter les techniques de transmission utilisées dans les systèmes de communications sans fil actuels.

RE3 42 - BE - ENSEIRB-MATMECA / IRT 21/09/2009

Connaissances acquises à l'issue du cours

303

- CARACTERISATION DES CANAUX DE COMMUNICATION SANS FIL :
 - Trajets multiples, fading, slow et fast fading, sélectivité en fréquence et flat fading.
- TECHNIQUES DE TRANSMISSION :
 - Égalisation, étalement de spectre, OFDM, diversité.
- UTILISATION DES TECHNIQUES DANS LES SYSTEMES SANS FIL :
 - GSM, IS-95, DVB-T, WiMAX, UMTS.

RE3 42 - BE - ENSEIRB-MATMECA / IRT 21/09/2009

Caractérisation des canaux

304

- Deux types de fading pour les communications sans fil.
- Fading à long terme : atténuation de la puissance émise.
- Fading à court terme : déformation du signal émis.

RE3 42 - BE - ENSEIRB-MATMECA / IRT 21/09/2009

Tableau récapitulatif

305

Étalement temporel du signal	Variation temporelle du canal
Canal sélectif en fréquence (ISI) $T_m > T$	Fading rapide (échec PLL, fort Doppler) $f_d > W$
Flat Fading (perte de SNR) $T_m < T$	Fading lent (perte de SNR) $f_d < W$
Canal sélectif en fréquence (ISI) $B_c < W$	Fading rapide (échec PLL, fort Doppler) $T_c < T$
Flat Fading (perte de SNR) $B_c > W$	Fading lent (perte de SNR) $T_c > T$

RE3 42 - BE - ENSEIRB-MATMECA / IRT 21/09/2009

Compensation du fading

306

- Compensation du fading à long terme :
 - Augmenter la puissance émise ou diminuer la puissance requise à l'arrivée (par des codes correcteurs par exemple).
- Compensation du fading à court terme :
 - Utiliser des techniques de transmission telles que l'égalisation, l'étalement de spectre, l'OFDM, les techniques de diversité en fonction du type de fading.

RE3 42 - BE - ENSEIRB-MATMECA / IRT 21/09/2009

Plan de bataille

307

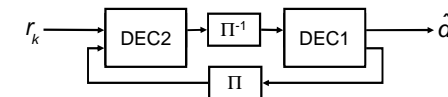
Pour combattre les distorsions	
<u>Sélectivité en fréquence</u>	<u>Fast fading</u>
Égalisation adaptative	Modulation robuste
Étalement de spectre	Redondance signal
OFDM	Codage et entrelacement
Pour combattre les pertes de SNR	
<u>Flat et slow fading</u>	
Diversité	
Codage canal	

RE3 42 - BE - ENSEIRB-MATMECA / IRT 21/09/2009

Techniques itératives de réception

308

- Constat : les données en fin de récepteur sont de meilleure qualité que celles à l'entrée du récepteur.
- Idée : faire parvenir ces bonnes données à l'entrée du récepteur et itérer le processus de réception.
- Exemples d'utilisation :
 - Turbo-codes : 3G, 4G, WiFi, DVB-S2, WiMAX.
 - Turbo-égalisation, Turbo-MIMO, Turbo-synchronisation.



RE3 42 - BE - ENSEIRB-MATMECA / IRT 21/09/2009

Conclusion générale

309

- Canaux sans fil :
 - Multi-trajets, fading : sélectivité en fréquence, fast fading.
- Égalisation, étalement de spectre, OFDM.