



# Mise en place d'une couche physique pour les futurs systèmes de radiocommunications hauts débits UWB

Louis-Marie Aubert

*8 novembre 2005*

**Thèse**

présentée devant

l'Institut National de Sciences Appliquées de Rennes

réalisée dans le cadre d'une collaboration entre

Mitsubishi Electric Information Technology Center Europe

et

Institut d'Electronique et de Télécommunication de Rennes

# Contexte de la thèse

---

- **Activités de recherche sur l'UWB**

- **IETR (depuis 1997) :**

- Etude de la propagation du signal UWB
  - Modélisation du signal radar pour la détection d'objets enfouis
  - Modélisation déterministe du canal
  - Caractérisation des matériaux
- Caractérisation et conception d'antennes
- Etude des solutions hauts débits multi-porteuses

- **Mitsubishi ITE (depuis 2002) :**

- Couche physique de communications bas et hauts débits
- Couche d'accès au réseau
- Etude des solutions technologiques pour l'implémentation

# Contexte de la thèse

---

- **Activités de recherche sur l'UWB**

- **IETR (depuis 1997) :**

- Etude de la propagation du signal UWB
      - Modélisation du signal radar pour la détection d'objets enfouis
      - Modélisation déterministe du canal
      - Caractérisation des matériaux
    - Caractérisation et conception d'antennes
    - Etude des solutions hauts débits multi-porteuses

- **Mitsubishi ITE (depuis 2002) :**

- Couche physique de communications bas et hauts débits
    - Couche d'accès au réseau
    - Etude des solutions technologiques pour l'implémentation

- **Convention CIFRE lancée en novembre 2002**

# Plan

---

- **Partie 1 – Contexte UWB et objectifs de la thèse**
- **Partie 2 – Spécificités du canal UWB**
- **Partie 3 – Principes et étude de la solution proposée**
- **Partie 4 – Etude comparative MB-OOK / MB-OFDM**
- **Conclusion et perspectives**

# Partie 1

---

- **Contexte UWB et objectifs de la thèse**
- **Partie 2 – Spécificités du canal UWB**
- **Partie 3 – Principes et étude de la solution proposée**
- **Partie 4 – Etude comparative MB-OOK / MB-OFDM**
- **Conclusion et perspectives**

# Contexte historique avant 2002

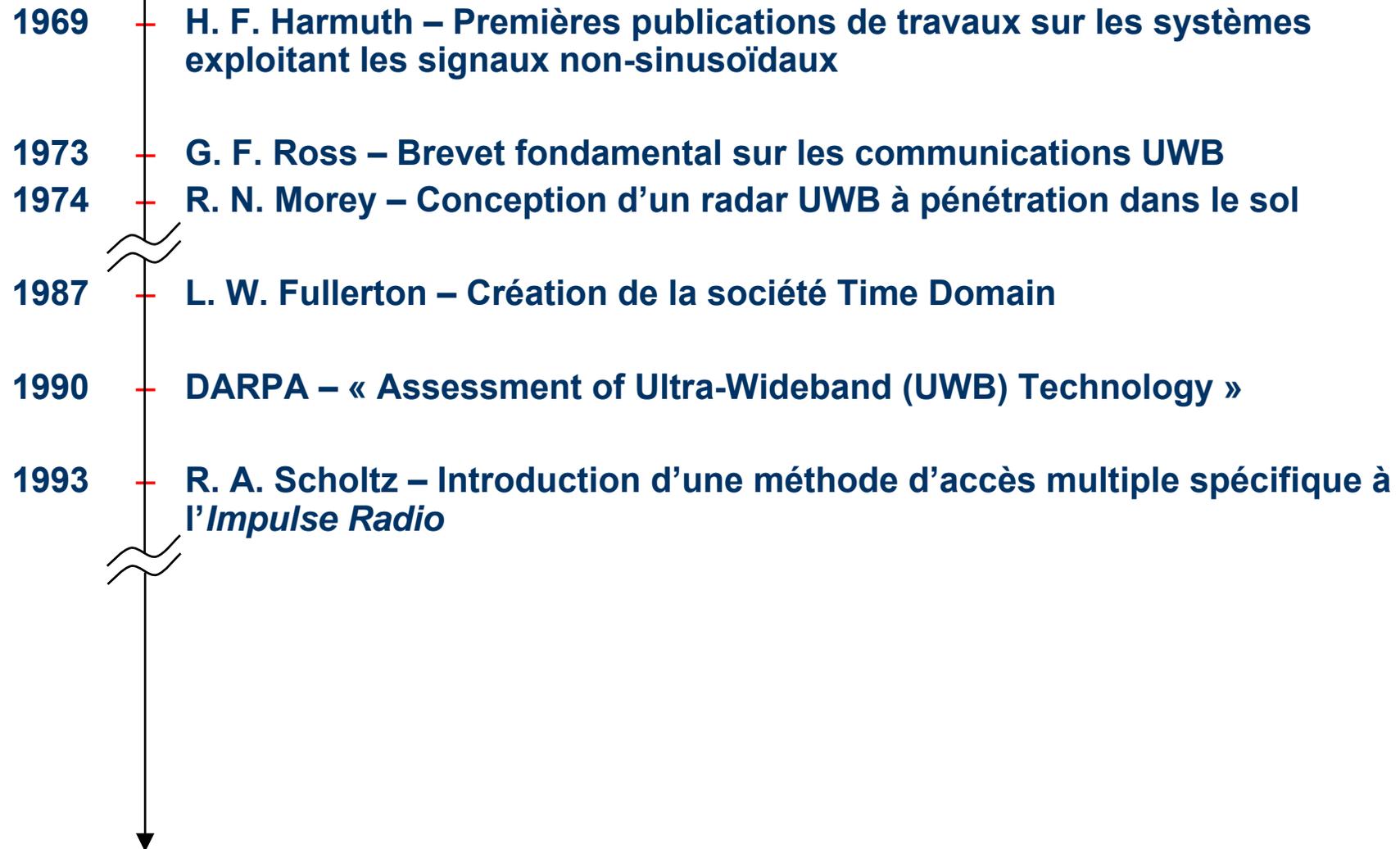
---

- 1969 - H. F. Harmuth – Premières publications de travaux sur les systèmes exploitant les signaux non-sinusoïdaux
- 1973 - G. F. Ross – Brevet fondamental sur les communications UWB
- 1974 - R. N. Morey – Conception d'un radar UWB à pénétration dans le sol



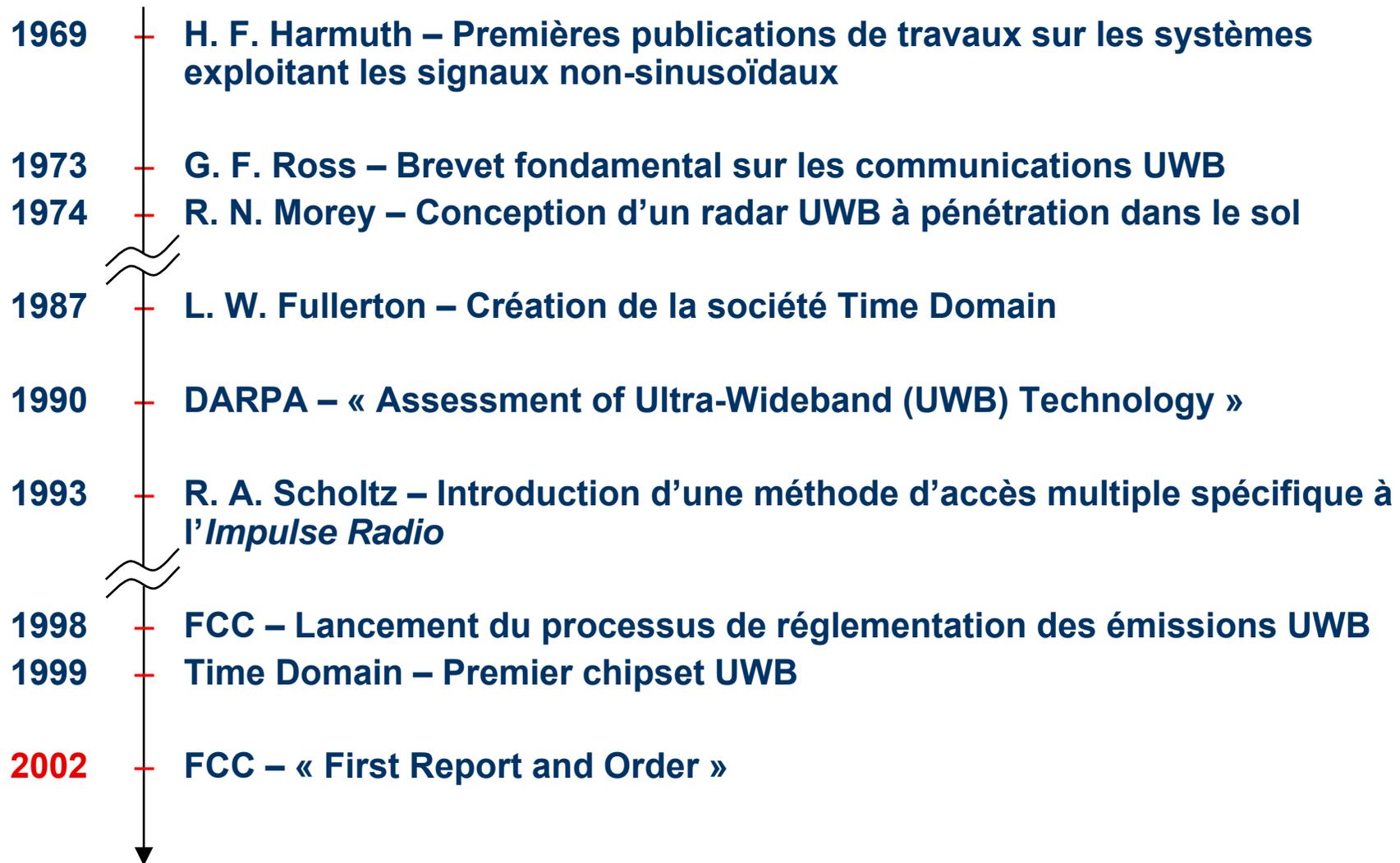
# Contexte historique avant 2002

---

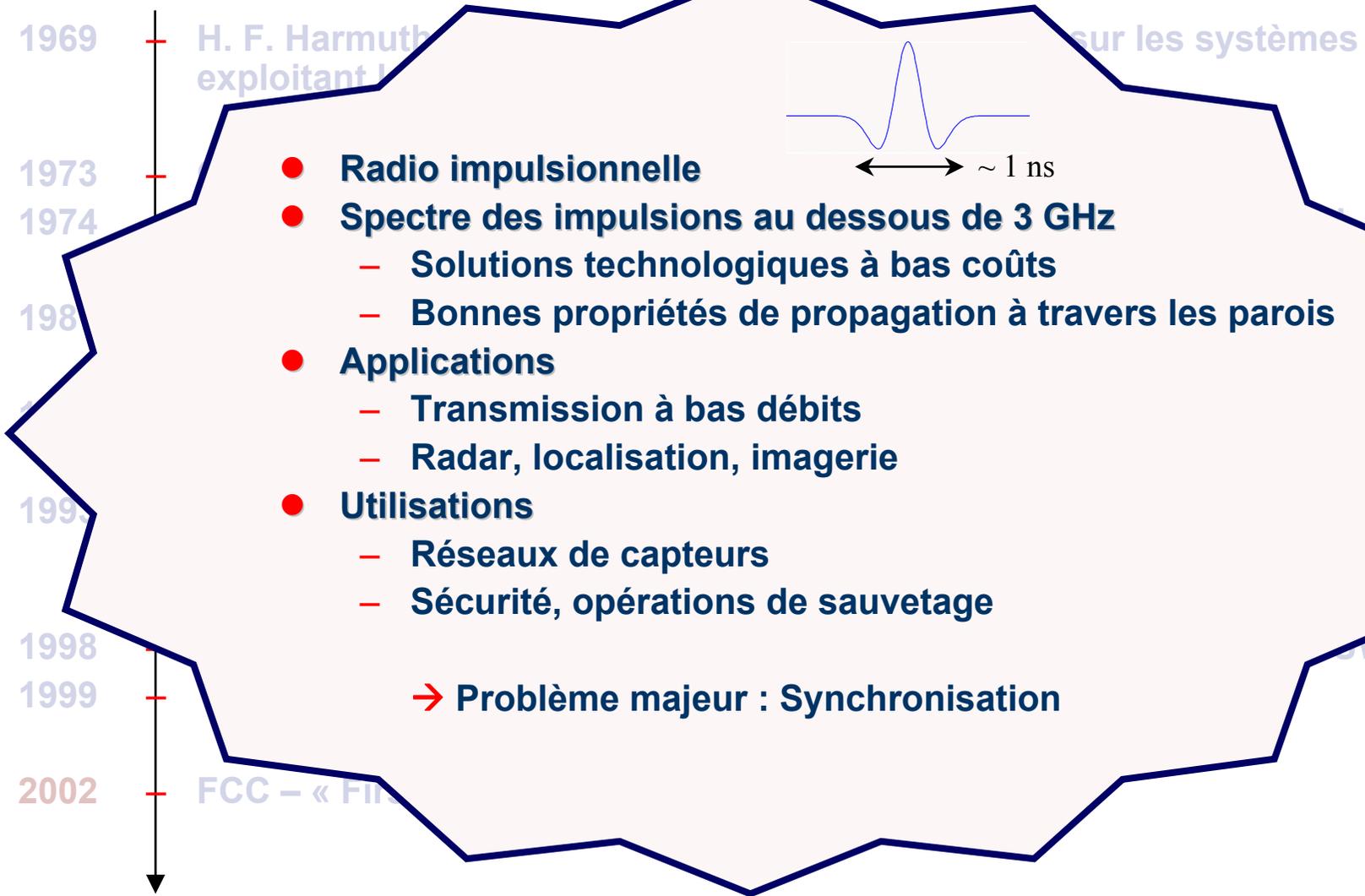


# Contexte historique avant 2002

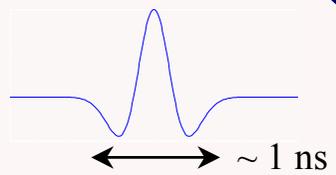
---



# Contexte historique avant 2002



- **Radio impulsionnelle**
  - **Spectre des impulsions au dessous de 3 GHz**
    - Solutions technologiques à bas coûts
    - Bonnes propriétés de propagation à travers les parois
  - **Applications**
    - Transmission à bas débits
    - Radar, localisation, imagerie
  - **Utilisations**
    - Réseaux de capteurs
    - Sécurité, opérations de sauvetage
- **Problème majeur : Synchronisation**

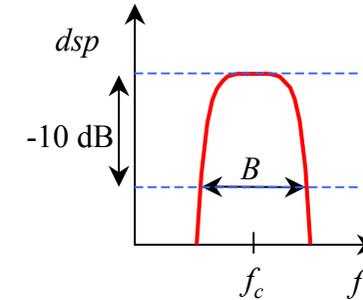


# Réglementation FCC

- **En février 2002**

- **Extension de la définition de l'UWB :**

- Bande fractionnelle  $B/f_c$  supérieure à 20%
    - Largeur de bande  $B$  supérieure à 500 MHz

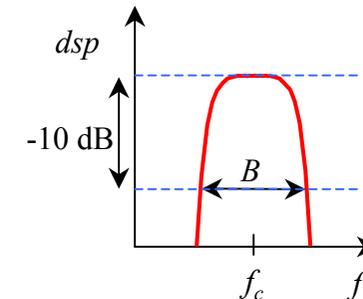


# Réglementation FCC

## ● En février 2002

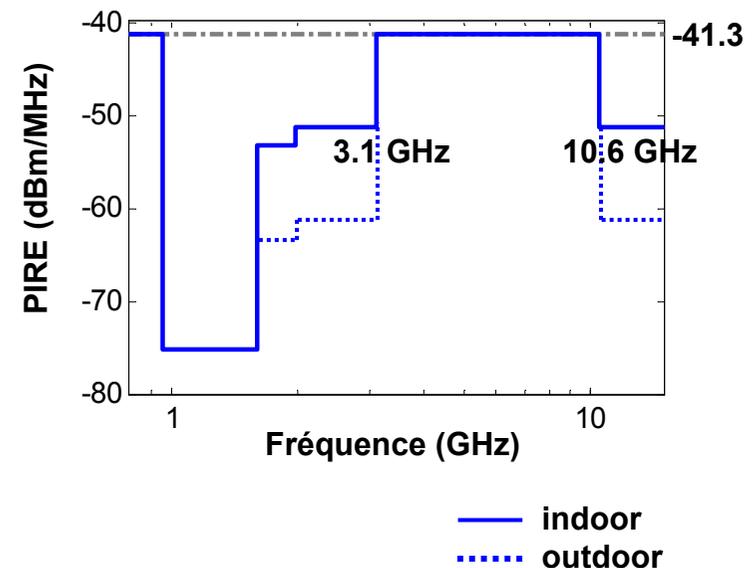
### – Extension de la définition de l'UWB :

- Bande fractionnelle  $B/f_c$  supérieure à 20%
- Largeur de bande  $B$  supérieure à 500 MHz



### – Autorisation des émissions UWB :

- Sans licence
- Principalement indoor
- Puissances moyennes limitées à  $-41.3$  dBm dans toute bande de 1 MHz entre 3.1 et 10.6 GHz
- Puissance pic limitée à 0 dBm dans toute bande de 50 MHz

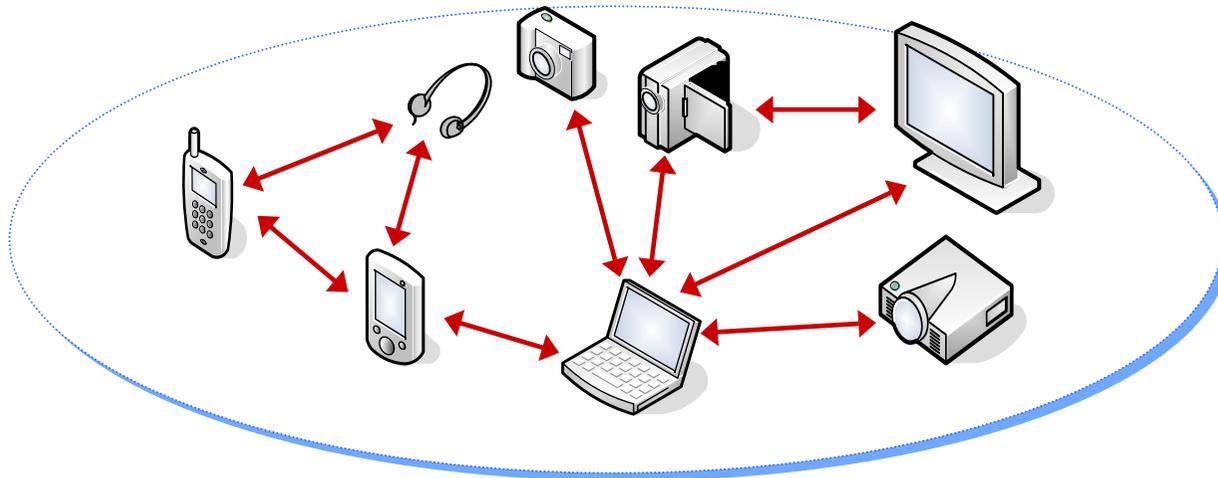


# Conséquences de la réglementation

- **Applications :**

- **Communications hauts débits WPAN**

- De 100 à 500 Mbit/s
    - Courtes portées (jusqu'à 10 mètres)

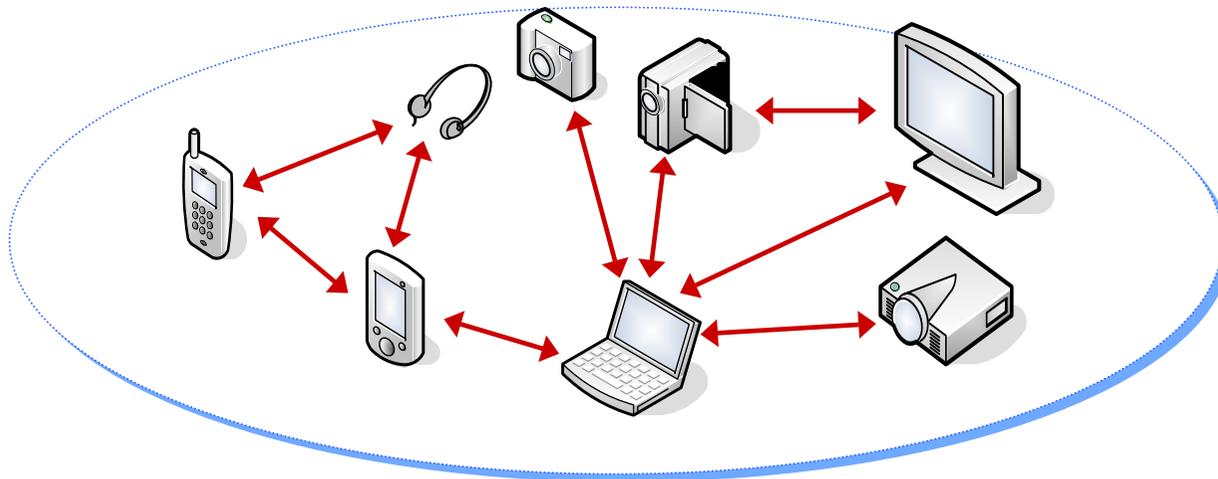


# Conséquences de la réglementation

- **Applications :**

- **Communications hauts débits WPAN**

- De 100 à 500 Mbit/s
    - Courtes portées (jusqu'à 10 mètres)

