



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

- **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**

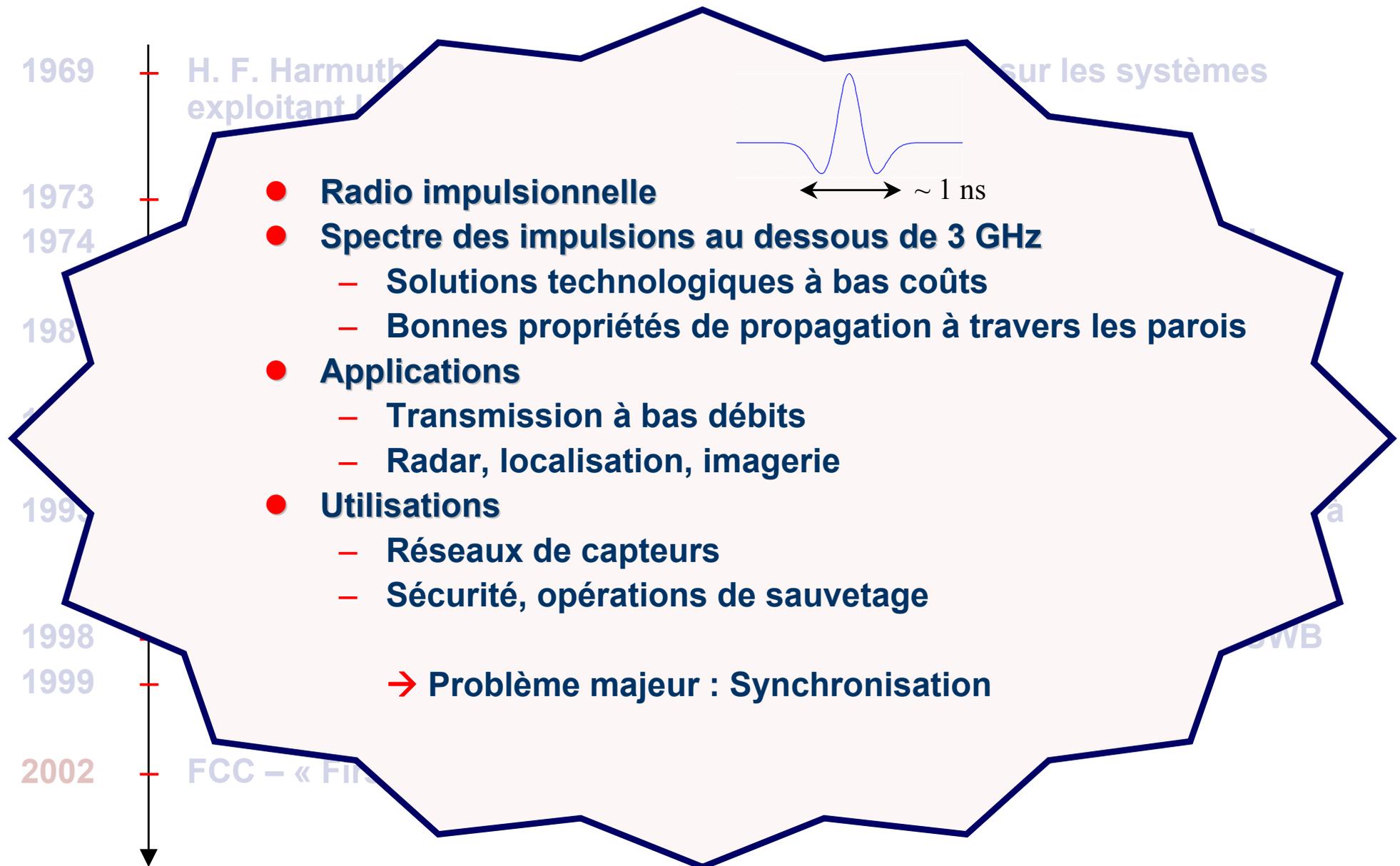
Partie 1

- **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

-
- A vertical timeline with a central line and arrows pointing to specific years. The years 1969, 1973, 1974, 1987, 1990, 1993, 1998, and 1999 are in black, while 2002 is in red. Wavy lines indicate breaks in the timeline between 1974 and 1987, and between 1993 and 1998.
- 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
 - 1987 - L. W. Fullerton – Création de la société Time Domain
 - 1990 - DARPA – « Assessment of Ultra-Wideband (UWB) Technology »
 - 1993 - R. A. Scholtz – Introduction d'une méthode d'accès multiple spécifique à l'*Impulse Radio*
 - 1998 - FCC – Lancement du processus de réglementation des émissions UWB
 - 1999 - Time Domain – Premier chipset UWB
 - 2002 - FCC – « First Report and Order »

Contexte historique avant 2002

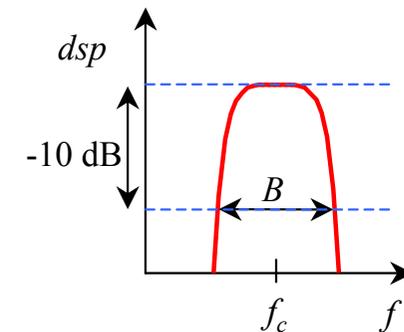


Réglementation FCC

● En février 2002

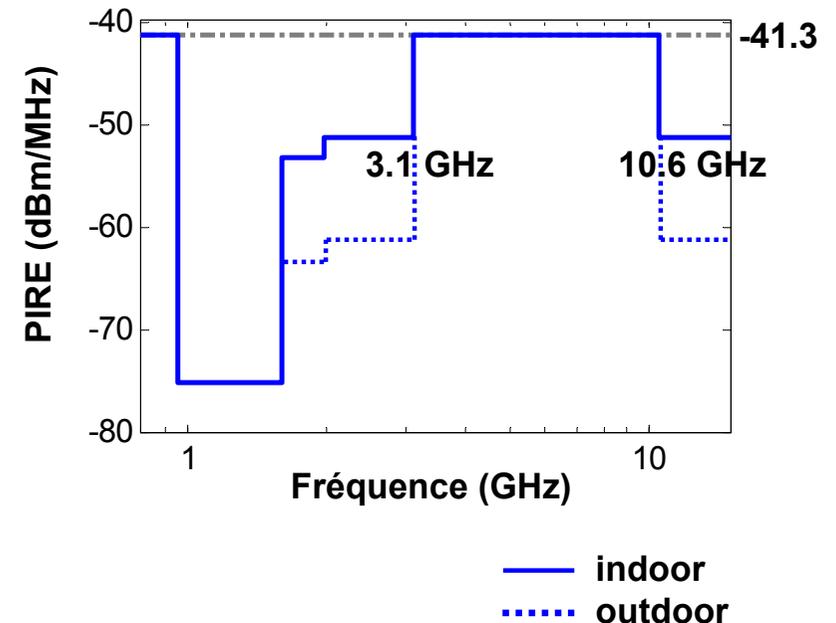
– Extension de la définition de l'UWB :

- 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

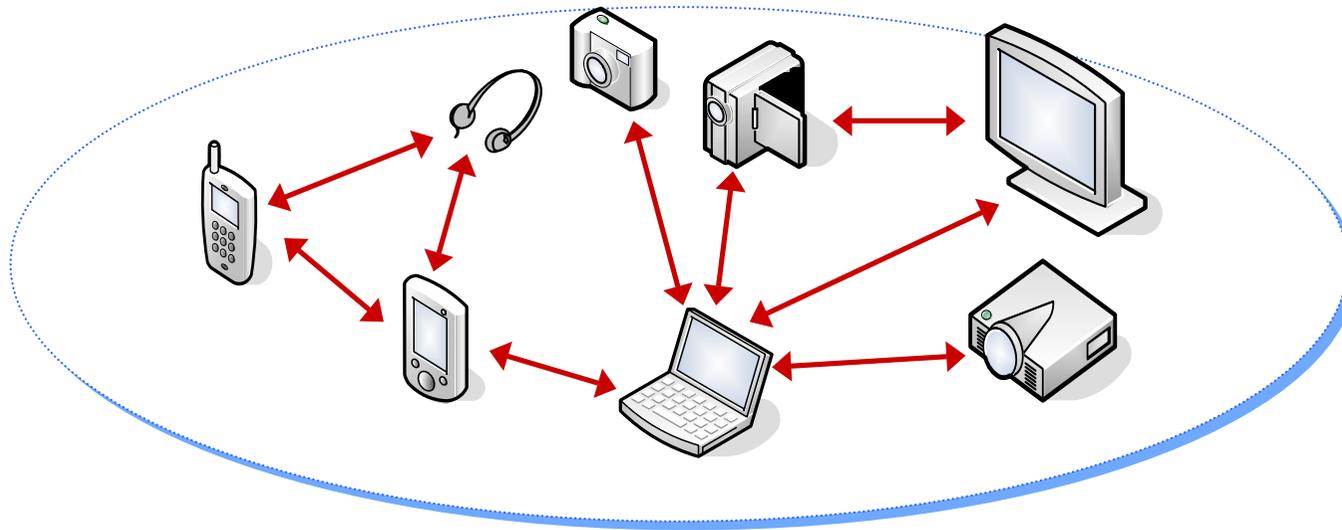


Conséquences de la réglementation

● Applications :

– Communications hauts débits WPAN

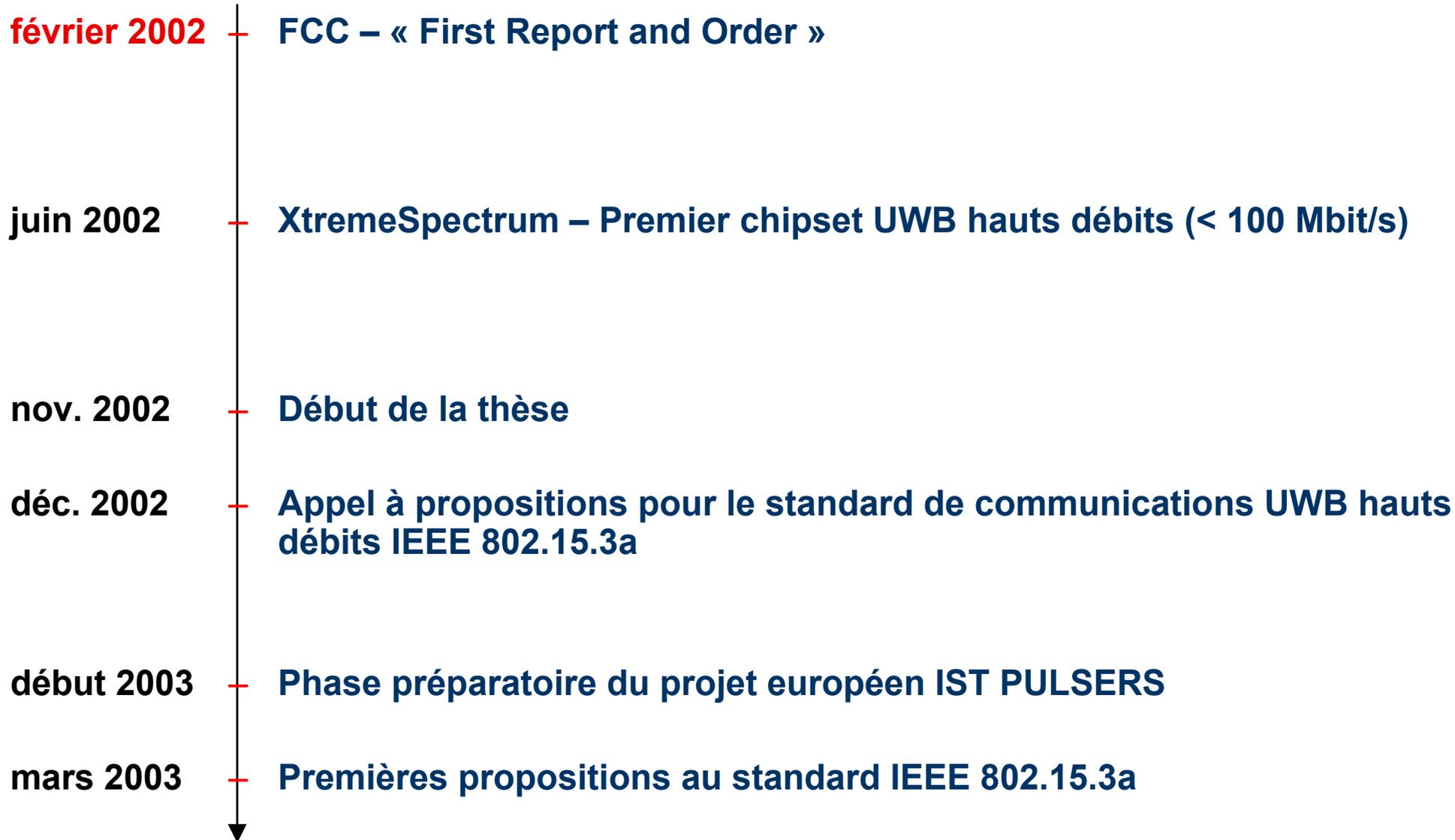
- De 100 à 500 Mbit/s
- Courtes portées (jusqu'à 10 mètres)



