

## Chapitre 2

---

# Les réseaux Personnels sans fil (WPAN)

Prof. M. Bouziani

## Sommaire :

- ▶ Les standards et caractéristiques (IEEE802.15)
  - ▶ Bluetooth (IEEE 802.15.1)
  - ▶ Zig Bee (IEEE 802.15.4)
  - ▶ UWB (IEEE 802.15.3a)

## PAN : Qu'est ce que c'est que ?

**Les réseaux personnels ou PAN (Wireless Personal Area Networks) autorisent la communication et l'échange d'informations entre ordinateurs, assistants personnels (PDA), imprimantes, téléphones mobiles et autres dispositifs, dans un rayon limité (généralement quelques mètres). Les technologies PAN les plus répandues sont les connexions infrarouges et les modules Bluetooth à radiofréquences (dans la gamme de fréquences sans licence de 2,4 GHz).**

# 802.15

- **WPAN** (*Wireless Personal Area Network*)
  - Réseaux Locaux personnels sans fil
- Groupe IEEE 802.15 mis en place en 1994
- Trois groupes de services
  - Groupe A
    - Bande sans licence d'utilisation (ISM 2.4 GHz) Bas coût
    - Taille réduite
    - Faible consommation électrique Mode sans connexion
    - Cohabitation avec IEEE 802.11
    - 
    -

# 802.15

- Groupe B

- Utilisation couche MAC jusqu'à 100 Kbps
- Communications entre toutes les machines 16 machines
- au moins
- QoS (Qualité de service) Portée 10m min
- Temps de raccordement : 1s max Passerelles avec autres
- réseaux
- 

- Groupe C

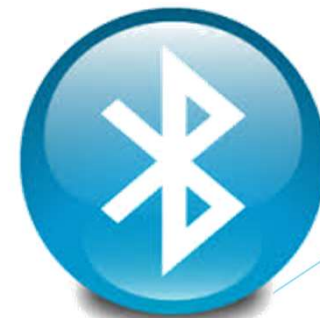
- Nouvelles fonctionnalités :
  - Sécurité des communications
  - Transmission vidéo
  - Itinérance vers un autre réseau WPAN

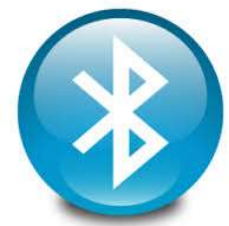
# 802.15

## □ Groupe IEEE 802.15 scindé en 4 sous-groupes

- IEEE 802.15.1
  - Pour satisfaire les contraintes des réseaux de catégorie C Bluetooth
  -
- IEEE 802.15.3
  - Pour satisfaire les contraintes des réseaux de catégorie B UWB (Ultra-Wide Band)
  - (très performant : ~1Gbit/s sur 10 m) IEEE 802.15.3a : Wireless USB
  -
- IEEE 802.15.4
  - Pour satisfaire les contraintes des réseaux de catégorie A ZigBee (très faible
  - coût et consommation, bas débit)
- IEEE 802.15.2
  - Pour gérer les interférences avec les autres réseaux utilisant la bande des 2.4 GHz

# Réseau Bluetooth





# Introduction

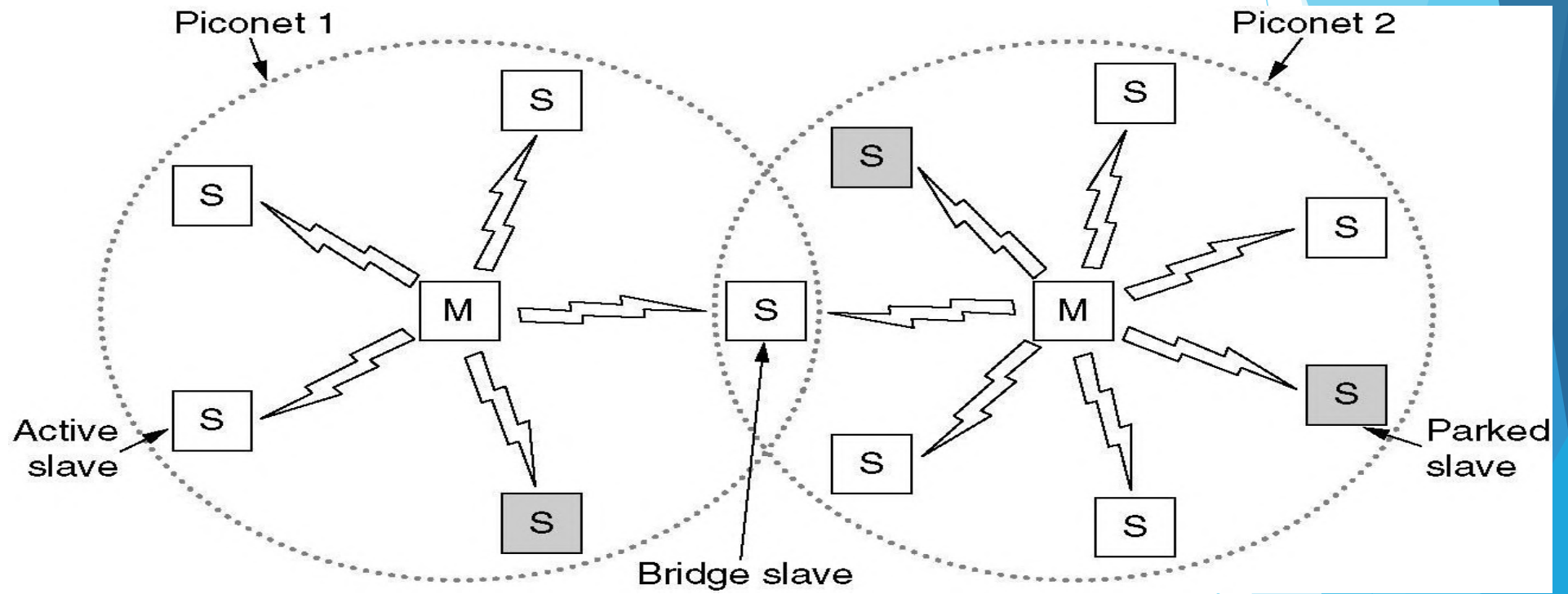
## Origines de Bluetooth:

Le nom «Bluetooth» a été choisi en l'honneur du roi danois " Harald Blaatand " qui signifie en français Harald à la dent bleue. Il a vécu en Scandinavie de 910 à 986 et a christianisé et uni la plus grande partie de cette région.

## Qu'est-ce que Bluetooth?

Bluetooth est une technologie de liaison sans fil, utilisant les ondes radio, sur une fréquence comprise entre 2.4 et 2.483 Ghz. Elle permet de relier tout type de périphérique comprenant une puce bluetooth, que ce soient des imprimantes, des modems, des disques durs externes, des congélateurs et même des télévisions... Les applications domotiques sont à venir!