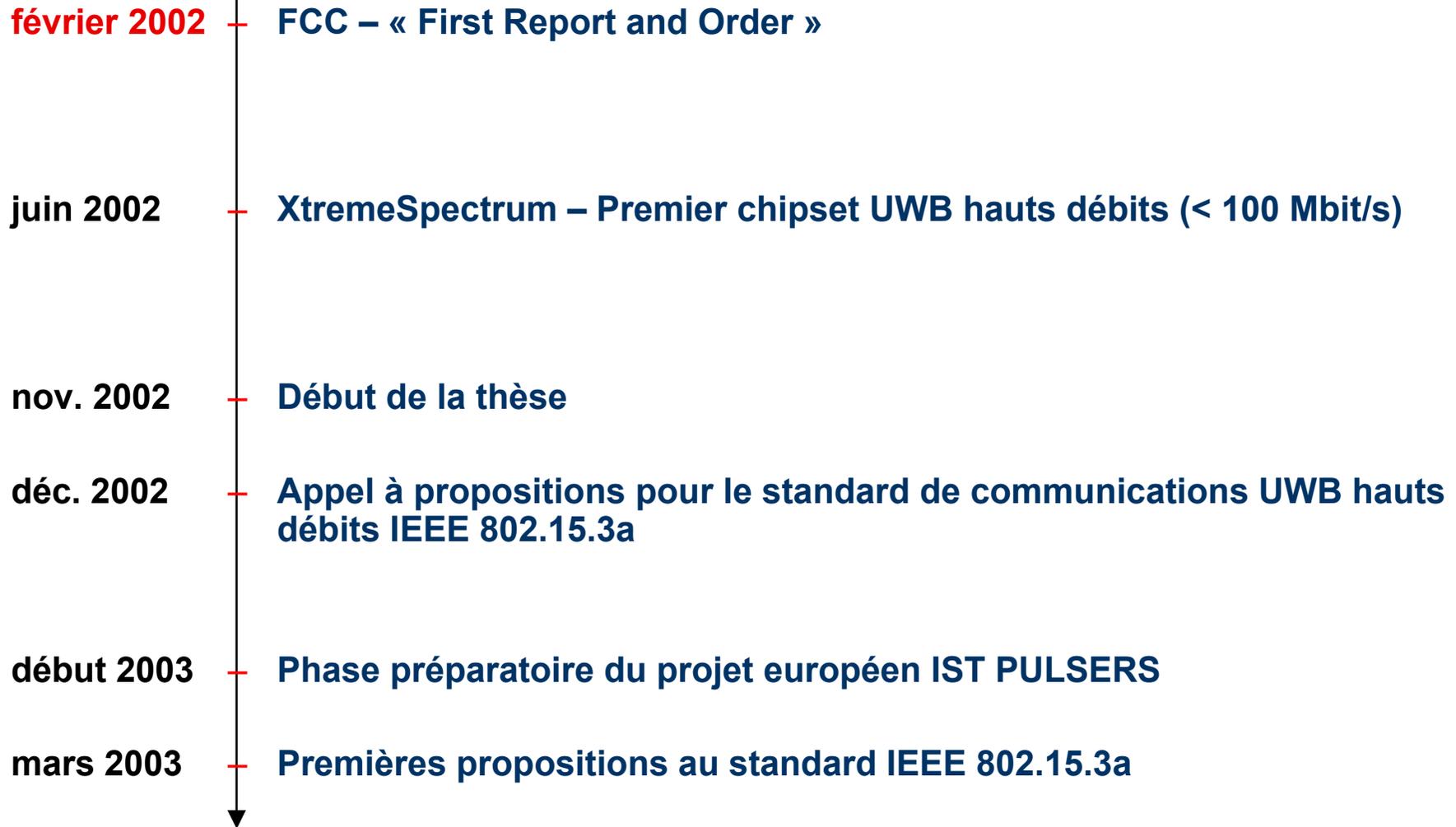


- **Solutions satisfaisant la définition très large de l'UWB :**

- Techniques impulsionnelles
  - Systèmes traditionnels à bande élargie

# L'UWB depuis la réglementation FCC

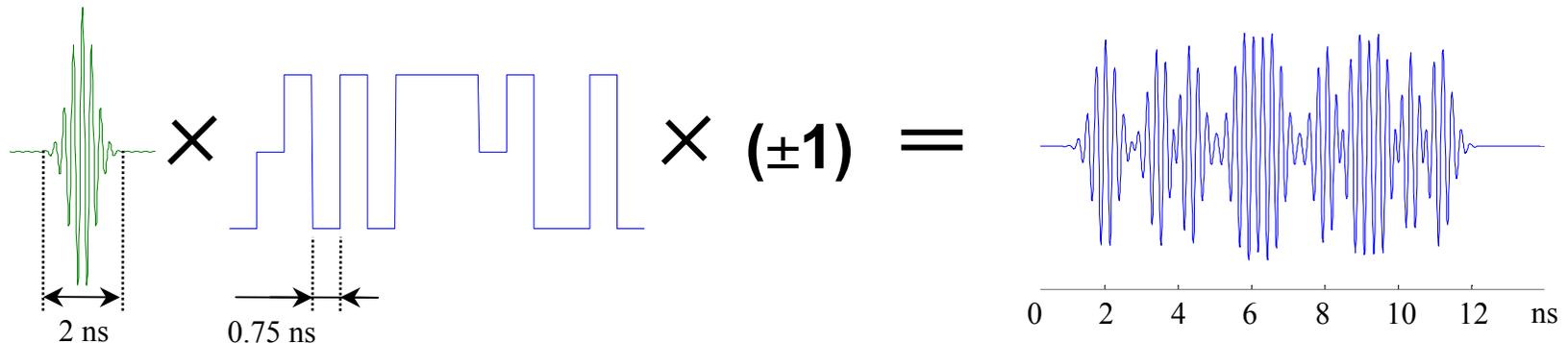
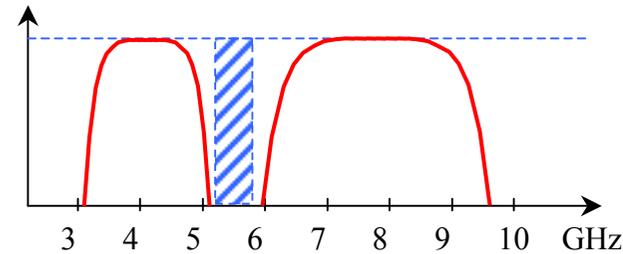
---



# Solutions pour le standard IEEE 802.15.3a

## ● Solution DS-UWB

- Solution impulsionnelle
- Spectre disponible scindé en 2 sous-bandes
- Étalement par CDMA de longueur 1 à 24, de fréquence chip :
  - 1.33 GHz sur la bande basse
  - 2.66 GHz sur la bande haute
- Modulation
  - BPSK (polarité) – 1 bit par symbole
  - 4-BOK (choix d'un code sur 2 disponibles + polarité) – 2 bit par symbole
- Débits théoriques de 55 à 1320 Mbit/s par sous-bande

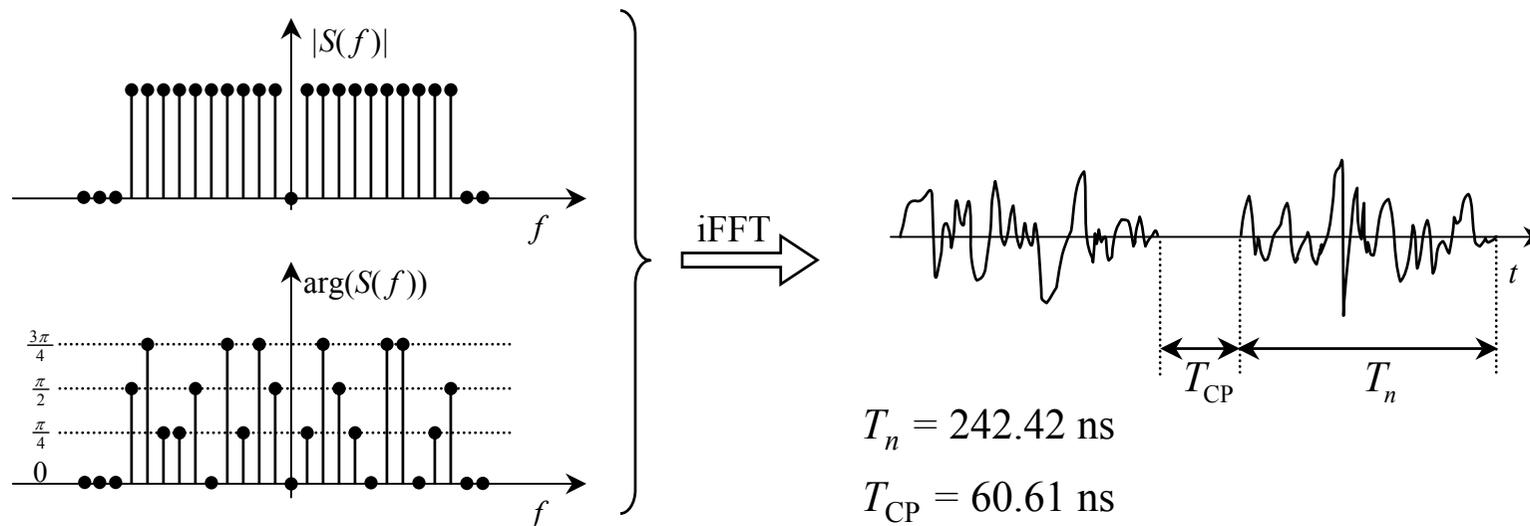
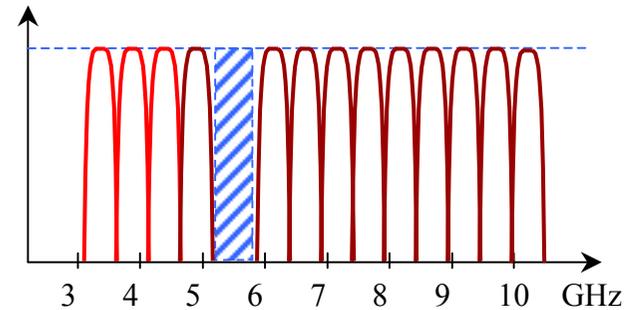


R. Fisher et al, « DS-UWB physical layer submission to 802.15 Task Group 3a », IEEE P802.15-04/0137r3, 2004

# Solutions pour le standard IEEE 802.15.3a

## ● Solution MB-OFDM

- Saut de fréquence sur au moins 3 sous-bandes de 528 MHz
- Modulation OFDM – QPSK sur 128 porteuses
- Débits
  - Brut : 640 Mbit/s (utilisation de 3 sous-bandes)
  - Utile : de 55 à 480 Mbit/s

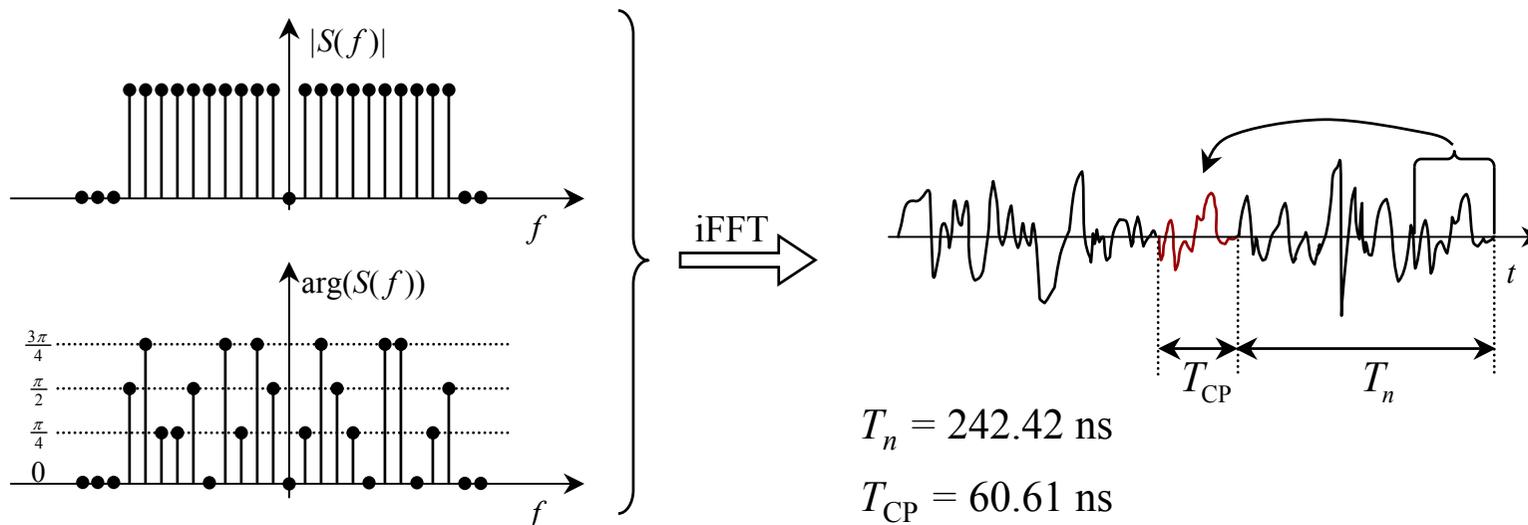
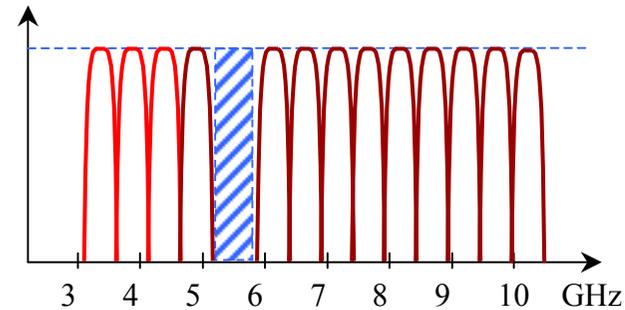


A. Batra et al, « Multi-band OFDM physical layer proposal for IEEE 802.15 Task Group 3a », IEEE P802.15-03/268r3, 2004

# Solutions pour le standard IEEE 802.15.3a

## ● Solution MB-OFDM

- Saut de fréquence sur au moins 3 sous-bandes de 528 MHz
- Modulation OFDM – QPSK sur 128 porteuses
- Débits
  - Brut : 640 Mbit/s (utilisation de 3 sous-bandes)
  - Utile : de 55 à 480 Mbit/s



A. Batra et al, « Multi-band OFDM physical layer proposal for IEEE 802.15 Task Group 3a », IEEE P802.15-03/268r3, 2004

# Solutions pour le standard IEEE 802.15.3a

---

- **Points caractéristiques :**

- **Point commun**

- Architecture multi-bandes

- Flexibilité sur les débits et coexistence avec les systèmes traditionnels

# Solutions pour le standard IEEE 802.15.3a

---

- **Points caractéristiques :**

- **Point commun**

- Architecture multi-bandes
      - Flexibilité sur les débits et coexistence avec les systèmes traditionnels

- **DS-UWB**

- Approche impulsionnelle
      - Réduction des évanouissements sur le signal reçu
    - Modulation à faible nombre d'états
      - Pour 1 Gbit/s avec une modulation à 2 états, nécessité d'un bit par ns

# Solutions pour le standard IEEE 802.15.3a

---

- **Points caractéristiques :**

- **Point commun**

- Architecture multi-bandes
  - Flexibilité sur les débits et coexistence avec les systèmes traditionnels

- **DS-UWB**

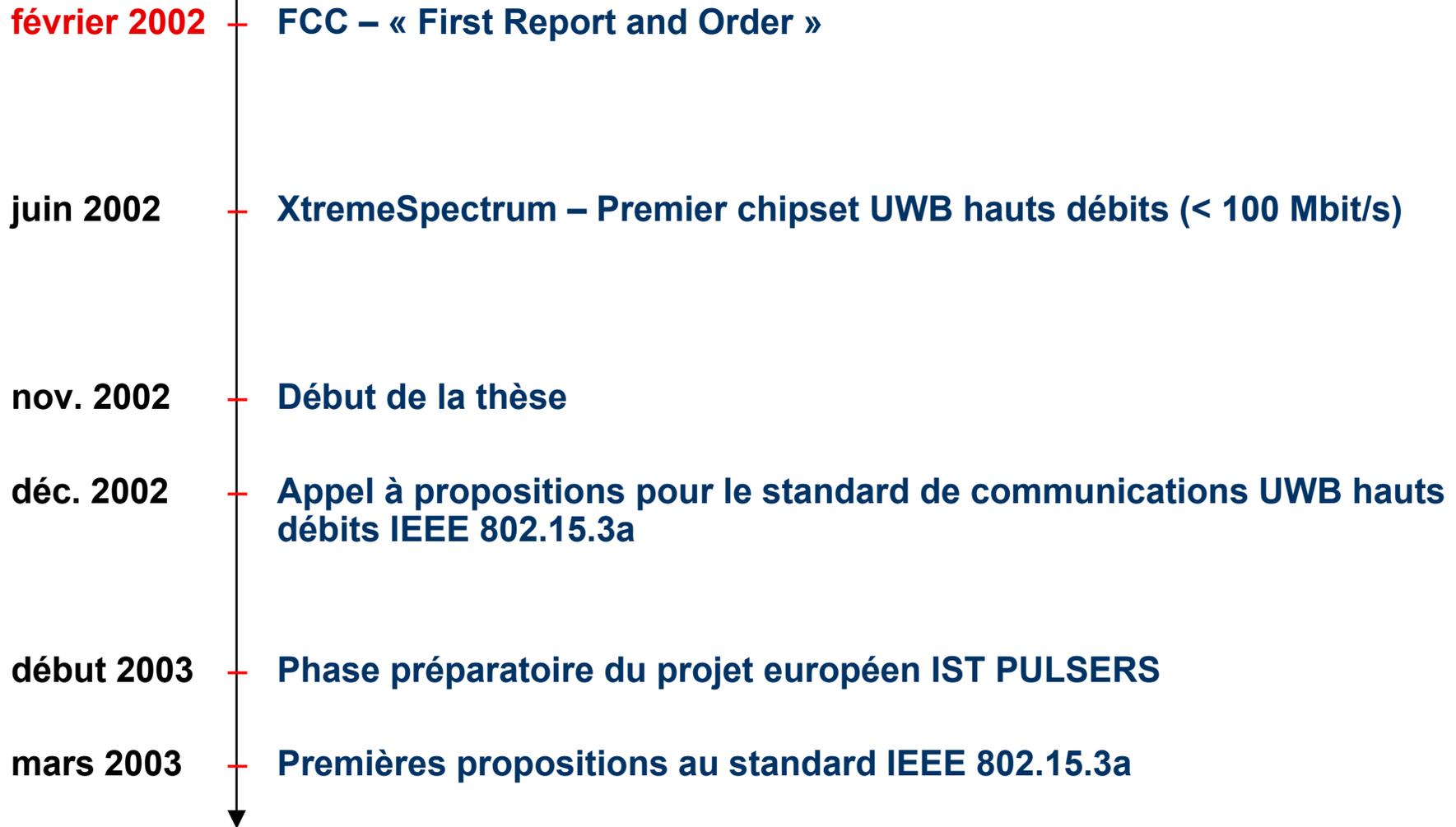
- Approche impulsionnelle
  - Réduction des évanouissements sur le signal reçu
- Modulation à faible nombre d'états
  - Pour 1 Gbit/s avec une modulation à 2 états, nécessité d'un bit par ns

- **MB-OFDM**

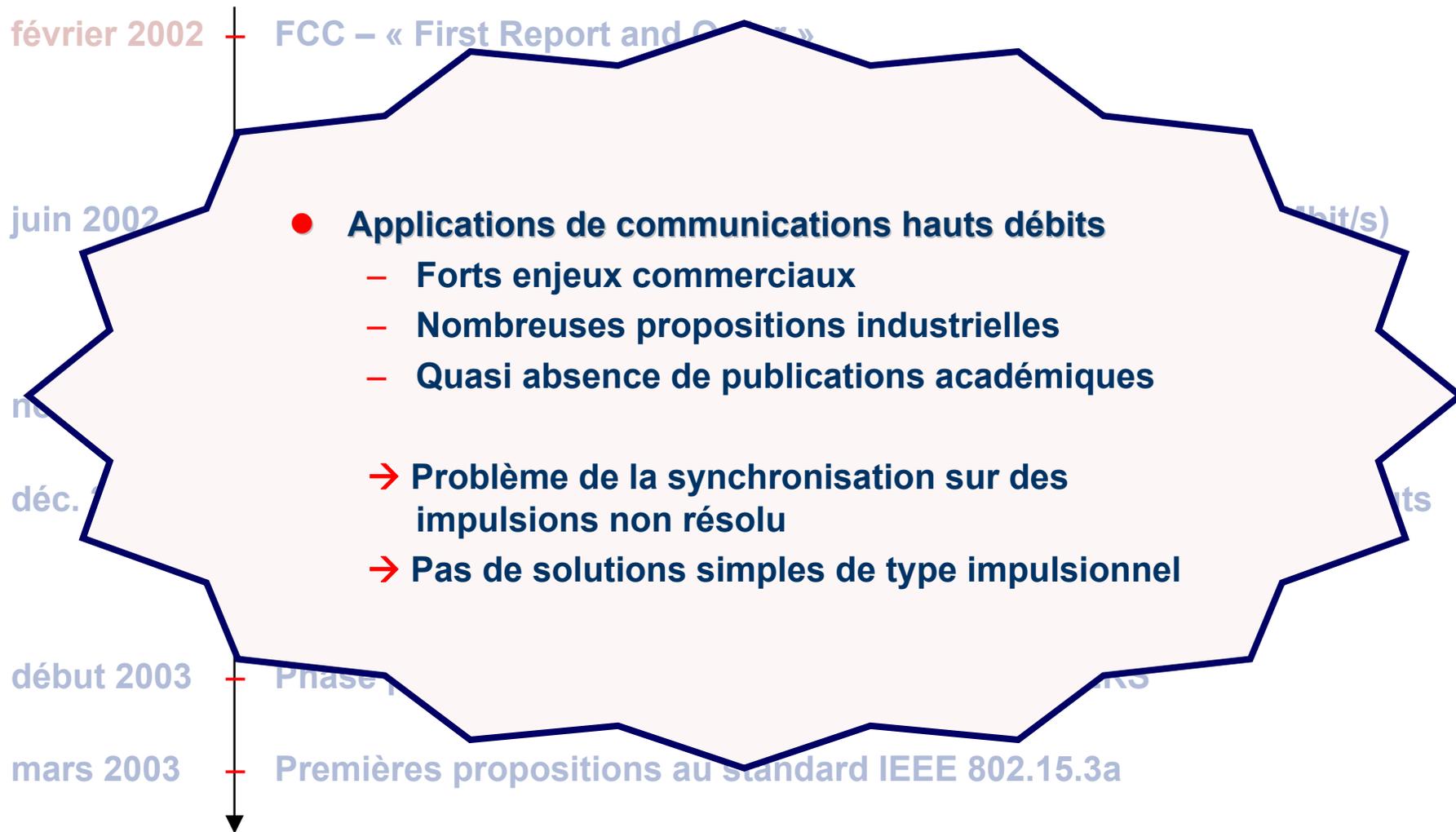
- Fonctionnement parallèle multi-porteuses
  - Minimisation naturelle des interférences inter-symboles
  - Récupération de la quasi totalité de l'énergie disponible
- Faible bande instantanée (compatible d'un échantillonnage)
  - Energie émise limitée par la bande
  - Evanouissement du signal reçu plus important