● Solutions satisfaisant la définition très large de l'UWB :

- Techniques impulsionnelles
- Systèmes traditionnels à bande élargie

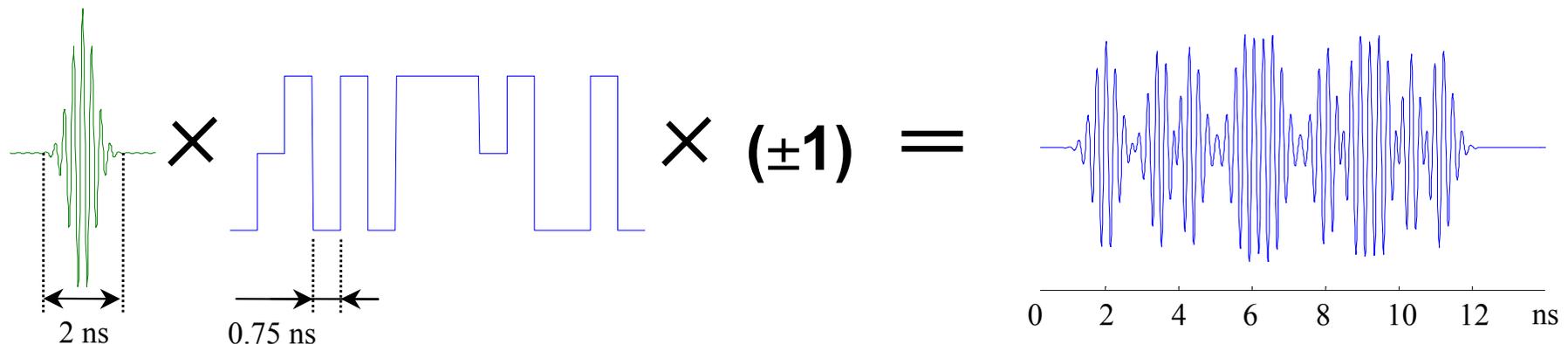
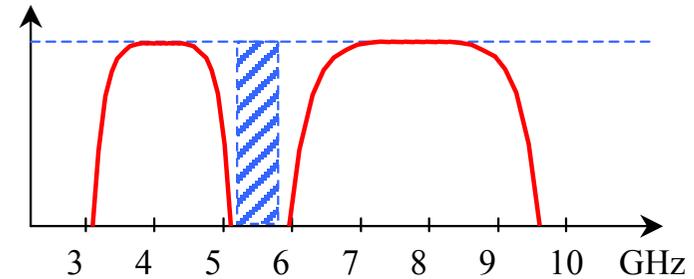
L'UWB depuis la réglementation FCC



Solutions pour le standard IEEE 802.15.3a

● Solution DS-UWB

- Solution impulsionnelle
- Spectre disponible scindé en 2 sous-bandes
- Etalement 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

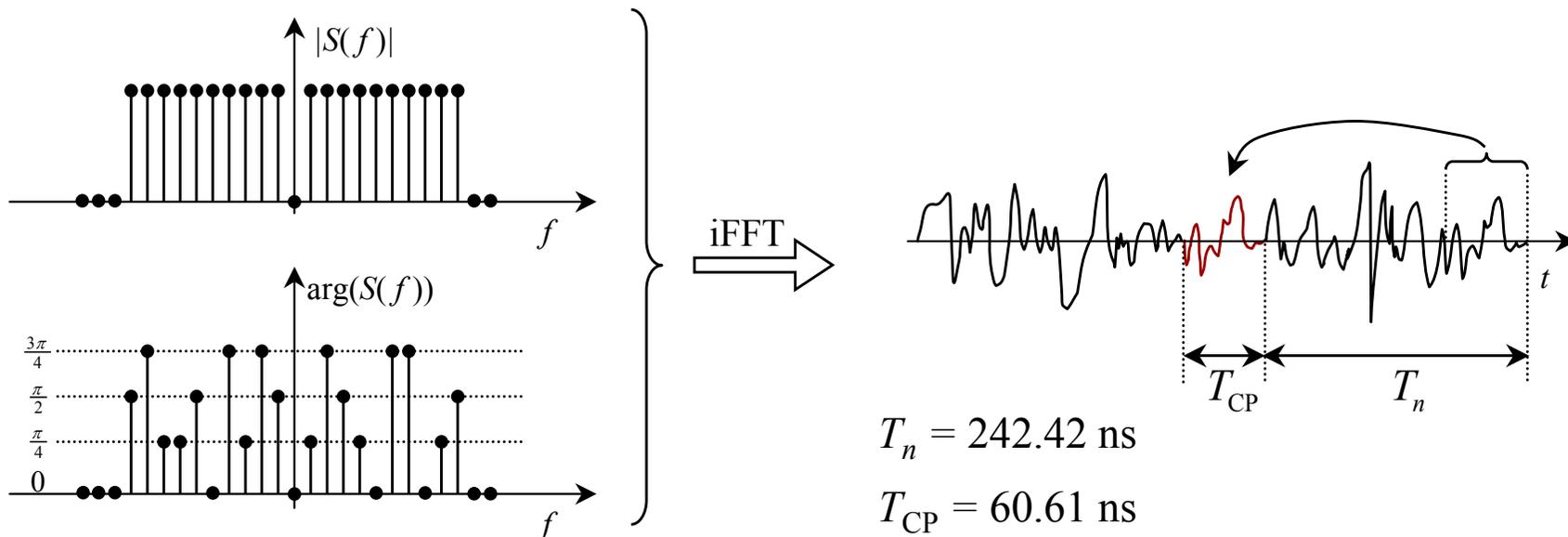
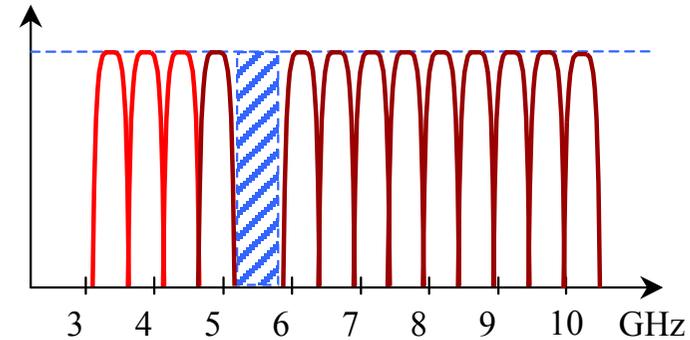


R. Fisher et al, « DS-UWB physical layer submission to 802.15 Task Group 3a », IEEE P802.15-04/0137r3, 2004

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

● Points caractéristiques :