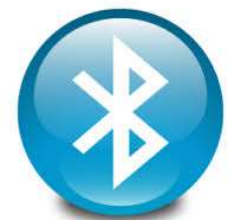
# Bluetooth Architecture



Deux piconets peuvent être connectés pour former un a scatternet

# Bluetooth Applications

<b>Name</b>	<b>Description</b>
Generic access	Procedures for link management
Service discovery	Protocol for discovering offered services
Serial port	Replacement for a serial port cable
Generic object exchange	Defines client-server relationship for object movement
LAN access	Protocol between a mobile computer and a fixed LAN
Dial-up networking	Allows a notebook computer to call via a mobile phone
Fax	Allows a mobile fax machine to talk to a mobile phone
Cordless telephony	Connects a handset and its local base station
Intercom	Digital walkie-talkie
Headset	Intended for hands-free voice communication
Object push	Provides a way to exchange simple objects
File transfer	Provides a more general file transfer facility
Synchronization	Permits a PDA to synchronize with another computer



# Principe de fonctionnement

**Bluetooth permet de transmettre et recevoir aussi bien des données que de la voix, simultanément ou séparément dans la bande de fréquence ISM (Industriel Médical et Scientifique) à 2.4GHz (plus précisément entre 2400 et 2483 MHz).**

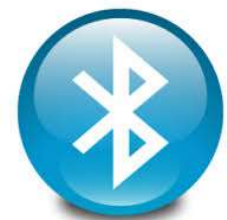
**Les transmissions sont sécurisées par :**

- Code d'authentification, de chiffrement et de correction d'erreur.**

**Des canaux de communication sont définis sur toute l'étendue de cette plage par tranches de 1 mégahertz.**

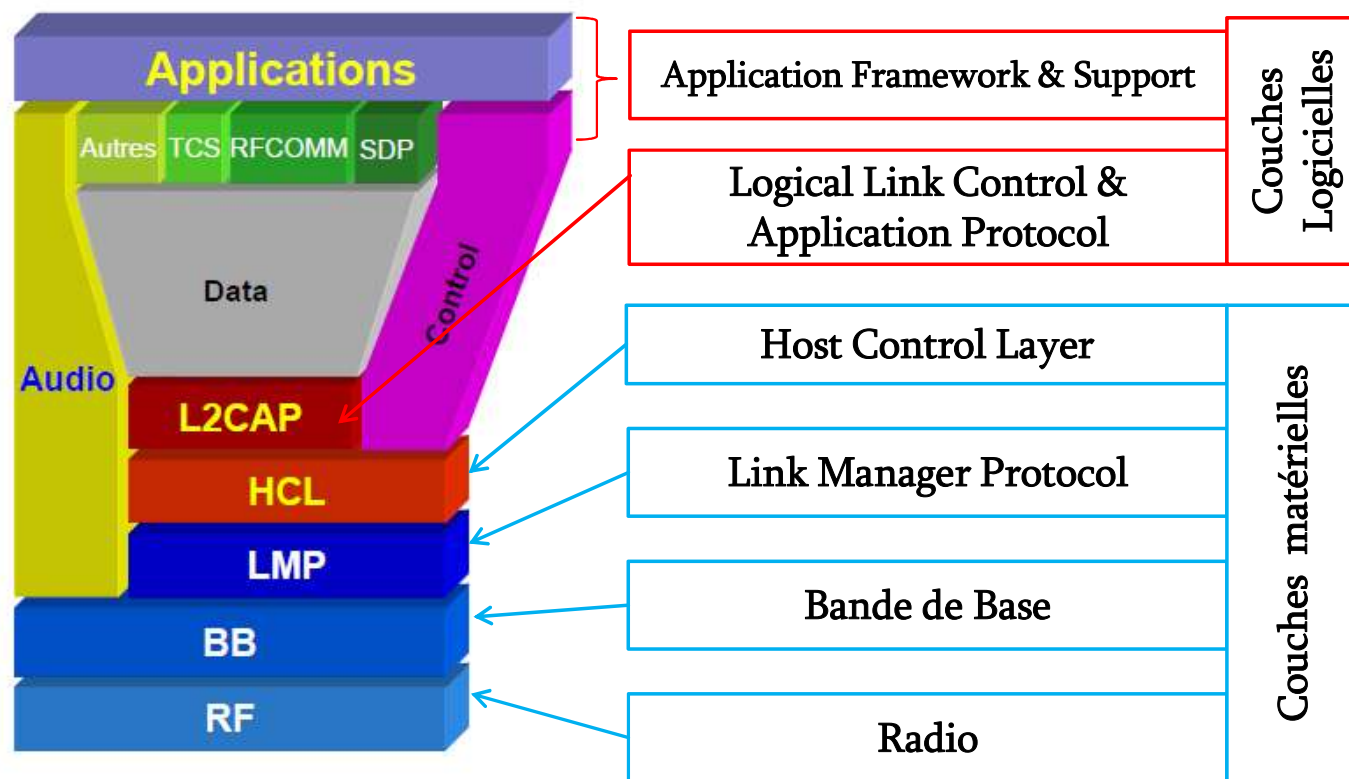
**Ceci fait donc environs 80 canaux distincts.**

**Le changement de fréquence est également appelé saut de fréquence (frequence hopping). Ces sauts de fréquence ont lieux 1600 fois par secondes. Entre chaque saut de fréquence, on trouve des plages de quelques micro secondes durant lesquelles des paquets peuvent êtres envoyés. Ces plages sont appelées " slots ".**