# L'UWB depuis la réglementation FCC

---



# L'UWB depuis la réglementation FCC



# Objectifs de la thèse

---

- **Au début de la thèse (nov. 2002) :**
  - « Comment se synchroniser rapidement et simplement sur une séquence d'impulsions ? »
  
- **Dès mai 2003 :**
  - « Comment tirer le meilleur parti de la radio impulsionnelle pour les transmissions hauts débits ? »
  
- **En respectant les contraintes :**
  - Faible complexité
  - Faible consommation
  - Faible coût
  - Robustesse dans un large éventail de conditions de propagation

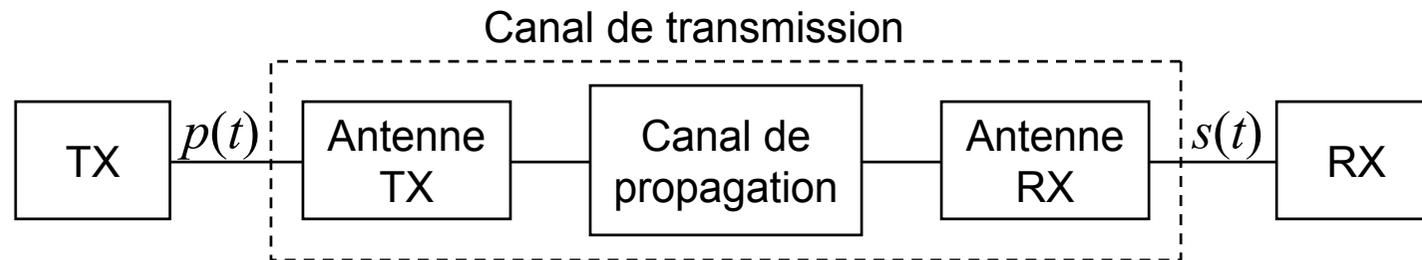
# Partie 2

---

- **Partie 1 – Contexte UWB et objectifs de la thèse**
- **Spécificités du canal UWB**
- **Partie 3 – Principes et étude de la solution proposée**
- **Partie 4 – Etude comparative MB-OOK / MB-OFDM**
- **Conclusion et perspectives**

# Modélisation du canal de transmission

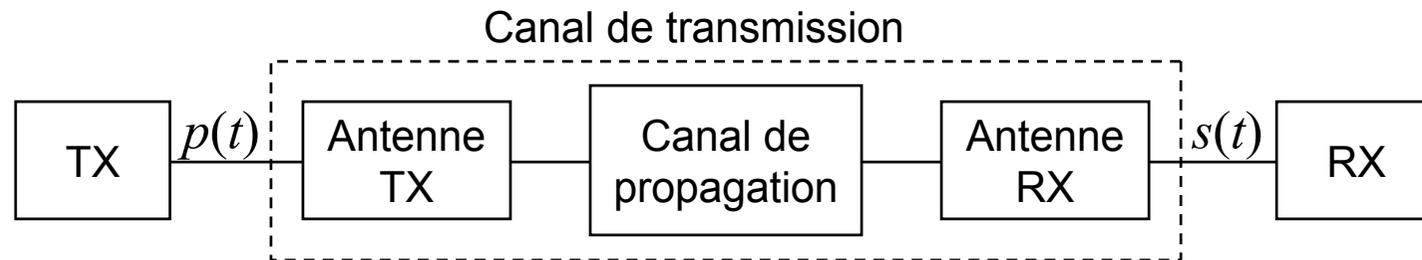
- Canal de transmission équivalent à un filtre linéaire invariant en temps (canal statique)



- Fonction de transfert  $H(f)$  :  $S(f) = H(f)P(f)$
- Réponse impulsionnelle  $h(t)$  :  $s(t) = h(t) * p(t)$

# Modélisation du canal de transmission

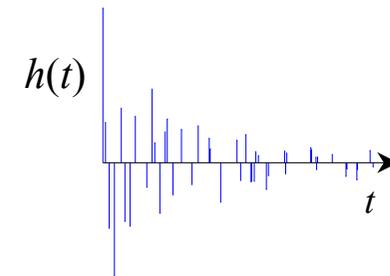
- **Canal de transmission équivalent à un filtre linéaire invariant en temps (canal statique)**



- Fonction de transfert  $H(f)$  :  $S(f) = H(f)P(f)$
  - Réponse impulsionnelle  $h(t)$  :  $s(t) = h(t) * p(t)$
- **Modélisation de la propagation en rayons**
    - Réponse impulsionnelle en bande infinie :

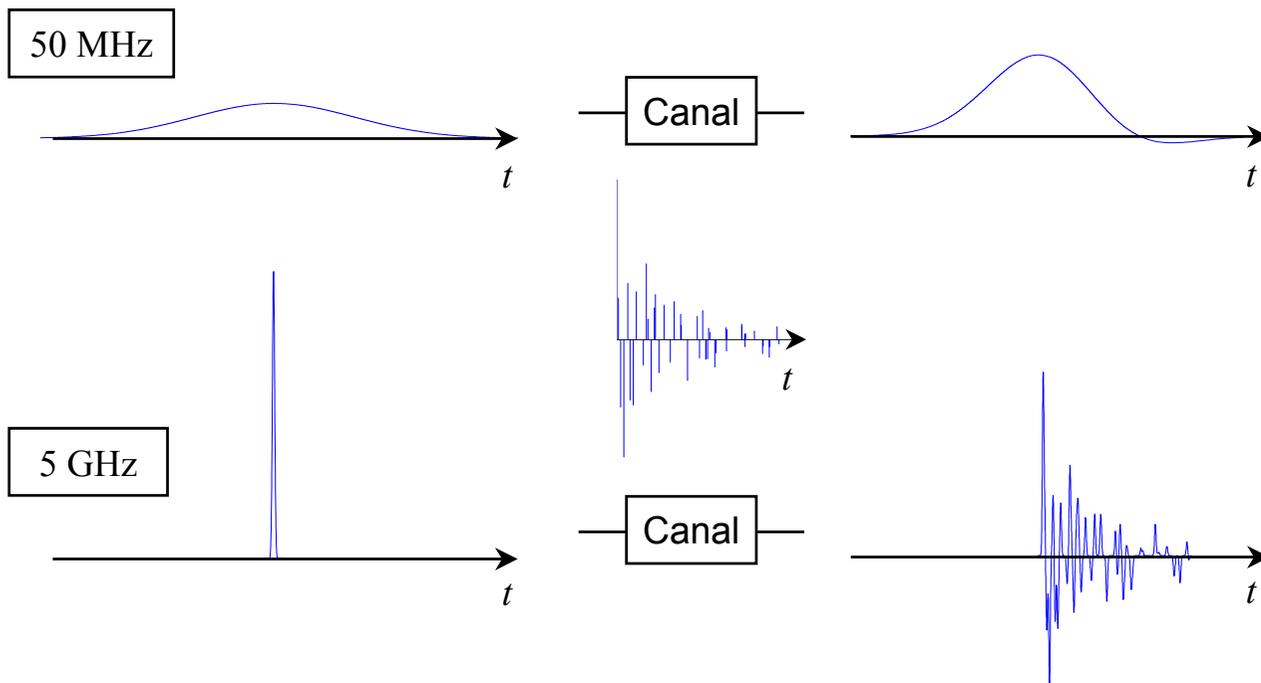
$$h(t) = \sum_k \alpha_k \delta(t - \tau_k)$$

$\alpha_k$  et  $\tau_k$  : amplitude et retard du  $k^{\text{ième}}$  trajet



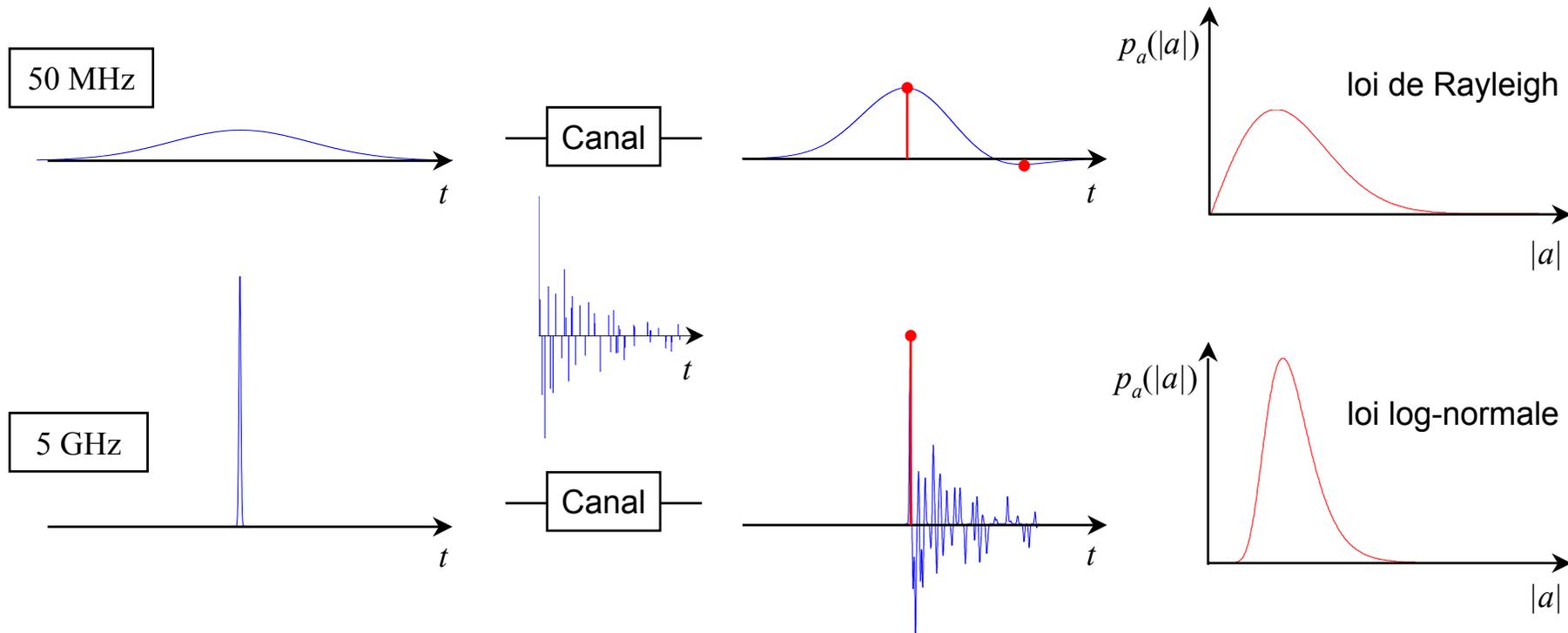
# Modélisation du canal UWB

- **Modèle à redéfinir en tenant compte des spécificités de l'UWB**
  - **Résolution temporelle très fine (capacité à distinguer les trajets)**
    - Nombre important de trajets
    - Distribution différente des amplitudes



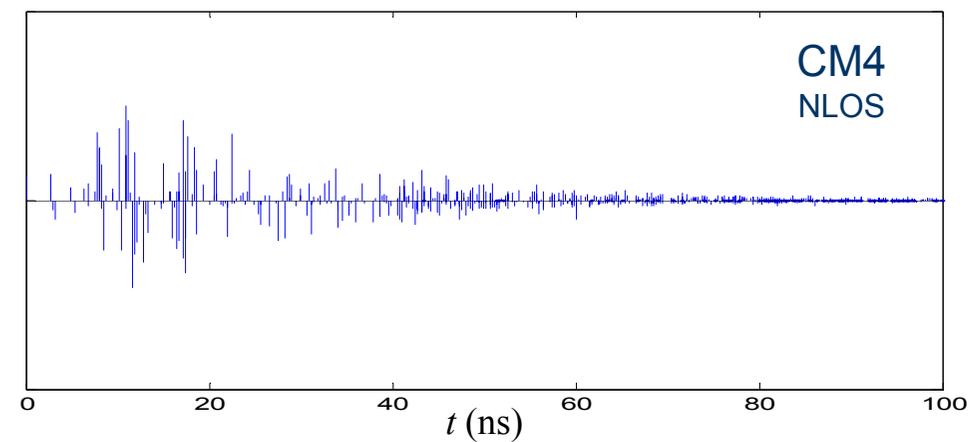
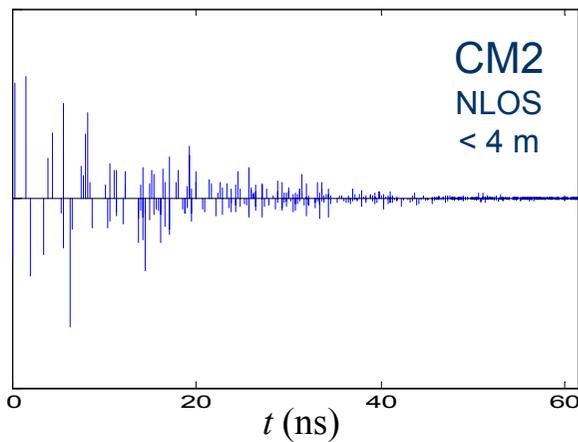
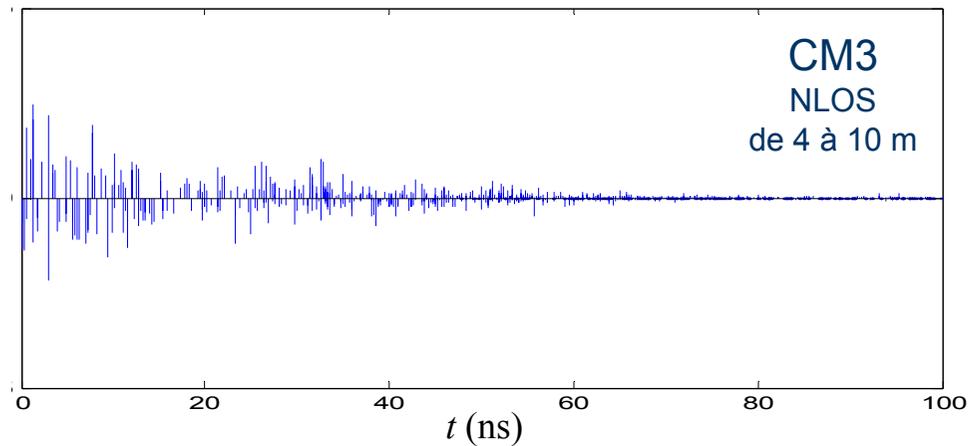
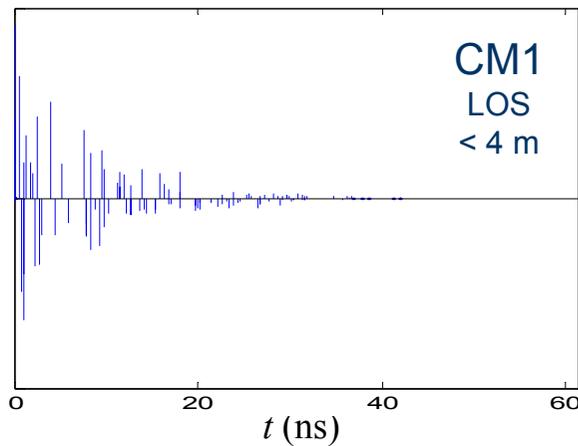
# Modélisation du canal UWB

- **Modèle à redéfinir en tenant compte des spécificités de l'UWB**
  - **Résolution temporelle très fine (capacité à distinguer les trajets)**
    - Nombre important de trajets
    - Distribution différente des amplitudes



# Modèle statistique IEEE 802.15.3a

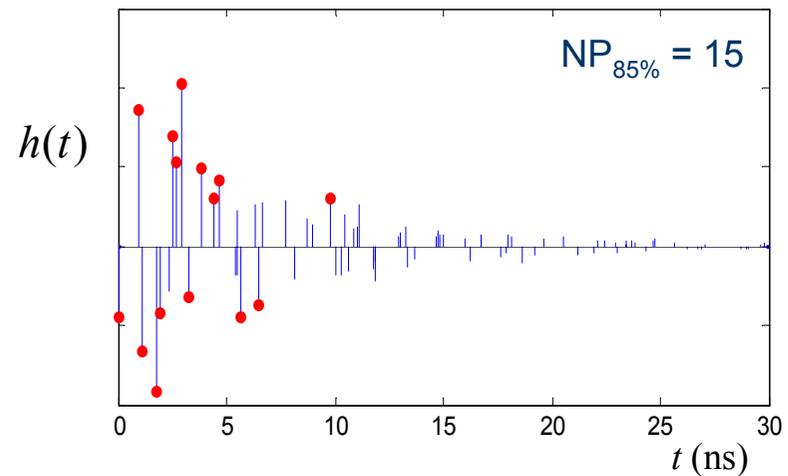
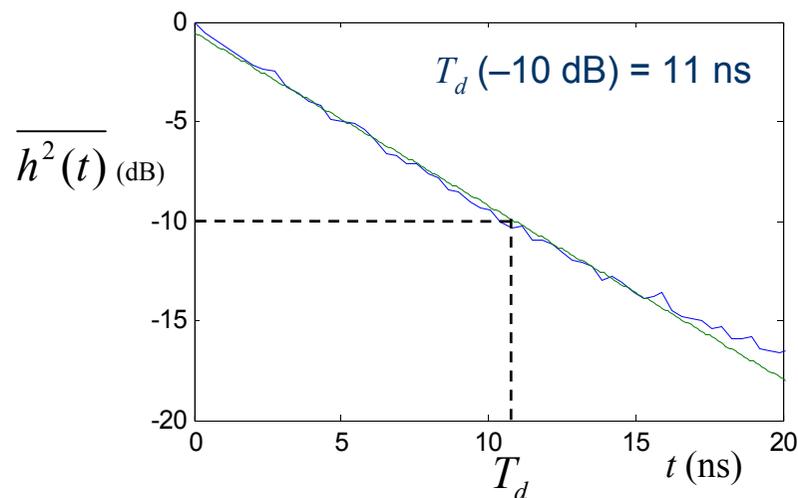
- Exemple de réponses impulsionnelles construites à partir du modèle



# Modèle statistique IEEE 802.15.3a

## ● Caractéristiques du modèle

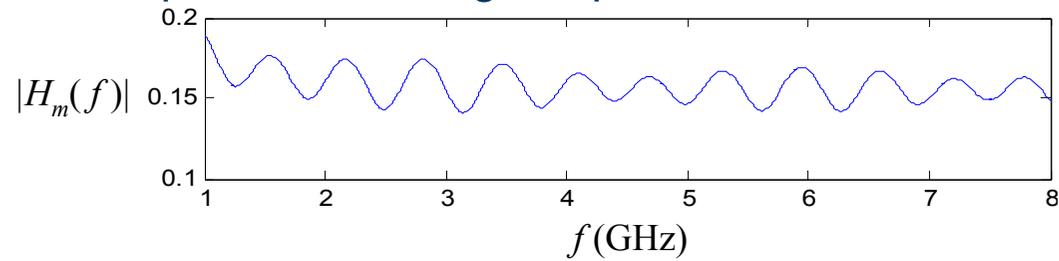
	CM1	CM2	CM3	CM4
Configuration	LOS < 4 m	NLOS < 4 m	NLOS de 4 à 10 m	NLOS $\tau_{\text{RMS}} = 25$ ns
$T_d$ (-10 dB) (ns)	11	16.5	23.5	38.5
$\overline{\text{NP}}_{85\%}$	24	36.1	61.54	123



# Distorsions de l'impulsion

- **Matériaux**

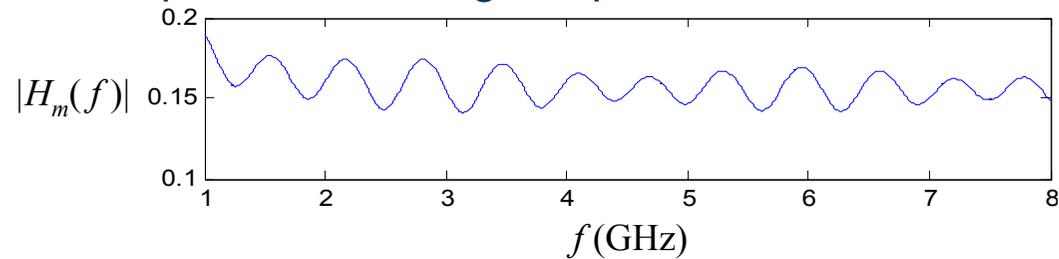
- Caractéristiques électromagnétiques variables suivant la fréquence