– Point commun

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

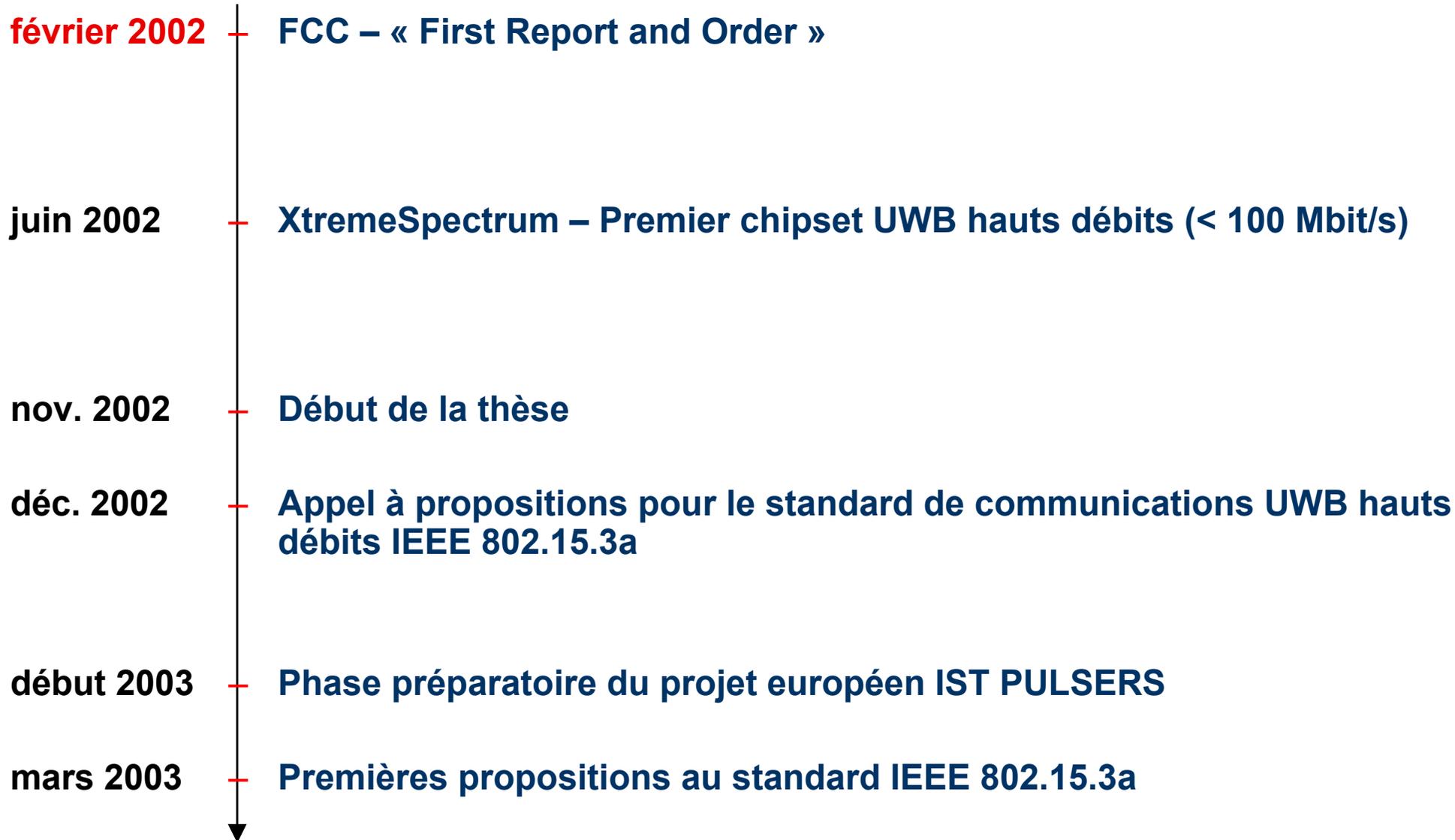
– DS-UWB

- 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

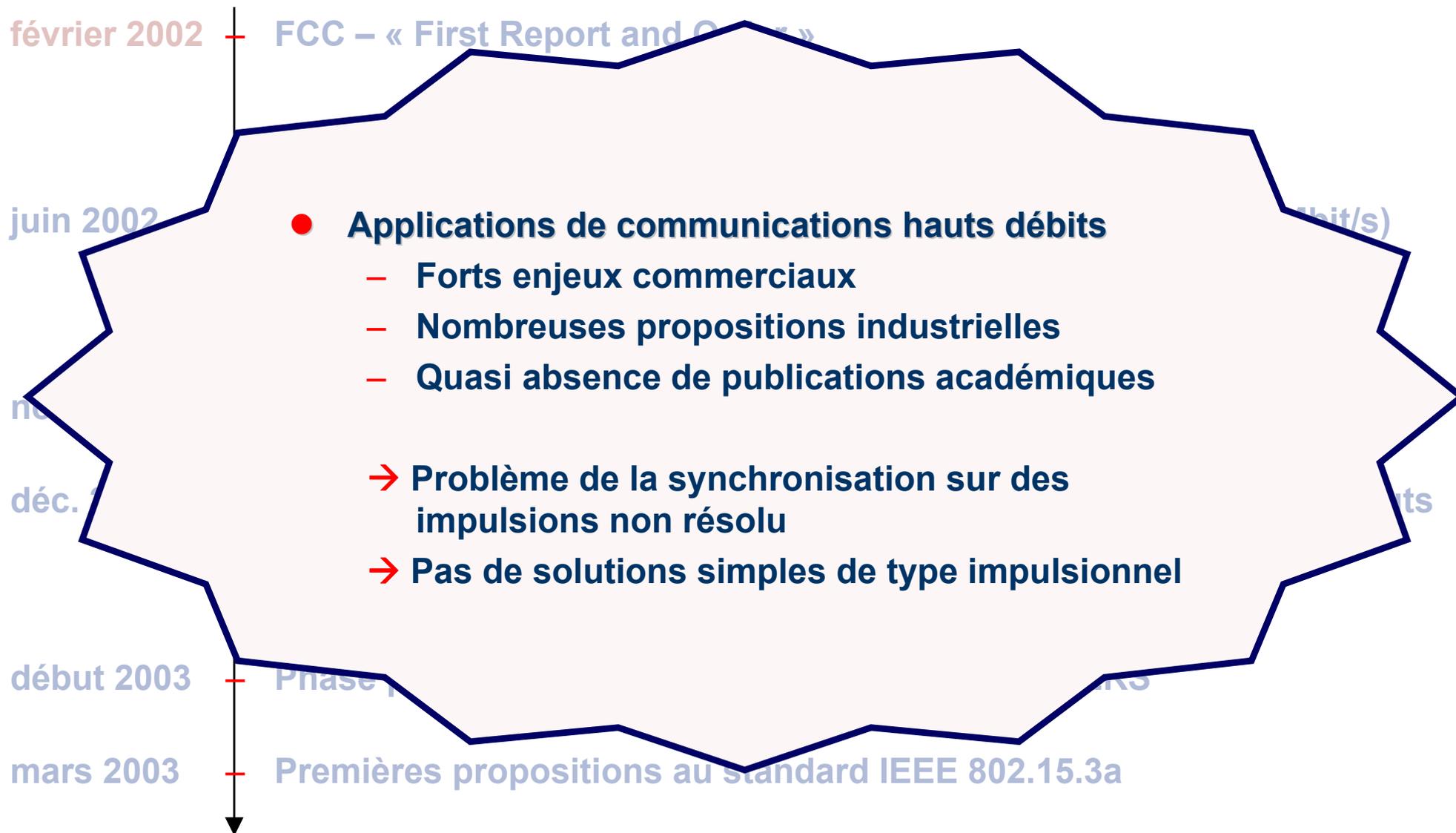
– MB-OFDM

- 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 :**

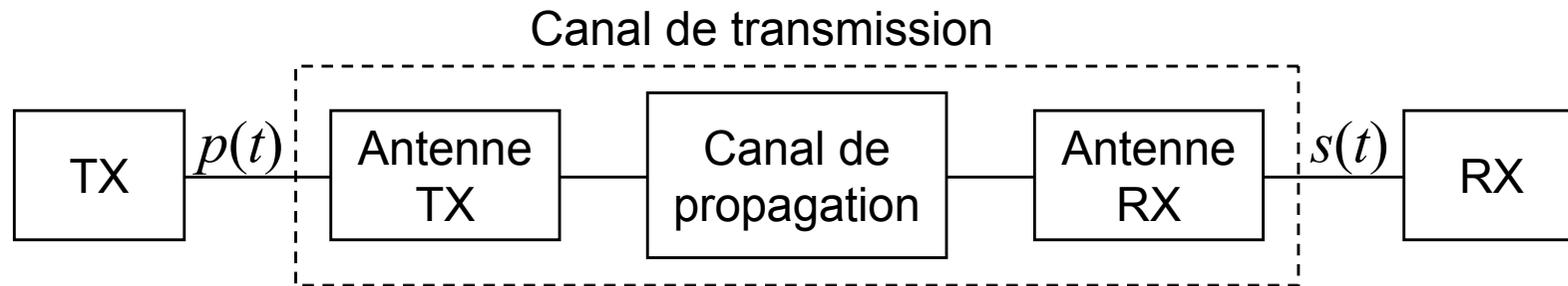
- Faible complexité
- Faible consommation
- Faible coût
- Robustesse dans un large éventail de conditions de propagation

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)**



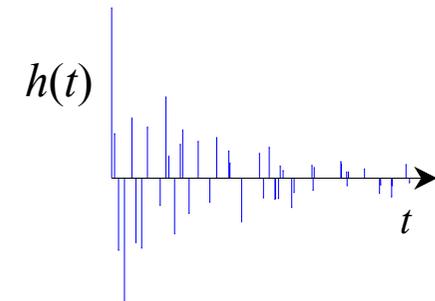
- Fonction de transfert $H(f)$: $S(f) = H(f)P(f)$
- Réponse impulsionnelle $h(t)$: $s(t) = h(t) * p(t)$

- **Modélisation de la propagation en rayons**

- Réponse impulsionnelle en bande infinie :

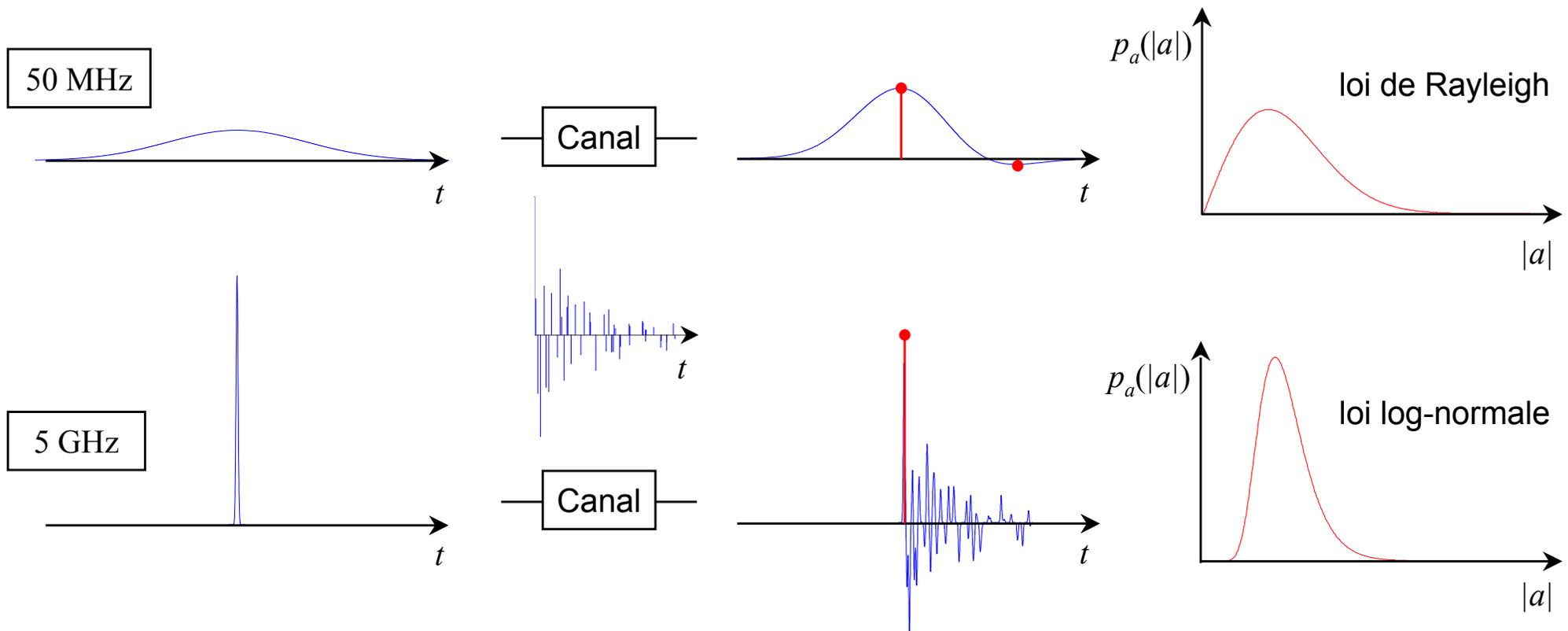
$$h(t) = \sum_k \alpha_k \delta(t - \tau_k)$$