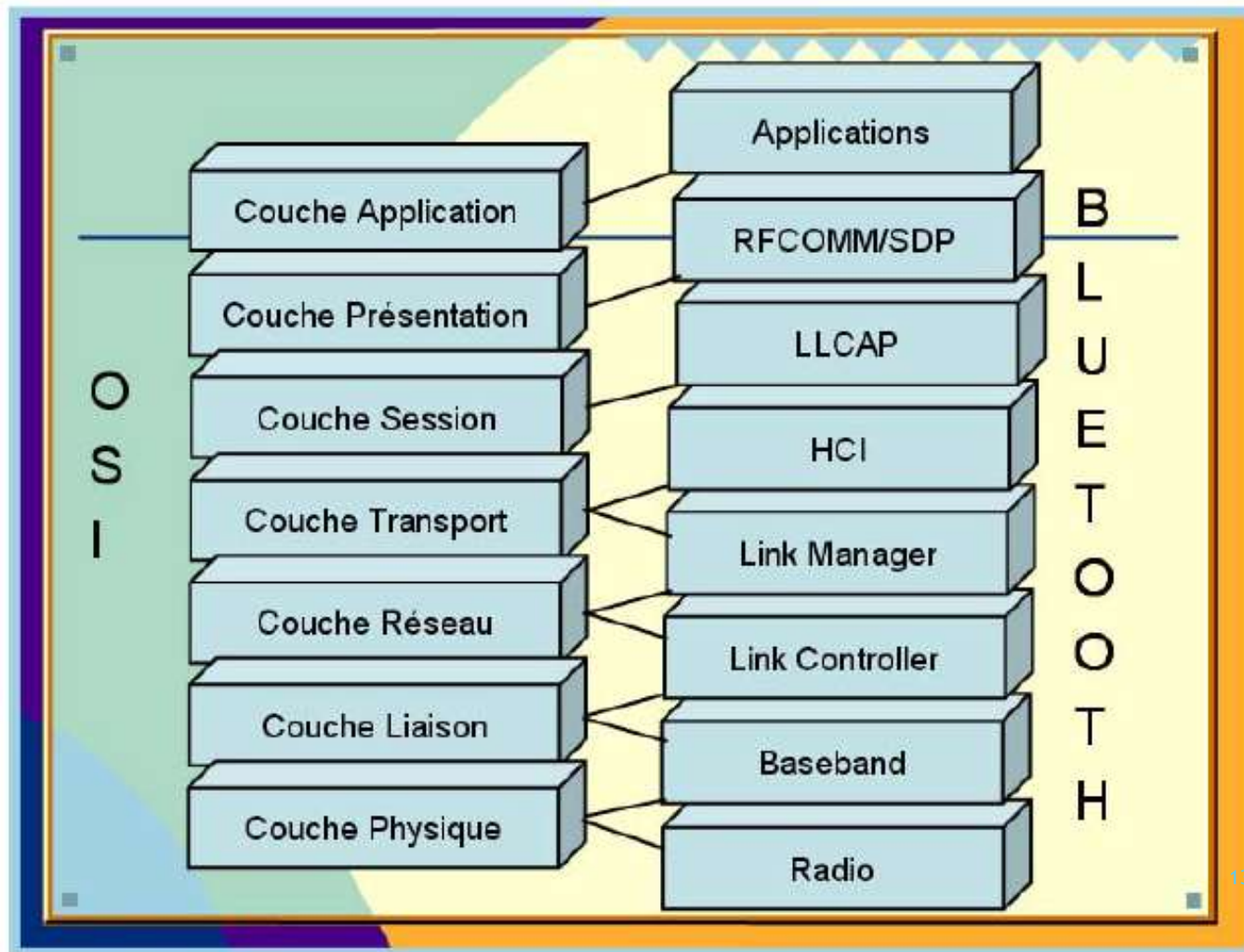


# Architecture du Bluetooth

## Architecture interne :



## Pile Protocolaire : Différente du modèle OSI ?

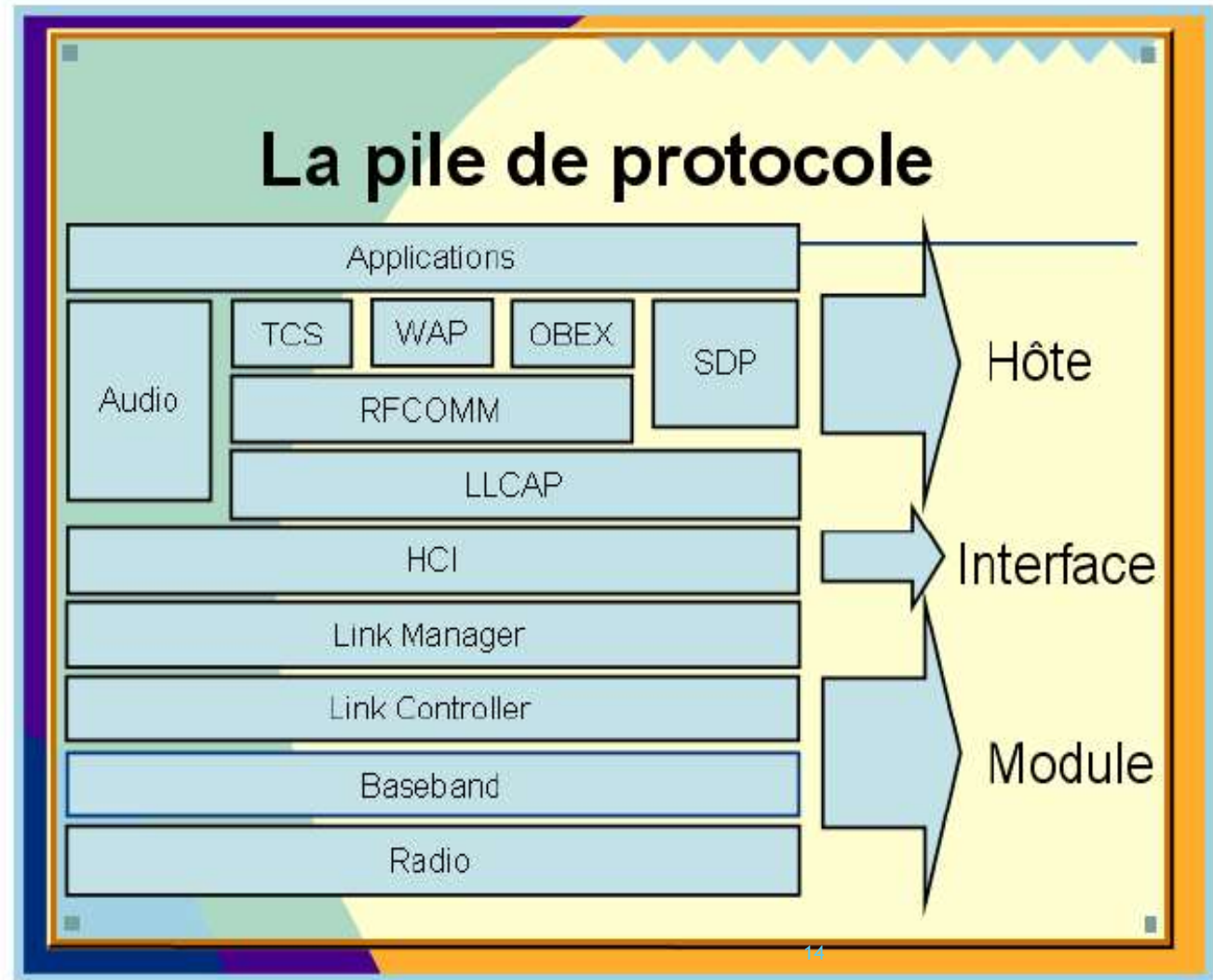


# La Pile de Protocoles

Pile de protocoles en deux couches :

- Couche Applicative (Hôte),
- Couche Physique (Module).

le HCI (Host Interface Controller) qui fera le lien entre le matériel et le logiciel.



# Couche physique

Les éléments fondamentaux d'un produit Bluetooth sont définis dans les deux premières couches protocolaires, la couche radio et la couche bande de base. Ces couches prennent en charge les tâches matérielles comme le contrôle du saut de fréquence et la synchronisation des horloges.



## La couche Radio Fréquence

La couche radio (la couche la plus basse) s'occupe de l'émission et de la réception des ondes radio. Elle définit les caractéristiques telles que la bande de fréquence et l'arrangement des canaux, les caractéristiques du transmetteur, de la modulation, du receveur, etc.

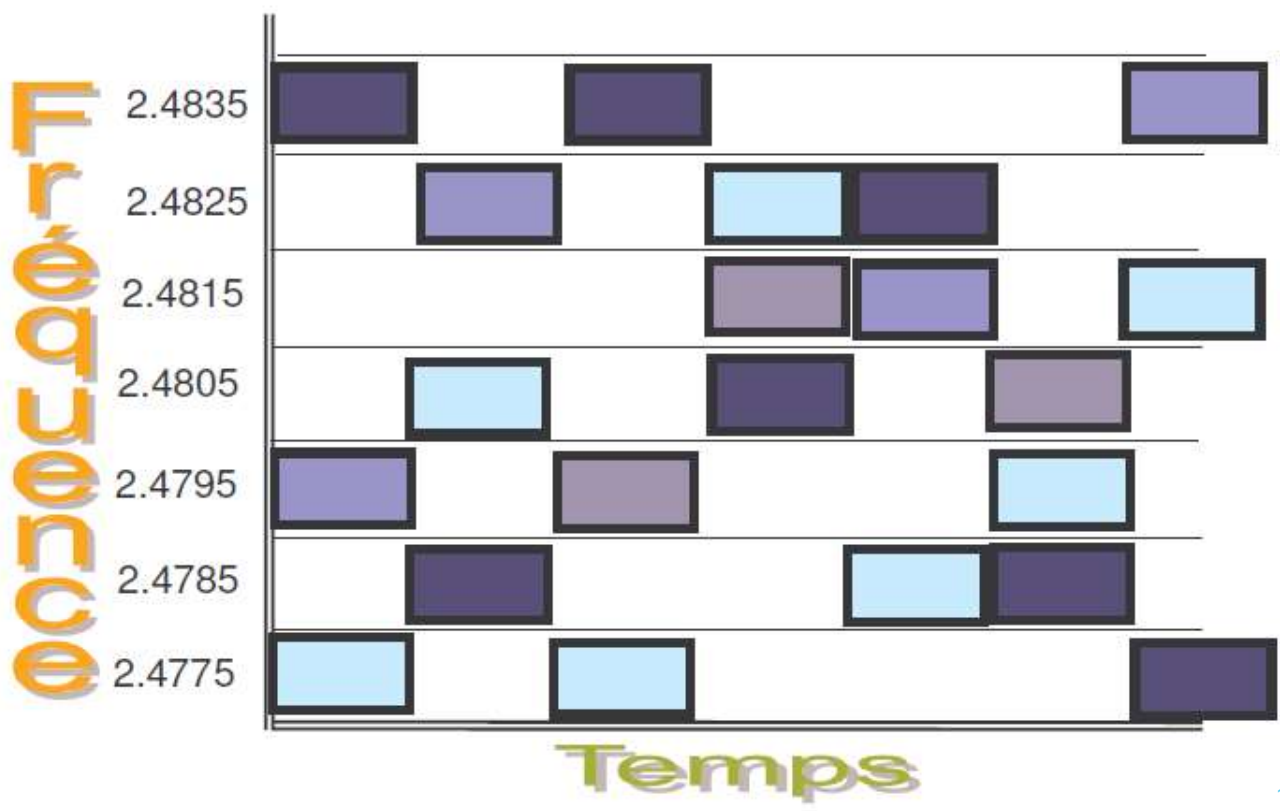
- commutation rapide entre plusieurs canaux de fréquence en utilisant FHSS ( Séquence pseudo aléatoire connue par l'émetteur et le récepteur pour la synchronisation)

# FHSS

Emetteur 1

Emetteur 2

Emetteur 3



## La couche bande de base (Baseband)

C'est au niveau de la bande de base que sont définies les adresses matérielles des périphériques Bluetooth (équivalent à l'adresse MAC d'une carte réseau). Cette adresse est nommée BD\_ADDR (Bluetooth Device Address) et est codée sur 48 bits. Ces adresses sont gérées par la IEEE Registration Authority.