# Distorsions de l'impulsion

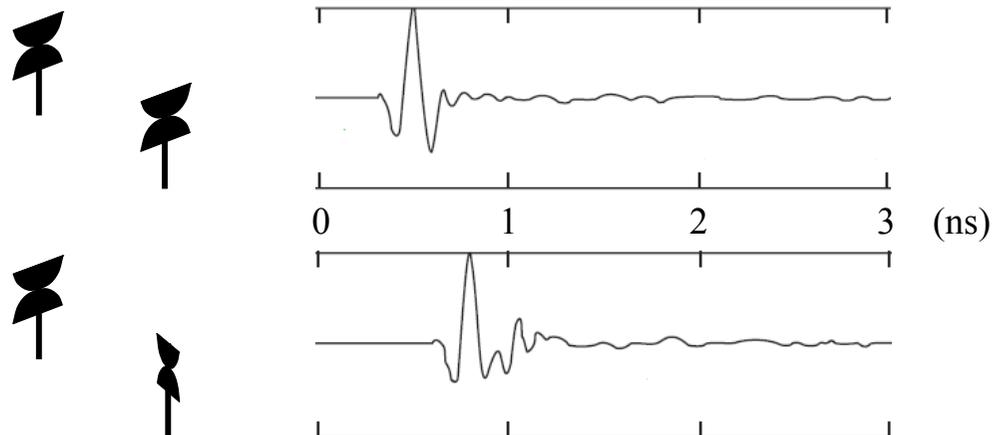
- **Matériaux**

- Caractéristiques électromagnétiques variables suivant la fréquence



- **Antennes**

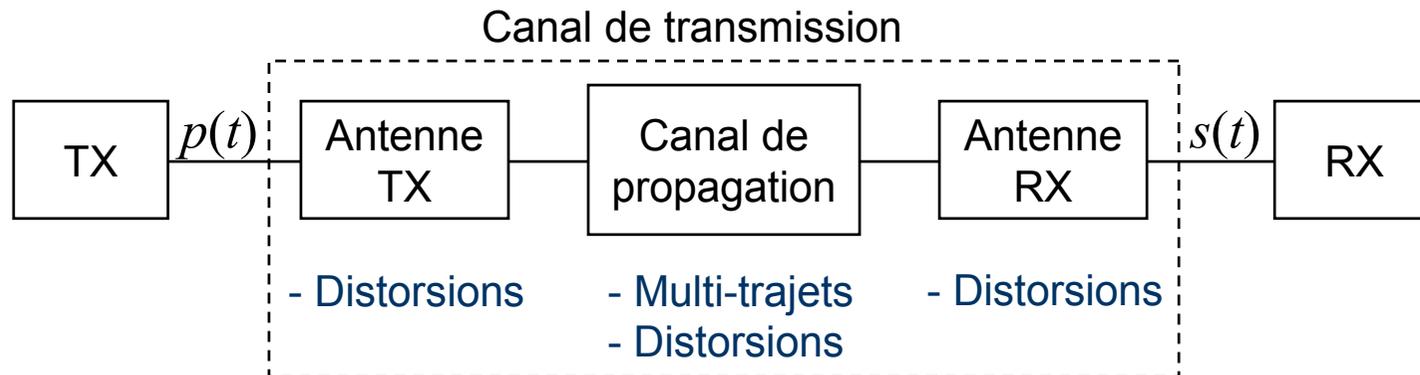
- Gain variable et phase non linéaire sur la totalité de la bande
- Réponse différente en fonction de l'orientation



F. Tchoffo Talom, « Modélisation déterministe du canal de propagation indoor dans un contexte Ultra Wide Band », Thèse IETR/INSA, 2005  
T. Matila et al, « UWB theory and applications - UWB antennas », pp 129–156, Wiley, 2004

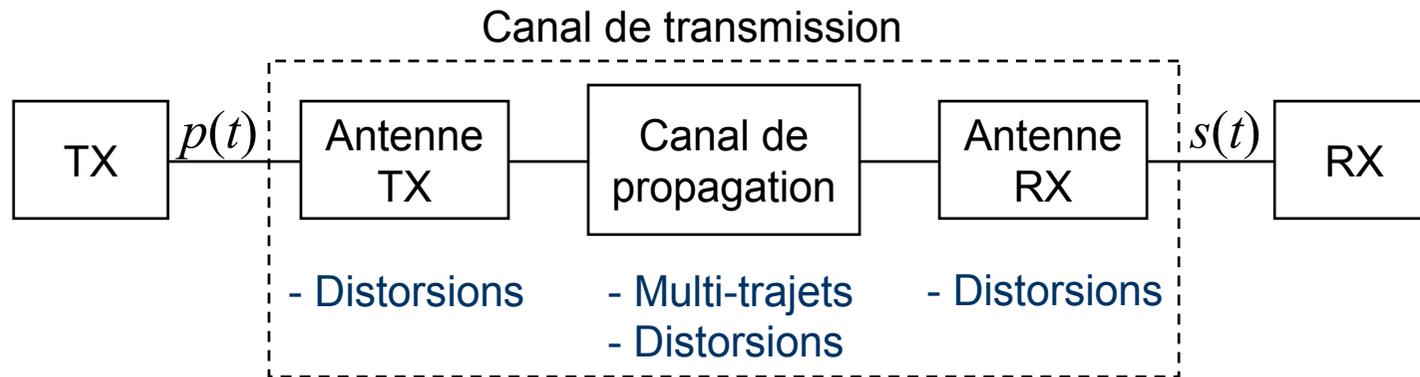
# Conclusion sur le canal

- **Nombreux degrés de liberté dans le canal de transmission**



# Conclusion sur le canal

- **Nombreux degrés de liberté dans le canal de transmission**



- **Difficultés de mise en œuvre des approches synchrones impulsionnelles**

- **Détection, estimation, poursuite d'un grand nombre de paramètres du canal**

- Synchronisation :
  - Instant d'arrivée des trajets
- Récepteur de type *rake* :
  - Amplitude des trajets
- Démodulation par corrélation :
  - Forme d'onde du signal reçu

Echantillonnage et traitements numériques complexes à cadence très élevée

# Partie 3

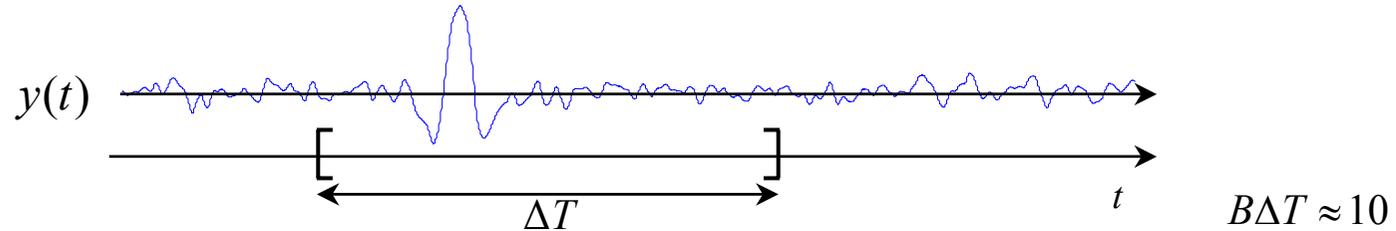
---

- **Partie 1 – Contexte UWB et objectifs de la thèse**
- **Partie 2 – Spécificités du canal UWB**
- **Principes et étude de la solution proposée**
- **Partie 4 – Etude comparative MB-OOK / MB-OFDM**
- **Conclusion et perspectives**

# Synchronisation

- **Approche asynchrone**

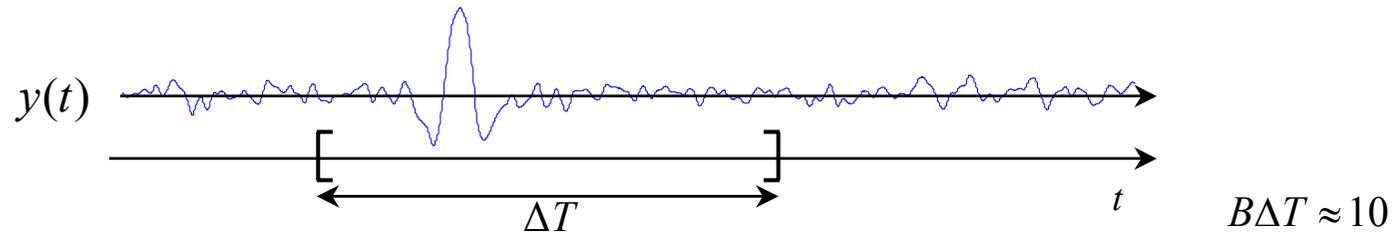
- Détection d'une impulsion dans un intervalle de temps  $\Delta T$  :



# Synchronisation

- **Approche asynchrone**

- Détection d'une impulsion dans un intervalle de temps  $\Delta T$  :



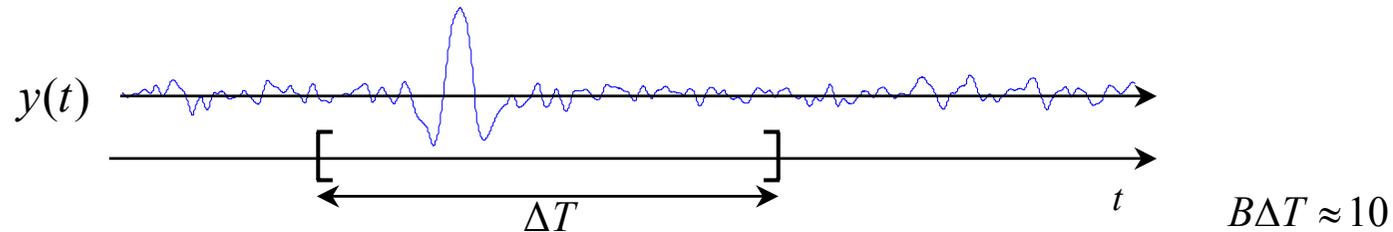
- Identifier le traitement qui maximise la probabilité de détection sous des conditions de fausse alarme fixées

$$\begin{cases} H_0 : y(t) = n(t) \\ H_1 : y(t) = A.p(t - \varepsilon) + n(t), \quad \varepsilon \sim U\left(\left[-\frac{\Delta T}{2}, \frac{\Delta T}{2}\right]\right), \quad A \neq 0 \text{ inconnu} \end{cases}$$

# Synchronisation

## ● Approche asynchrone

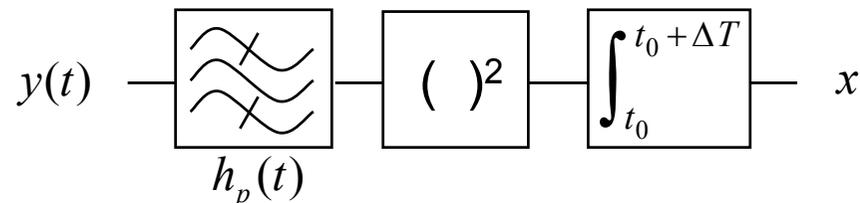
- Détection d'une impulsion dans un intervalle de temps  $\Delta T$  :



- Identifier le traitement qui maximise la probabilité de détection sous des conditions de fausse alarme fixées

$$\begin{cases} H_0 : y(t) = n(t) \\ H_1 : y(t) = A.p(t - \varepsilon) + n(t), \quad \varepsilon \sim U\left(\left[-\frac{\Delta T}{2}, \frac{\Delta T}{2}\right]\right), \quad A \neq 0 \text{ inconnu} \end{cases}$$

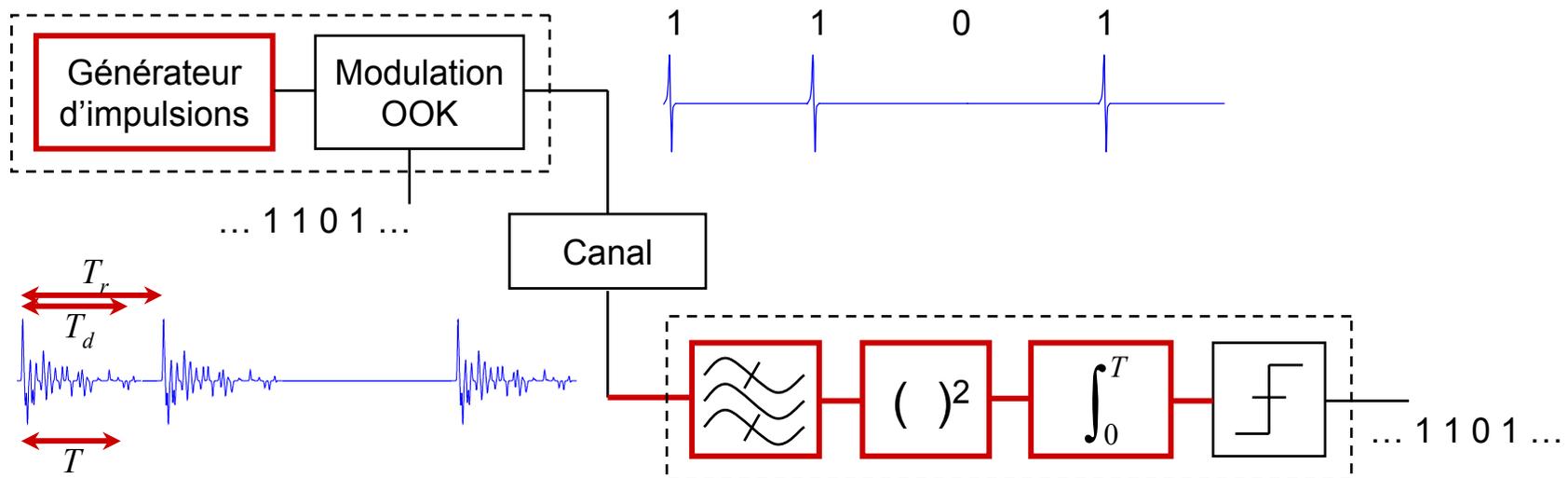
- Implique de considérer la quantité :  $x = \int_{t_0}^{t_0 + \Delta T} (h_p(t) * y(t))^2 dt$



# Modulation hauts débits

- **Solution impulsionnelle, asynchrone**

- Traitements en réception basés uniquement sur l'énergie du signal
- Pour éviter les interférences inter-symboles, période de répétition des impulsions supérieure à l'étalement du canal



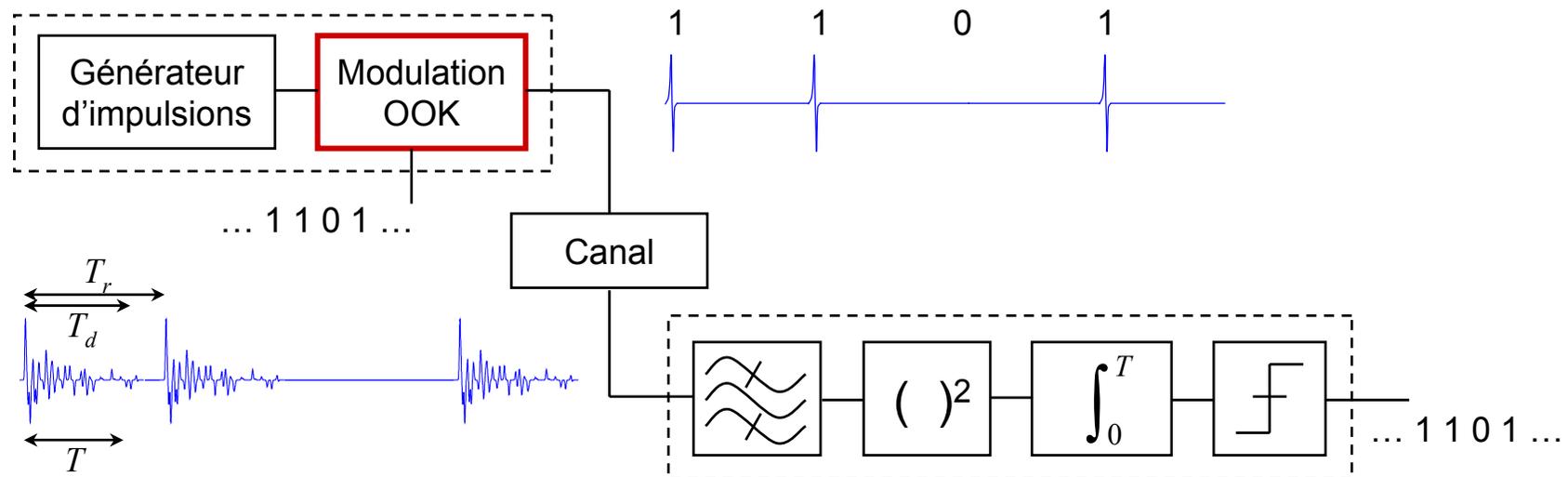
# Modulation hauts débits

- **Solution impulsionnelle, asynchrone**

- Traitements en réception basés uniquement sur l'énergie du signal
- Pour éviter les interférences inter-symboles, période de répétition des impulsions supérieure à l'étalement du canal

- **Modulation**

- Retard → PPM : incompatible avec les hauts débits
- Amplitude → OOK



# Modulation hauts débits

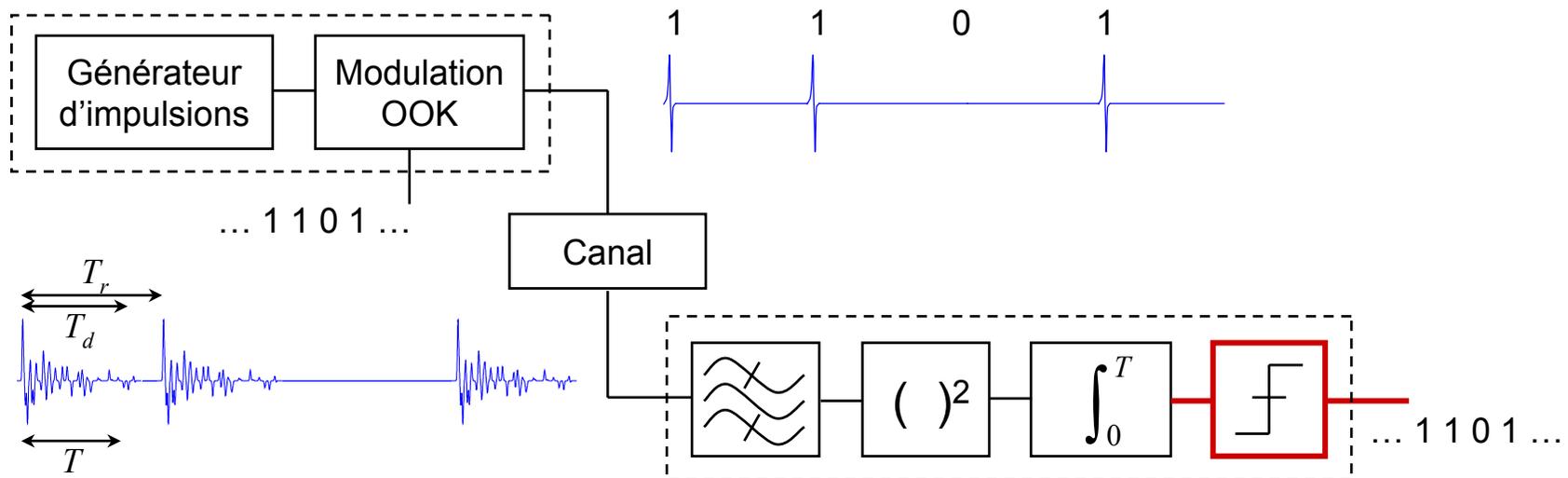
- **Solution impulsionnelle, asynchrone**

- Traitements en réception basés uniquement sur l'énergie du signal
- Pour éviter les interférences inter-symboles, période de répétition des impulsions supérieure à l'étalement du canal

- **Modulation**

- Retard → PPM : incompatible avec les hauts débits
- Amplitude → OOK

- **Démodulation non-cohérente par seuillage**



# Modulation hauts débits

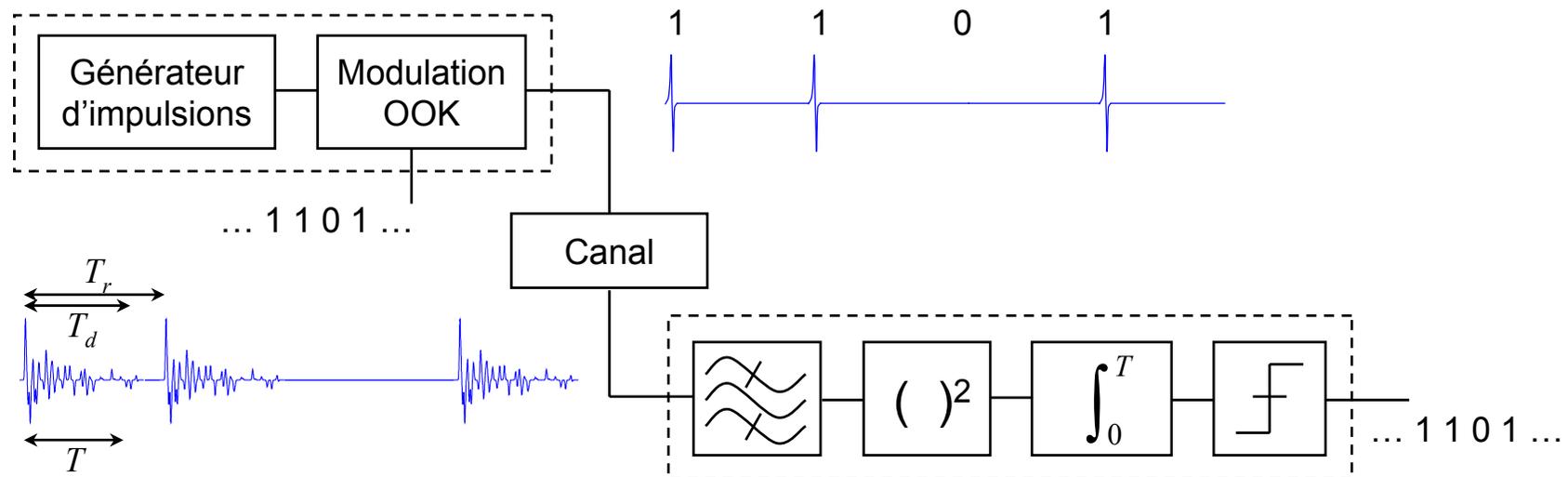
- **Solution impulsionnelle, asynchrone**