α_k et τ_k : amplitude et retard du $k^{\text{ième}}$ trajet



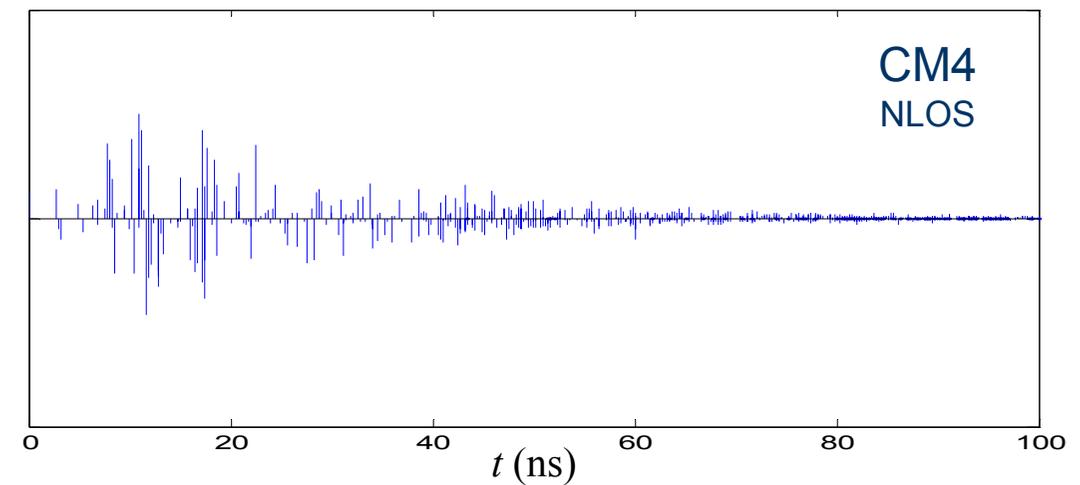
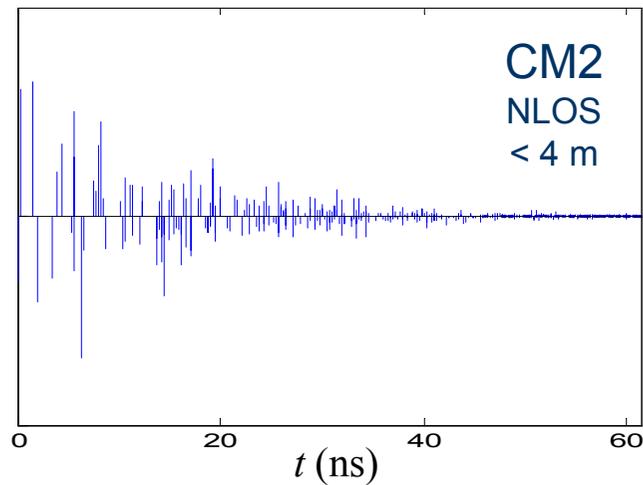
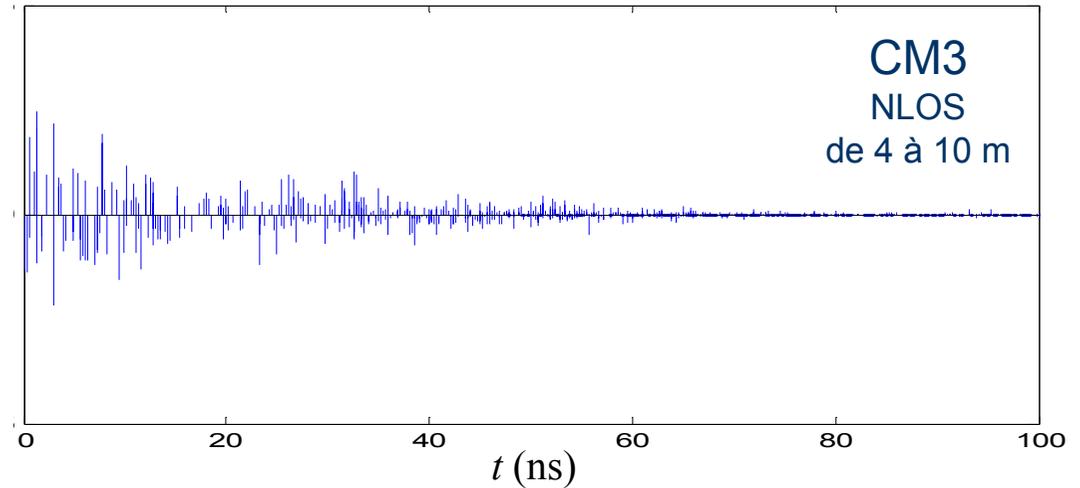
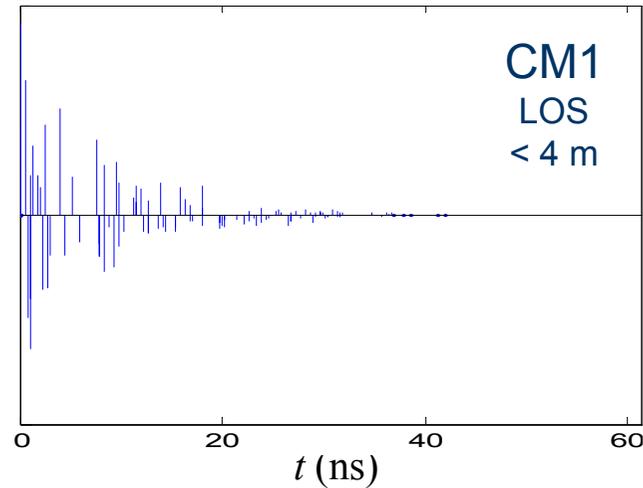
Modélisation du canal UWB

- **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



Modèle statistique IEEE 802.15.3a

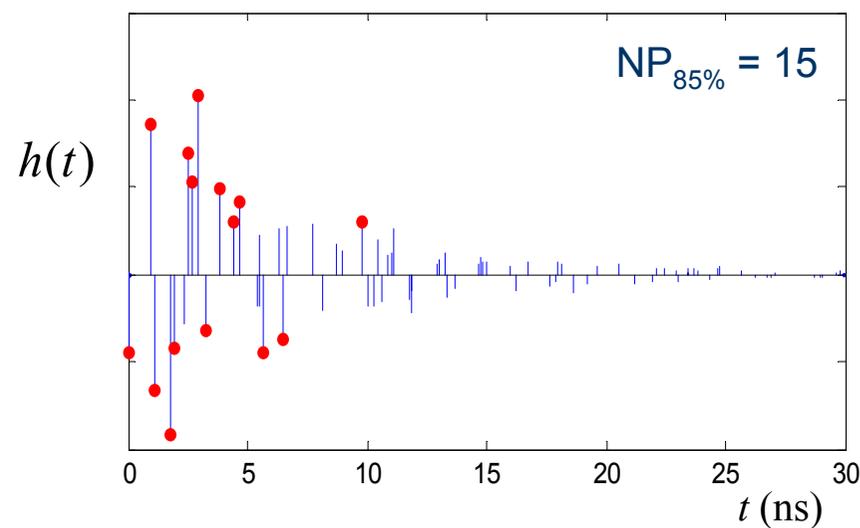
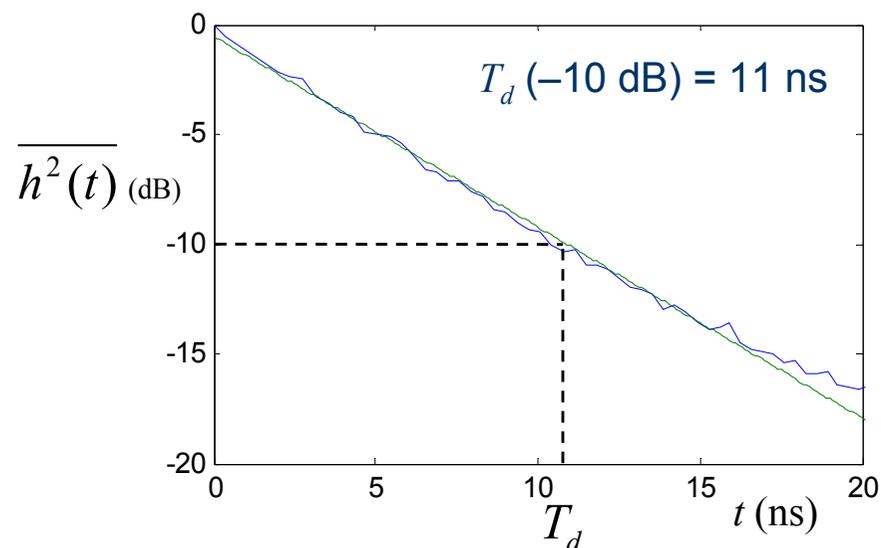
- Exemple de réponses impulsionnelles construites à partir du modèle



Modèle statistique IEEE 802.15.3a

● Caractéristiques du modèle

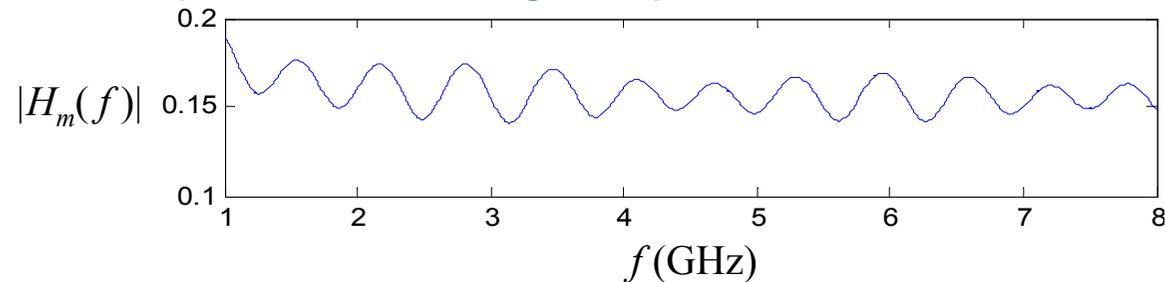
	CM1	CM2	CM3	CM4
Configuration	LOS < 4 m	NLOS < 4 m	NLOS de 4 à 10 m	NLOS $\tau_{\text{RMS}} = 25$ ns
T_d (-10 dB) (ns)	11	16.5	23.5	38.5
$\overline{\text{NP}}_{85\%}$	24	36.1	61.54	123



