

Étude des modulations à porteuses multiples et à spectre étalé

- Contexte de l'étude
- Les accès multiples
- L'étalement de spectre
- Les modulations à porteuses multiples
- Les modulations à porteuses multiples et à spectre étalé
 - Le MC-CDMA et sa représentation
 - Le MC-DS-CDMA et sa représentation
 - Le MT-CDMA et sa représentation
 - Comparaison des techniques MC-SS
- La liaison descendante synchrone : le système AMRC à porteuses multiples (MC-CDMA)
 - Les récepteurs AMRC
 - Caractéristiques de la liaison descendante
 - La chaîne de communication simplifiée
 - Les récepteurs linéaires et la limite du filtre adapté
 - Le filtrage de Wiener global
 - Capacité des récepteurs linéaires
 - L'annulation des interférences
 - Performances des récepteurs : puissances des signaux identiques et puissances des signaux différentes
- La liaison montante asynchrone : le système AMRC multipilote (MT-CDMA)
 - Les réseaux CDMA
 - La liaison montante asynchrone
 - Expression de la probabilité d'erreur
 - Capacité du système MT-CDMA
- Conclusion et perspectives

Étude des modulations à porteuses multiples et à spectre étalé : analyse et optimisation

Jean-Yves Baudais

4 mai 2001



LCST/INSA Rennes

France Telecom R&D/DMR/DDH



Mitsubishi Electric ITE



Plan de la présentation

- Contexte de l'étude
- Les accès multiples
- L'étalement de spectre
- Les modulations à porteuses multiples

- Les modulations à porteuses multiples et à spectre étalé
 - Le MC-CDMA
 - Le MC-DS-CDMA
 - Le MT-CDMA

- La liaison descendante synchrone : le système AMRC à porteuses multiples (MC-CDMA)
 - Les récepteurs linéaires
 - Le filtrage de Wiener global
 - Les récepteurs non linéaires

- La liaison montante asynchrone : le système AMRC multipilote (MT-CDMA)

- Conclusion et perspectives

Contexte de l'étude

Le contexte général

- Étude de systèmes de communications permettant le transfert de données multimédia à haut débit,
 - forte efficacité spectrale (contraintes fréquentielles, demande de débits toujours plus élevés),
 - forte capacité réseau (nombre d'utilisateurs croissant).
- Applications :
 - réseaux mobiles cellulaires de quatrième génération, post-UMTS,
 - réseaux hertziens à l'intérieur des bâtiments, ...

Le contexte SMARC (*Systemes à porteuses Multiples et à Accès multiples par Répartition de Codes*)

- Modulation / démodulation adaptée au canaux de propagation hertziens,
 - Prise en compte des interférences d'accès multiples dans les processus de réception.
- ⇒ Étude « algorithmique ».

⇒ Les techniques à porteuses multiples et à accès multiples par répartition de codes sont pressenties comme une solution à fort potentiel pour les générations futures de communications hertziennes.

Les accès multiples

L'accès multiple : partager un canal (hertzien) en sous-canaux d'accès orthogonaux entre plusieurs utilisateurs.

- Répartition temporelle \longrightarrow intervalle de garde temporel.
- Répartition fréquentielle \longrightarrow intervalle fréquentiel.

Les accès multiples

L'accès multiple : partager un canal (hertzien) en sous-canaux d'accès orthogonaux entre plusieurs utilisateurs.

- Répartition temporelle \longrightarrow intervalle de garde temporel.
- Répartition fréquentielle \longrightarrow intervalle fréquentiel.
- Répartition de codes (forme d'onde) \longrightarrow propriétés des codes (fonctions de corrélation).

Synchrone

Asynchrone

Orthogonalité en 0

Orthogonalité pour tous les décalages

Les accès multiples

L'accès multiple : partager un canal (hertzien) en sous-canaux d'accès orthogonaux entre plusieurs utilisateurs.

- Répartition temporelle \longrightarrow intervalle de garde temporel.
- Répartition fréquentielle \longrightarrow intervalle fréquentiel.
- Répartition de codes (forme d'onde) \longrightarrow propriétés des codes (fonctions de corrélation).

| Synchrone | Asynchrone |
|---|--|
| Orthogonalité en 0 | Orthogonalité pour tous les décalages |
| \Downarrow | \Downarrow |
| Codes orthogonaux Walsh–Hadamard Golay, <i>etc.</i> | Intercorrélation minimale Gold Kasami, <i>etc.</i> |

Les accès multiples

L'accès multiple : partager un canal (hertzien) en sous-canaux d'accès orthogonaux entre plusieurs utilisateurs.

- Répartition temporelle \rightarrow intervalle de garde temporel.
- Répartition fréquentielle \rightarrow intervalle fréquentiel.
- Répartition de codes (forme d'onde) \rightarrow propriétés des codes (fonctions de corrélation).

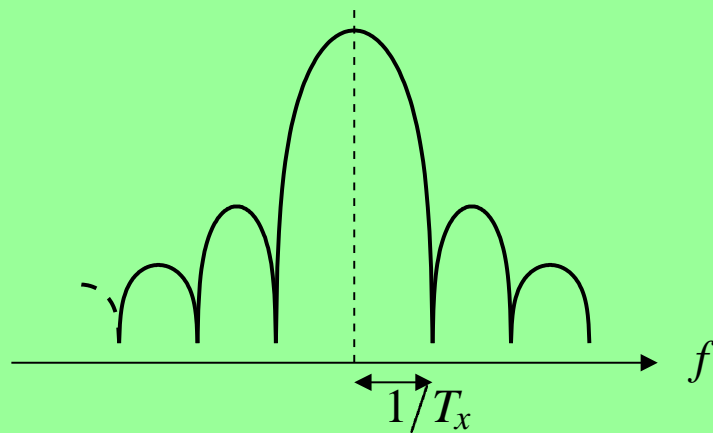
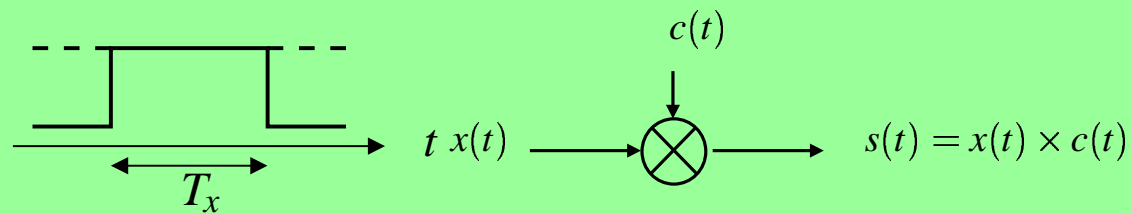
| Synchrone | Asynchrone |
|---|--|
| Orthogonalité en 0 | Orthogonalité pour tous les décalages |
| \Downarrow | \Downarrow |
| Codes orthogonaux Walsh–Hadamard Golay, <i>etc.</i> | Intercorrélation minimale Gold Kasami, <i>etc.</i> |

Autre répartition : spatiale.

Réception : retrouver l'orthogonalité détruite par le canal.

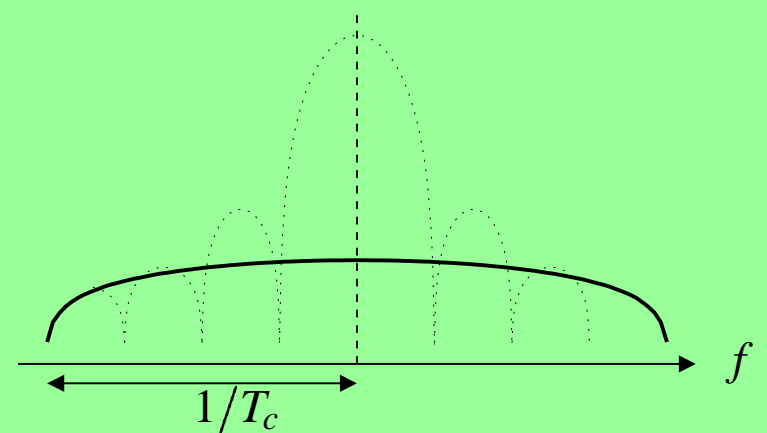
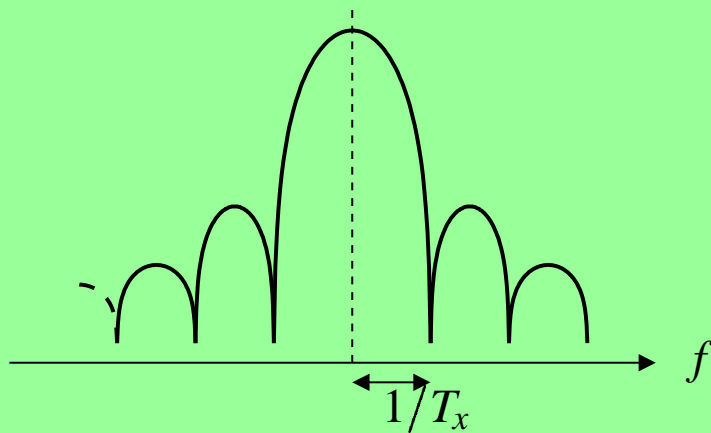
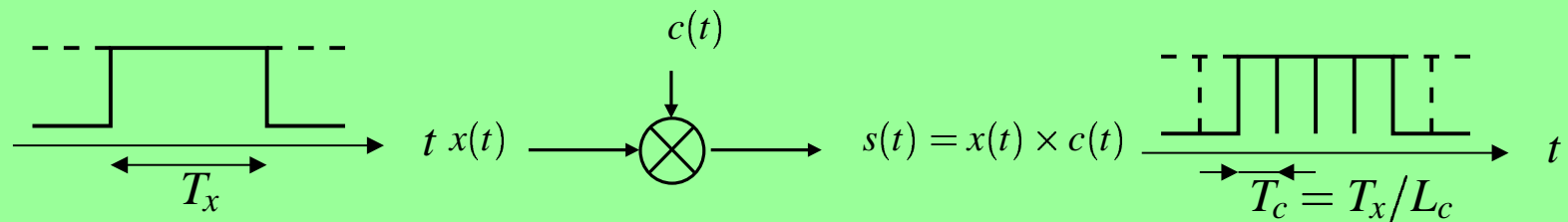
L'étalement de spectre

Relation de Shannon : $C = B \log_2 \left(1 + \frac{S}{N} \right)$



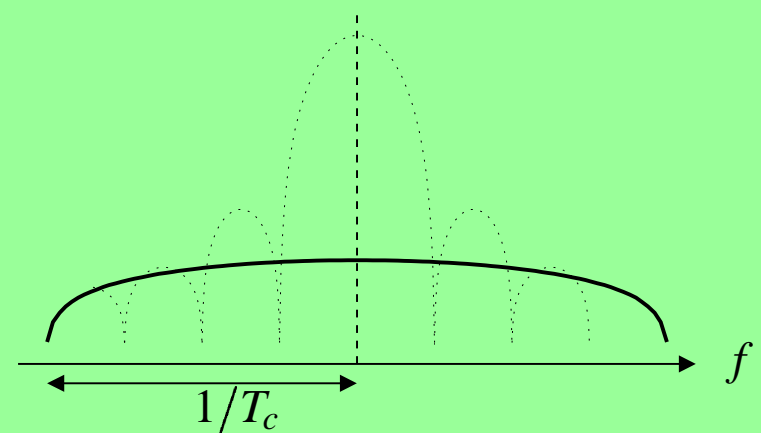
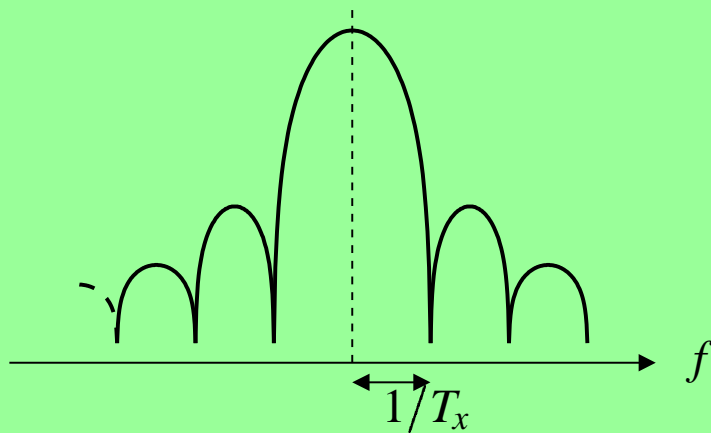
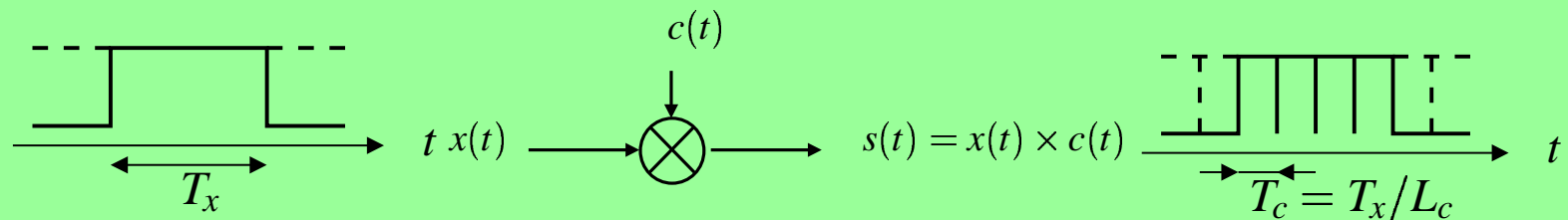
L'étalement de spectre