- Traitements en réception basés uniquement sur l'énergie du signal
- Pour éviter les interférences inter-symboles, période de répétition des impulsions supérieure à l'étalement du canal

- **Modulation**

- Retard → PPM : incompatible avec les hauts débits
- Amplitude → OOK

- **Démodulation non-cohérente par seuillage**



# Architecture multi-bandes

---

- **Pour atteindre la capacité du canal :**
  - Augmenter la dimension de la constellation des signaux  $\{s_i(t)\}$
  - Pour chaque signal  $s_i(t)$  : utilisation du schéma précédent

# Architecture multi-bandes

---

- **Pour atteindre la capacité du canal :**
  - **Augmenter la dimension de la constellation des signaux  $\{s_i(t)\}$**
  - **Pour chaque signal  $s_i(t)$  : utilisation du schéma précédent**
    - Le canal se comporte comme un filtre linéaire  $h(t)$  invariant en temps, parcourant un très grand ensemble de possibles
    - Le récepteur n'a pas la possibilité d'estimer précisément  $h(t)$

# Architecture multi-bandes

- **Pour atteindre la capacité du canal :**

- **Augmenter la dimension de la constellation des signaux  $\{s_i(t)\}$**
- **Pour chaque signal  $s_i(t)$  : utilisation du schéma précédent**

- Le canal se comporte comme un filtre linéaire  $h(t)$  invariant en temps, parcourant un très grand ensemble de possibles
- Le récepteur n'a pas la possibilité d'estimer précisément  $h(t)$

→ Les informations véhiculées par les signaux de la constellation ne doivent pas être mélangées par le passage dans le canal

$$\int_0^T (h * s_i)(t) s_j(t) dt = 0 \quad , \quad \forall j \neq i \quad , \quad \forall h$$

→ Supports spectraux des signaux  $s_i(t)$  nécessairement disjoints

# Architecture multi-bandes

- **Pour atteindre la capacité du canal :**

- **Augmenter la dimension de la constellation des signaux  $\{s_i(t)\}$**
- **Pour chaque signal  $s_i(t)$  : utilisation du schéma précédent**

- Le canal se comporte comme un filtre linéaire  $h(t)$  invariant en temps, parcourant un très grand ensemble de possibles
- Le récepteur n'a pas la possibilité d'estimer précisément  $h(t)$

→ Les informations véhiculées par les signaux de la constellation ne doivent pas être mélangées par le passage dans le canal

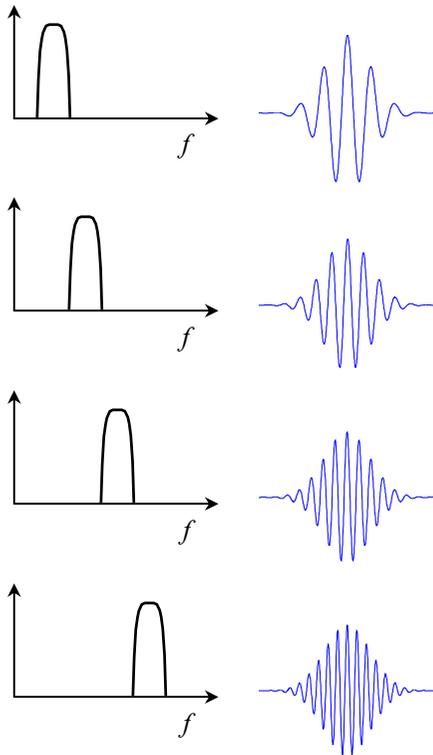
$$\int_0^T (h * s_i)(t) s_j(t) dt = 0 \quad , \quad \forall j \neq i \quad , \quad \forall h$$

→ Supports spectraux des signaux  $s_i(t)$  nécessairement disjoints

→ **Architecture parallèle multi-bandes**

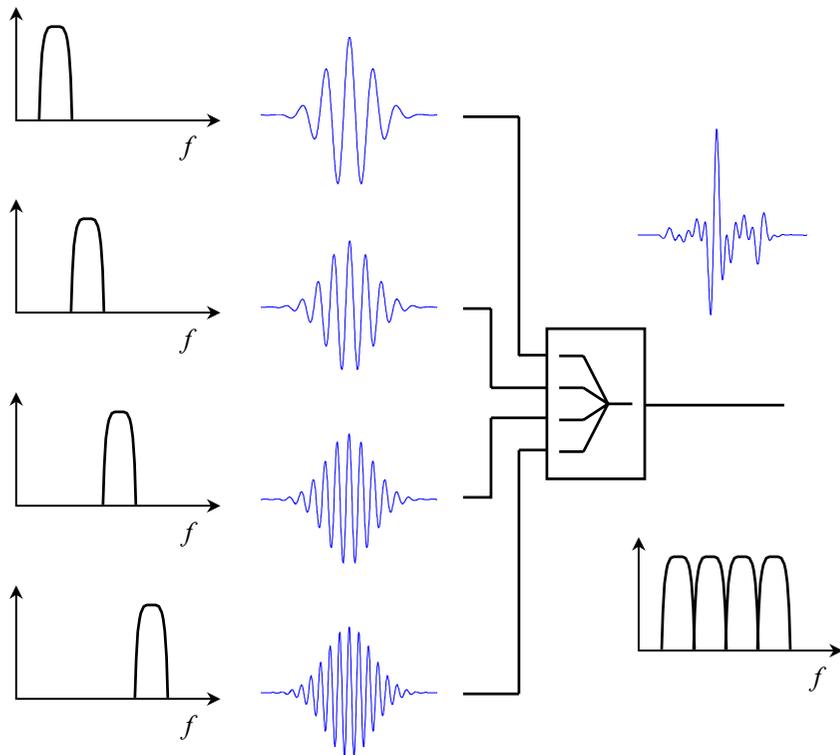
# Architecture multi-bandes

- **Orthogonalité des signaux conservée après le passage dans le canal**



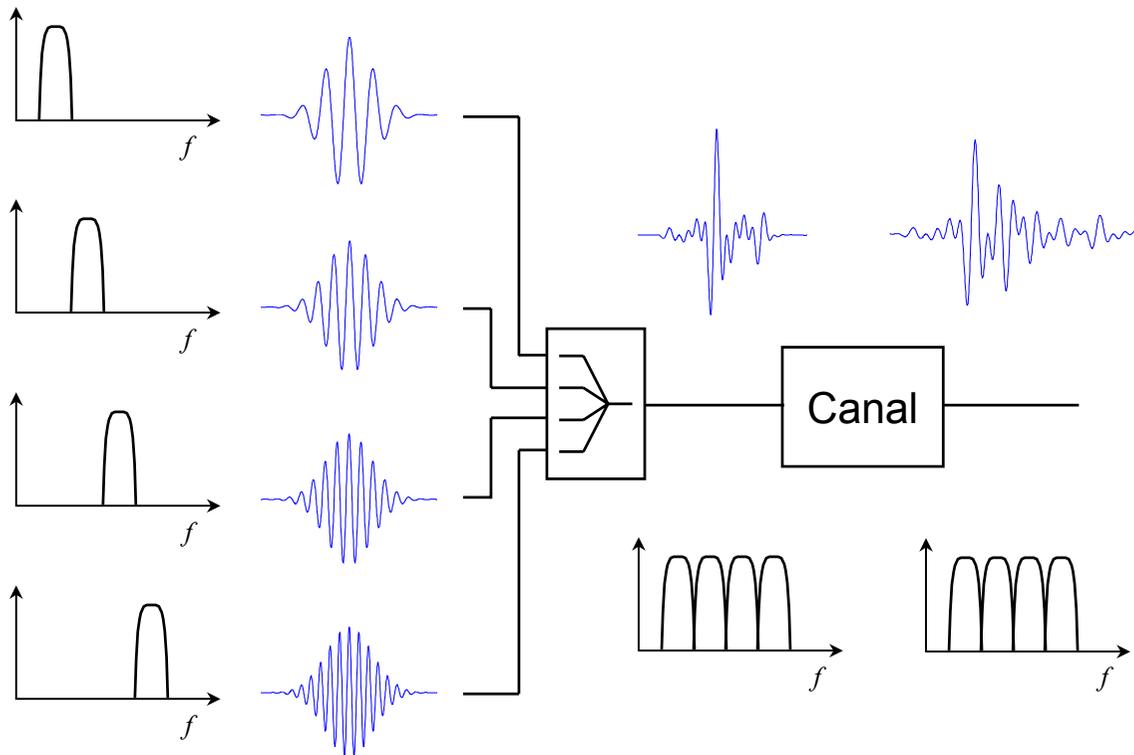
# Architecture multi-bandes

- **Orthogonalité des signaux conservée après le passage dans le canal**



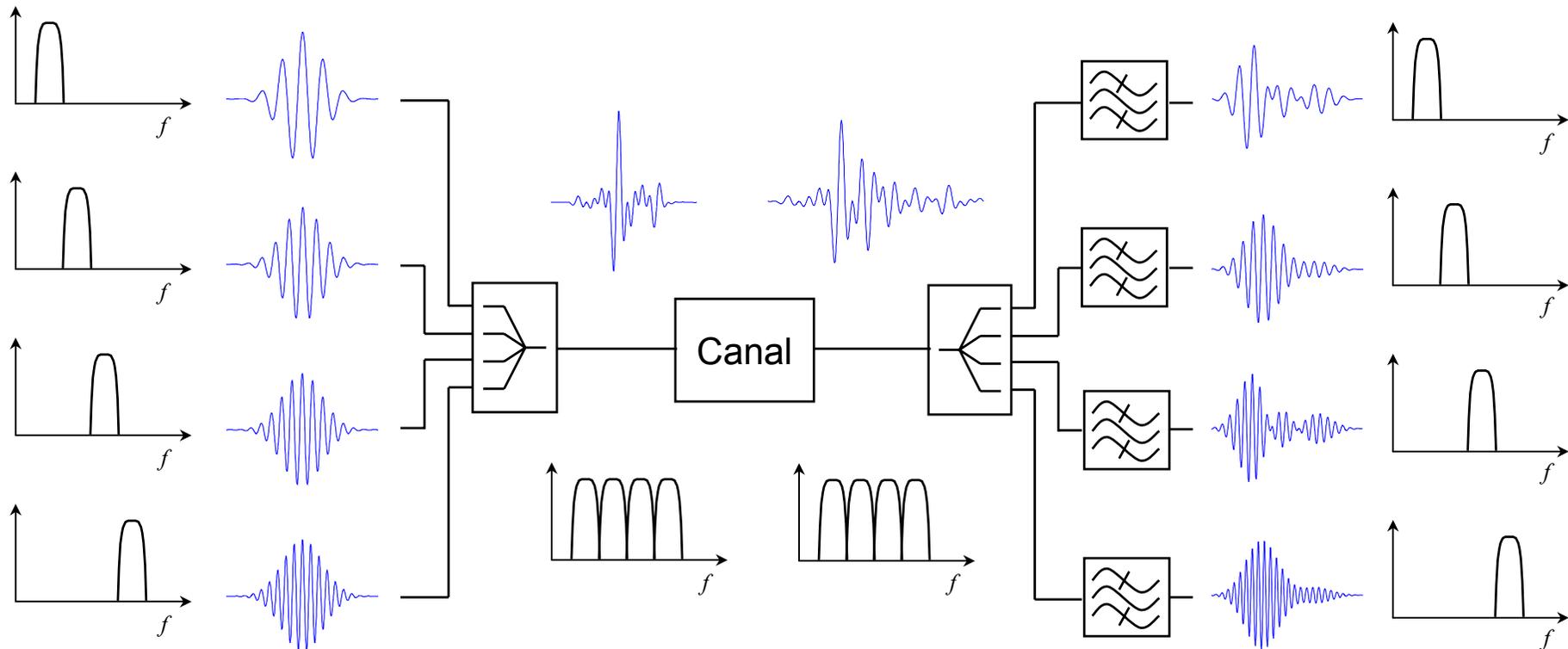
# Architecture multi-bandes

- **Orthogonalité des signaux conservée après le passage dans le canal**



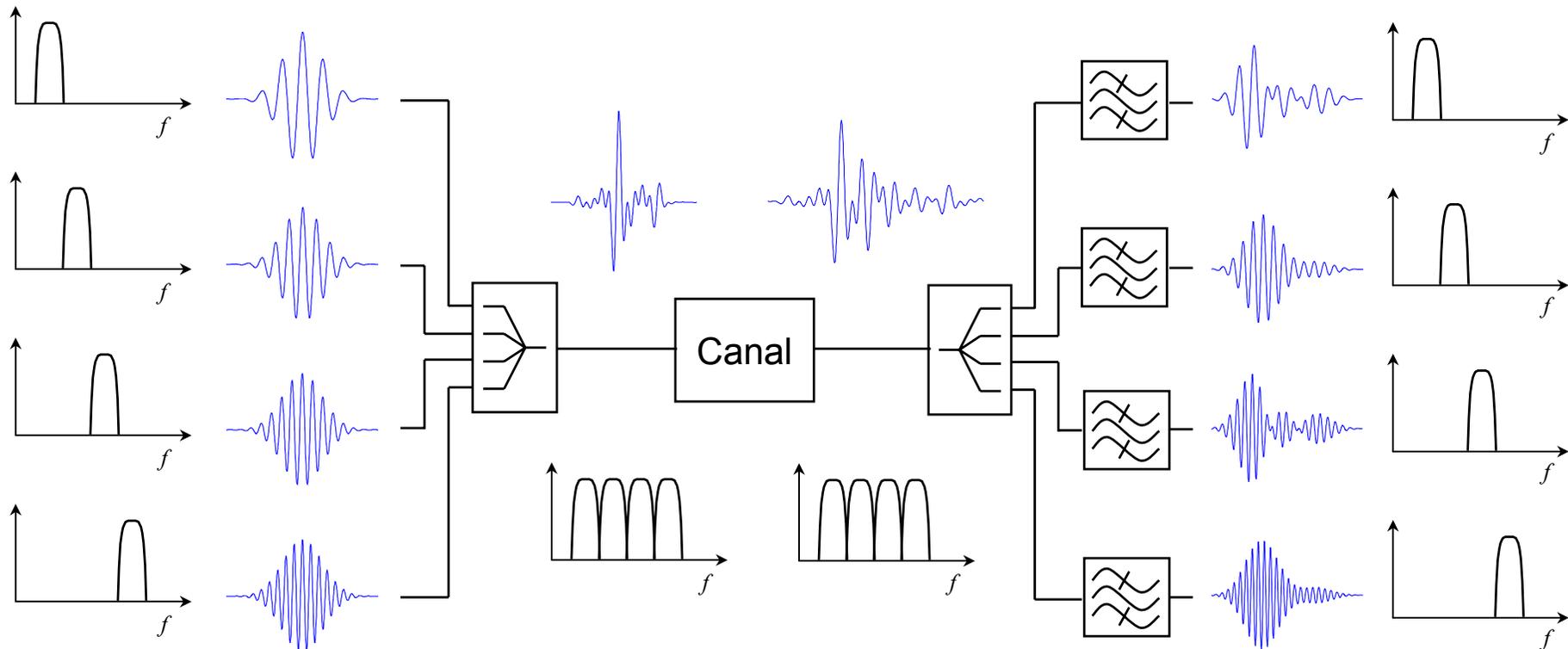
# Architecture multi-bandes

- Orthogonalité des signaux conservée après le passage dans le canal



# Architecture multi-bandes

- **Orthogonalité des signaux conservée après le passage dans le canal**



- **Ordres de grandeur en pratique**
  - Nombre de sous-bandes : de 12 à 24
  - Largeur des sous-bandes : de 250 à 500 MHz

# Analyse théorique

● **Problème de décision :**

$$\begin{cases} H_0 : x = \int_0^T [n(t)]^2 dt \\ H_1 : x = \int_0^T [s(t) + n(t)]^2 dt \end{cases}$$

→ Minimiser la probabilité d'erreur connaissant  $B$   
et ayant estimé  $T$ ,  $E = \int_0^T s^2(t)dt$ ,  $N$

# Analyse théorique

● **Problème de décision :**

$$\begin{cases} H_0 : x = \int_0^T [n(t)]^2 dt \\ H_1 : x = \int_0^T [s(t) + n(t)]^2 dt \end{cases}$$

→ Minimiser la probabilité d'erreur connaissant  $B$   
et ayant estimé  $T$ ,  $E = \int_0^T s^2(t)dt$ ,  $N$

● **Densité de probabilité :**  $\chi^2$

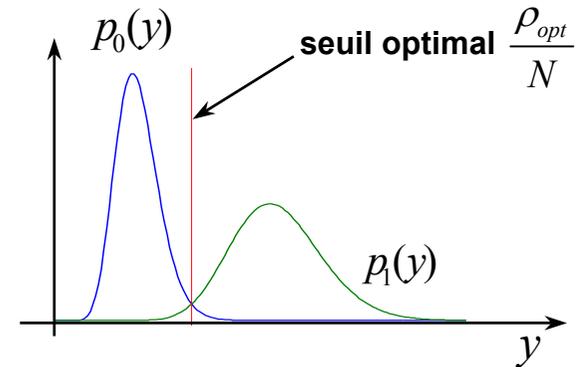
$$\begin{cases} H_0 : p_0(y) = \frac{y^{M-1} e^{-y}}{\Gamma(M)}, & y \geq 0 \\ H_1 : p_1(y) = \left(\frac{y}{L}\right)^{\frac{M-1}{2}} e^{-y-L} I_{M-1}(2\sqrt{yL}), & y \geq 0 \end{cases}$$

avec  $\begin{cases} y & = & x/N \\ 2M & = & 2BT + 1 \\ L & = & E/N \end{cases}$

# Analyse théorique

- **Fixation du seuil optimal :**

$$- p_0\left(\frac{\rho_{opt}}{N}\right) = p_1\left(\frac{\rho_{opt}}{N}\right)$$



# Analyse théorique

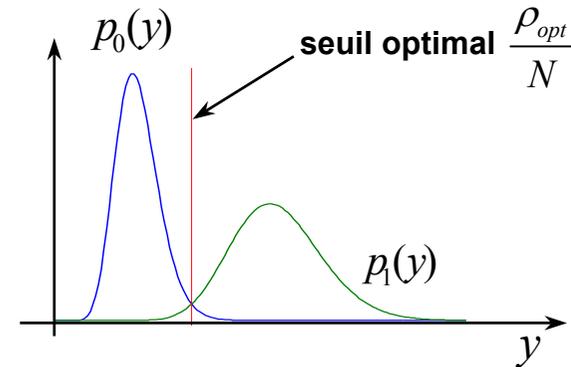
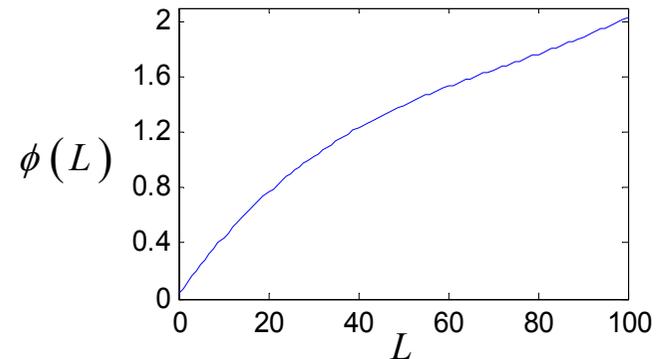
- **Fixation du seuil optimal :**

$$- p_0\left(\frac{\rho_{opt}}{N}\right) = p_1\left(\frac{\rho_{opt}}{N}\right)$$

$$\rightarrow \frac{\rho_{opt}}{N} \approx \frac{L}{4} + M + \sqrt{M-1} \cdot \phi(L)$$

$$\text{avec } \begin{cases} L & = & E/N \\ 2M & = & 2BT + 1 \end{cases}$$

et



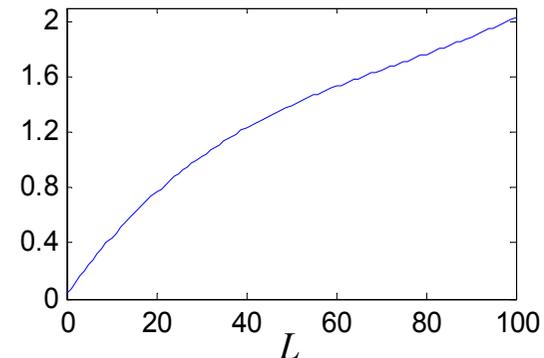
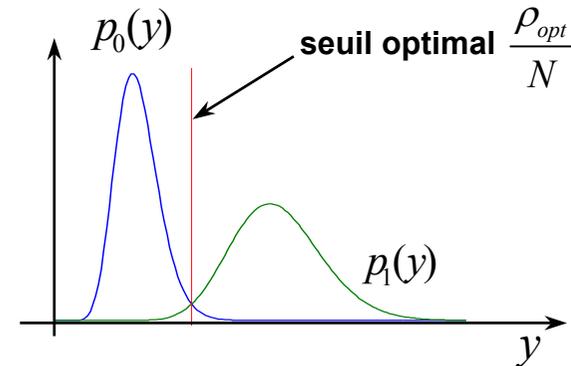
# Analyse théorique