Distorsions de l'impulsion

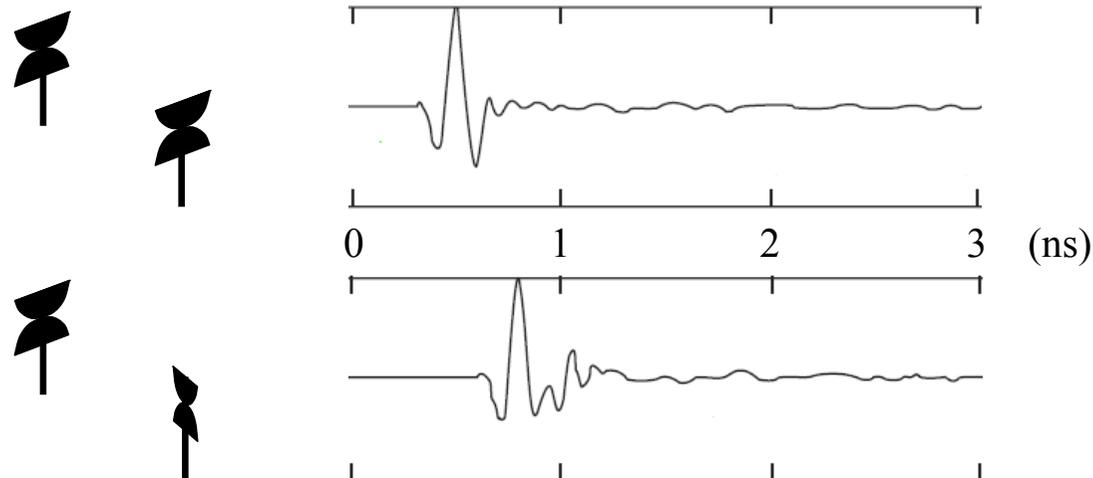
● Matériaux

- Caractéristiques électromagnétiques variables suivant la fréquence



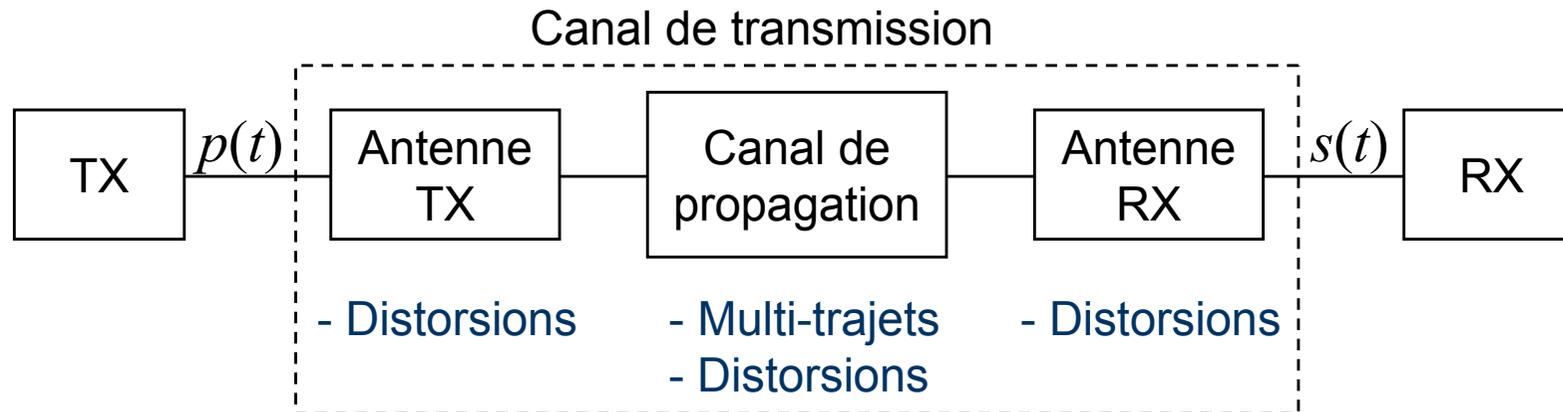
● Antennes

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



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

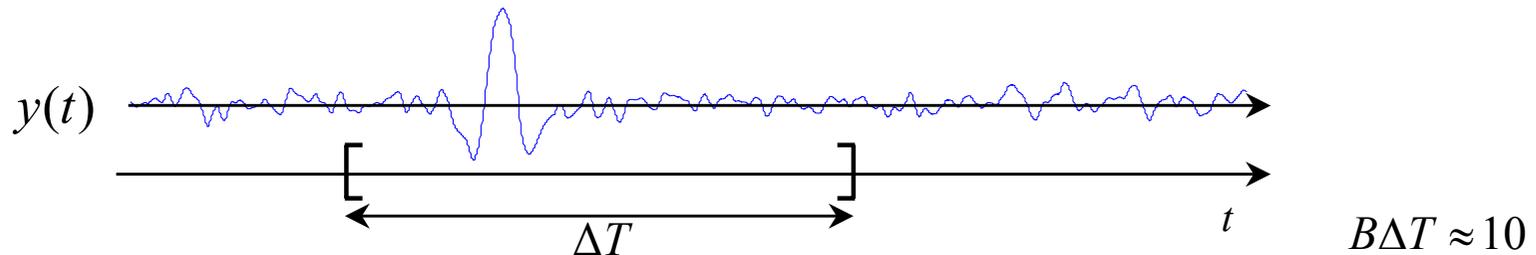
Partie 3

- 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

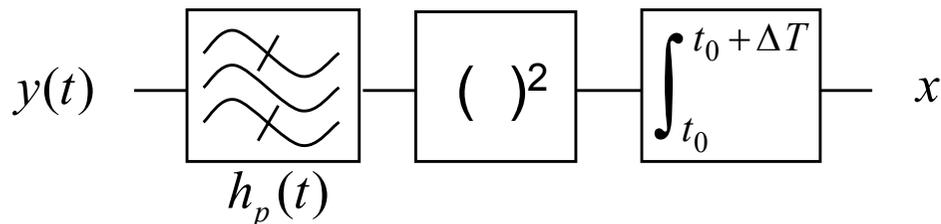
- Détection d'une impulsion dans un intervalle de temps ΔT :



- 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

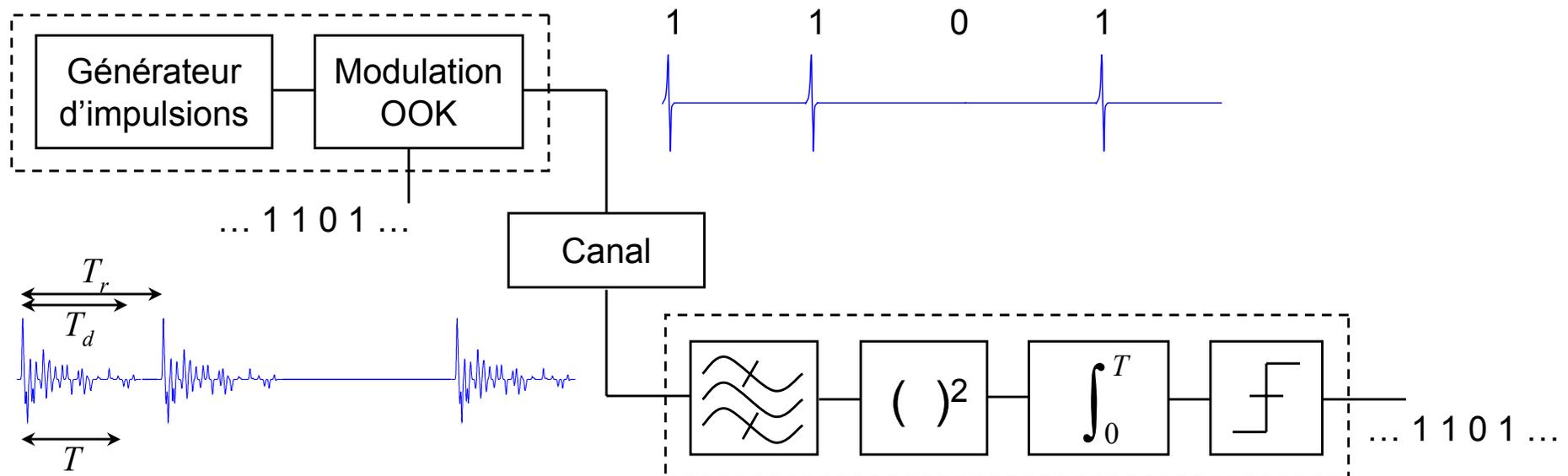
- **Solution impulsionnelle, asynchrone**

- 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**

- 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**

- 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

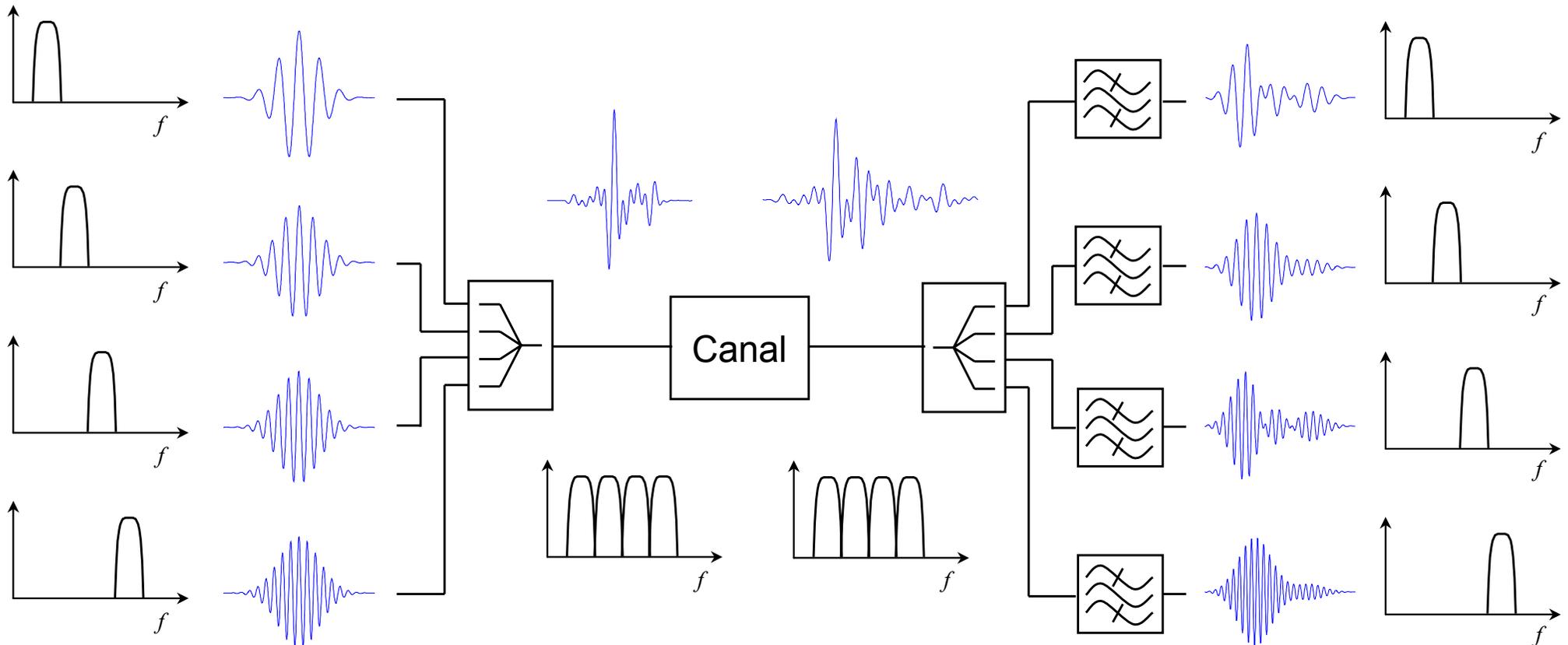
$$\int_0^T (h * s_i)(t) s_j(t) dt = 0, \quad \forall j \neq i, \quad \forall h$$

→ 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**



- **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

- **Densité de probabilité :** χ^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 :**

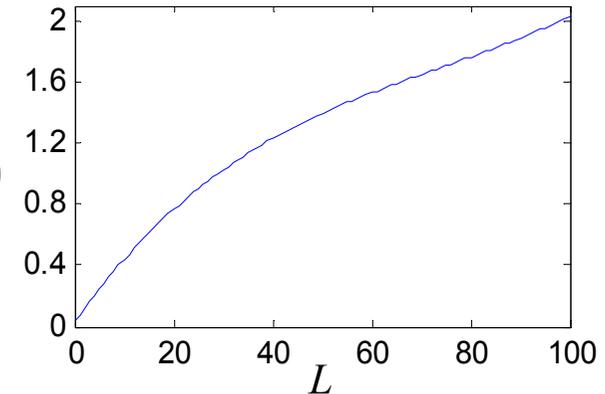
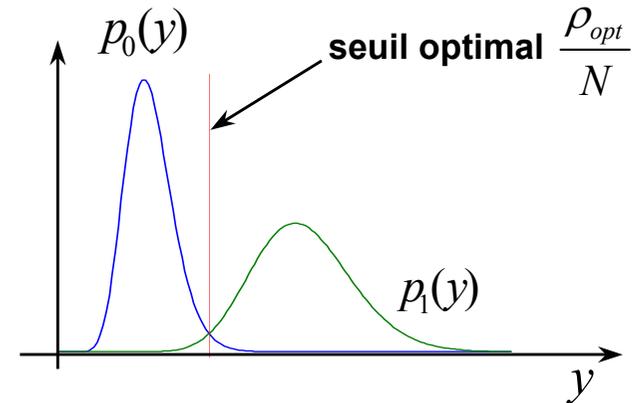
- $p_0\left(\frac{\rho_{opt}}{N}\right) = p_1\left(\frac{\rho_{opt}}{N}\right)$