Relation de Shannon : $C = B \log_2 \left(1 + \frac{S}{N} \right)$



L'étalement de spectre

Relation de Shannon : $C = B \log_2 \left(1 + \frac{S}{N} \right)$

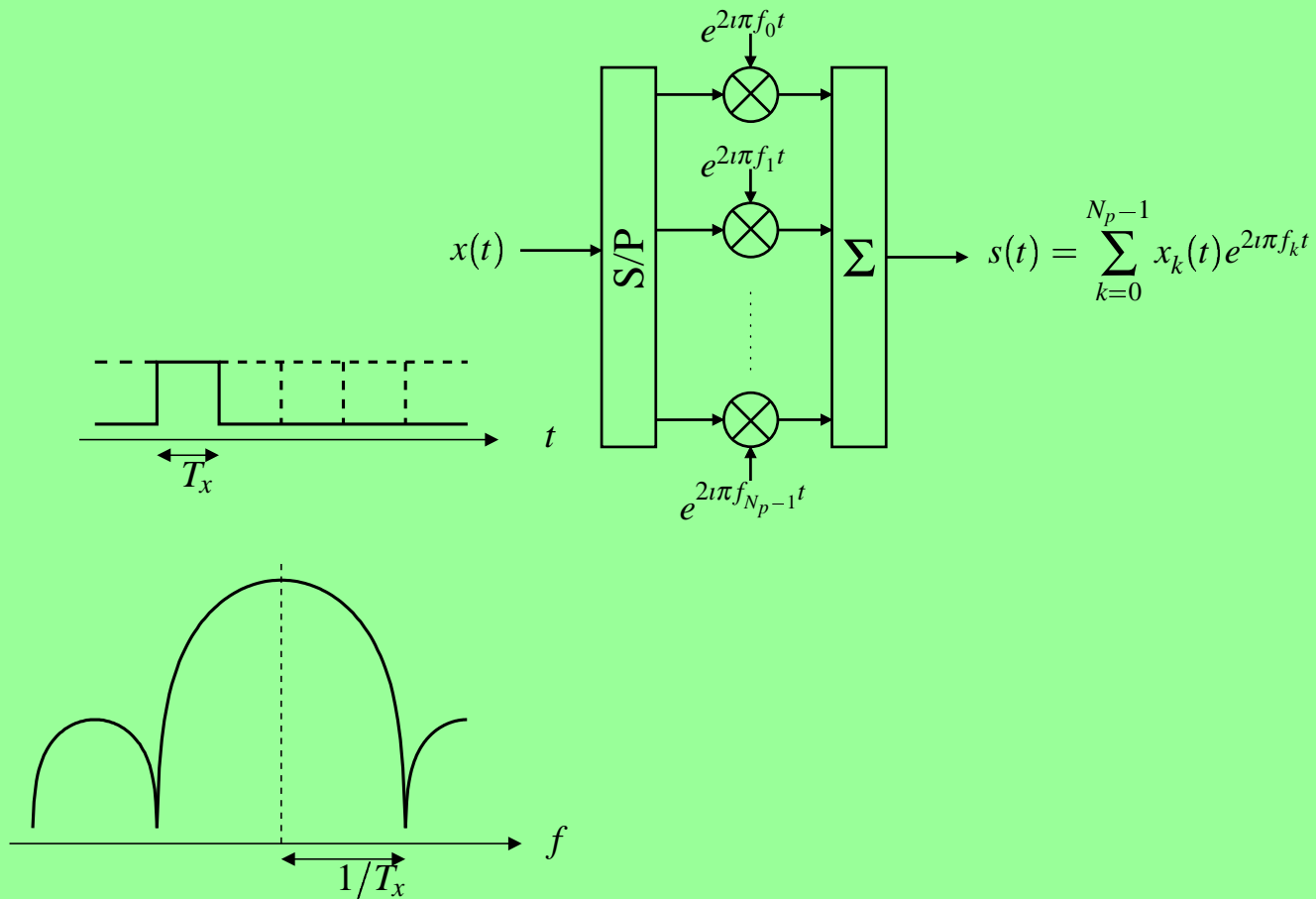


Avantages : discrétion, robustesse face aux trajets multiples, réjection des brouilleurs.

Inconvénient : faible efficacité spectrale.

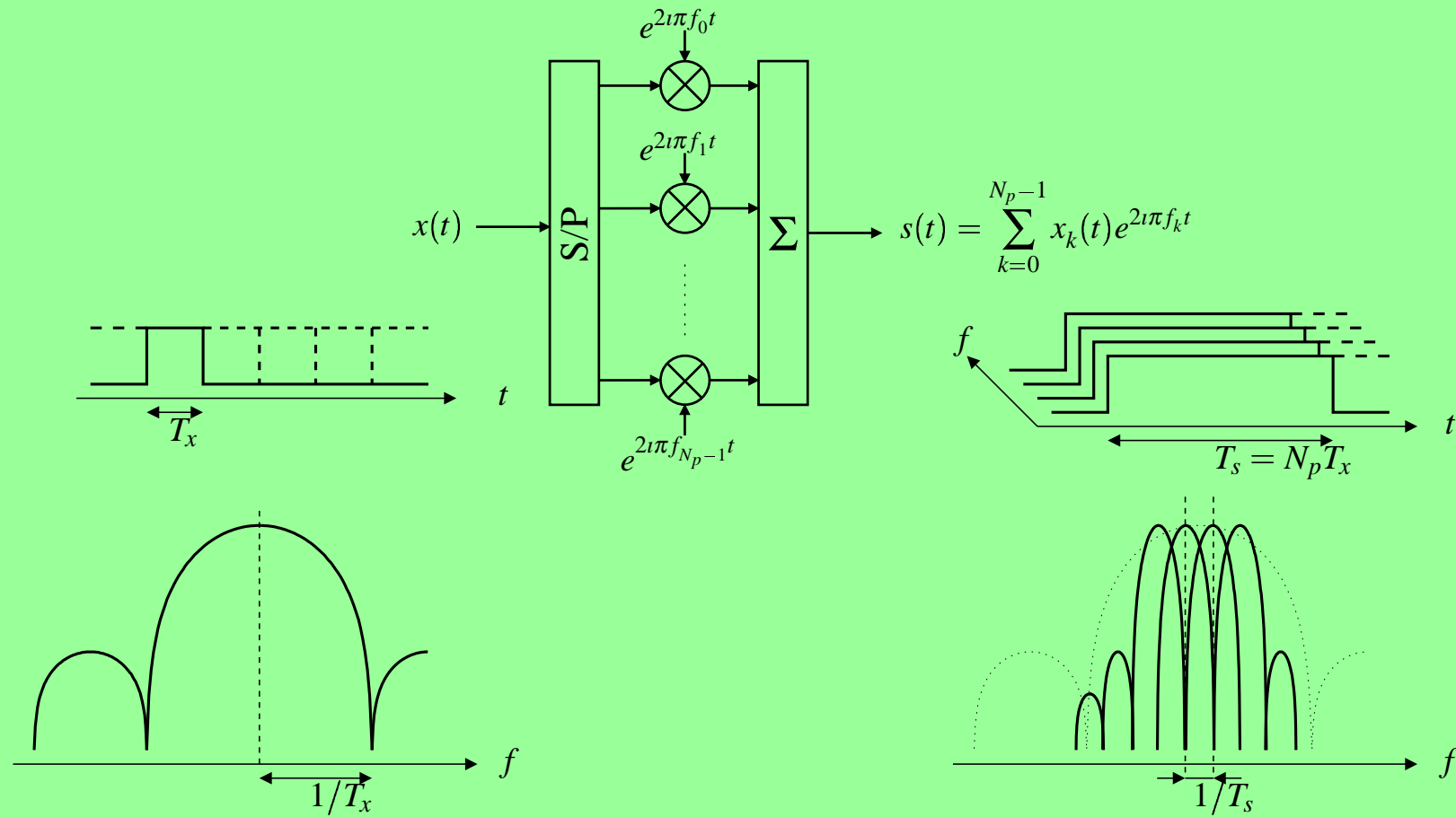
Les modulations à porteuses multiples

Principe : transmission en parallèle des données sur une base fréquentielle orthogonale.



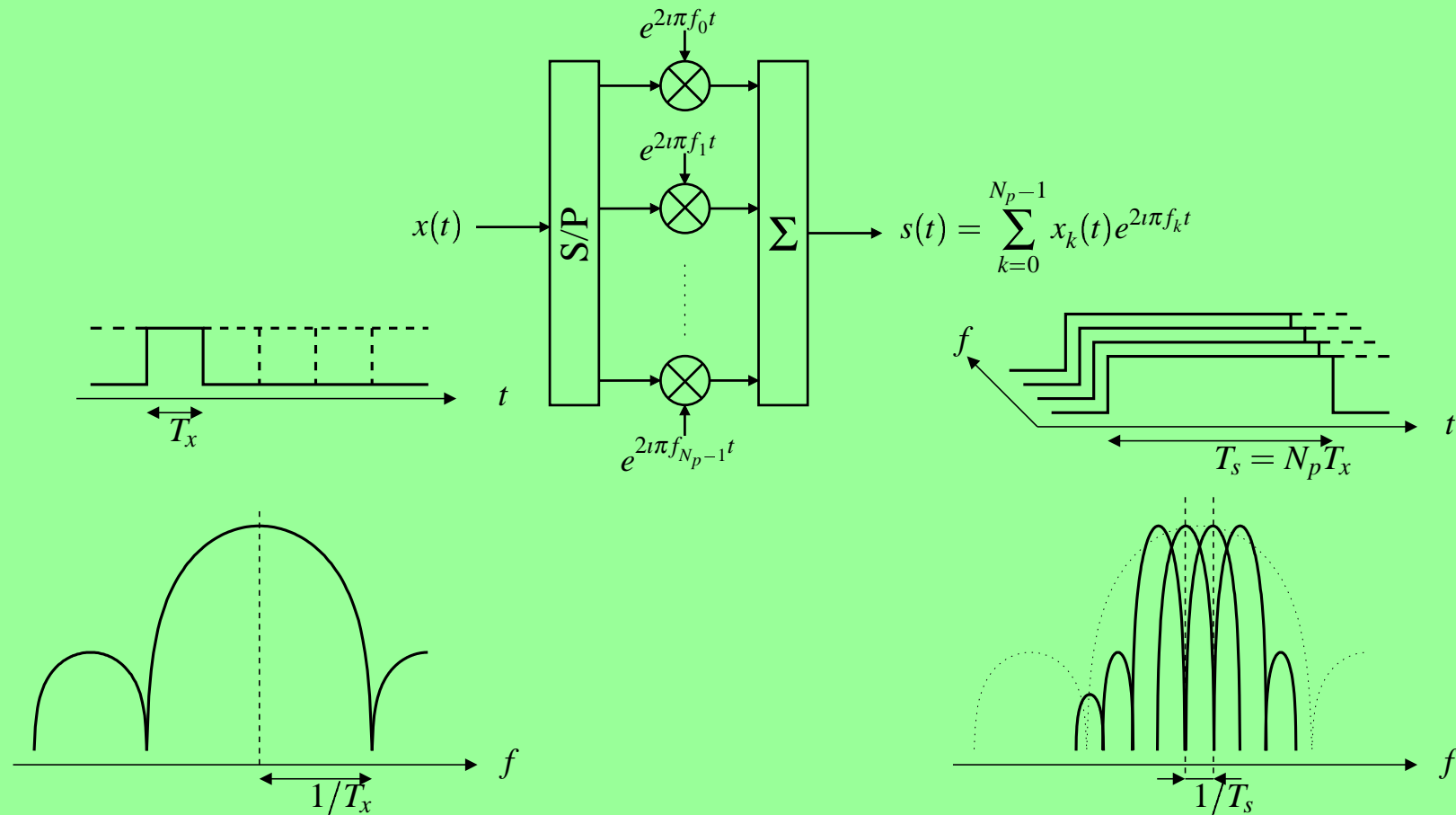
Les modulations à porteuses multiples

Principe : transmission en parallèle des données sur une base fréquentielle orthogonale.