## ● Fixation du seuil optimal :

$$- p_0\left(\frac{\rho_{opt}}{N}\right) = p_1\left(\frac{\rho_{opt}}{N}\right)$$

$$\rightarrow \frac{\rho_{opt}}{N} \approx \frac{L}{4} + M + \sqrt{M-1} \cdot \phi(L)$$

$$\text{avec } \begin{cases} L & = & E/N \\ 2M & = & 2BT + 1 \end{cases} \quad \text{et}$$



- Adaptation dynamique du seuil en fonction des conditions de propagation dans le canal
- Estimation du canal réduite à deux quantités macroscopiques :
  - Durée d'étalement
  - Rapport des énergies du signal utile et du bruit

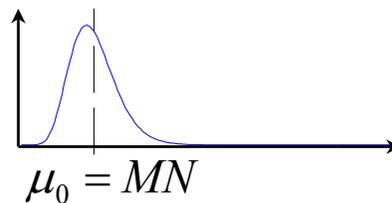
# Estimation du canal

- Estimation de l'énergie utile disponible  $E$  et l'énergie du bruit  $N$

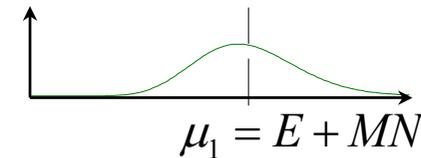
- Estimation initiale pendant un préambule :

- Emission d'échantillons  $\{x_{i,k}\}, k \in \{1, \dots, m_i\}, i \in \{0,1\}$  sous les hypothèses :

$H_0 : x_{0,k} \sim \chi^2$  centré



$H_1 : x_{1,k} \sim \chi^2$  décentré



- Estimateurs simples non-biaisés :

$$H_0 : \hat{N} = \frac{\sum_{k=1}^{m_0} x_{0,k}}{Mm_0}$$

$$H_1 : \hat{E} = \frac{\sum_{k=1}^{m_1} x_{1,k}}{m_1} - M\hat{N}$$

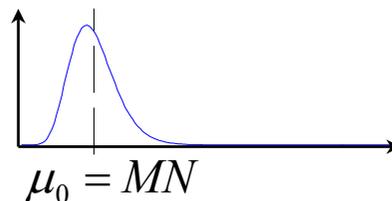
# Estimation du canal

- **Estimation de l'énergie utile disponible  $E$  et l'énergie du bruit  $N$**

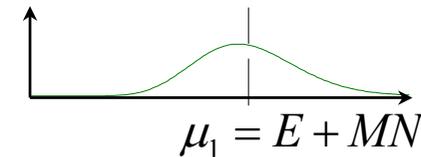
- **Estimation initiale pendant un préambule :**

- Emission d'échantillons  $\{x_{i,k}\}, k \in \{1, \dots, m_i\}, i \in \{0,1\}$  sous les hypothèses :

$H_0 : x_{0,k} \sim \chi^2$  centré



$H_1 : x_{1,k} \sim \chi^2$  décentré



- Estimateurs simples non-biaisés :

$$H_0 : \hat{N} = \frac{\sum_{k=1}^{m_0} x_{0,k}}{Mm_0}$$

$$H_1 : \hat{E} = \frac{\sum_{k=1}^{m_1} x_{1,k}}{m_1} - M\hat{N}$$

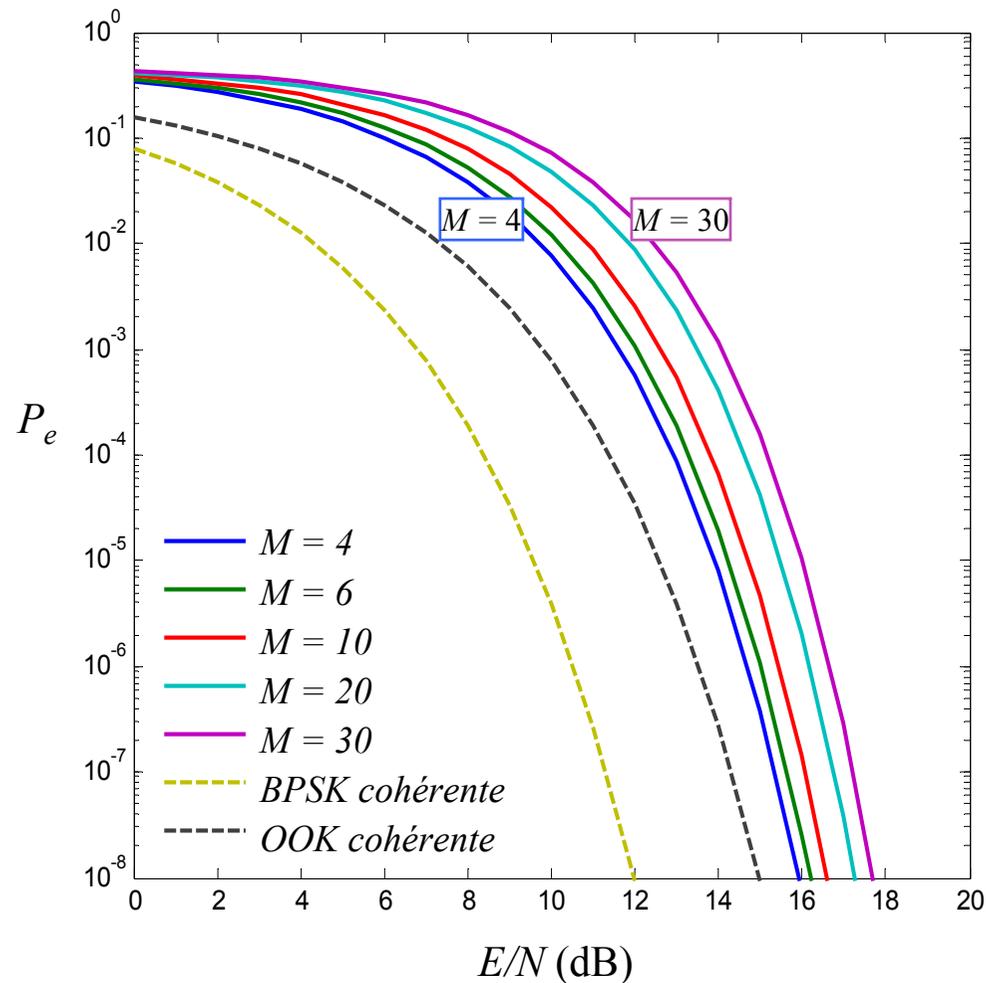
- **Estimation récursive pendant la démodulation :**

- Expression de l'estimée au bit  $m+1$  en fonction de l'estimée au bit  $m$ 
  - Amélioration de l'estimation initiale
  - Adaptation de l'estimation aux variations du canal

$$\hat{E}_{m_1+1} = \left(1 - \frac{1}{K}\right) \hat{E}_{m_1} + \frac{x_{m_1+1} - M\hat{N}}{K}$$

# Performances à énergie reçue fixée

## ● Probabilité d'erreur en fonction de l'énergie récupérée



**Récepteur *rake* cohérent :**

→ Energie récupérée sur quelques trajets uniquement

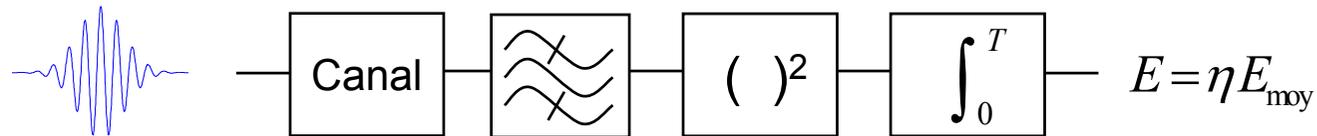
**à l'inverse**

**Intégration quadratique :**

→ Energie récupérée en quasi totalité

# Performances moyennes

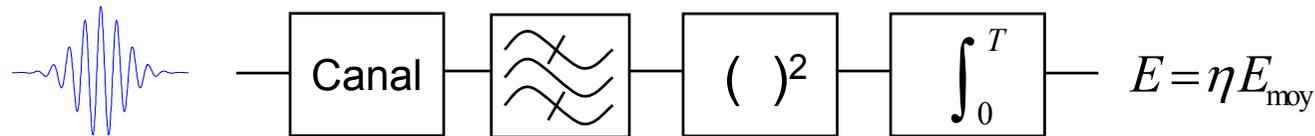
- **Energie récupérable  $E$  variable suivant les réalisations de canaux :**



- $E_{\text{moy}}$  : énergie moyenne
- $\eta$  : coefficient traduisant la variabilité du canal,  $E(\eta) = 1$

# Performances moyennes

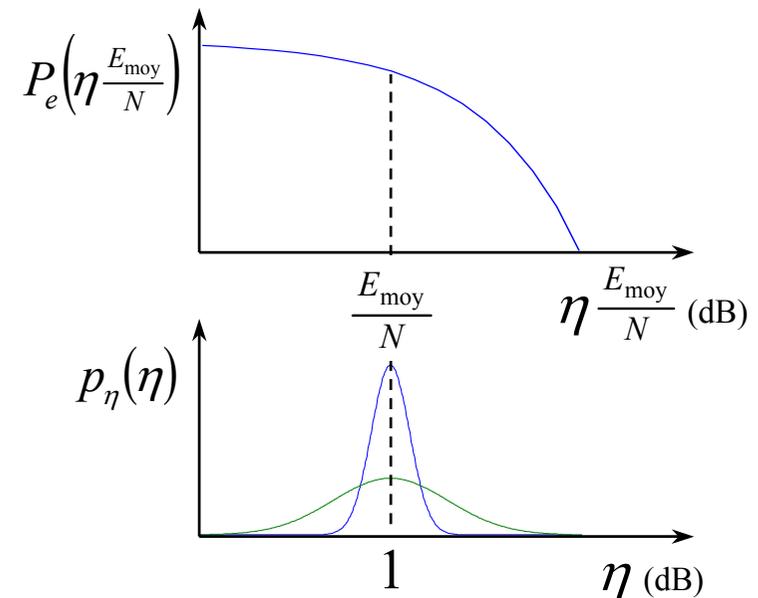
- **Energie récupérable  $E$  variable suivant les réalisations de canaux :**



- $E_{\text{moy}}$  : énergie moyenne
- $\eta$  : coefficient traduisant la variabilité du canal,  $E(\eta) = 1$

- **Probabilité d'erreur moyennée sur l'ensemble des réalisations possibles de canaux :**

$$\bar{P}_e\left(\frac{E_{\text{moy}}}{N}\right) = \int_0^\infty P_e\left(\eta \frac{E_{\text{moy}}}{N}\right) p_\eta(\eta) d\eta$$

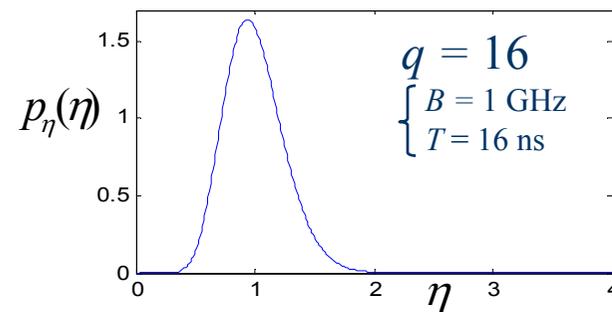
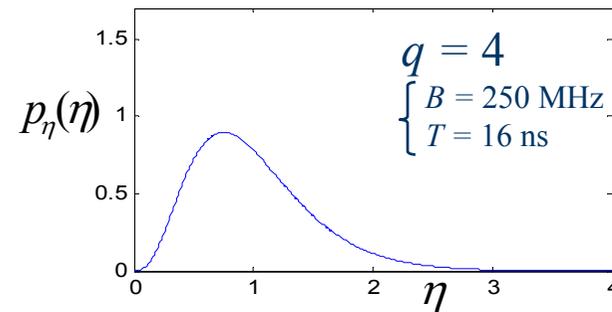
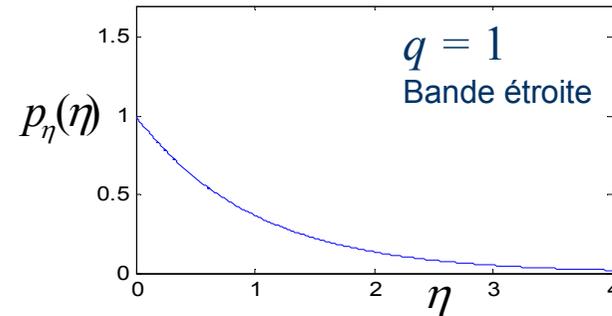


# Performances moyennes

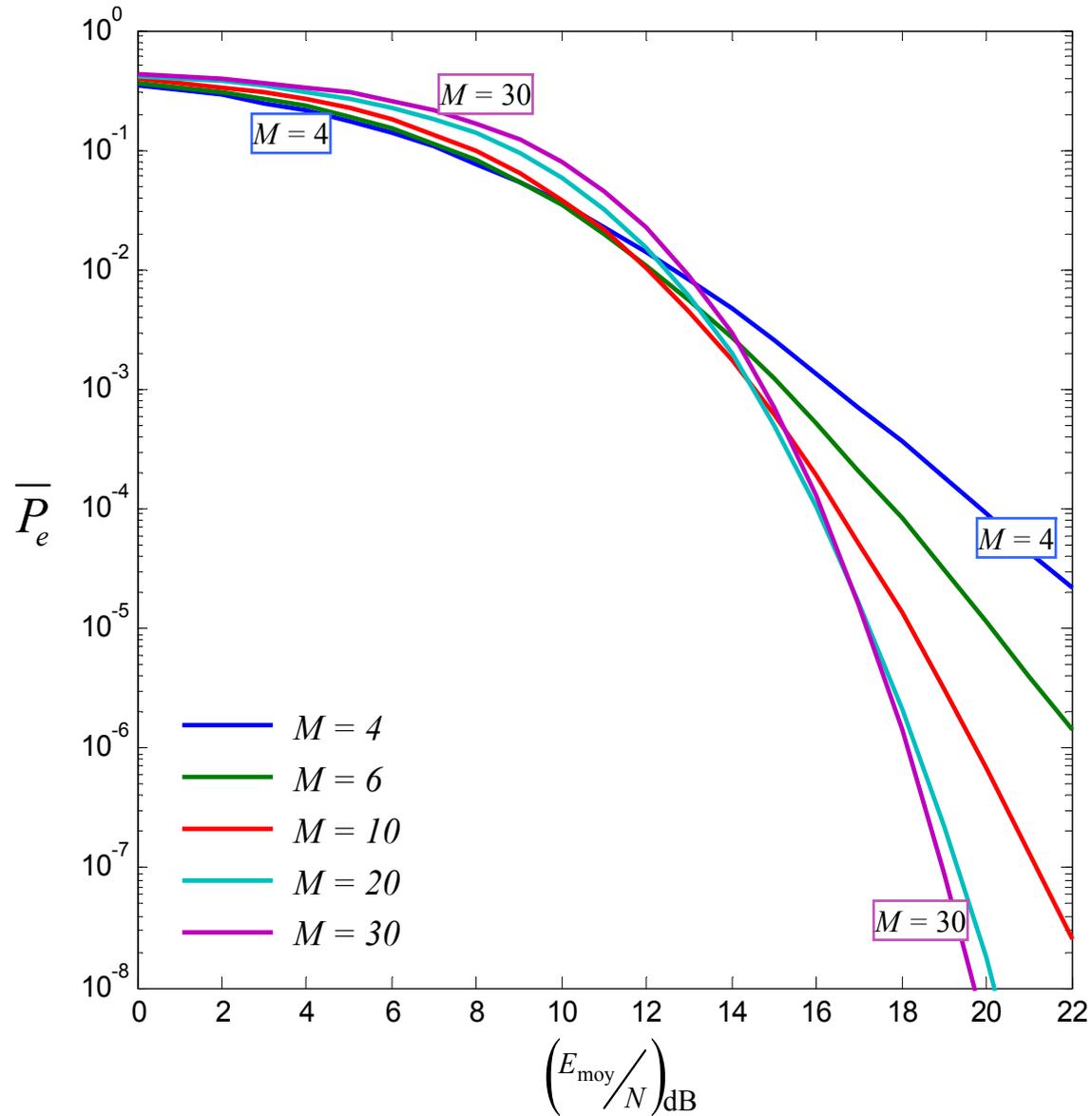
- **Statistique du coefficient  $\eta$**

- **loi gamma**

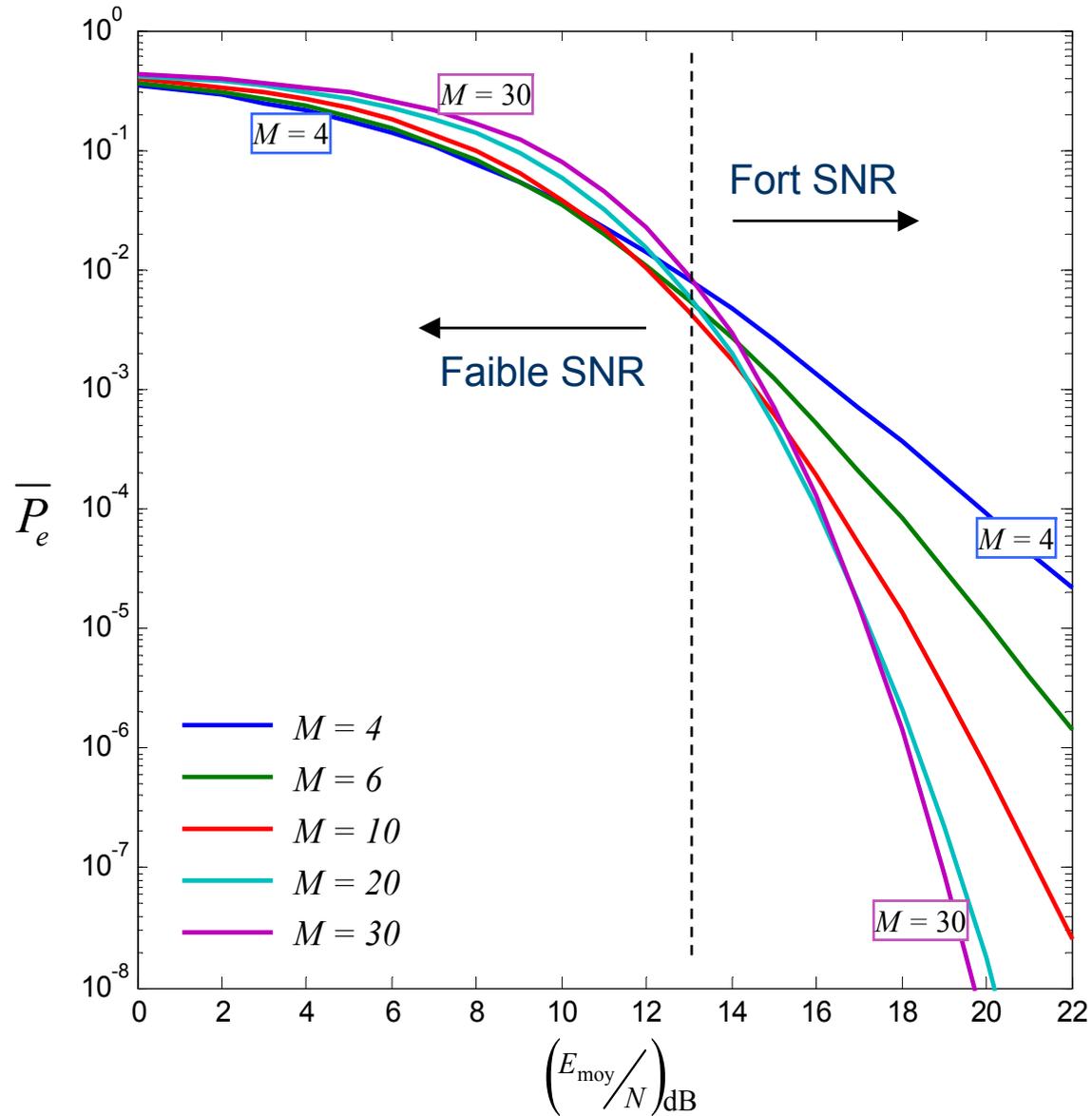
- moyenne = 1
    - variance =  $1/q$ 
      - $q \propto B$
      - dans le cas du modèle IEEE 802.15.3a :  $q \propto T_d$
    - pour  $T = T_d$  :  $q \propto BT \approx M$