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

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

et

$\phi(L)$



- 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

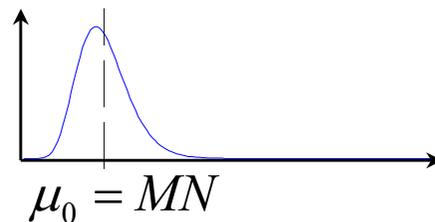
Estimation du canal

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

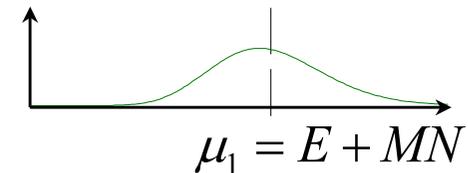
- **Estimation initiale pendant un préambule :**

- 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 :

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

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

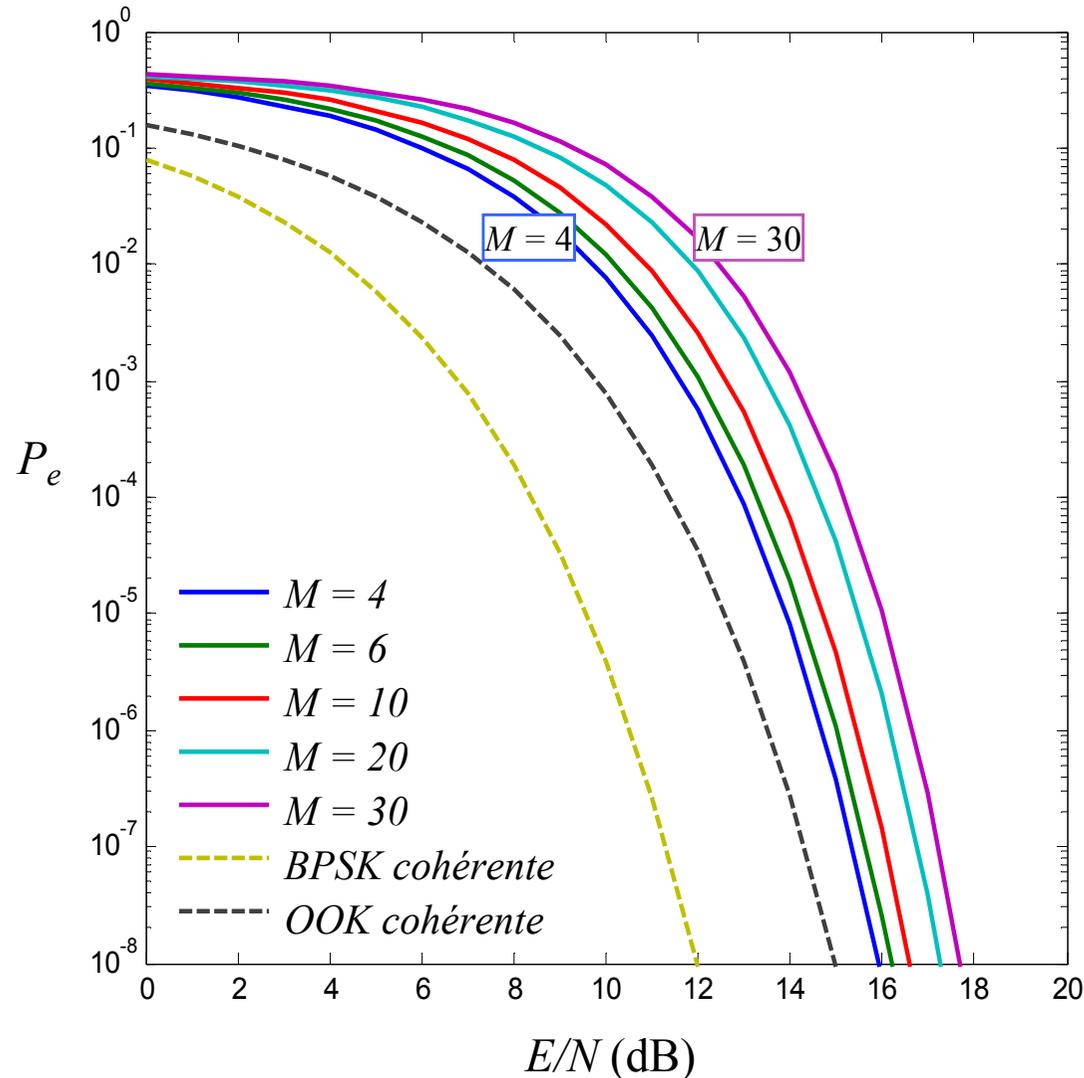
- **Estimation récursive pendant la démodulation :**

- 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

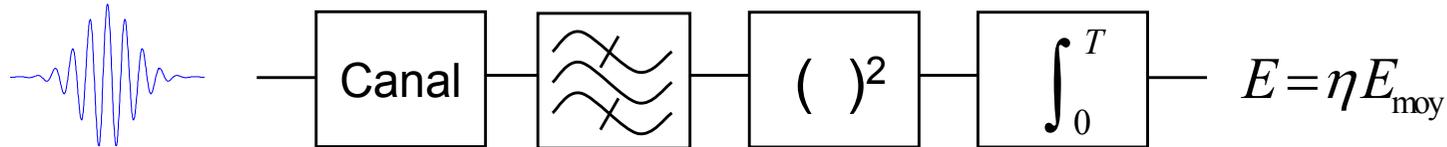
à l'inverse

Intégration quadratique :

→ Energie récupérée en quasi totalité

Performances moyennes

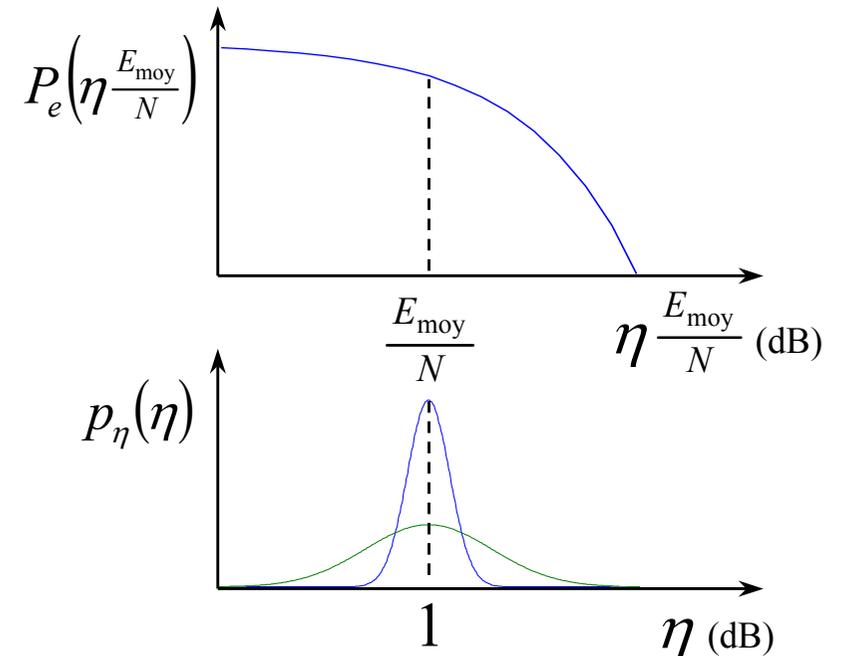
- **Energie récupérable E variable suivant les réalisations de canaux :**



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

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

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

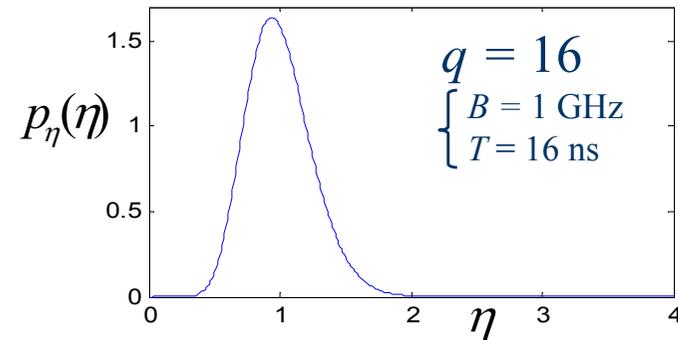
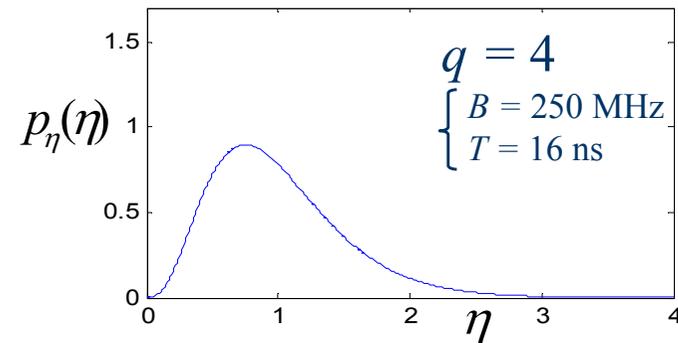
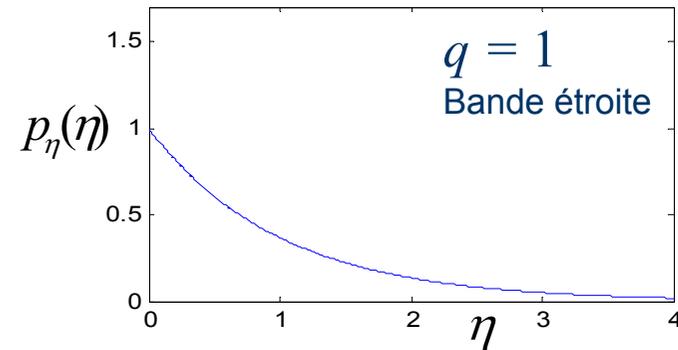