Les connexions établies entre deux appareils Bluetooth peuvent être synchrones ou asynchrones. La bande de base peut donc gérer deux liens de connexions :

- Les liaisons SCO (Synchronous Connection-Oriented) ;
- Les liaisons ACL (Asynchronous Connection-Less) ;

## Les connexions SCO : Synchronous Connection-Oriented

Ce type de connexion permet une transmission bidirectionnelle. Une connexion SCO fonctionne en mode "Temps réel", c'est-à-dire qu'il n'y a pas de retransmission possible. C'est ce type de connexion qui est utilisé pour la transmission de la voix.

Bluetooth utilise dans ce cas des créneaux réservés afin de réduire au maximum le délai. Il est alors possible d'atteindre un débit de 64Kb/s, sachant qu'un maître peut gérer jusqu'à 3 liens de ce type.

## Les connexions ACL : Asynchronous Connection-Less

C'est ce type de connexion qui est utilisé pour échanger des données. Avec les connexion ACL, il est possible d'effectuer un broadcast et d'obtenir des débits de 723.2 Kbps en sortie et un débit de 57.6 Kb/s en entrée.

# Paquet Bluetooth

## Les liaisons de base.

Ce type de liaison est utilisé pour la gestion des connexions au sein du réseau bluetooth (piconet).

# TRANSMISSION PAR PAQUETS

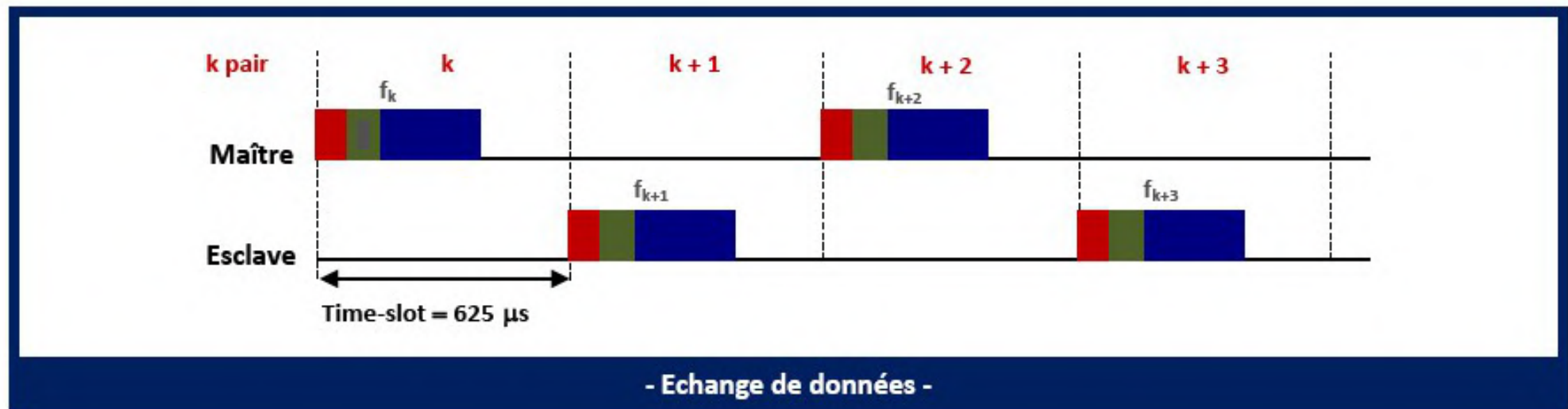
Les données sont transmises par paquet. Chaque paquet est constitué des informations suivantes :



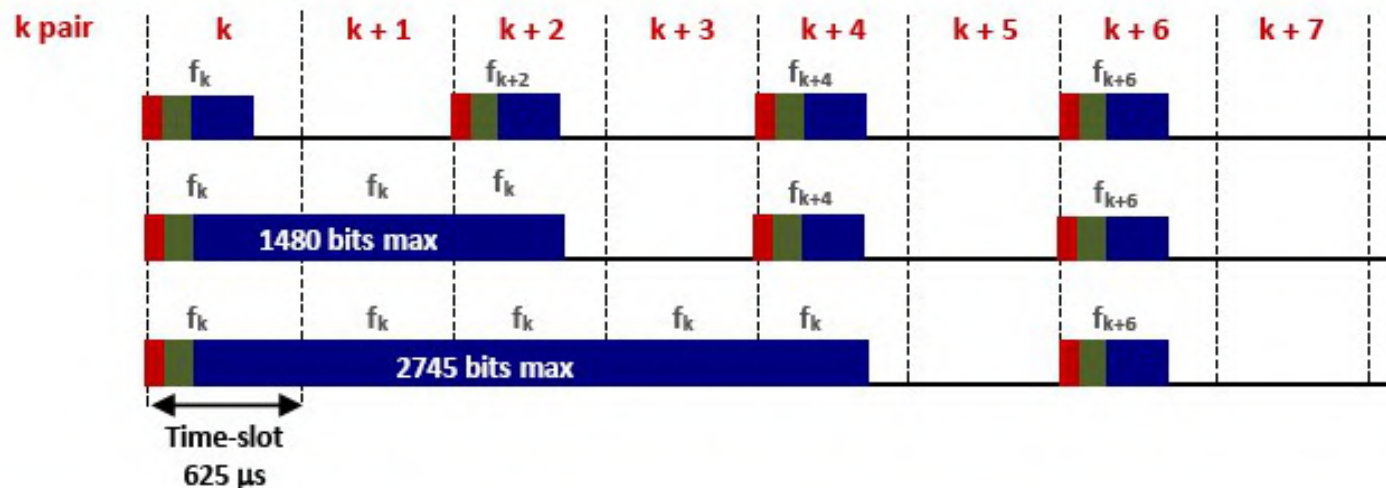
<b>Code d'accès</b>	<b>72 bits</b>	Chaque paquet débute par un code d'accès composé du code de canal ou <b>CAC</b> (Chanel Access Code) propre à un « piconet », du code de composant ou <b>DAC</b> (Device Access Code) et du code de recherche ou <b>IAC</b> (Inquiry Access Code) si le maître recherche d'autres équipements Bluetooth du « piconet »
<b>En-tête</b>	<b>54 bits</b>	Ce champ contient dans l'ordre l'adresse de l'esclave (codée sur 3 bits), le type de paquet et des bits de contrôle (erreurs, buffer de réception ...)
<b>Donnée</b>	<b>240 bits max</b>	La taille de la donnée est variable et peut aller jusqu'à 240 bits

Les échanges de données sont régis par les règles suivantes :

- le **choix des fréquences** se fait selon une séquence **pseudo-aléatoire** définie par le **maître** ;
- le maître émet dans les **time-slots pairs** et l'esclave dans les **time-slots impair** ;
- les time-slots sont numérotés par le maître de  $k = 0$  jusqu'à  $k = 2^{27} - 1$ .



Il est possible de transmettre des **paquets de données courts** (1 time-slot, 240 bits au maximum), **moyens** (3 time-slot, 1480 bits max) ou **longs** (5 time-slot, 2745 bits max). Dans les 2 derniers cas le saut de fréquence ne se fait pas à la fin du time-slot, mais après transmission du paquet complet.