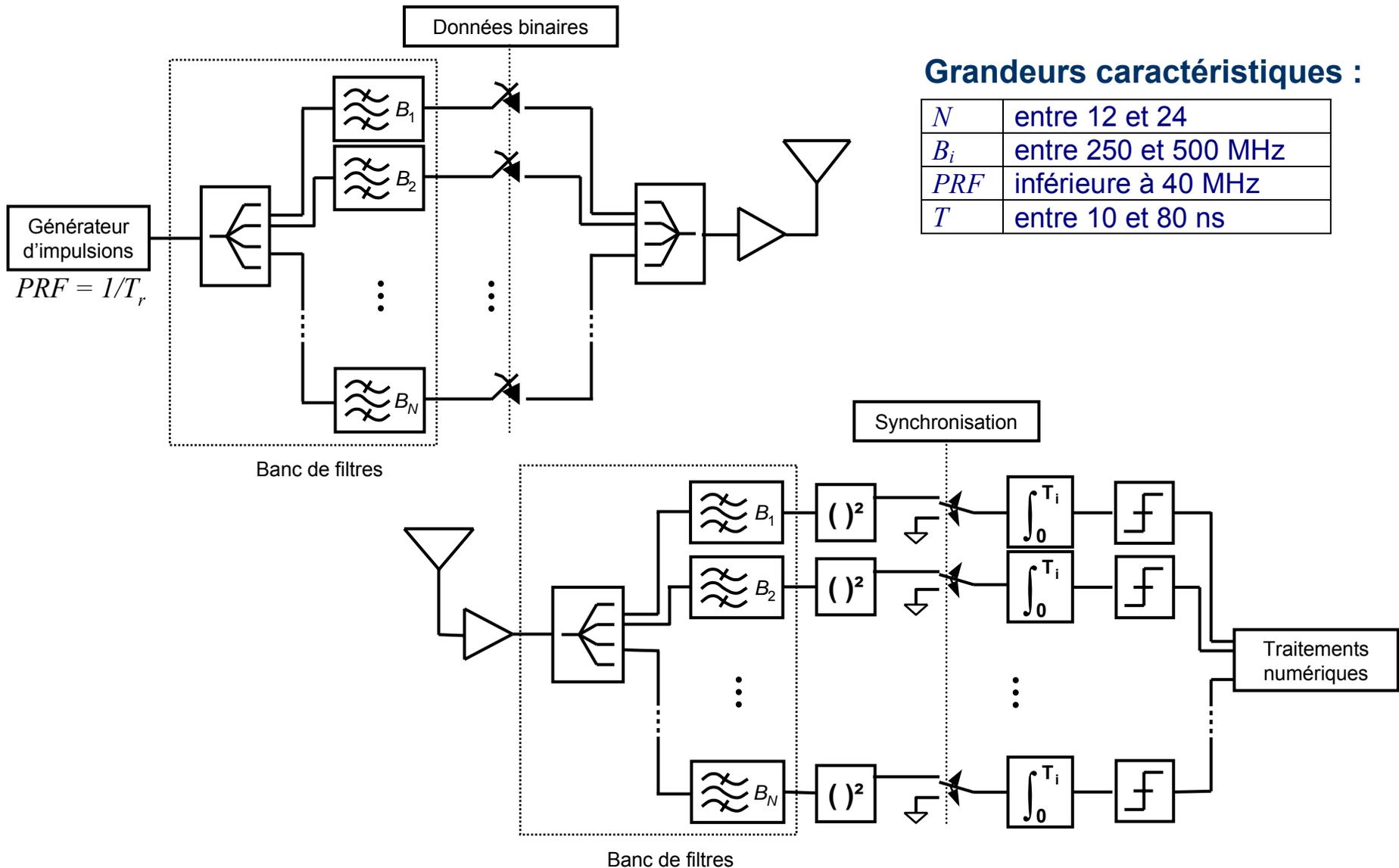
# Performances moyennes



# Performances moyennes



# Schéma synoptique du système



## Grandeurs caractéristiques :

$N$	entre 12 et 24
$B_i$	entre 250 et 500 MHz
$PRF$	inférieure à 40 MHz
$T$	entre 10 et 80 ns

# Remarques sur l'implémentation

---

- **Contraintes matérielles relaxées :**
  - **Seule une synchronisation grossière est requise**
    - Robuste aux imprécisions des horloges
  - **Traitements basés sur l'énergie du signal**
    - Robuste aux distorsions et aux non-linéarités de phase (conception simplifiée : antennes, amplificateurs et filtres)
  - **Principalement des composants analogiques passifs**
    - Réduction de la consommation

# Remarques sur l'implémentation

---

- **Contraintes matérielles relaxées :**
  - **Seule une synchronisation grossière est requise**
    - Robuste aux imprécisions des horloges
  - **Traitements basés sur l'énergie du signal**
    - Robuste aux distorsions et aux non-linéarités de phase (conception simplifiée : antennes, amplificateurs et filtres)
  - **Principalement des composants analogiques passifs**
    - Réduction de la consommation
- **Flexibilité de l'architecture multi-bandes :**
  - **Compromis possible entre débits de transmission et consommation**
  - **Gestion des interférences**
    - Systèmes traditionnels existants : détection et évitement
    - Systèmes UWB : accès multiple

# Partie 4

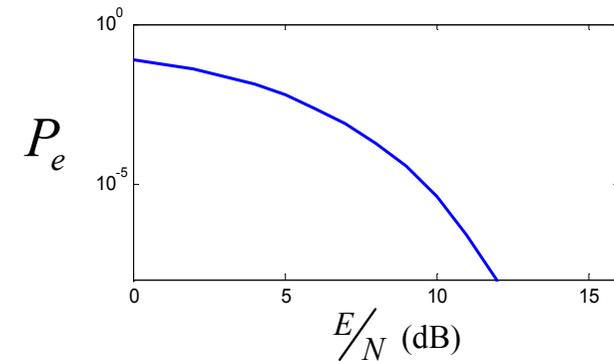
---

- Partie 1 – Contexte UWB et objectifs de la thèse
- Partie 2 – Spécificités du canal UWB
- Partie 3 – Principes et étude de la solution proposée
- **Etude comparative MB-OOK / MB-OFDM**
- Conclusion et perspectives

# Performances de la modulation OFDM

- **Multiplex de systèmes bande étroite**
  - **Modulation BPSK / QPSK**

$$P_e = \frac{1}{2} \operatorname{erfc}\left(\sqrt{\frac{E}{N}}\right)$$



# Performances de la modulation OFDM

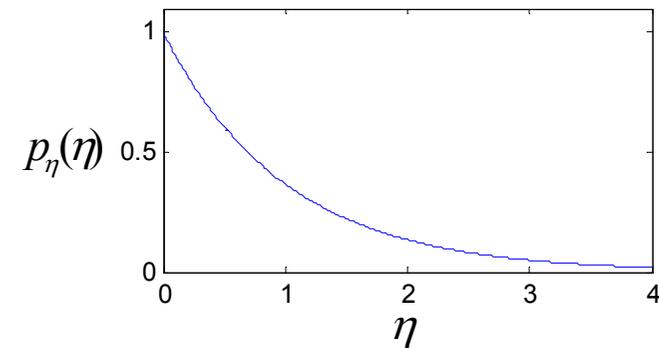
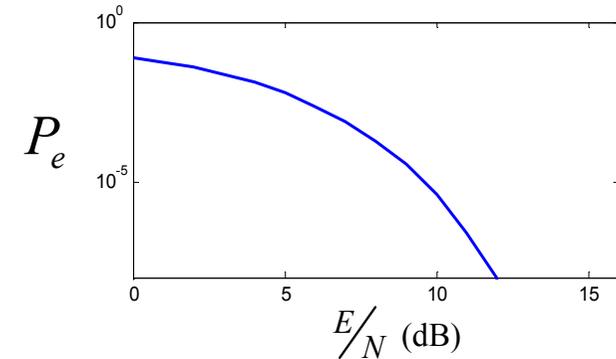
- **Multiplex de systèmes bande étroite**

- **Modulation BPSK / QPSK**

$$P_e = \frac{1}{2} \operatorname{erfc}\left(\sqrt{\frac{E}{N}}\right)$$

- **Fading de Rayleigh**

- $E = \eta E_{\text{moy}}$
    - Coefficient  $\eta$  suivant une loi exponentielle



# Performances de la modulation OFDM

- **Multiplex de systèmes bande étroite**

- **Modulation BPSK / QPSK**

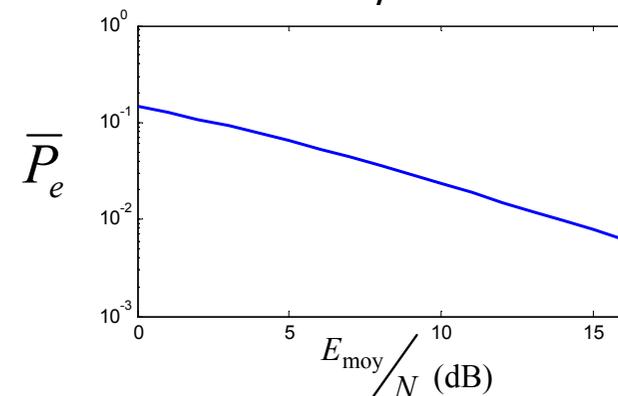
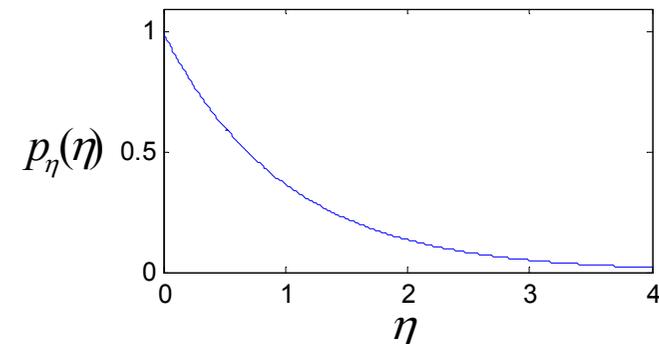
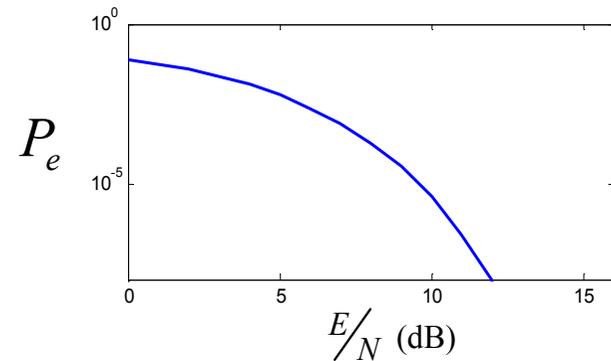
$$P_e = \frac{1}{2} \operatorname{erfc}\left(\sqrt{\frac{E}{N}}\right)$$

- **Fading de Rayleigh**

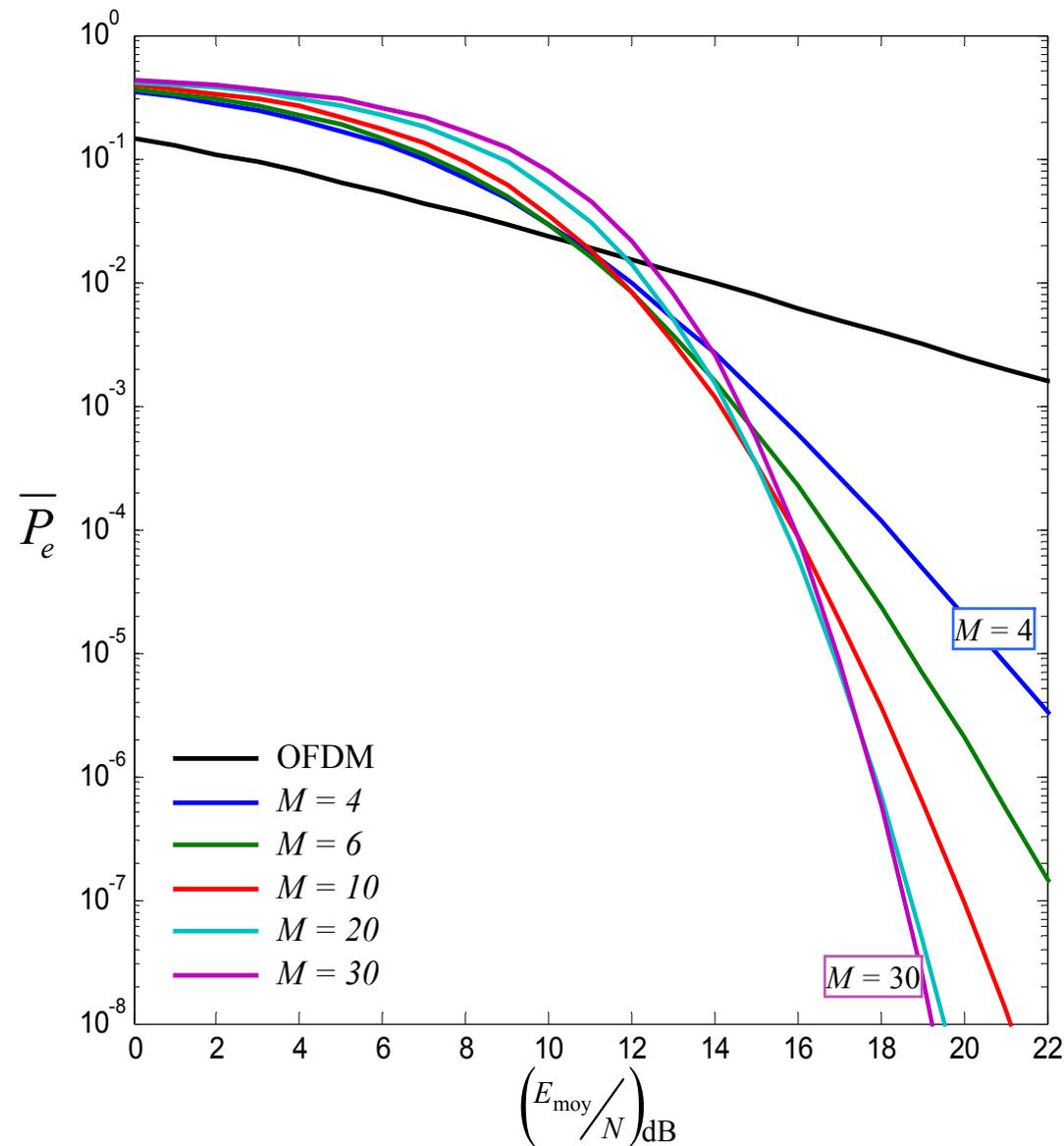
- $E = \eta E_{\text{moy}}$
    - Coefficient  $\eta$  suivant une loi exponentielle

- **Performances moyennes sur canal multi-trajets**

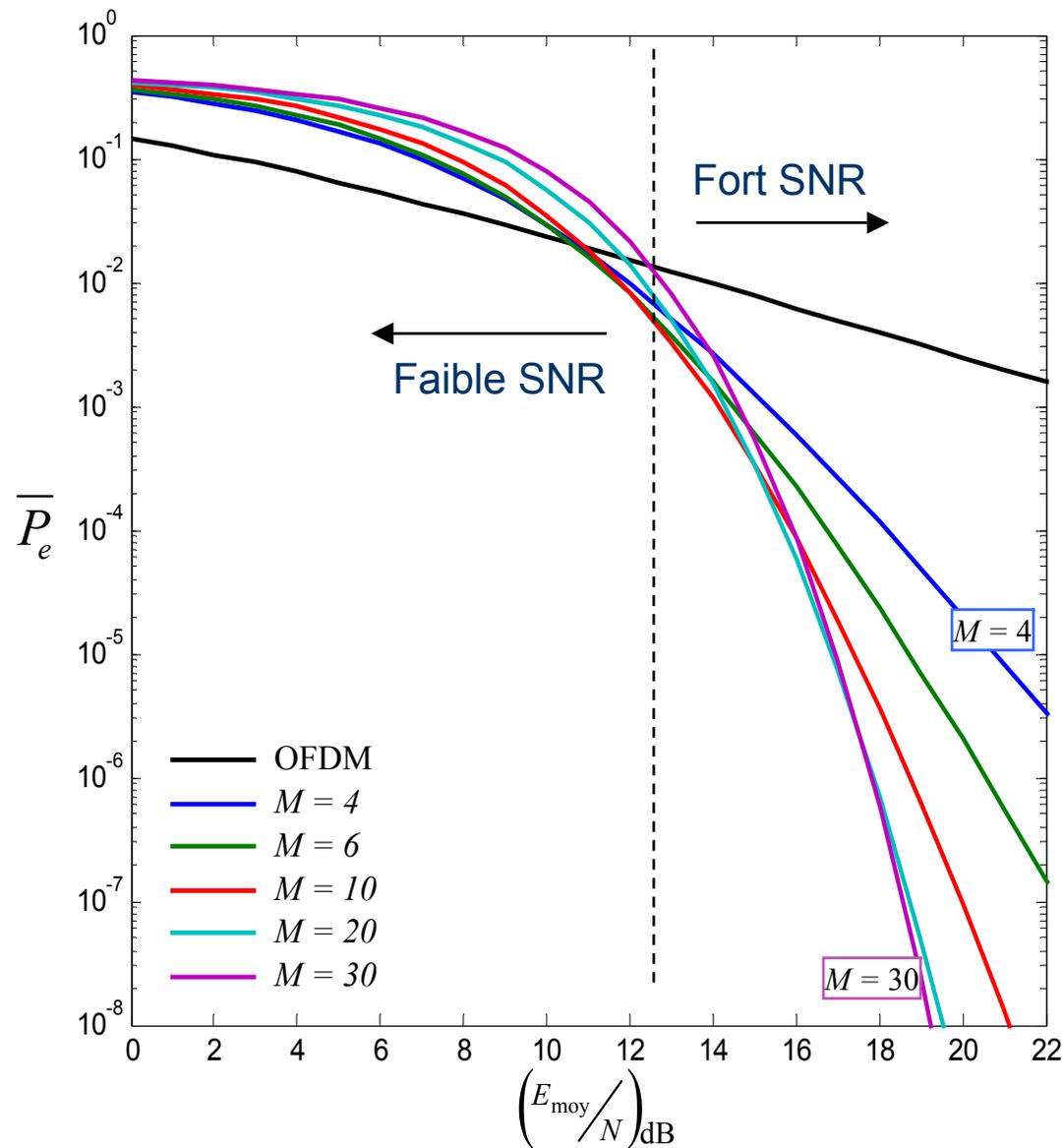
$$\bar{P}_e = \frac{1}{2} - \frac{1}{2\sqrt{1 + \frac{1}{E_{\text{moy}}/N}}}$$



# Comparaison à énergie reçue identique

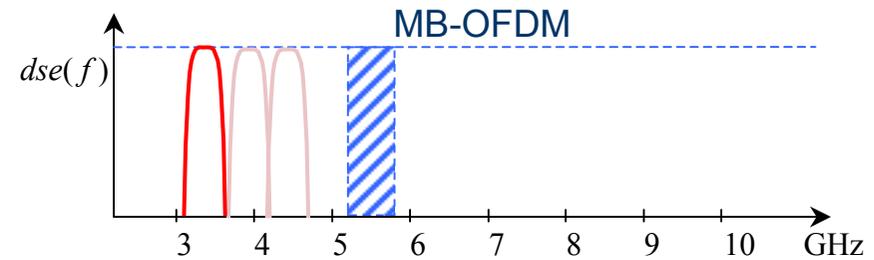
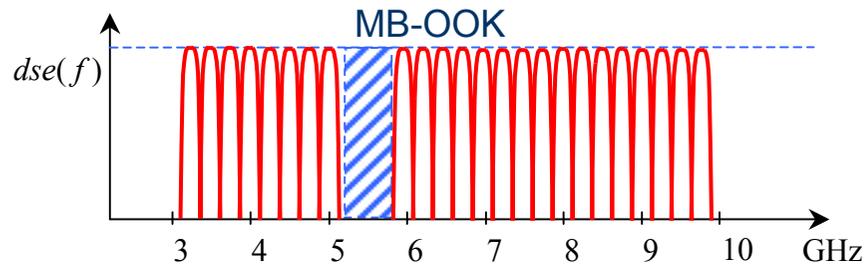


# Comparaison à énergie reçue identique



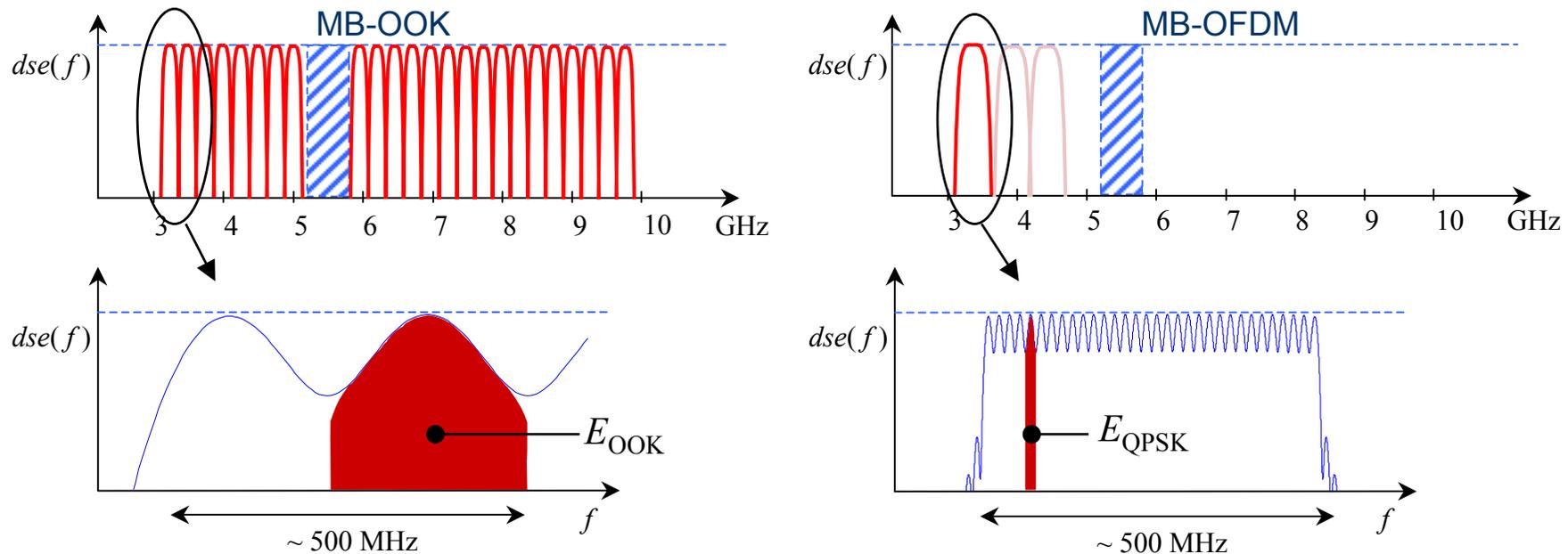
# Comparaison de l'énergie émise par bit