Les modulations à porteuses multiples

Principe : transmission en parallèle des données sur une base fréquentielle orthogonale.



Avantages : efficacité spectrale, conservation de l'orthogonalité en réception grâce à l'insertion d'un préfixe cyclique.

Inconvénient : grande dynamique du signal généré.

Plan de la présentation

- Les accès multiples
- L'étalement de spectre
- Les modulations à porteuses multiples

- Les modulations à porteuses multiples et à spectre étalé
 - Le MC-CDMA
 - Le MC-DS-CDMA
 - Le MT-CDMA

- La liaison descendante synchrone : le système AMRC à porteuses multiples (MC-CDMA)
 - Les récepteurs linéaires
 - Le filtrage de Wiener global
 - Les récepteurs non linéaires

- La liaison montante asynchrone : le système AMRC multipilote (MT-CDMA)

- Conclusion et perspectives

Les modulations à porteuses multiples et à spectre étalé

Trois principales techniques : étalement dans le domaine temporel ou fréquentiel, porteuses orthogonales ou non en sortie du modulateur.

| Domaine d'étalement | fréquentiel | temporel |
|---------------------------------|-------------|------------|
| Sous-porteuses orthogonales | MC-CDMA | MC-DS-CDMA |
| Sous-porteuses non orthogonales | | MT-CDMA |

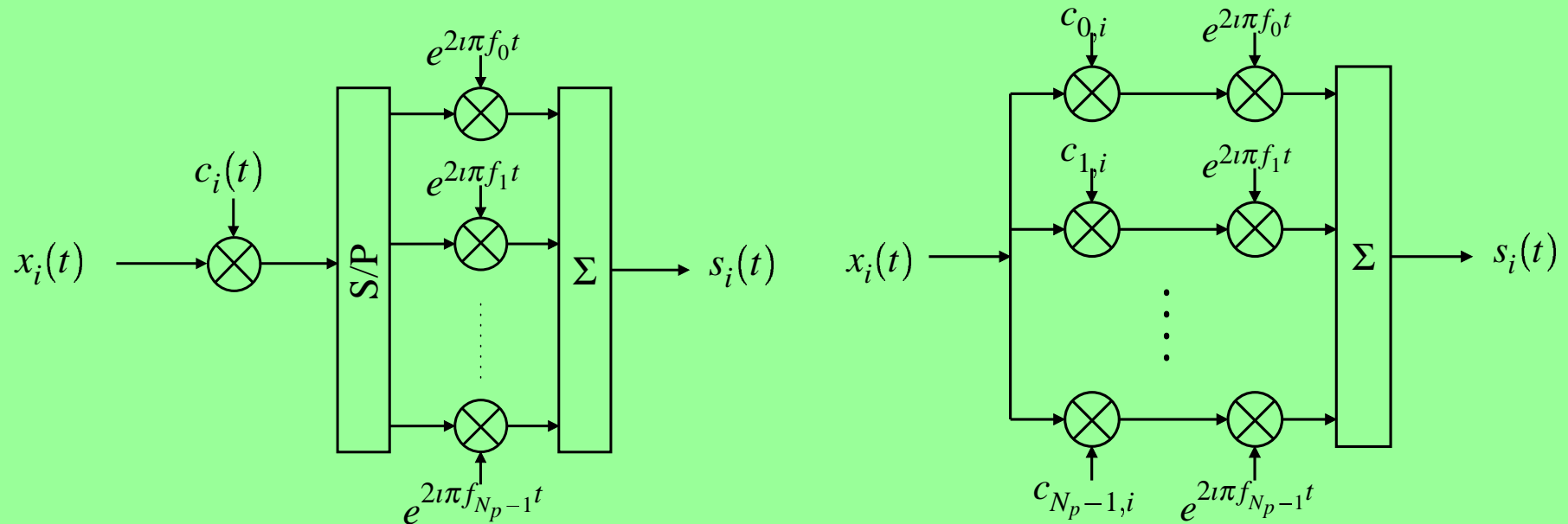
- MC-CDMA : AMRC à porteuses multiples.
- MC-DS-CDMA : AMRC à porteuses multiples et à séquence directe.
- MT-CDMA : AMRC multipilote.

Paramètres variables : N_p et $L_c \Rightarrow$ adapter le signal au canal (B_c, T_c).

Modification possible des principales techniques :

- SS-MC-CDMA.

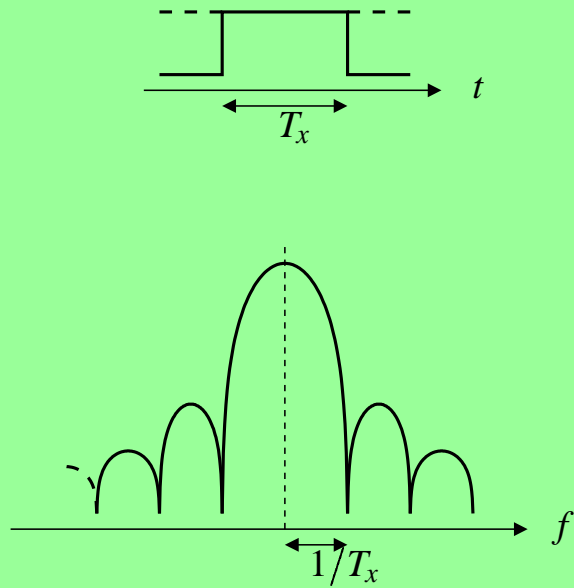
Le signal AMRC à porteuses multiples (MC-CDMA)



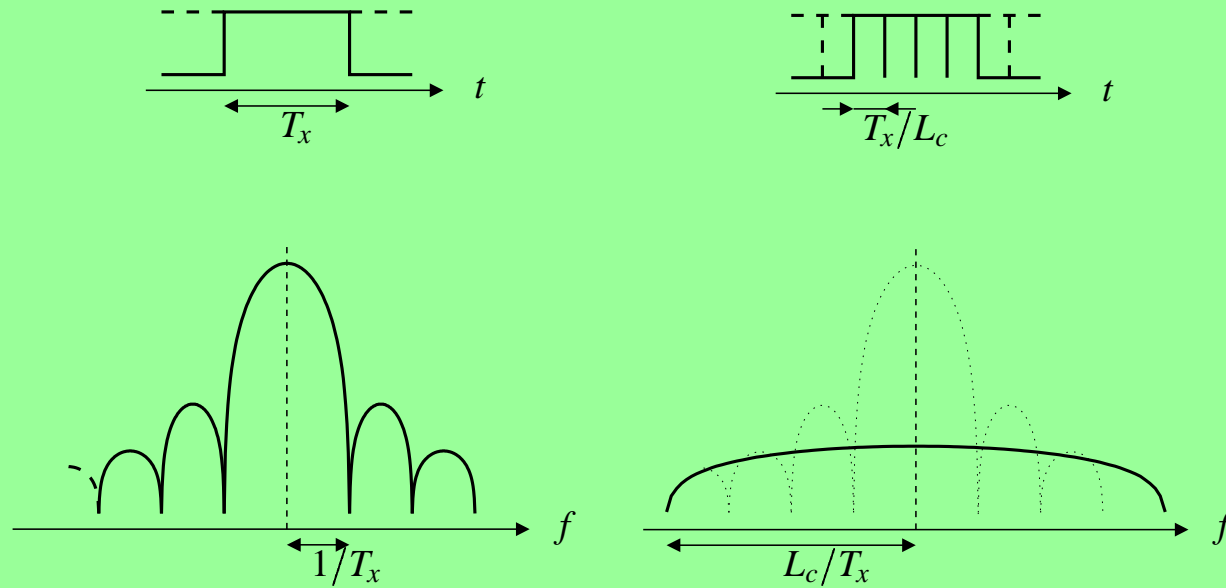
$$s_i(nT_s/N_p) = \frac{x_i}{\sqrt{N_p}} \sum_{k=0}^{N_p-1} c_{k,i} e^{2i\pi(k-N_p/2)n/N_p} = (-1)^n \sqrt{N_p} x_i \left\{ \text{TFD}^{-1} \{c_{k,i}\} \right\}_{k=0}^{N_p-1}$$

Réalisation numérique : transformation de Fourier discrète inverse appliquée au code.

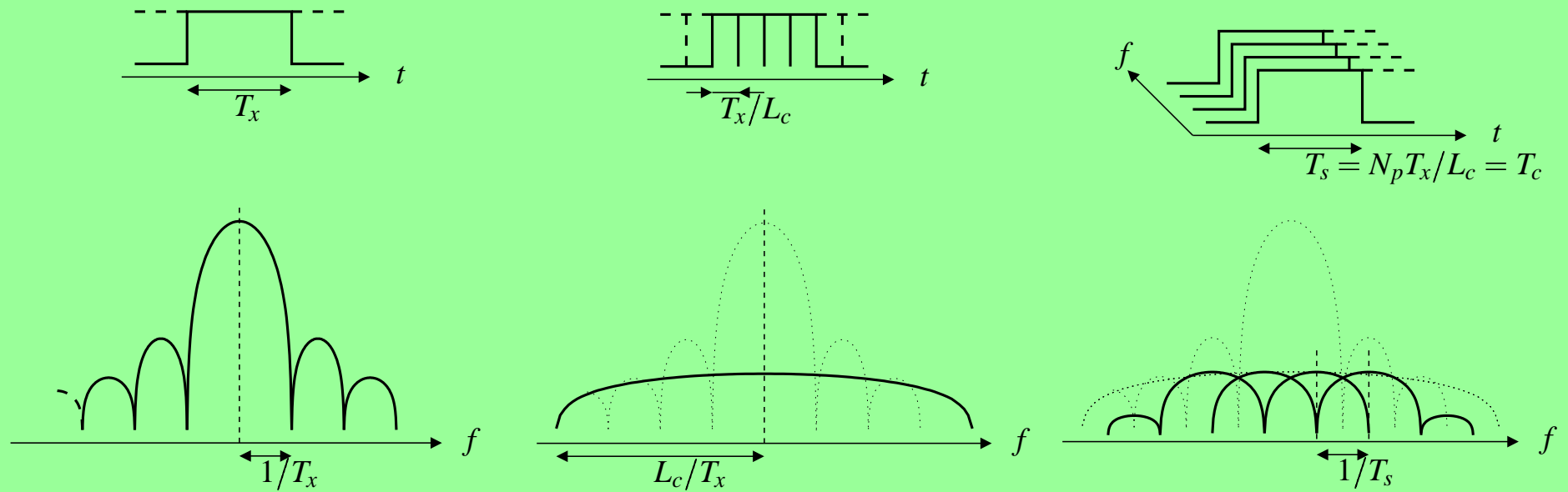
Le signal AMRC à porteuses multiples (MC-CDMA)



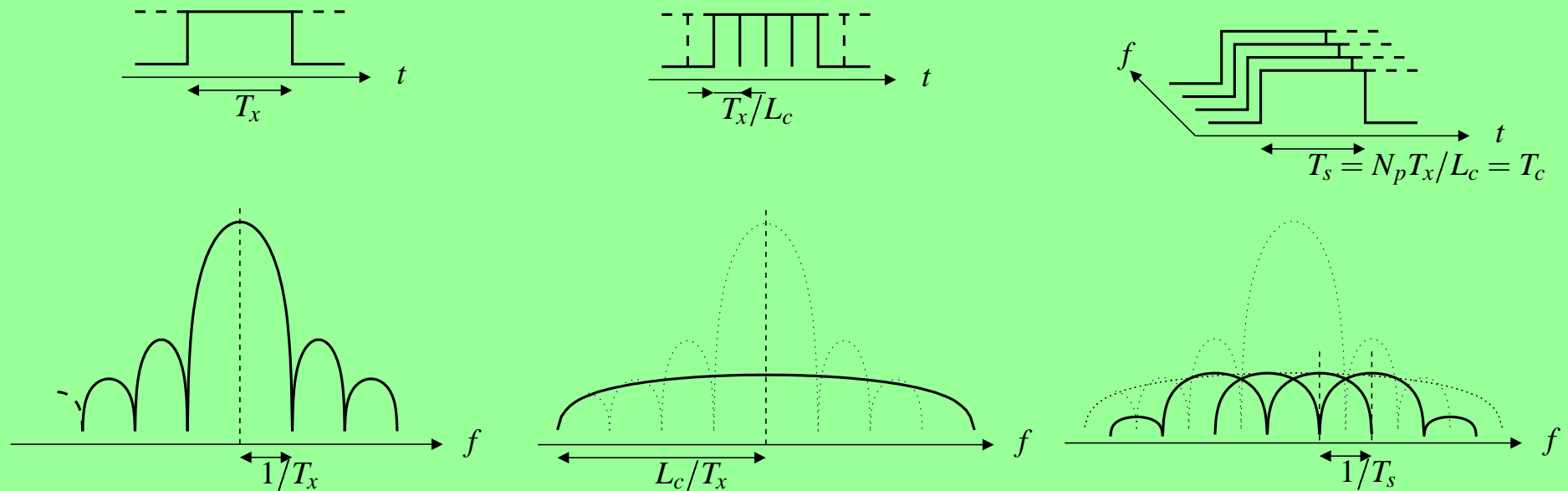
Le signal AMRC à porteuses multiples (MC-CDMA)