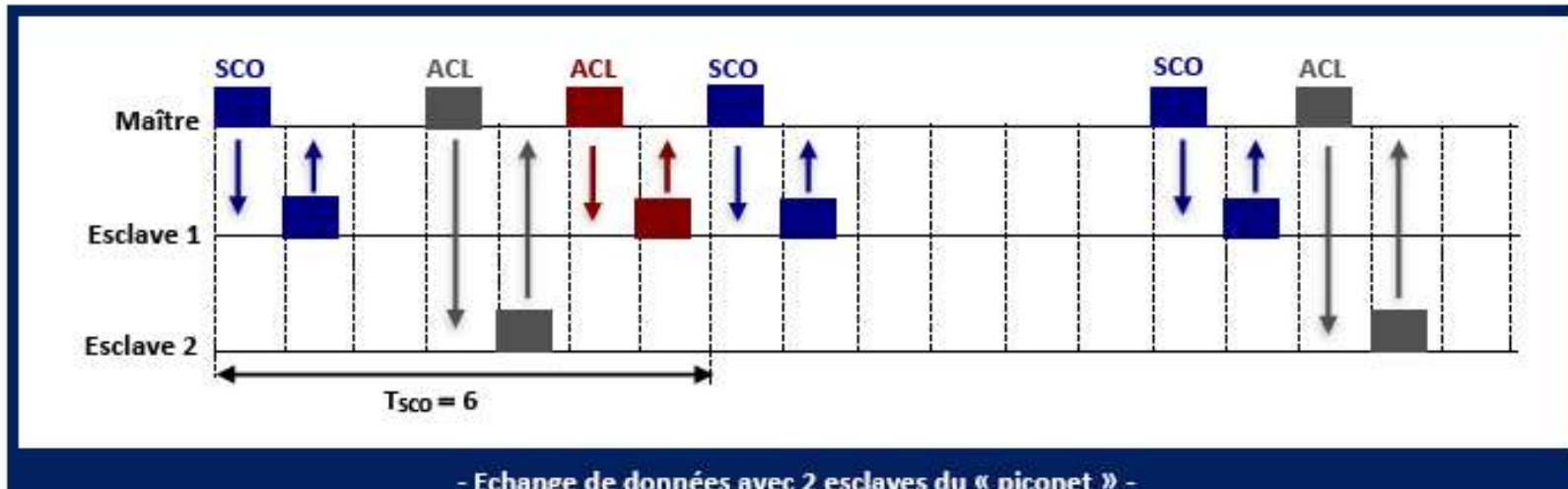
- Echange de paquets de tailles différentes -

<b>Code d'accès</b> 72 bits	<b>Entête</b> 54 bits	<b>Données</b> 0 à 2745 bits
--------------------------------	--------------------------	---------------------------------

Deux types de connexions peuvent être mises en place entre le maître et l'esclave :

- **Connexion synchrone** ou **SCO (Synchronous Connection Oriented)** : il s'agit d'une connexion **point à point** entre le maître et un esclave du « piconet ». Ce type de connexion **réserve des slots** par le paramètre  $T_{SCO}$  (intervalle entre deux slots réservés). Ce type de connexion est utilisée notamment pour **transmettre la voix** car le débit est garanti. L'esclave répond lors du time-slot suivant le time-slot de réception. Il n'y a pas de renvoi en cas d'erreur de transmission.
- **Connexion asynchrone** ou **ACL (Asynchronous Connection Less)** : Cette connexion utilise les slots non réservés par un lien synchrone. L'esclave répond dans le time-slot suivant le time-slot de réception. Il y renvoi en cas d'erreur de transmission. Les paquets ACL «broadcast »seront lus par tous les esclaves

**Exemple** : Le maître échange des données avec 2 esclaves du « piconet ». Avec l'esclave 1 : une connexion synchrone SCO pour une communication vocale et une communication asynchrone ACL pour les données. Avec l'esclave 2 un lien asynchrone ACL pour des données. Pour la connexion le maître envoie les données tous les 6 time-slots ( $T_{SCO} = 6$ ).



# MISE EN PLACE D'UNE CONNEXION

Les modules Bluetooth entrent en liaison de la façon suivante :

- ils sont au départ en **mode « Standby »** (attente) et cherchent toutes les **1,28 s** la **présence de transmissions** à proximité en écoutant successivement 32 «porteuces d'éveil » parmi les 79 canaux disponibles ;
- le module Bluetooth qui souhaite communiquer **envoie des requêtes**, en **mode Inquiry** si les adresses sont inconnues et en **mode Page** si elles sont connues. Il devient alors le maître du piconet, et son adresse définit la suite des sauts en fréquence suivie par les esclaves ;

- les autres modules (esclaves) se **synchronisent sur l'horloge du maître**, et répondent avec leur **numéro d'identification**. Le maître sait maintenant quels sont les modules présents, connaît leur adresse respectives et peut sélectionner le dispositif qui l'intéresse ;
- s'il veut échanger des données, le maître passe en **mode d'appel** et définit avec le module esclave visé le type et les caractéristiques de la liaison qu'il veut mettre en place ;
- la liaison **sera établie** (état : **connected**) au bout de **0,6 s**, et la transmission de donnée (**Transmit Data**) peut débuter.

Après l'échange de données, le module peut retourner en mode d'attente ou adopter l'un des trois états suivants permettant de réduire la consommation :

- **Mode de maintien (Hold)** dans lequel l'appareil reste actif dans le « piconet ». Dans ce mode un temporisateur interne est mis en place. Lorsque le délai de temporisation vient à expiration, l'esclave s'annonce brièvement au maître avant de recommencer le compte à rebours.
- **Mode «renifleur» (Sniff)**, l'esclave est programmé pour se **mettre périodiquement à l'écoute** sur le « piconet » afin de déterminer si ce dernier un maître désire lui envoyer des données.
- **Mode parcage d'esclaves (Park)** : l'esclave se **retire temporairement** du « piconet » et se resynchronise périodiquement sur le maître.

# Topologies Bluetooth

Les liaisons de base gérées par la couche bande de base permettent de gérer les connexions au sein d'un réseau Bluetooth (PICONET SCATTERNET)

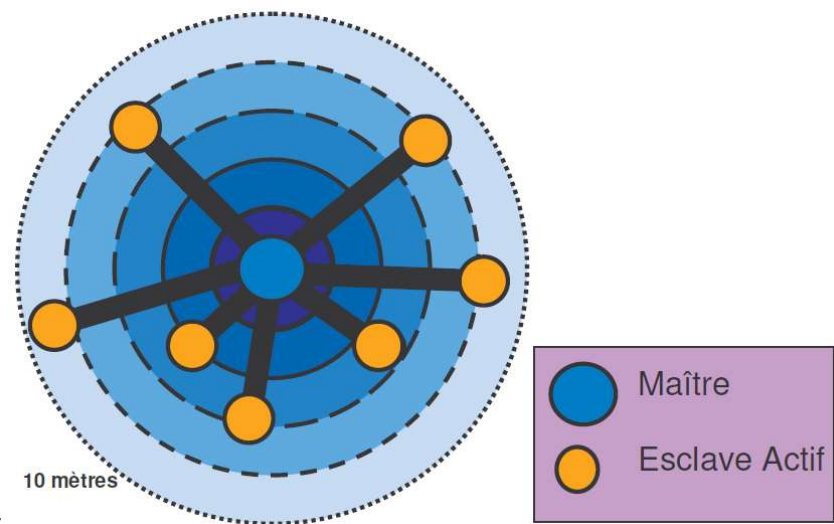
## Piconet

Un piconet est un réseau qui se crée de manière instantanée et automatique quand plusieurs périphériques Bluetooth sont dans un même rayon (10 m).

Ce réseau suit une topologie en étoile : 1 maître / plusieurs esclaves. Un périphérique maître peut administrer jusqu'à 7 esclaves actifs ou 255 esclaves en mode parked (=inactif).

La communication est directe entre le maître et un esclave. Les esclaves ne peuvent pas communiquer entre eux.