- Occupation du spectre sur la durée d'un symbole :



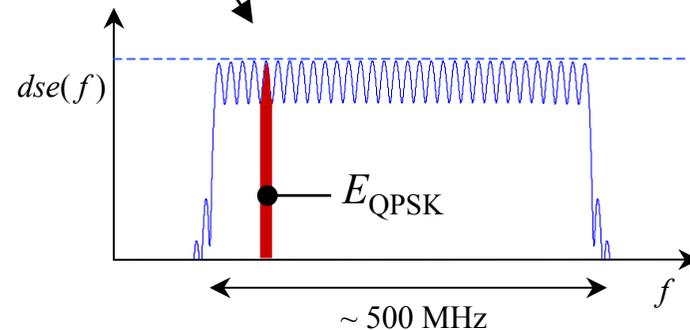
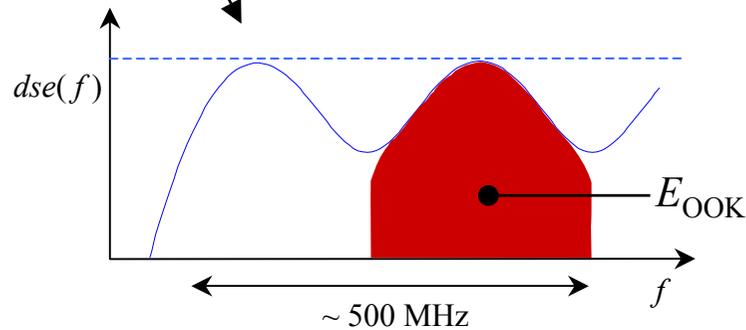
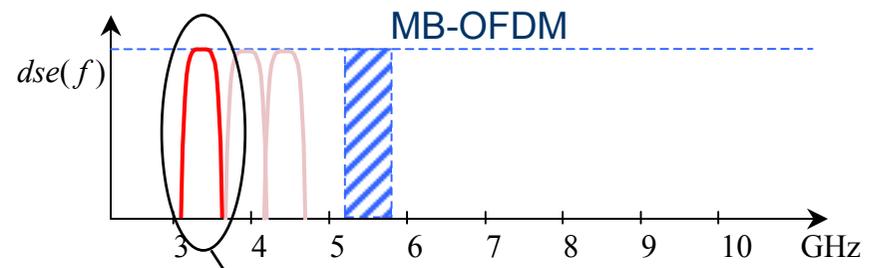
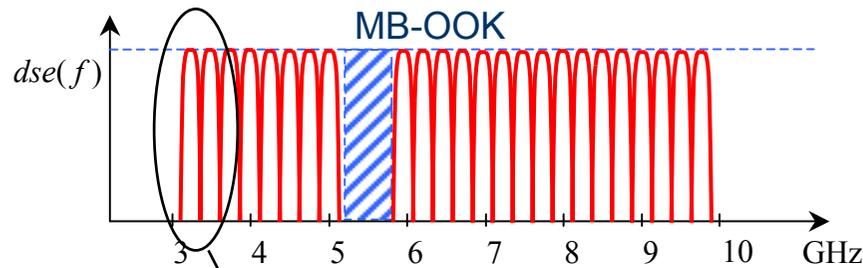
# Comparaison de l'énergie émise par bit

- Occupation du spectre sur la durée d'un symbole :



# Comparaison de l'énergie émise par bit

- Occupation du spectre sur la durée d'un symbole :



- Modulation OOK

$$E_{b, \text{MBOOK}} = E_{\text{OOK}}$$

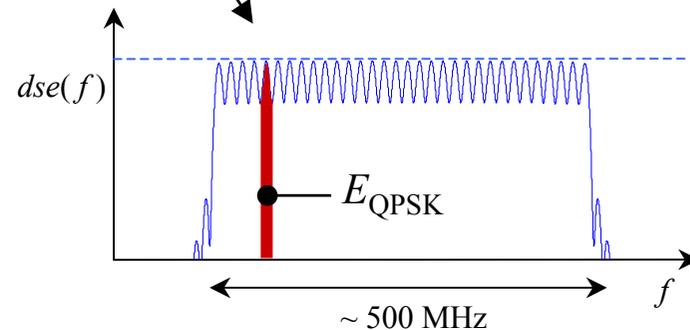
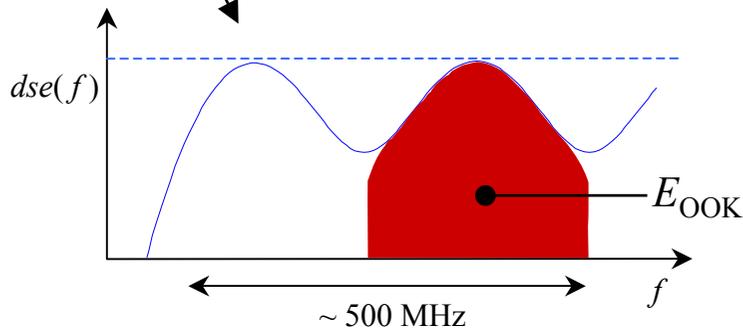
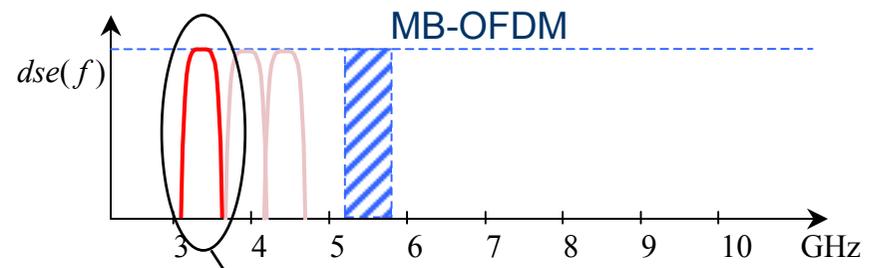
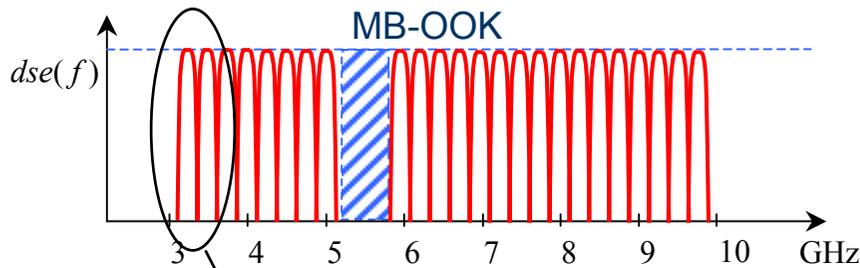
- Modulation QPSK

- Saut de fréquence sur 3 sous-bandes

$$E_{b, \text{MB-OFDM}} = \frac{3}{2} E_{\text{QPSK}}$$

# Comparaison de l'énergie émise par bit

● Occupation du spectre sur la durée d'un symbole :



- Modulation OOK

$$E_{b, \text{MBOOK}} = E_{\text{OOK}}$$

- Modulation QPSK

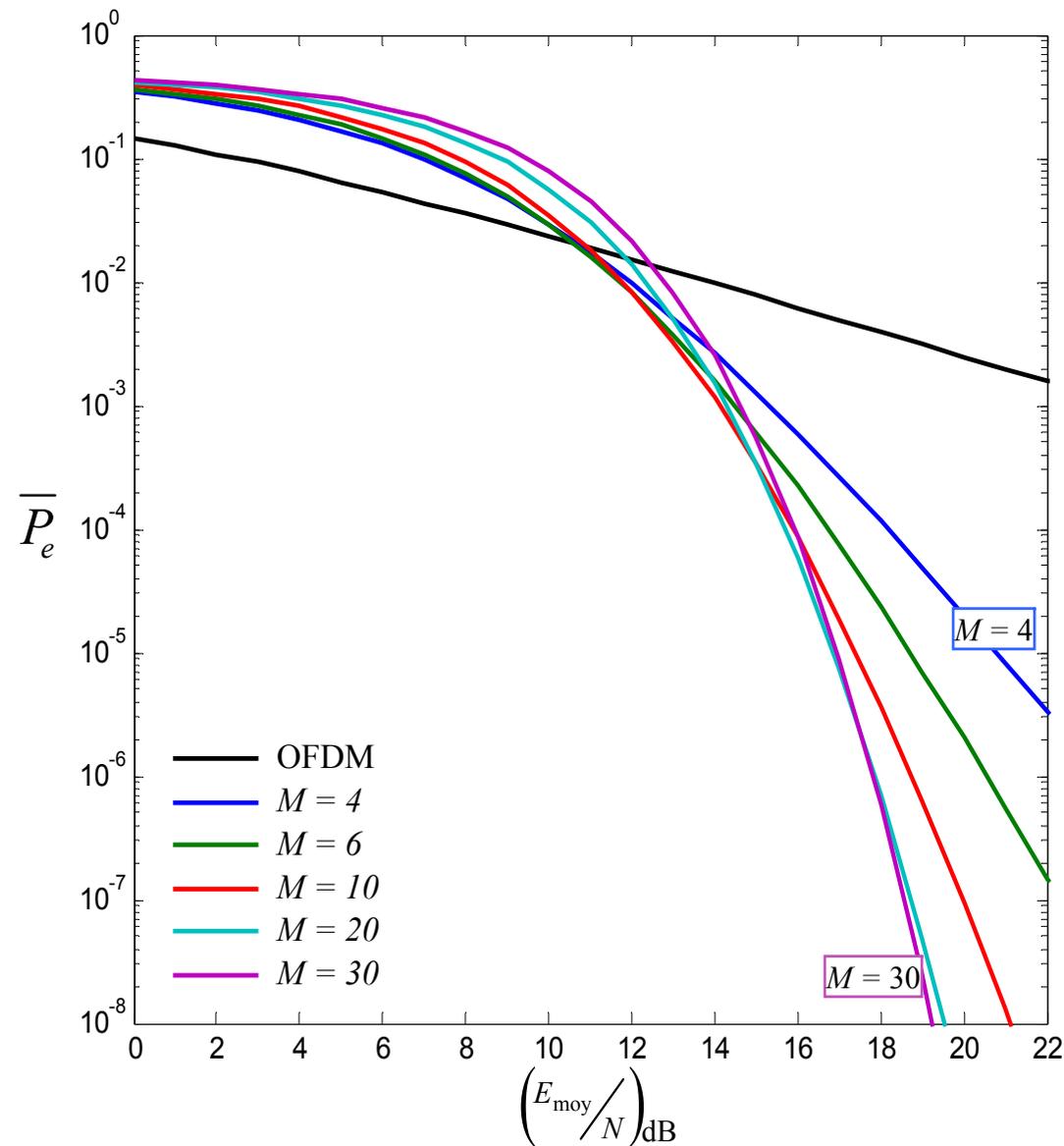
- Saut de fréquence sur 3 sous-bandes

$$E_{b, \text{MB-OFDM}} = \frac{3}{2} E_{\text{QPSK}}$$

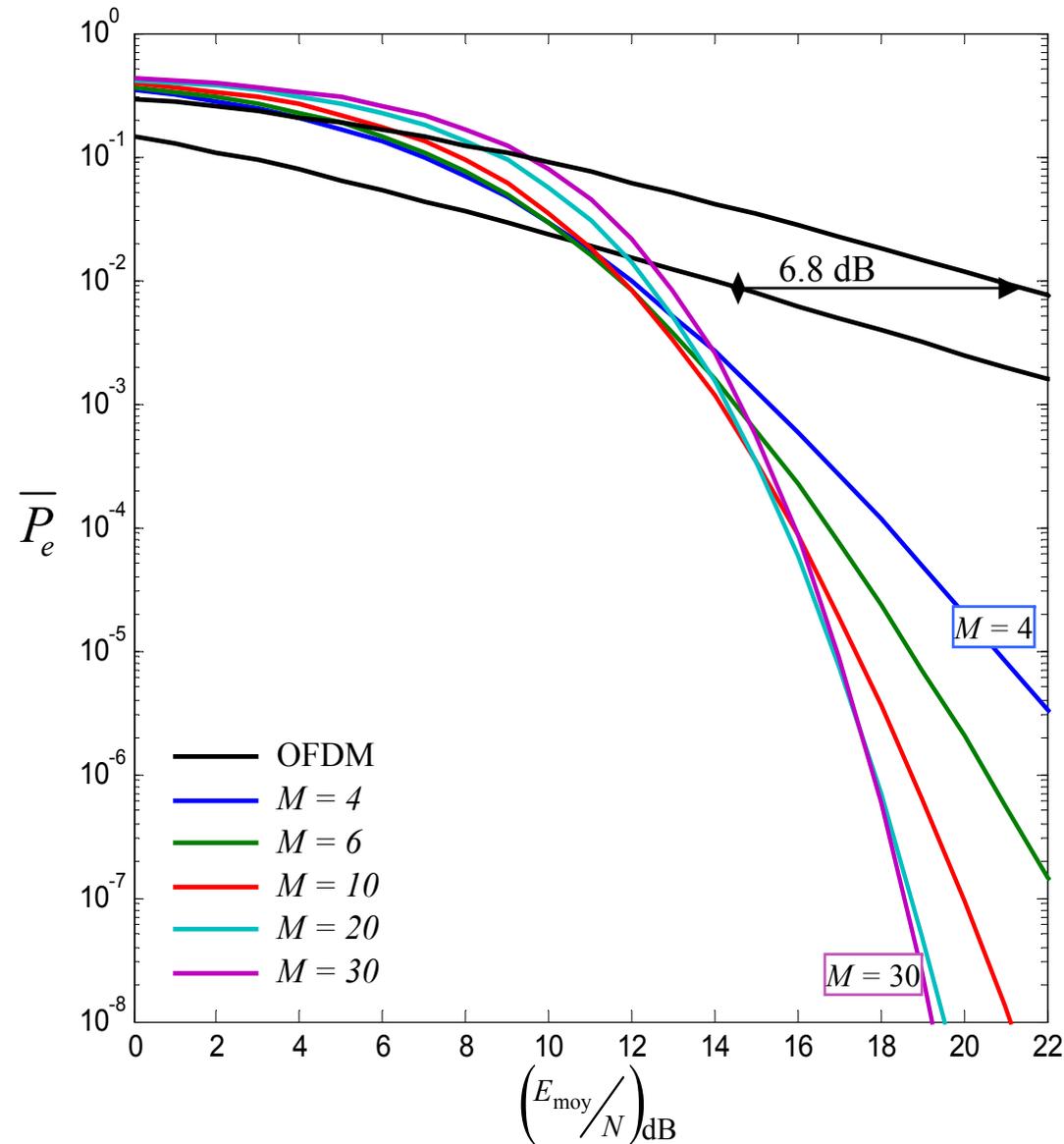
Pour un même débit brut (640 Mbit/s) :

$$\Delta E = 6.8 \text{ dB}$$

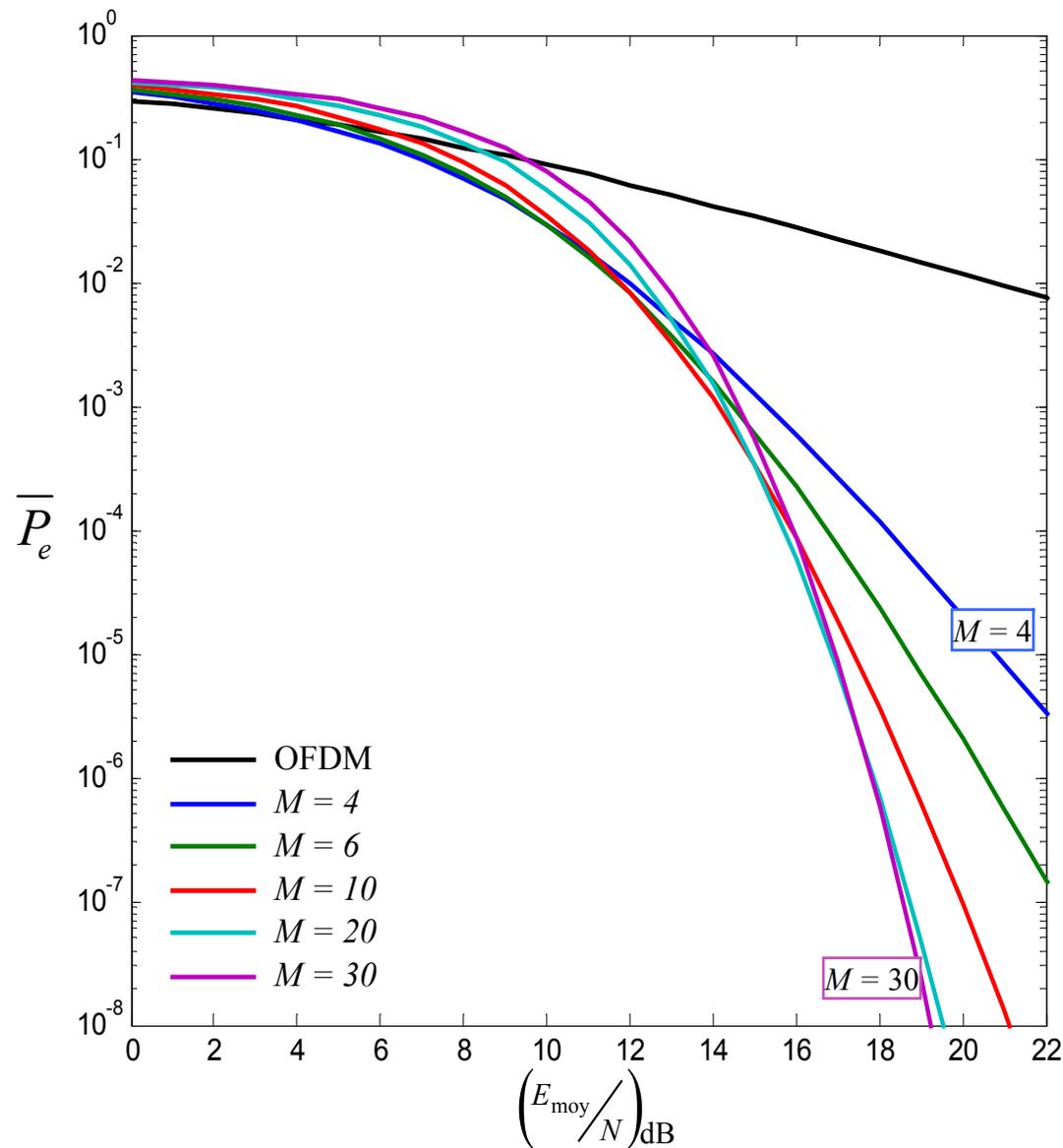
# Comparaison des performances en tenant compte des limitations FCC



# Comparaison des performances en tenant compte des limitations FCC



# Comparaison des performances en tenant compte des limitations FCC



# Remarques relatives au codage

---

- **Solution MB-OFDM**
  - **Sous-porteuses en parallèle**
  - **Diversité par codage de canal**
    - Architecture numérique plus complexe
    - Débits utiles limités

# Remarques relatives au codage

---

- **Solution MB-OFDM**

- **Sous-porteuses en parallèle**
- **Diversité par codage de canal**
  - Architecture numérique plus complexe
  - Débits utiles limités

- **Solution MB-OOK**

- **Sous-bande (de 250 à 500 MHz) en parallèle**
- **Diversité par exploitation de la bande**
- **Codage de canal de rendement élevé**
  - Partie numérique simple
  - Débits utiles très élevés

- 
- **Partie 1 – Contexte UWB et objectifs de la thèse**
  - **Partie 2 – Spécificités du canal UWB**
  - **Partie 3 – Principes et étude de la solution proposée**
  - **Partie 4 – Etude comparative**
  - **Conclusion et perspectives**

# Conclusion

---

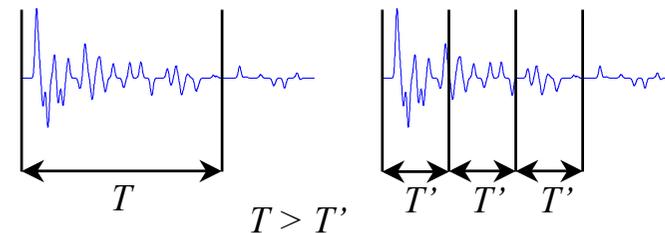
- **Système impulsionnel MB-OOK pour les hauts débits**
  - **Architecture multi-bandes**
    - Approche asynchrone - traitement non-cohérent quadratique
    - Modulation OOK
    - Démodulation par seuillage adapté dynamiquement aux conditions de propagation dans le canal
  - **Fonctionnement simple**
    - Estimation du canal limitée à deux quantités macroscopiques
    - Robuste à de faibles écarts sur les amplitudes et les retards
  - **Bandes utilisées très larges**
    - Energie par bit élevée
    - *Fading* limité
  - **Codage de canal**
    - Simplifié
    - Permettant de très hauts débits utiles

# Perspectives

- **Traitement du signal quadratique pour les communications numériques**

- **Echantillonnage plus rapide de l'énergie**

- Réduire les durées d'intégration
- Conserver l'énergie intégrée totale



- **Procédure d'annulation des interférences inter-impulsions**
- **Codage de canal**
- **Procédure de détection et d'évitement des interférences**

- **Etude d'implémentation**

- **Nouvelles fonctions analogiques pour l'architecture multi-bandes**
- **Eléments actifs du système**