Le signal AMRC à porteuses multiples (MC-CDMA)

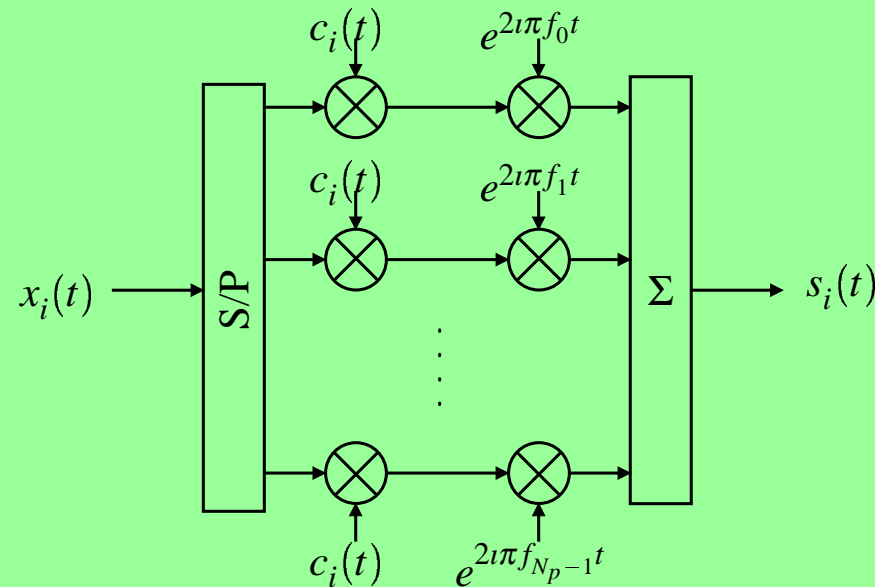


Le signal AMRC à porteuses multiples (MC-CDMA)



- $T_s = T_x = T_c$,
- $L_c \approx L_{\text{DS-CDMA}}$,
- évanouissements non sélectifs en fréquence par sous-porteuse + intervalle de garde,
- code \Rightarrow traitement de la diversité fréquentielle et accès multiple,
- modulation à enveloppe non constante \Rightarrow réponse fréquentielle des codes d'étalement.

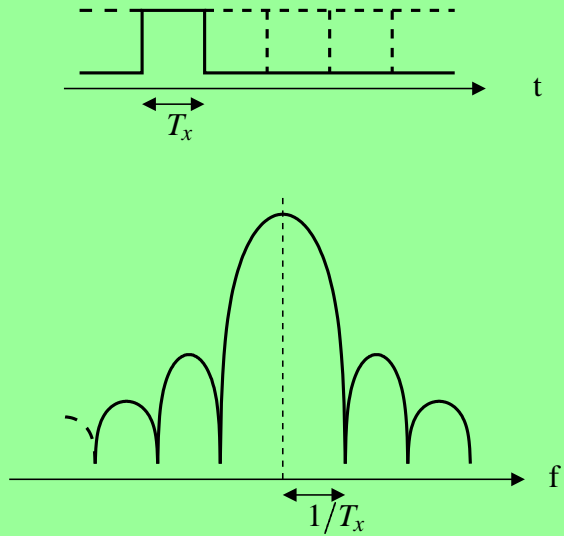
Le signal AMRC à porteuses multiples et à séquence directe (MC-DS-CDMA)



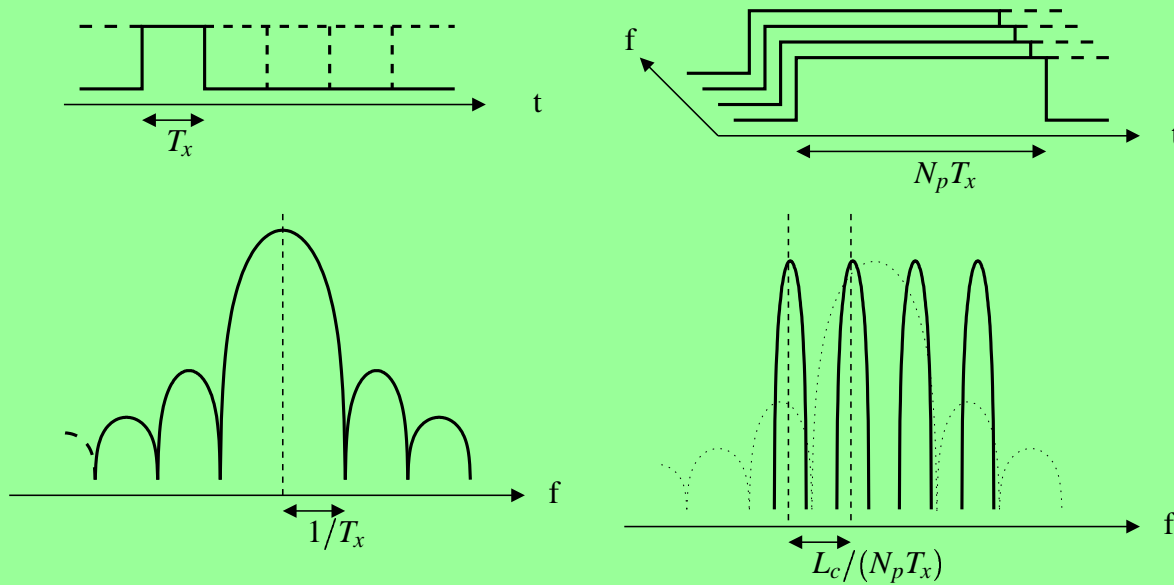
$$s_i(nT_c/N_p) = c_i(nT_c/N_p) \sum_{k=0}^{N_p-1} (-1)^n x_{k,i} e^{2i\pi nk/N_p} = (-1)^n \sqrt{N_p} c_i(nT_c/N_p) \left\{ \text{TFD}^{-1} \{x_{k,i}\} \right\}_{k=0}^{N_p-1}$$

Réalisation numérique : transformation de Fourier discrète inverse appliquée aux $x_{k,i}$.

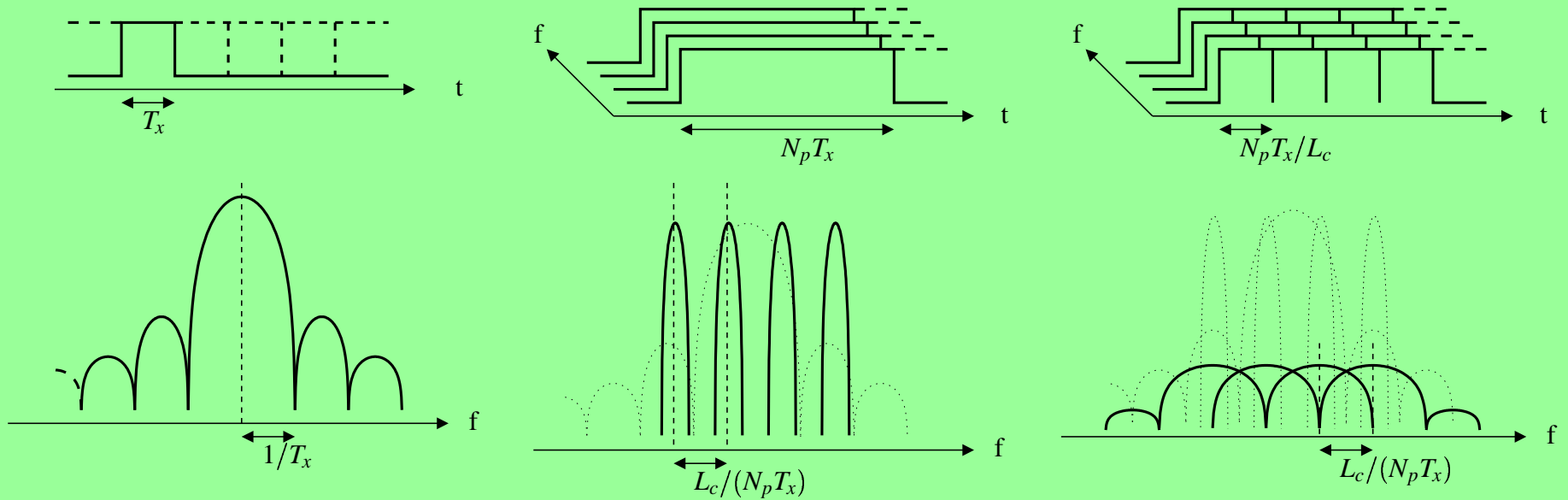
Le signal AMRC à porteuses multiples et à séquence directe (MC-DS-CDMA)



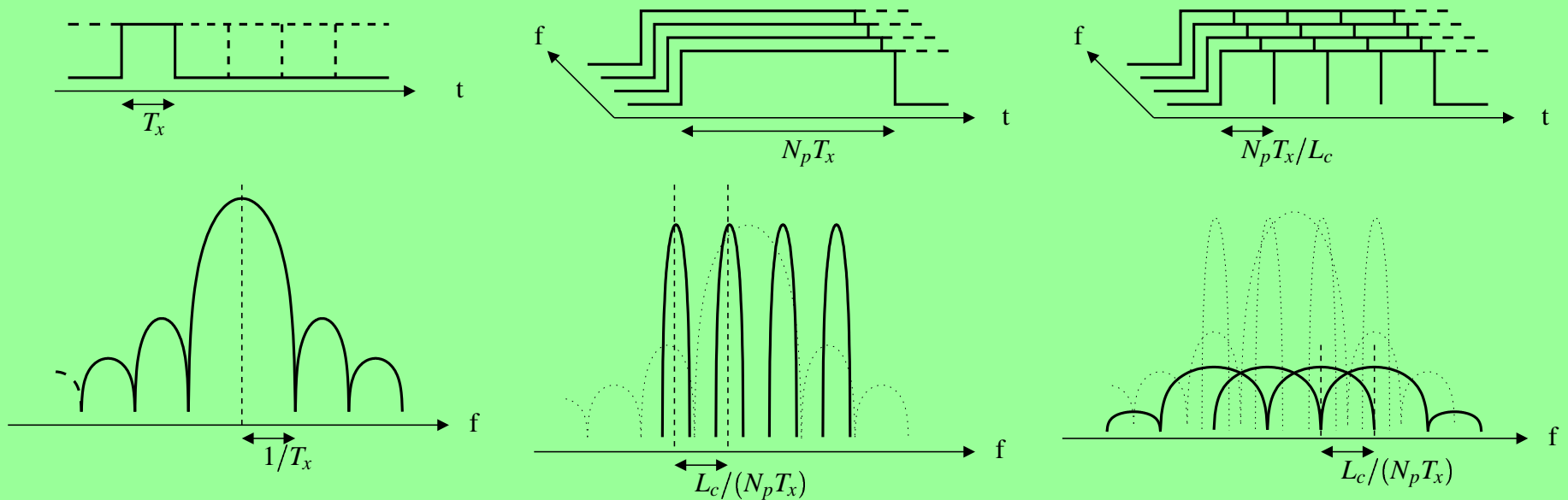
Le signal AMRC à porteuses multiples et à séquence directe (MC-DS-CDMA)



Le signal AMRC à porteuses multiples et à séquence directe (MC-DS-CDMA)