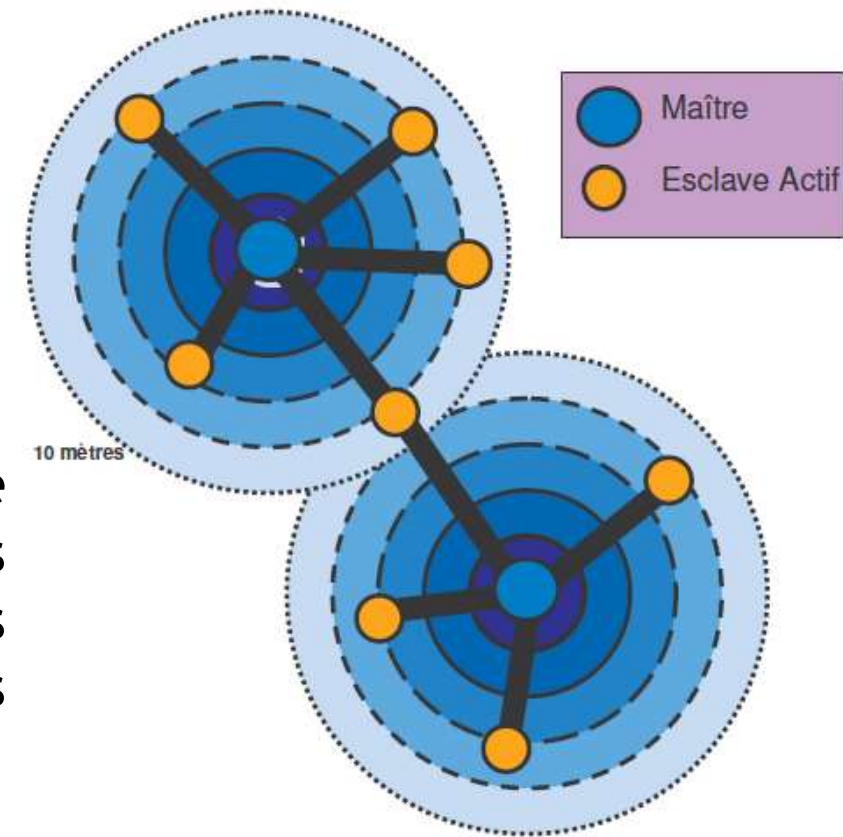
Tous les esclaves du piconet sont synchronisés sur l'horloge du maître. C'est le maître qui détermine la fréquence de saut de fréquence pour tout le piconet.



# Topologies Bluetooth

## Scatternet

Les Scatternets sont en fait des interconnexions de Piconets (Scatter = dispersion). Ces interconnexions sont possibles car les périphériques esclaves peuvent avoir plusieurs maîtres, les différents piconets peuvent donc être reliés entre eux.



## La couche Link Manager

Cette couche gère la supervision des différentes connexions, de l'authentification des appareils, et du chiffrement. Elle gère également les mises en veille des différents appareils. Ce gestionnaire de liaisons qui implémente les mécanismes de sécurité comme :

- ▶ - l'authentification,
- ▶ - le pairage,
- ▶ - la création et la modification des clés,
- ▶ - le cryptage.

## La couche L2CAP (Link Layer Control & Adaptation)

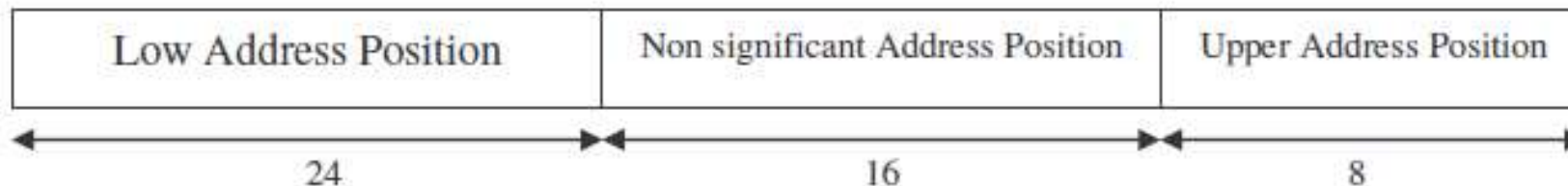
Cette couche permet l'adaptation des protocoles supérieurs au réseau Bluetooth. Elle comporte un mécanisme permettant d'identifier le protocole de chaque paquet envoyé pour permettre à l'appareil distant de passer le paquet au bon protocole, une fois celui-ci récupéré.

Cette couche supporte la segmentation et le réassemblage, et le multiplexage de protocole

# Accès au Medium

## Les différents types d'adresses des dispositifs

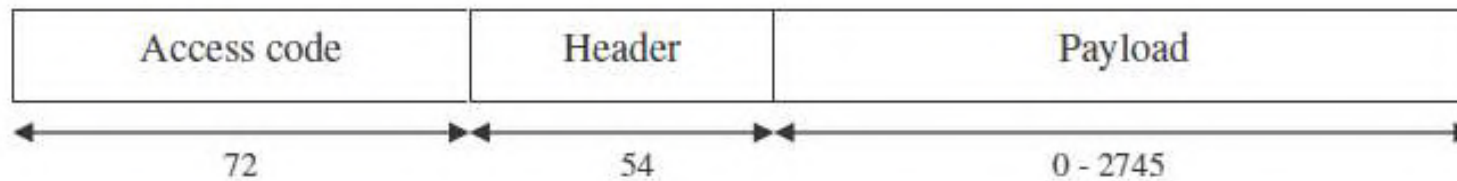
- **DBA (ou DB\_ADDR)** : « Bluetooth Address Device » est une adresse unique pour chaque équipement Bluetooth. C'est l'équivalent de l'adresse MAC d'une carte réseaux. Elle est codée sur 48 bits comme montre le schéma ci-dessous :



- **AMA (ou AM\_ADDR)** : « Active Member Address » est l'adresse d'un esclave dans le piconet. Elle est codée sur 3 bits dont l'adresse « 000 » est réservée pour le broadcast. Il peut donc avoir 7 esclaves au maximum dans un piconet.
- **PMA (ou PM\_ADDR)** : « Parked Member Address » est l'adresse d'un esclave lorsqu'il se trouve à l'état parké. Elle est codée sur 8 bits, donc il ne peut y avoir que 255 esclaves parkés au maximum.
- **ARA (ou AR\_ADDR)** : « Access Request Address » est l'adresse de demande d'accès utilisé par les esclaves parkés. Cette adresse n'est pas nécessairement unique.