Performances moyennes

● Statistique du coefficient η

– 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

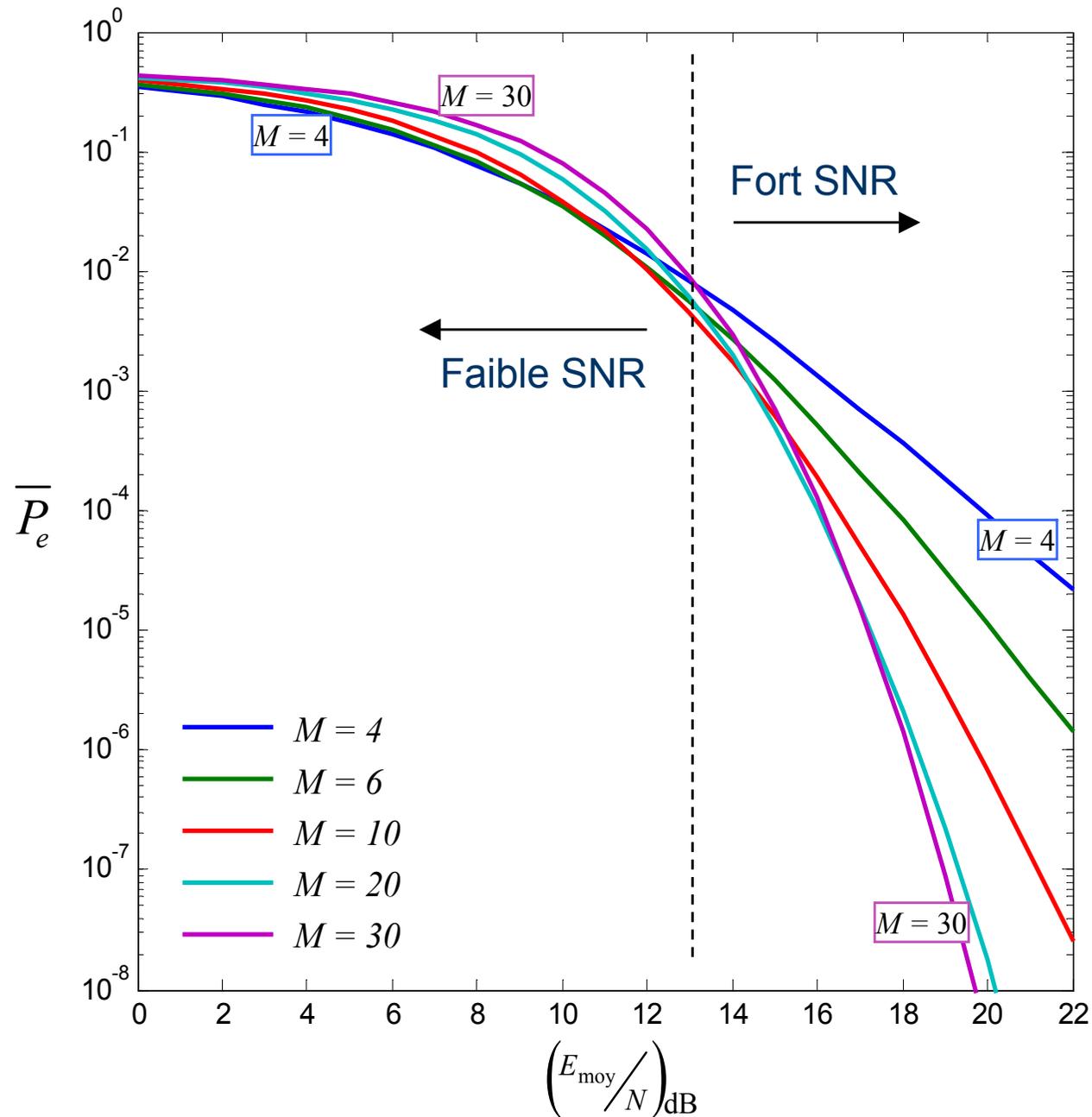
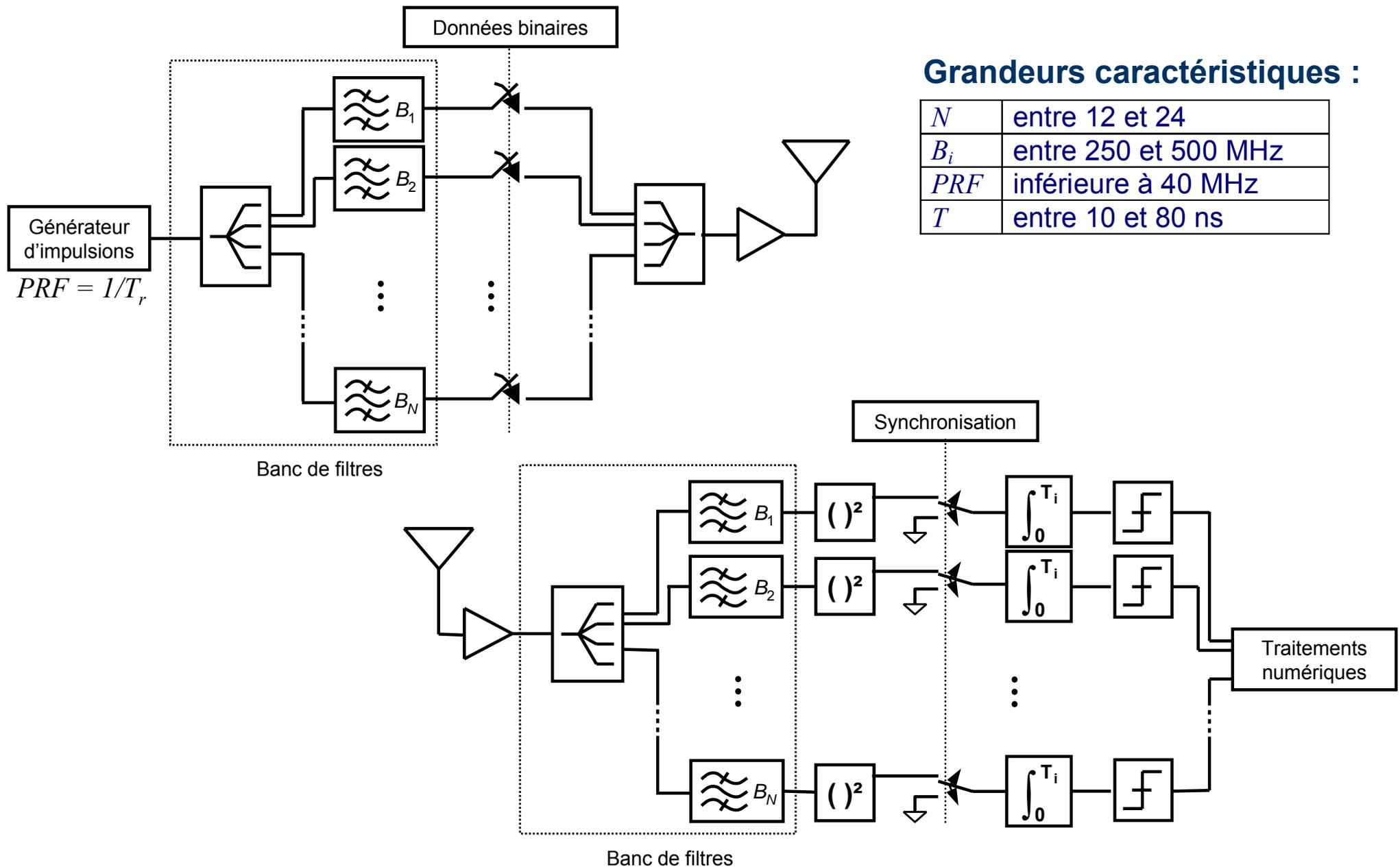


Schéma synoptique du système



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
- **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**

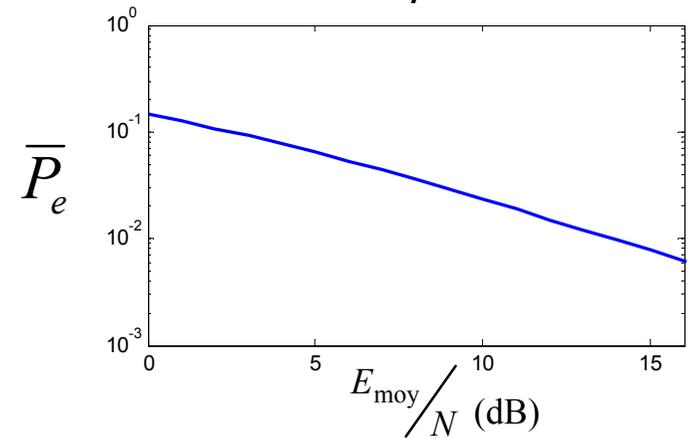
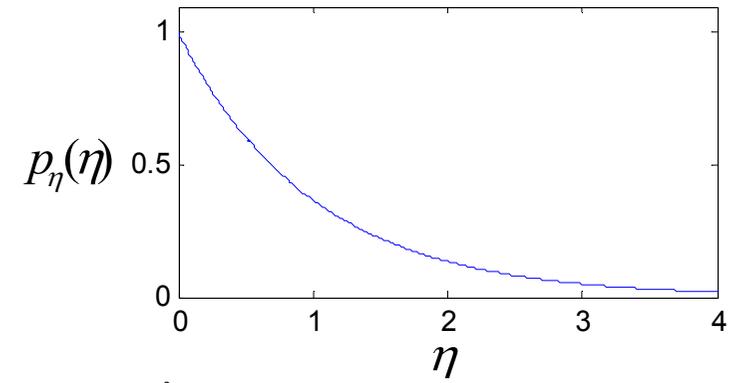
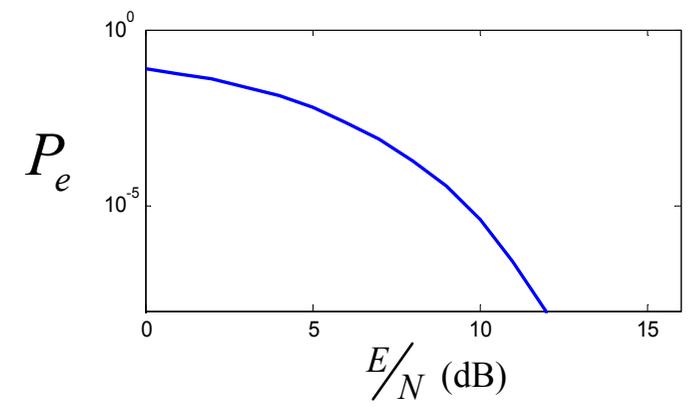
$$P_e = \frac{1}{2} \operatorname{erfc}\left(\sqrt{\frac{E}{N}}\right)$$