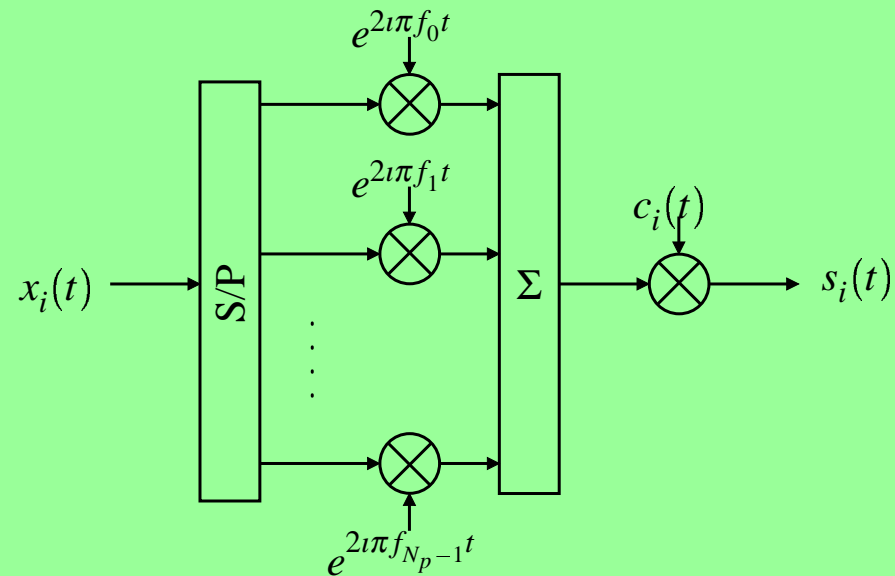


Le signal AMRC à porteuses multiples et à séquence directe (MC-DS-CDMA)



- $T_s = N_p T_x = L_c T_c$,
- $L_c \approx L_{\text{DS-CDMA}}$,
- évanouissements non sélectifs en fréquence par sous-porteuse + intervalle de garde,
- code \Rightarrow accès multiple,
- traitement de la diversité fréquentielle possible avec le codage de canal + entrelacement,
- modulation à enveloppe non constante \Rightarrow réponse fréquentielle de la séquence $x_{k,i}$.

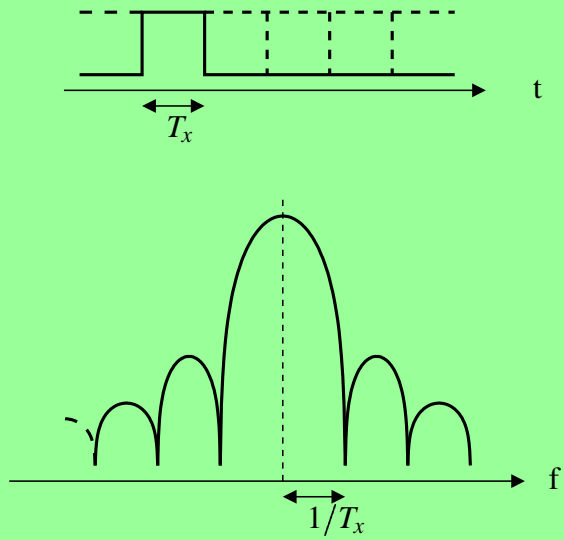
Le signal AMRC multipilote (MT-CDMA)



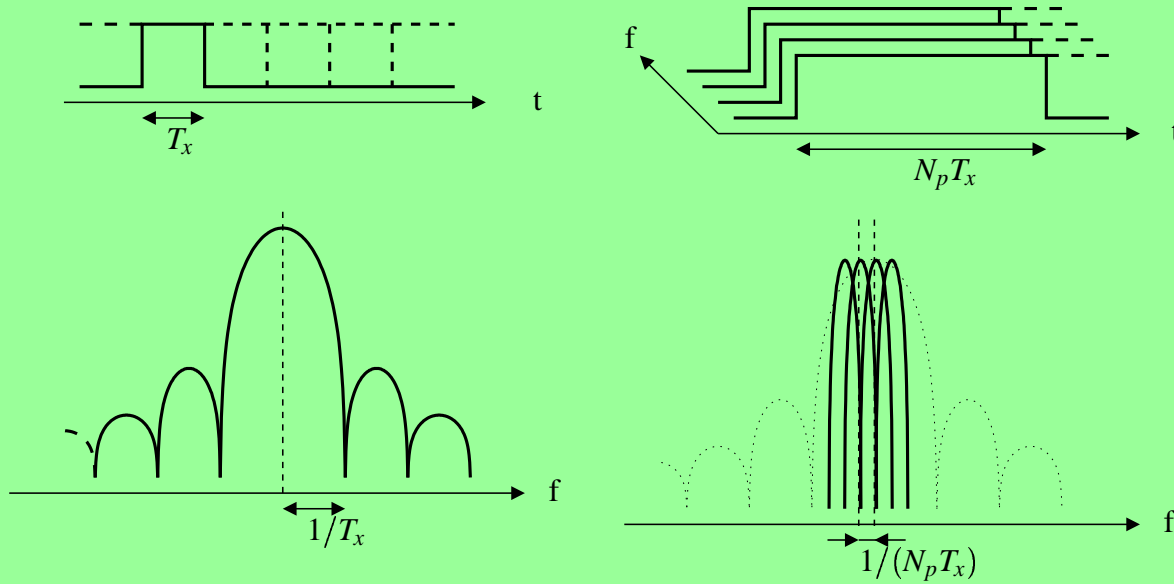
$$s_i(t) = \sum_{k=0}^{N_p-1} x_{k,i} c_i(t) e^{2i\pi(k-N_p/2)t/T_s}$$

Réalisation numérique plus délicate dans un contexte asynchrone.

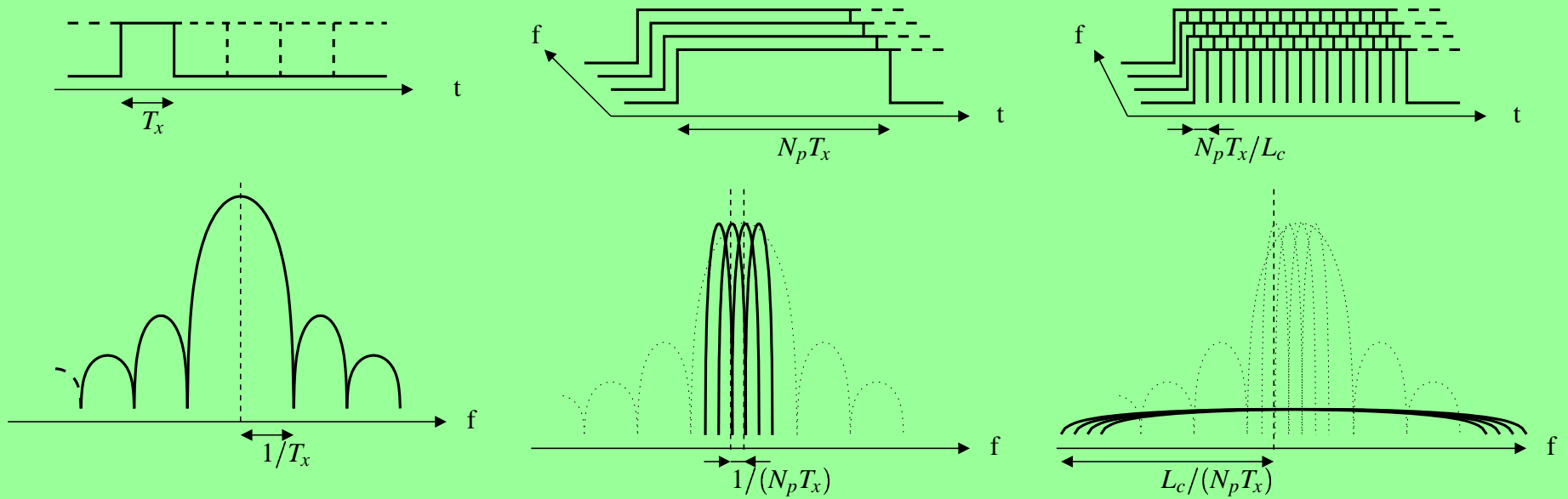
Le signal AMRC multipilote (MT-CDMA)



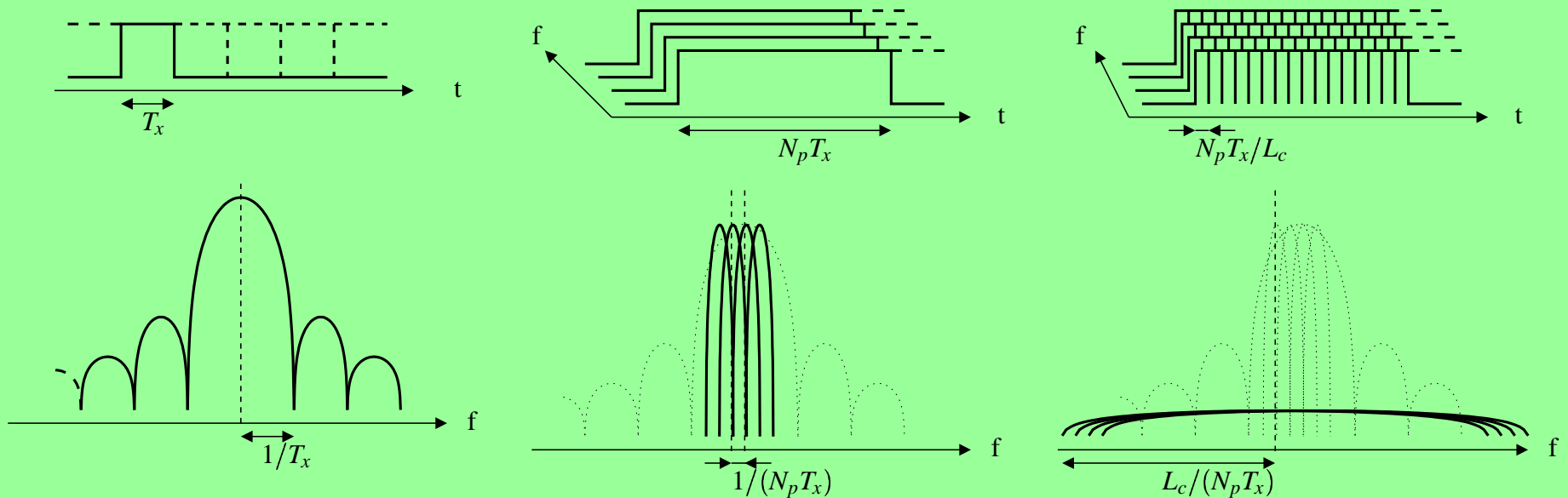
Le signal AMRC multipilote (MT-CDMA)



Le signal AMRC multipilote (MT-CDMA)



Le signal AMRC multipilote (MT-CDMA)



- $T_s = N_p T_x = L_c T_c$,
- $L_c \approx N_p L_{\text{DS-CDMA}} \Rightarrow$ meilleures propriétés des fonctions de corrélation,
- évanouissements sélectifs en fréquence par sous-porteuse,
- code \Rightarrow traitement de la diversité dans le domaine temporel (Rake) et accès multiples,
- modulation à enveloppe non constante \Rightarrow réponse fréquentielle de la séquence $x_{k,i}$.

Comparaison des trois systèmes

| Modulation | MC-CDMA | MC-DS-CDMA | MT-CDMA |
|--|-----------------------|--------------------------------|--|
| Durée d'un symbole T_s sur chaque sous-porteuse | T_x | $N_p T_x$ | $N_p T_x$ |
| Longueur des codes | L_c | L_c | $L'_c \approx N_p L_c$ |
| Durée d'un chip T_c | T_x | $N_p T_x / L_c$ | $N_p T_x / L'_c$ |
| Espace entre les sous-porteuses | $1/T_x$ | $L_c / (N_p T_x)$ | $1 / (N_p T_x)$ |
| Occupation spectrale (lobes principaux) | $\frac{N_p + 1}{T_x}$ | $\frac{(N_p + 1)L_c}{N_p T_x}$ | $\approx 0,5 \frac{2L'_c + N_p - 1}{N_p T_x}$ (filtrage de Nyquist) |

Même débit symbole $1/T_x \implies$ même occupation spectrale lorsque $N_p = L_c$.

Plan de la présentation

- Les accès multiples
- L'étalement de spectre
- Les modulations à porteuses multiples

- Les modulations à porteuses multiples et à spectre étalé
 - Le MC-CDMA
 - Le MC-DS-CDMA
 - Le MT-CDMA

- La liaison descendante synchrone : le système AMRC à porteuses multiples (MC-CDMA)
 - Les récepteurs linéaires
 - Le filtrage de Wiener global
 - Les récepteurs non linéaires

- La liaison montante asynchrone : le système AMRC multipilote (MT-CDMA)

- Conclusion et perspectives

Les récepteurs AMRC

Classification des récepteurs

- structures :
 - linéaires, non linéaires,
 - parallèles, séries,
 - conjointes, disjointes,...
- critères :
 - étalement de spectre : CGM, CGE,
 - égalisation : EQM, ZF,
- récepteurs optimaux, sous-optimaux,
- techniques mono ou multi-utilisateurs.