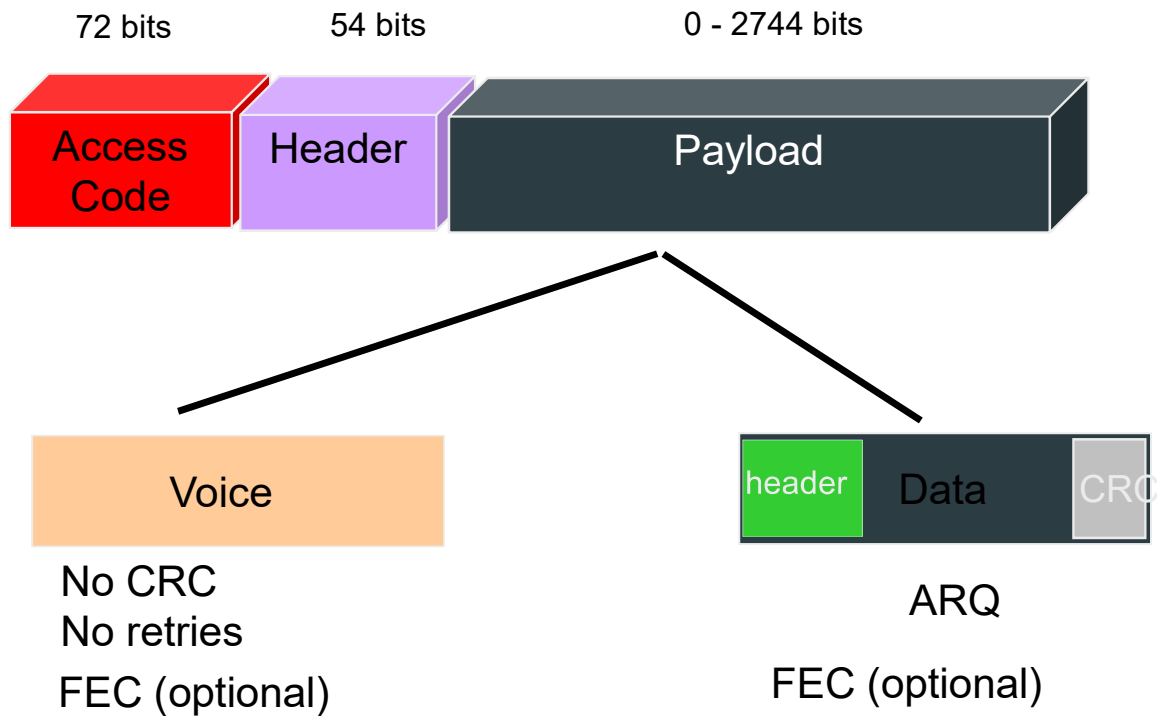
# Format du paquet bluetooth

## Structure

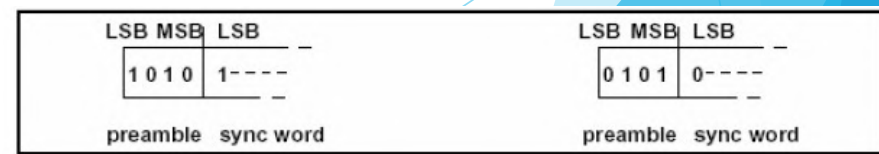
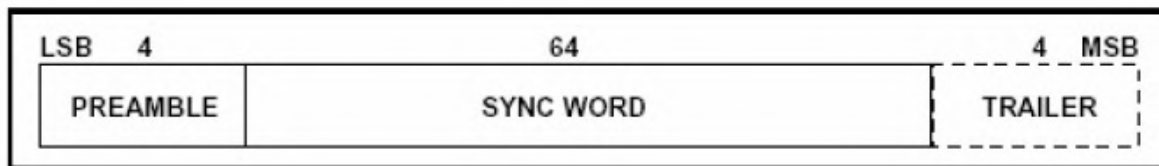


Le paquet bluetooth est composé de trois différentes parties :

- « **Access code** » (68/72 bits) : Il identifie le piconet maître et il est utilisé pour la synchronisation, le « paging » et la recherche. Il y a trois types de code d'accès :
  - o *CAC (Channel Access Code)* : Ce code de canal est identifié un unique piconet.
  - o *DAC (Device Access Code)* : Le code de composant est utilisé durant pagination (« page » et « page scan ») et ses réponses. Ce code dérive de la BDA..
  - o *IAC (Inquiry Access Code)* : Ce code est utilisé dans les procédures de recherche de composant. Il y a deux type de IAC :
    - *GIAC (Generic IAC)* : Utilisé par défaut pour rechercher tous les périphériques Bluetooth dans la zone. (0x9E8B33)
    - *DIAC (Dedicated IAC)* : Utilisé pour rechercher un type spécifique de composant.

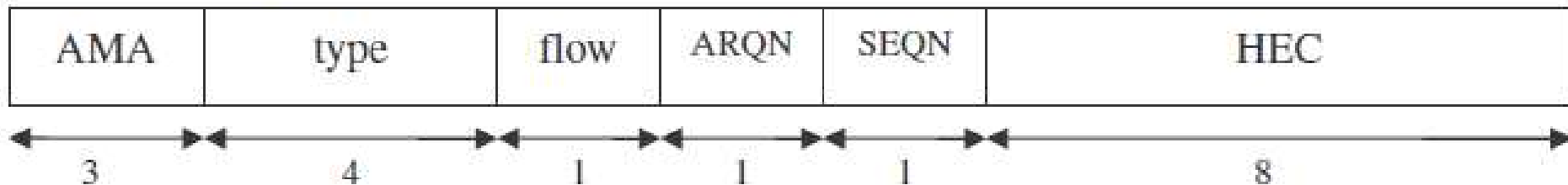


**Access Code : 68/72**



## Format du paquet Bluetooth

- « **Header** » (54 bits) : L'entête est codé sur 54 bits. Il s'agit en fait d'une séquence de 18 bits répétés trois fois. Cette séquence est composée de six champs :



- *AMA (3 bits)* : L'adresse active de l'esclave. 0 pour le broadcast et 1 à 6 pour le périphérique.
  - *Type (4 bits)* : SCO, ACL, NULL, POLL / type de FEC / durée du payload
  - *Flow (1 bit)* : Contrôle de flow pour signaler que la mémoire tampon est pleine
  - *ARQN (1 bit)* : Indication de l'acquittement (ACK)
  - *SEQN (1 bit)* : Numéro de séquence
  - *HEC (8 bits)* : « Header Error Control »
- « **Payload** » : Données binaires utiles avec une zone de contrôle d'erreur de 16 bits.

# Contrôle d'Erreur

## ➤ FEC :

Les données peuvent être protégées par le code de correcteur d'erreur FEC (Forward Error Correction) :

- Le code FEC 2/3 nécessite 3 bits pour en protéger 2. (ex : 160b utiles pour 240b)
- Le code FEC 1/3 nécessite 3 bits pour en protéger 1. (ex. 80b utiles pour 240b)

Il s'agit d'un codage avec répétition de bits. Chaque en-tête d'un est toujours protégé par un FEC car elle est composée d'une séquence de 18 bits répétés 3 fois.

Cette protection réduit donc le débit utile mais, en contre partie, il permet la correction des paquets en erreur sur la liaison.

## ➤ CRC :

Pour les données, il s'ajoute au FEC une détection d'erreur CRC (Cyclic Redundancy Check) qui permet au récepteur de détecter les paquets en erreurs. Si le paquet est corrompu, le CRC peut demander un ARQ (Automatic Repeat Request) pour lui redemander ce paquet.

# Automatic Repeat Request

Dans le protocole ARQ, les paquets sont retransmis jusqu'à ce qu'un acquittement soit reçu (ou le dépassement du délai de temps). Bluetooth emploie une confirmation rapide et non numérotée dans laquelle il emploie des confirmations positives et négatives en plaçant les valeurs appropriées dans l'en-tête. Si le délai de temps est dépassé, le paquet est perdu et la transmission est poursuivie avec la suite des paquets.

Dans la pratique,

- ARQN = 1 si paquet précédent bien reçu et SEQN=SEQN+1 (SEQN = NOT SEQN)
- ARQN=0 si paquet précédent pas bien reçu. Cela arrive dans les cas suivants :
  - o Le maître ne détecte pas le code d'accès. (paquet perdu)
  - o HEC échoue
  - o CRC échoue
  - o SEQN = SEQN donc retransmission et ignore les paquets SEQN+1

Le broadcast n'a pas de ARQ.

# Les différents types de paquets

On distingue 15 types de paquets qu'on peut regrouper en trois :

## 1) Paquet de contrôle :

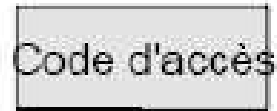
Ces paquets sont utilisés pour la gestion des connexions Bluetooth :

- ID (codé 0000) est utilisé pour le paging, la recherche, les réponses. Elle est principalement composée d'un DAC ou IAC (GIAC ou DIAC)
- NULL (codé 0001) est utilisé pour faire une réponse de retour notamment lors d'une réponse à une requête POLL. Elle informe le maître sur le succès de la transmission, état de buffer, ect... Elle ne doit pas être acquittée.
- POLL (codé 0010) est idem que NULL mais il doit être acquitté. Il s'agit d'un paquet envoyé par le maître à l'esclave pour l'obliger à répondre même s'il n'a rien à dire.
- FHS (« Frequency Hopping Synchronisation » codé 0011) est utilisé pour synchroniser les esclaves lors de la mise en place du piconet. Ce paquet contient :
  - o 240 bits de données utiles
  - o L'adresse BDA de la source
  - o L'horloge de la source
  - o AMA donné par le maître à l'esclave
  - o Des infos sur la période de paginations

# Les différents types de paquets

Ces paquets et le paquet de type DM1 peuvent être utilisés sur les 2 types de liens SCO et ACL.