- **Fading de Rayleigh**

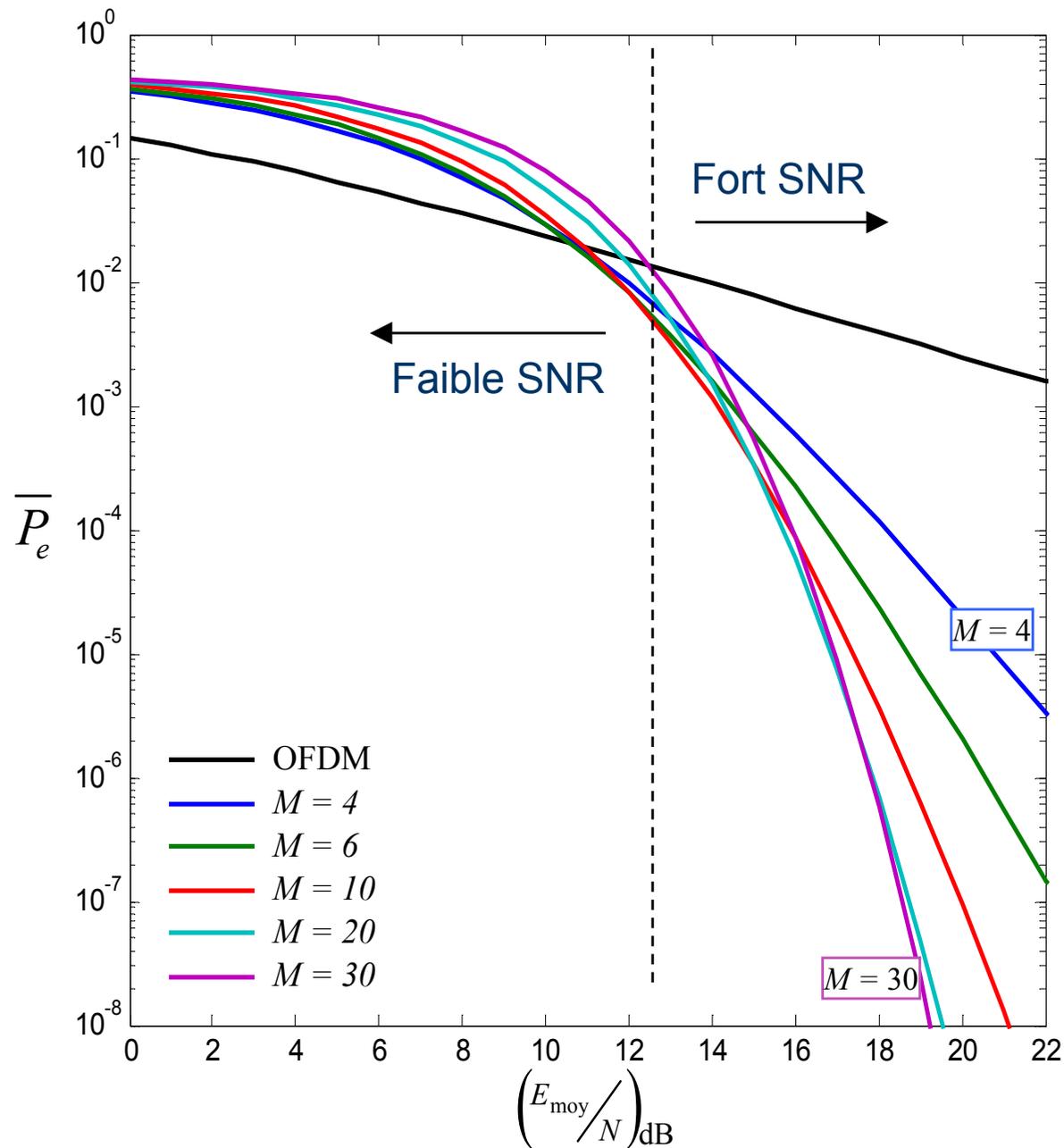
- $E = \eta E_{\text{moy}}$
 - Coefficient η suivant une loi exponentielle

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

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

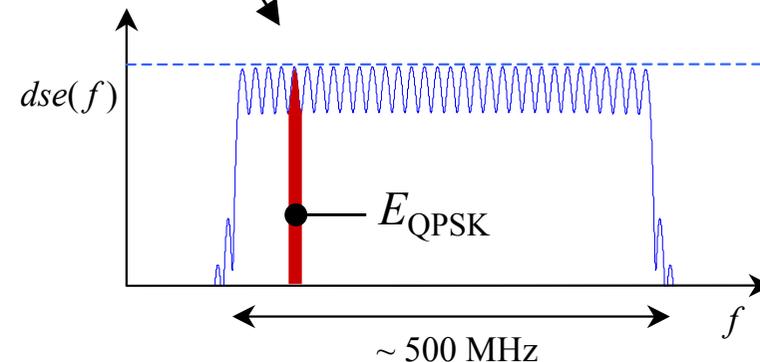
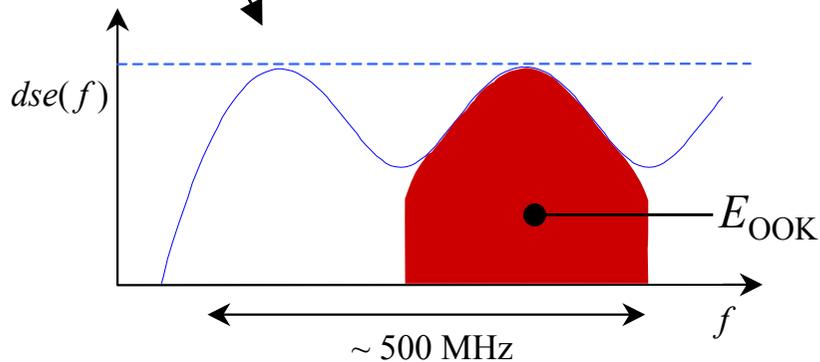
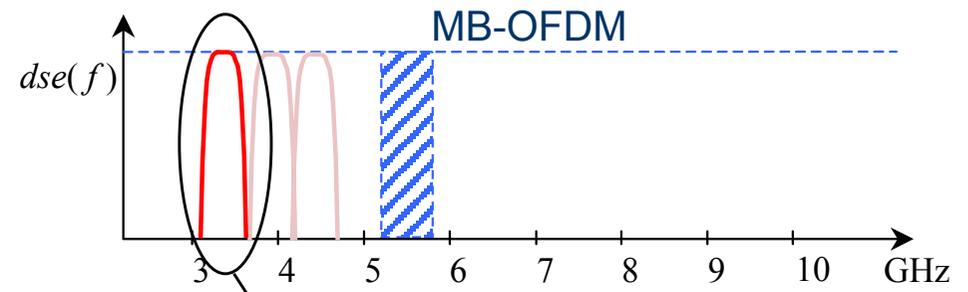
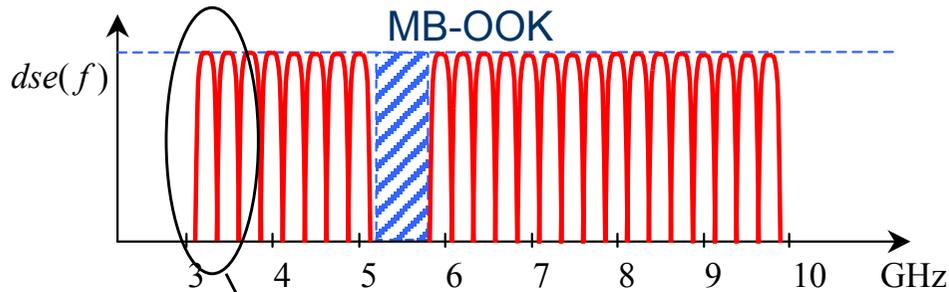


Comparaison à énergie reçue identique



Comparaison 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

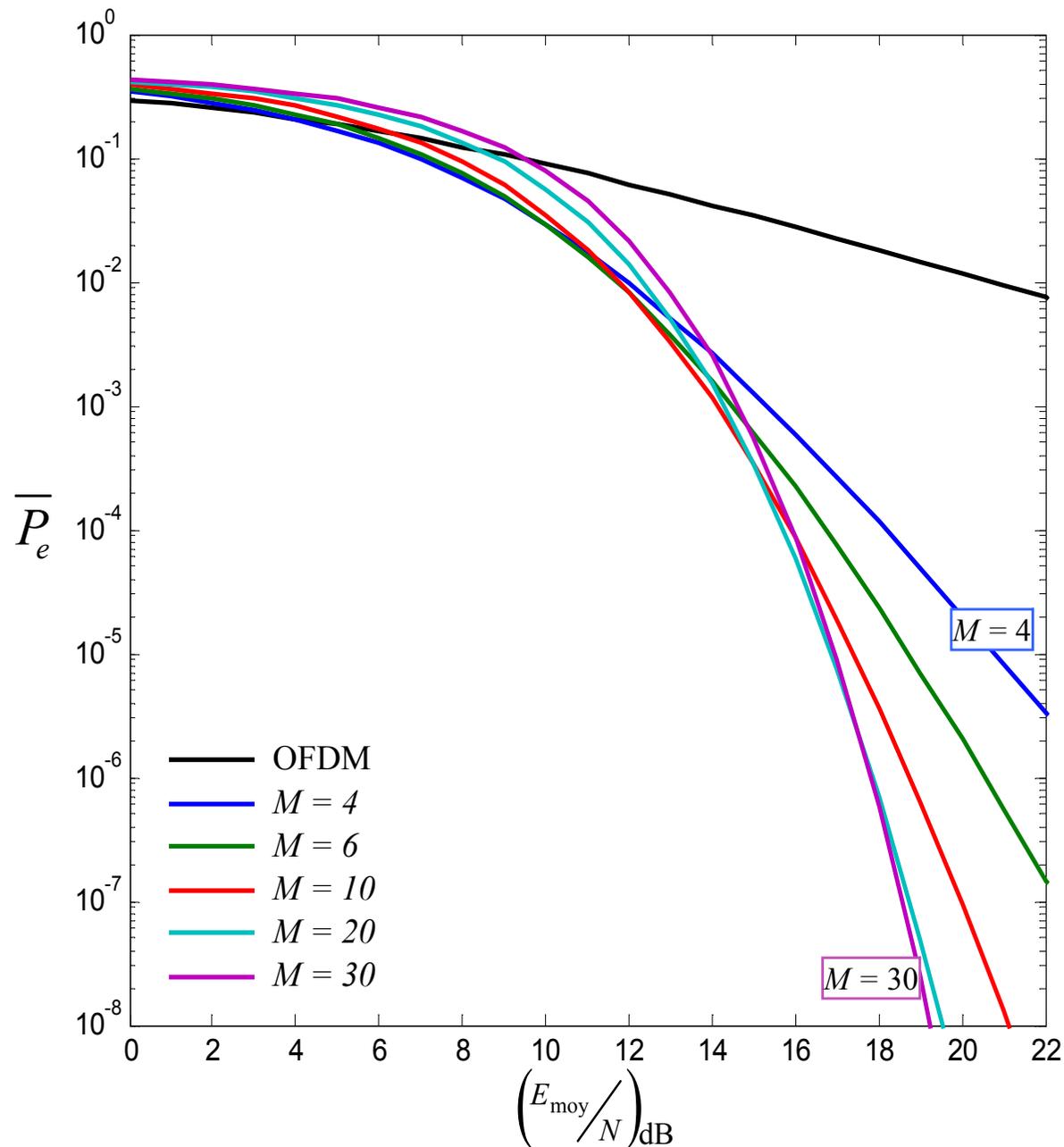
- Saut de fréquence sur 3 sous-bandes

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

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

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

Comparaison des performances en tenant compte des limitations FCC



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

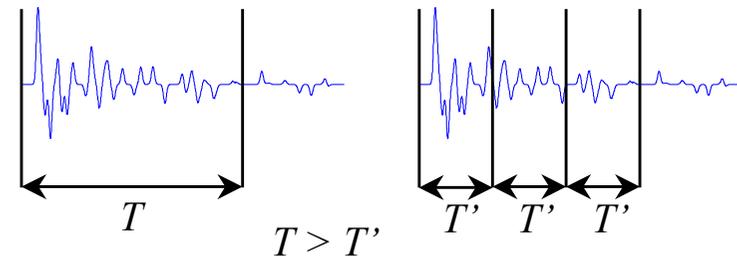
- **Système impulsionnel MB-OOK pour les hauts débits**
 - **Architecture multi-bandes**
 - Approche asynchrone - traitement non-cohérent quadratique
 - Modulation OOK
 - Démodulation par seuillage adapté dynamiquement aux conditions de propagation dans le canal
 - **Fonctionnement simple**
 - Estimation 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**

- **Éléments actifs du système**