Définition (*Verdù*) : *l'objectif de la détection multiutilisateur est l'étude de la stratégie de démodulation des informations binaires envoyées simultanément par plusieurs émetteurs qui partagent un même canal de communication.*

En pratique : utilisation d'informations sur les signaux des autres utilisateurs,
⇒ puissances, codes, matrices de corrélation, retards...

La liaison descendante synchrone

- Le contexte :**
- monocellulaire,
 - liaison descendante synchrone.

- Les paramètres :**
- codes de Walsh–Hadamard (Golay),
 - gain de traitement $L_c = N_p$ avec à pleine charge $N_u = L_c$,
 - modulation MDP4.

- Le canal :**
- Rayleigh sélectif en fréquence,
 - bruit additif blanc gaussien.

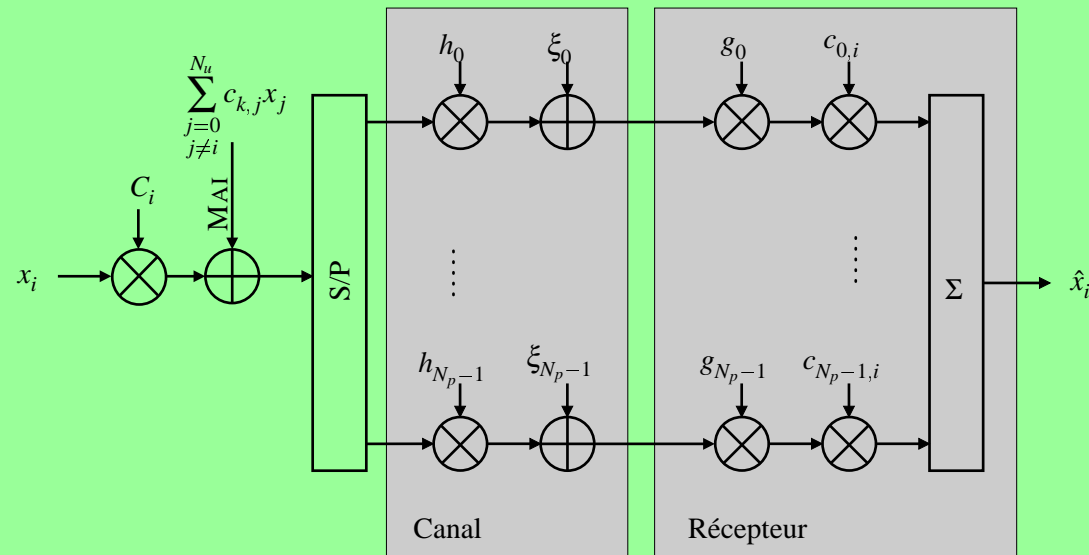
Les hypothèses systèmes :

- fonctions de synchronisation et fonctions RF idéales,
- Doppler compensé,
- système MC–CDMA adapté au canal :
 - canal non sélectif en fréquence / sous–porteuse,
 - canal non sélectif en temps / symbole MC–CDMA,
 - $\Delta_g > \Delta\tau_{\max}$,
- matrices d'entrelacement idéales,
- estimations parfaites des coefficients du canal et de la puissance des signaux.

La chaîne de communication simplifiée

Modélisation du canal en fréquence :

- h_k constant sur chaque symbole MC-CDMA, processus de Rayleigh,
- diversité fréquentielle optimale $L = L_c$,
- ξ_k bruit additif blanc gaussien.



$$\hat{x}_i = {}^t C_i G (H C X + N) = \underbrace{\sum_{k=0}^{N_p-1} c_{k,i}^2 g_k h_k x_i}_{(a)} + \underbrace{\sum_{j=0, j \neq i}^{N_u-1} \sum_{k=0}^{N_p-1} c_{k,i} c_{k,j} g_k h_k x_j}_{(b)} + \underbrace{\sum_{k=0}^{N_p-1} c_{k,i} g_k \xi_k}_{(c)}$$

Les récepteurs linéaires utilisés

Les récepteurs :

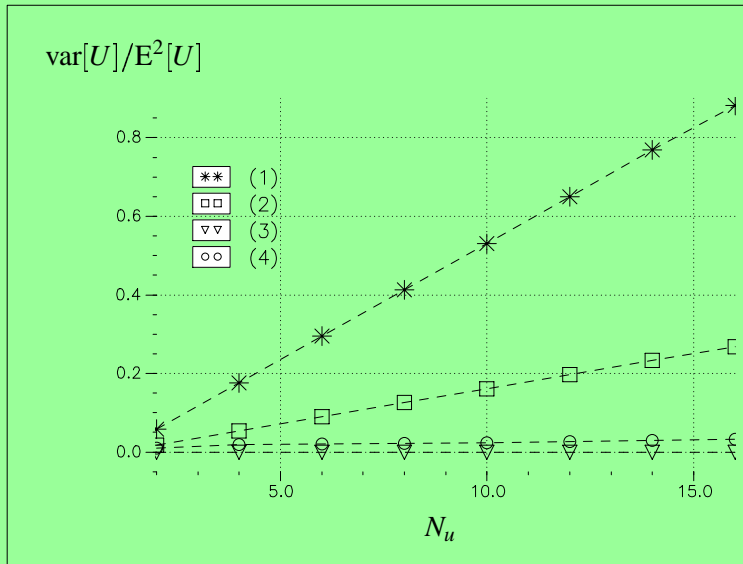
- | | | | |
|-------|-------------------------|---------|--|
| • CGM | $g_k = \bar{h}_k$ | • ZF | $g_k = 1/h_k$ |
| • CGE | $g_k = \bar{h}_k/ h_k $ | • CEQMM | $g_k = \bar{h}_k/(h_k ^2 + 1/\gamma_K)$ |

Les récepteurs linéaires utilisés

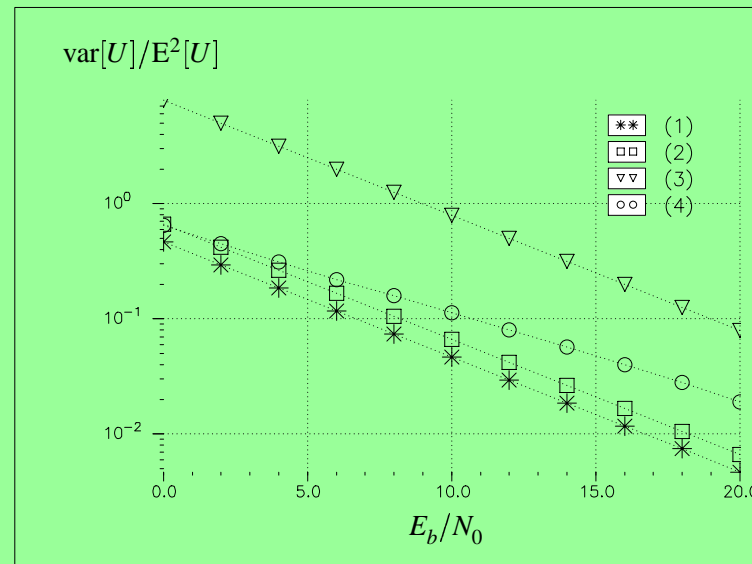
Les récepteurs :

- | | | | |
|-------|-------------------------|---------|--|
| • CGM | $g_k = \bar{h}_k$ | • ZF | $g_k = 1/h_k$ |
| • CGE | $g_k = \bar{h}_k/ h_k $ | • CEQMM | $g_k = \bar{h}_k/(h_k ^2 + 1/\gamma_K)$ |

Interférences d'accès multiple



Bruit additif

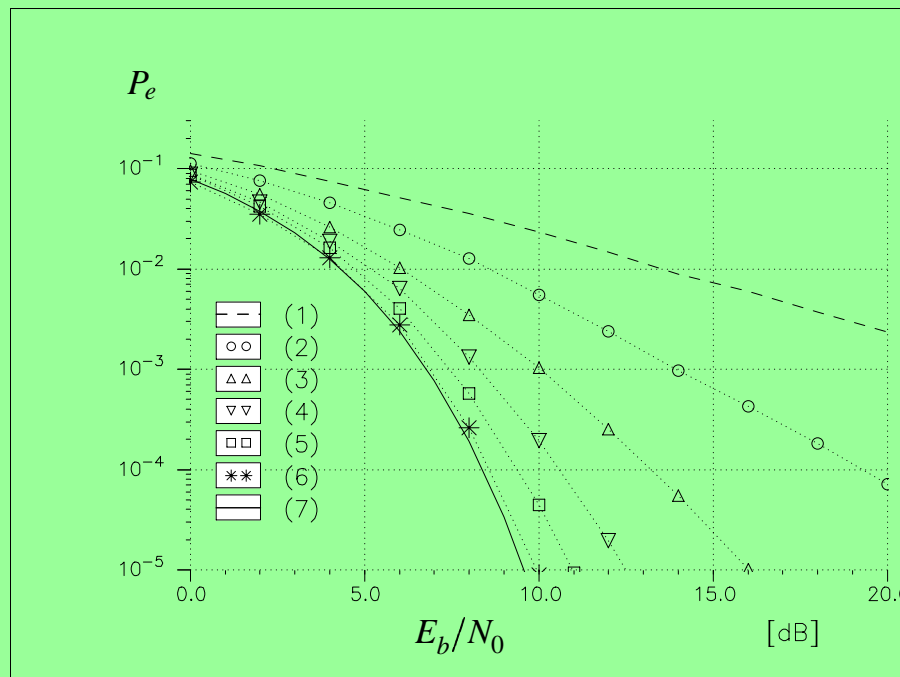


CGM (1), CGE (2), ZF (3), CEQMM (4).

La limite du filtre adapté

$$P_e = \left(1 - \sqrt{\frac{\gamma}{L+\gamma}}\right)^L \sum_{k=0}^{L-1} \mathbf{C}_k^{L-1+k} \left(\frac{1}{2}\right)^{L-k} \left(1 + \sqrt{\frac{\gamma}{L+\gamma}}\right)^k$$

- γ : rapport E_b/N_0 ,
- L : diversité du canal vue par le récepteur, avec $N_p = L_c \geq L$.



- (1) \Rightarrow OFDM sans codage,
 (2)...(6) $\Rightarrow L \in \{2, 4, 8, 16, 64\}$,
 (7) \Rightarrow canal gaussien.

Le filtrage de Wiener global

Minimisation de l'erreur quadratique moyenne entre le signal émis x_i et le signal reçu après filtrage \hat{x}_i :

$$\varepsilon = x_i - \hat{x}_i = x_i - {}^tW_i(HCX + N)$$

$$\min_{W_i} E [|\varepsilon|^2] \iff {}^tW_i = E [|x_i|^2] {}^tC_i\bar{H}(HC\Sigma_X{}^tC\bar{H} + \Sigma_N)^{-1} = {}^tC_iG$$

Le filtrage de Wiener global

Minimisation de l'erreur quadratique moyenne entre le signal émis x_i et le signal reçu après filtrage \hat{x}_i :

$$\varepsilon = x_i - \hat{x}_i = x_i - {}^tW_i(HCX + N)$$

$$\min_{W_i} E [|\varepsilon|^2] \iff {}^tW_i = E [|x_i|^2] {}^tC_i\bar{H}(HC\Sigma_X{}^tC\bar{H} + \Sigma_N)^{-1} = {}^tC_iG$$

CEQMM

$$g_k = \frac{\bar{h}_k}{|h_k|^2 + 1/\gamma_k}$$

connaissance des puissances des signaux

$$\text{émis : } |s_k|^2 = \left| \sum_{j=0}^{N_u-1} c_{k,j}x_j \right|^2$$

CEQMMG

$$G = \bar{H}(HC\Sigma_X{}^tC\bar{H} + \Sigma_N)^{-1}$$

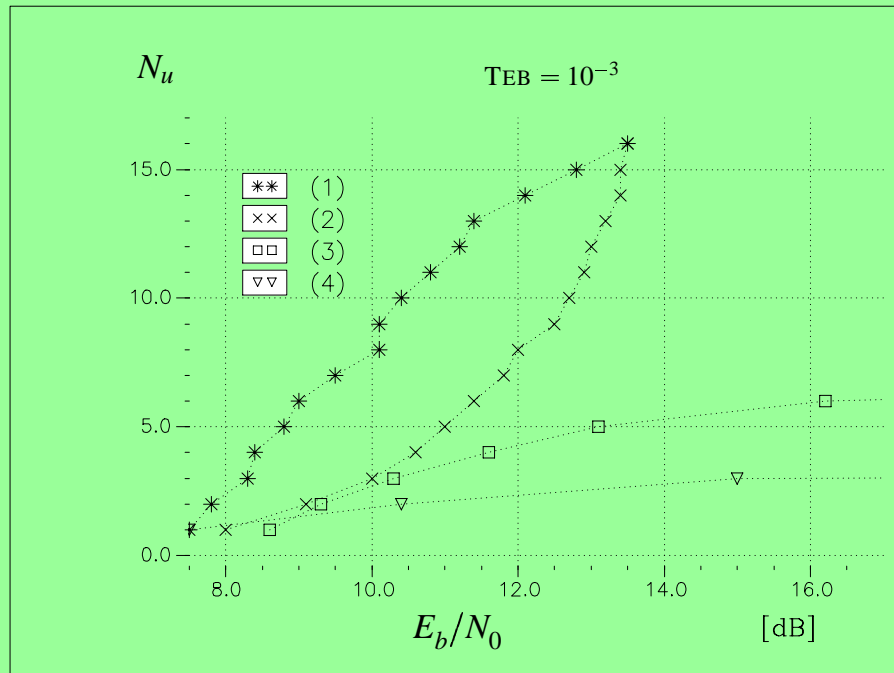
connaissance de la matrice de corrélation

des codes : $C\Sigma_X{}^tC$

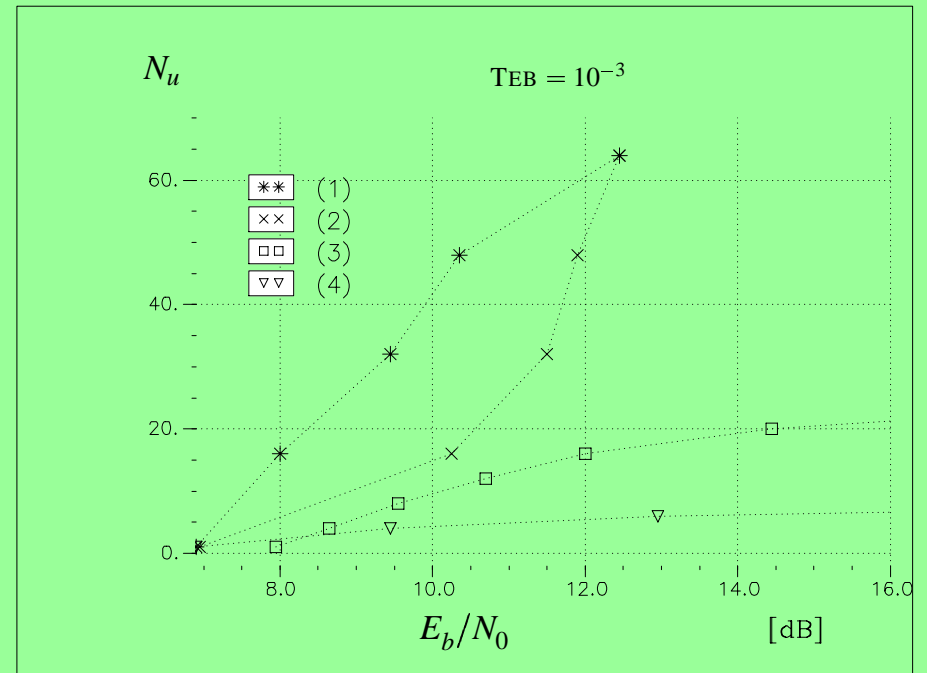
⇒ Connaissance d'informations déterministes sur les signaux des utilisateurs.

Performances des récepteurs linéaires

$$N_p = L_c = L = 16$$



$$N_p = L_c = L = 64$$



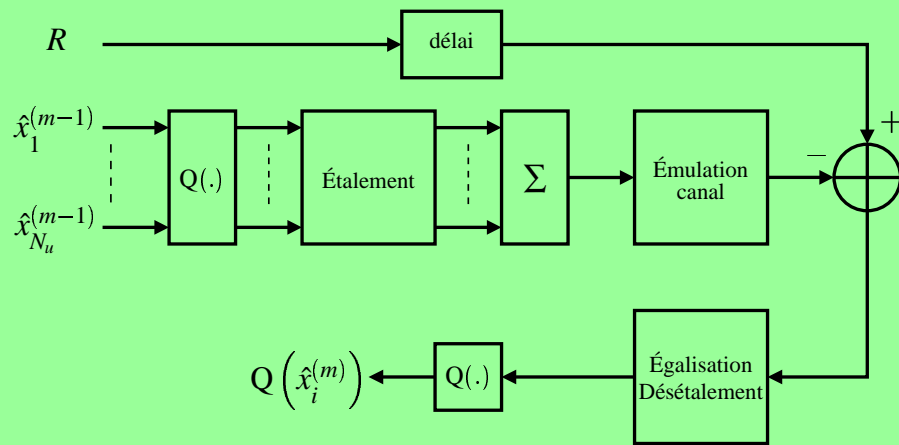
CEQMMG (1), CEQMM (2), CGE (3), CGM (4), ZF (>20 dB).

- $N_p = L_c = 16$, $TEB = 10^{-3}$, $E_b/N_{0LFA} = 7,5$ dB :

| Perf. (en dB/LFA) | $N_u = L_c/2$ | $N_u = L_c$ |
|-------------------|---------------|-------------|
| CEQMM | 5,5 | 6 |
| CEQMMG | 2,6 | 6 |

L'annulation des interférences

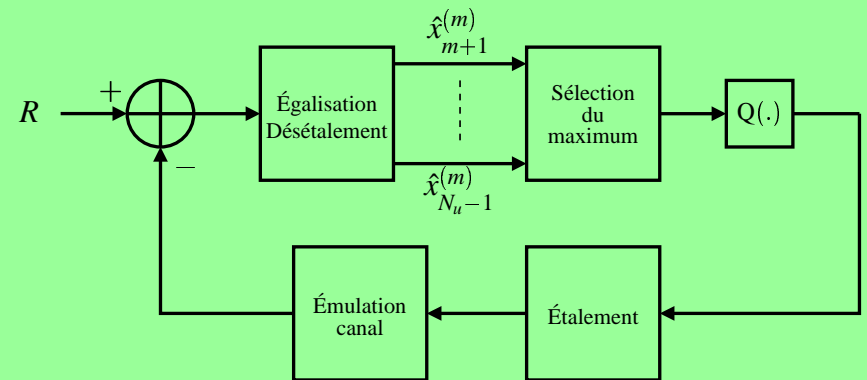
• Structure parallèle



$$\hat{x}_i^{(m)} = {}^t C_i G^{(m)} \left(R - H \sum_{\substack{j=0 \\ j \neq i}}^{N_u-1} C_j Q \left(\hat{x}_j^{(m-1)} \right) \right)$$

⇒ puissance de calcul

• Structure série



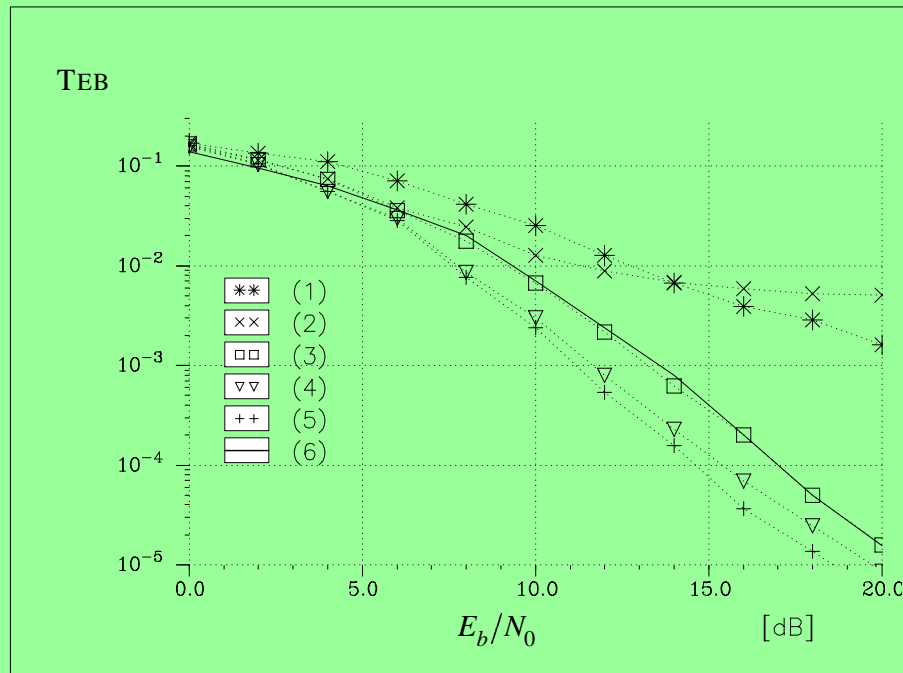
$$\hat{x}_i^{(m)} = {}^t C_i G^{(m)} \left(R - H \sum_{\substack{r=0 \\ j_r \neq i}}^{m-1} C_{j_r} Q \left(\hat{x}_{j_r}^{(r)} \right) \right)$$

⇒ temps de traitement

$G^{(m)}$: CGM, CGE, CEQMM, CEQMMG.

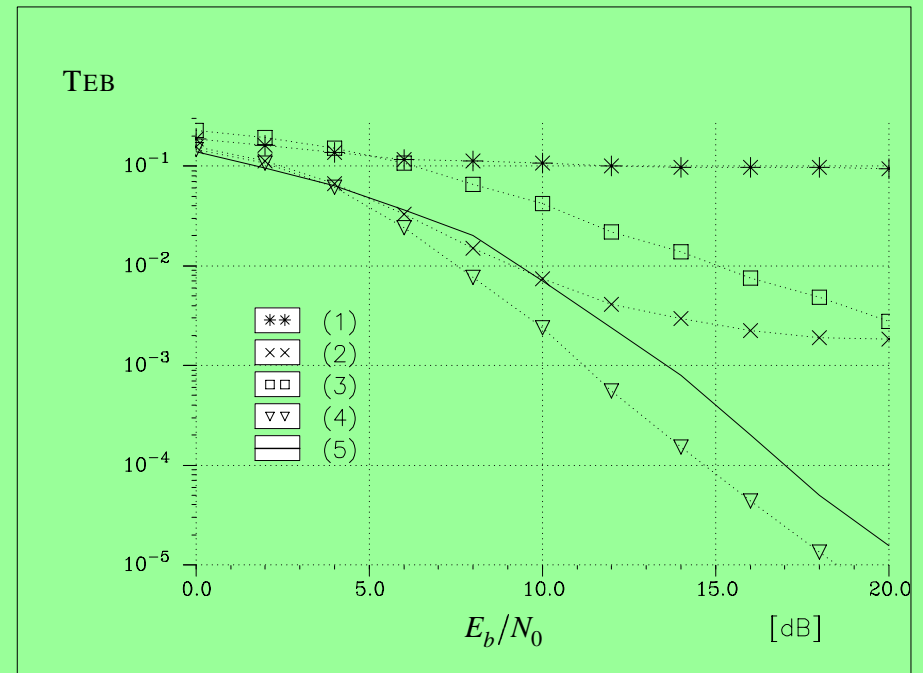
Performances des récepteurs (1)

• PIC



ZF-CGM (1), CGE-CGE (2),
CEQMM-CGM (3), CEQMM-CGE (4),
CEQMM-CEQMM (5), CEQMM (6).

• SIC



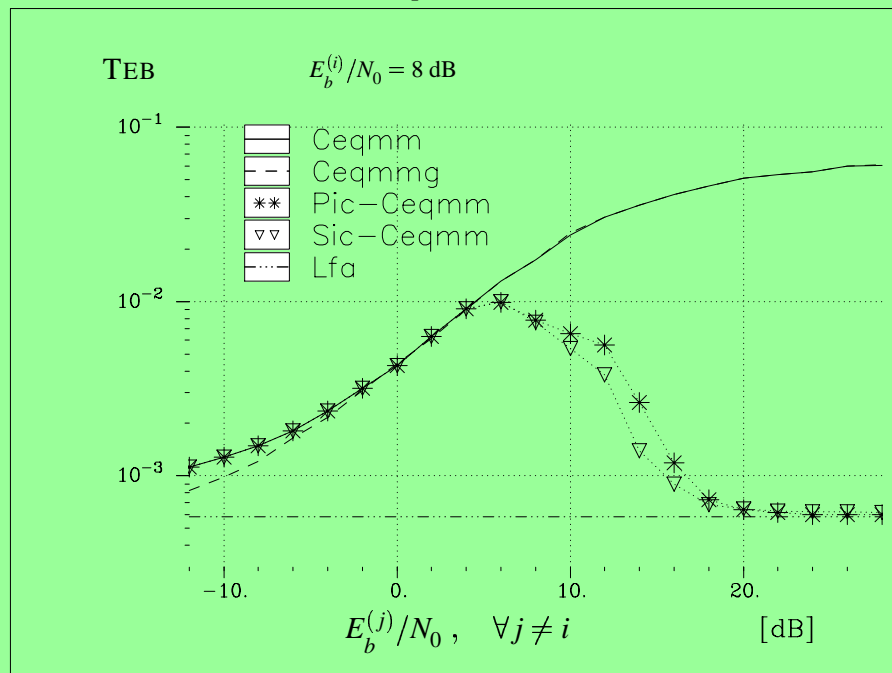
SIC-CGM (1), SIC-CGE (2)
SIC-ZF (3), SIC-CEQMM (4)
CEQMM (5).

$$N_u = N_p = L_c = L = 16$$

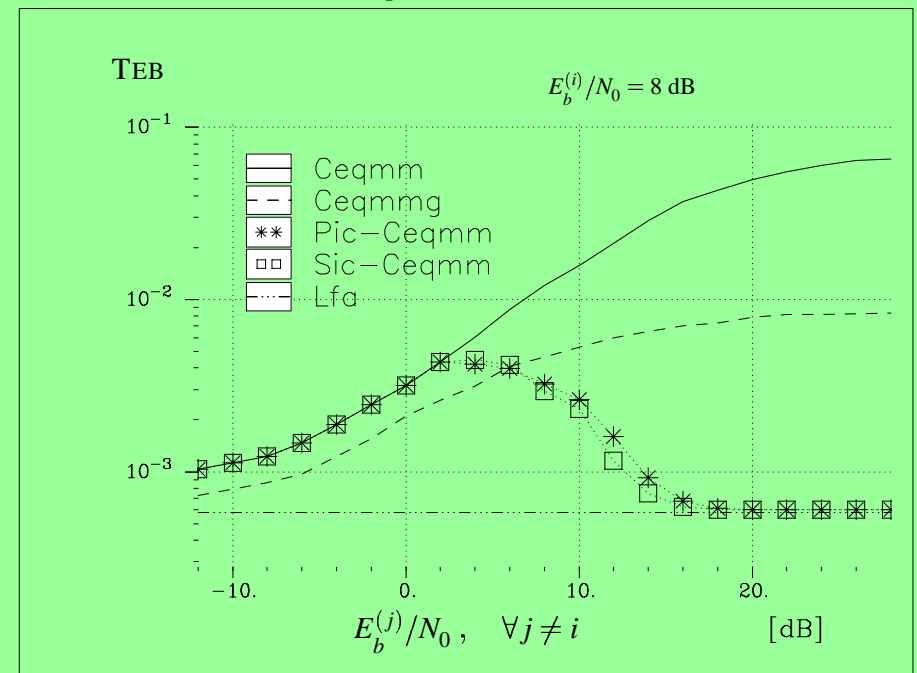
Performances des récepteurs (2)

Puissances différentes des signaux des utilisateurs \Rightarrow la limite du filtre adapté est atteinte.

$$N_u = N_p = L_c = 16$$



$$N_u = N_p/2 = L_c/2 = 8$$



Intérêt des détecteurs Pic/Sic : puissances différentes des signaux des utilisateurs.

Plan de la présentation

- Les accès multiples
- L'étalement de spectre
- Les modulations à porteuses multiples

- Les modulations à porteuses multiples et à spectre étalé
 - Le MC-CDMA
 - Le MC-DS-CDMA
 - Le MT-CDMA

- La liaison descendante synchrone : le système AMRC à porteuses multiples (MC-CDMA)
 - Les récepteurs linéaires
 - Le filtrage de Wiener global
 - Les récepteurs non linéaires

- La liaison montante asynchrone : le système AMRC multipilote (MT-CDMA)

- Conclusion et perspectives

Les réseaux CDMA

La liaison descendante :

- système réseau synchrone, codes orthogonaux,
- canal à une seule entrée du type point à multipoint,
- sommation des signaux avant le canal,
- contrôle de puissance : puissances différentes des signaux des utilisateurs (minimisation du rapport $S/(I + N)$).

La liaison montante :

- système asynchrone (quasi-synchrone), choix des codes,
- canal à plusieurs entrées,
- sommation des signaux en réception,
- même puissance des signaux en réception.

La liaison montante asynchrone

- Le contexte :**
- monocellulaire,
 - liaison montante asynchrone.

- Les paramètres :**
- gain de traitement : $L_c/N_p \approx 16$,
 - codes de longueur $L_c = 2^n - 1$,
 - modulation MDP4.

Le canal : gaussien à accès multiple.

Le récepteur : banc de filtres adaptés au code \Rightarrow 1 corrélateur par sous-porteuse.

Les hypothèses de calcul :

- codes idéalement aléatoires,
- approximation gaussienne (variable de décision),
- retards entre les signaux équirépartis sur $[0, T_s[$.

Expression de la probabilité d'erreur

$$P_e = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left(\gamma(E_b/N_0, N_u, L_c, N_p, k) \right)$$

$$\gamma(\cdot) = \frac{E[U_k]}{\sqrt{2\operatorname{var}[U_k]}} = \left[\underbrace{\frac{N_0}{E_b}}_{(a)} + \underbrace{\frac{4(N_u - 1)}{3L_c}}_{(b)} + \underbrace{\sum_{\substack{l=0 \\ l \neq k}}^{N_p-1} \frac{(N_u - 1)L_c}{\pi^2(l - k)} \left(1 - \frac{L_c}{2\pi(l - k)} \sin\left(2\pi \frac{l - k}{L_c}\right) \right)}_{(c)} \right]^{-0,5}$$

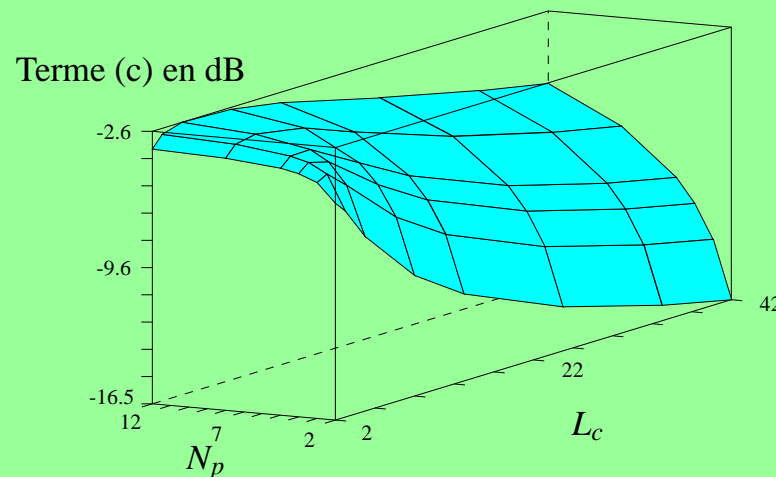
Coefficient 2 sur le terme (b) par rapport à l'approximation gaussienne de Pursley.

Expression de la probabilité d'erreur

$$P_e = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left(\gamma(E_b/N_0, N_u, L_c, N_p, k) \right)$$

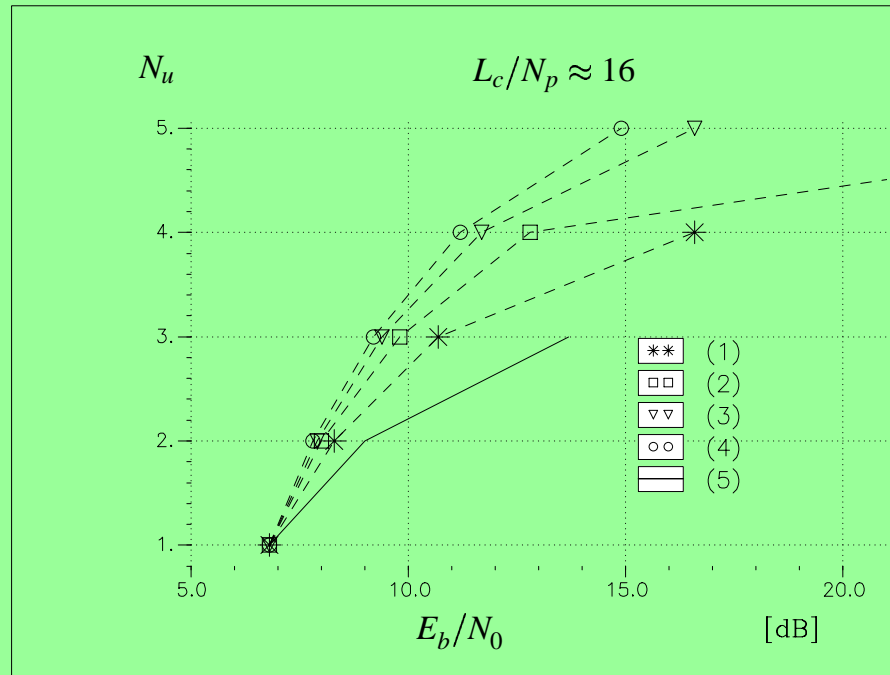
$$\gamma(\cdot) = \frac{E[U_k]}{\sqrt{2\operatorname{var}[U_k]}} = \left[\underbrace{\frac{N_0}{E_b}}_{(a)} + \underbrace{\frac{4(N_u - 1)}{3L_c}}_{(b)} + \underbrace{\sum_{\substack{l=0 \\ l \neq k}}^{N_p-1} \frac{(N_u - 1)L_c}{\pi^2(l - k)} \left(1 - \frac{L_c}{2\pi(l - k)} \sin\left(2\pi \frac{l - k}{L_c}\right) \right)}_{(c)} \right]^{-0,5}$$

Coefficient 2 sur le terme (b) par rapport à l'approximation gaussienne de Pursley.



$$N_u = 15$$

Capacité du système MT-CDMA



(1)...(4) $\Rightarrow N_p \in \{2, 4, 8, 16\}$,
 (5) $\Rightarrow N_p = 1$, DS-SS-CDMA,
 $T_{EB} = 10^{-3}$.

\Rightarrow Amélioration des performances du système AMRC à porteuse unique (DS-SS-CDMA) avec une valeur de N_p relativement faible.

Conclusion

- Étude de nouvelles modulations combinant OFDM (efficacité spectrale) et étalement de spectre par séquence directe (capacité d'accès multiple).
- MT-CDMA : amélioration de la capacité d'accès du DS-CDMA d'un facteur 1,6 avec une structure de réception simple et un nombre faible de sous-porteuses (8).
- MC-CDMA
 - ★ EQM : critère performant (structure linéaire de réception).
 - ★ Approche globale de la détection → CEQMMG,
 - * gain de 3 dB à demi-charge / CEQMM,
 - * 2,6 dB de la LFA à demi-charge.
 - ★ Annulation des interférences,
 - * puissances égales : gain de 2,3 dB à pleine charge (0,7 dB à demi-charge) / récepteur linéaire CEQMMG,
 - * puissances différentes : PIC/SIC-CEQMM → LFA lorsque $P_{\text{interférents}} > P_{\text{utile}}$,
⇒ répartition judicieuse des puissances,
 - * PIC-CEQMM \approx SIC-CEQMM.

Perspectives

- Prise en compte de l'indispensable codage de canal :
 - * puissances des signaux identiques → éléments de réponse avec le projet SMARC, turbo-décodage + CEQMMG (canaux UMTS),
 - * puissances différentes des signaux → décodage dans la boucle d'annulation d'interférences ?
- Robustesse vis-à-vis des erreurs de synchronisation (temps, fréquence, rythme).
- Prise en compte de l'estimation des informations nécessaires à la détection (canal, bruit, puissance,...).
- Prise en compte des non linéarités des amplificateurs (spectre, TEB).
- Résistance au Doppler, bruit de phase, interférences intercellules.
- MT-CDMA : limiter les interférences interporteuses et d'accès multiples (approche globale de la détection — annulation d'interférences).
- La voie montante : MC-CDMA ou MT-CDMA, asynchrone ou quasi-synchrone ?
- Étude du système MC-DS-CDMA.