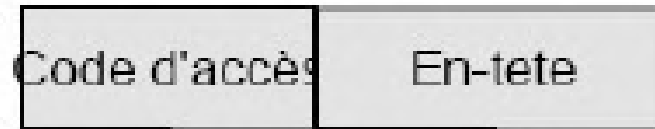
ID : (DAC/(G-D)IAC)



NULL : ne doit pas être  
acquitté



POLL : doit être acquitté  
par NULL



# Paquet SCO

Pour rappel, les liaisons à connexion synchrone orientée (SCO) se caractérise par :

- Transmission voix temps réel.
- Créneau réservé pour réduire au maximum le délai.
- Transmission point à point. Bidirectionnel.
- Il n'y a pas de retransmission du fait des contraintes temps réelles.
- Débit à 64 Kbit/s, pour être compatible avec les normes d'encodage.

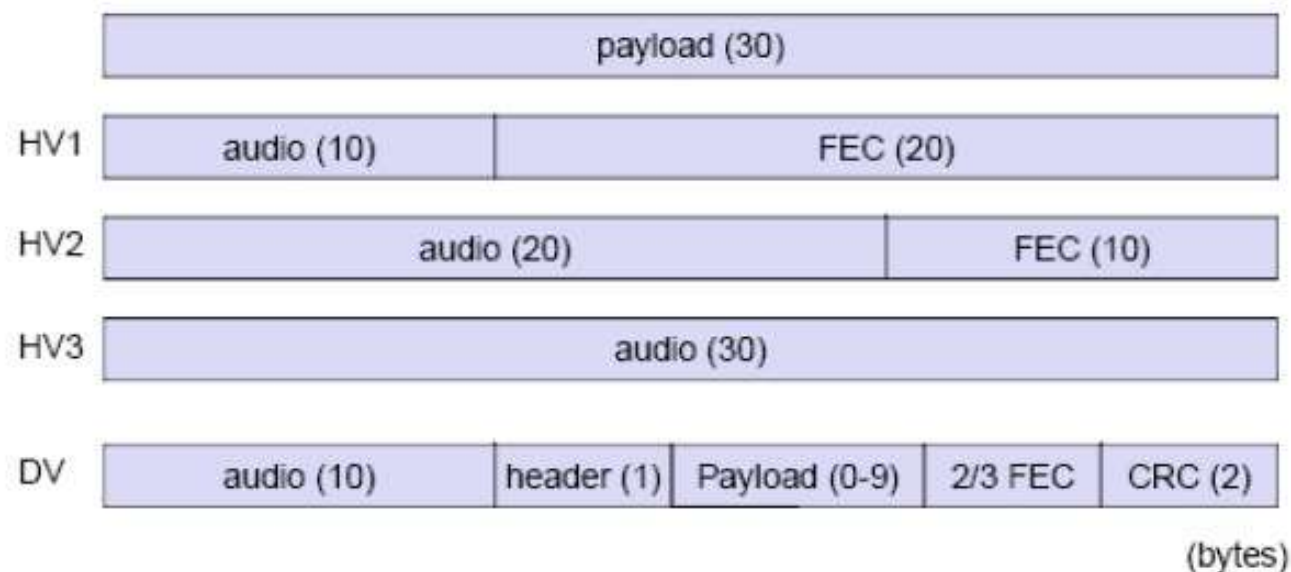
Il y a deux sous-catégories de paquet :

- Paquet HVx : « High quality Voice » sans correction d'erreur
- Paquet DV : « DataVoice » porte à la fois les données et la voix. Le ratio voix-donnée est d'environ 1/3 pour 2/3. La partie voix n'a pas de correction d'erreur et n'est jamais retransmise alors que la partie donnée est traitée séparément, on peut donc la retransmettre comme un paquet « standard ».

# Paquet SCO

Type	En-tête (octet)	Données Utiles (octet)	FEC	CRC	Débit max. symétrique (Kbit/s)
HV1	Aucun	10	1/3	Non	64
HV2	Aucun	20	2/3	Non	64
HV3	Aucun	30	Aucun	Non	64
DV	1 ( pour les données)	10 + 0-9 D	2/3 sur les données	Oui sur les données	64 + 57,6 D

Ci-dessous représentation de la charge utile par type de paquet SCO :



## Paquets ACL

Les liaisons à connexion asynchrone (ACL) se caractérisent par :

- Conçu pour l'échange de données.
- Le broadcast est possible.
- Schéma optionnel de retransmission en cas de paquets en erreurs (ARQ).
- Classification des paquets suivant la liaison.

Il y a deux sous-catégories de paquet :

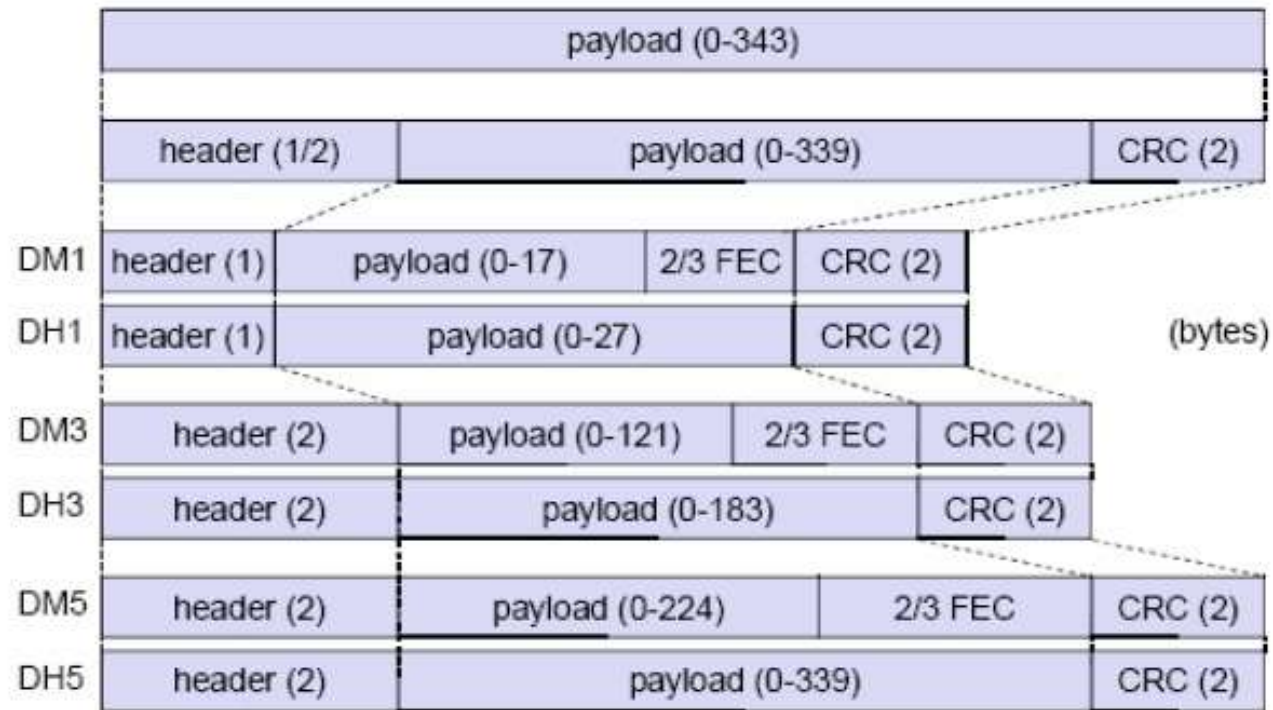
- Paquet DMx : « Data Medium » avec un encodage permettant la correction des erreurs en ligne
- Paquet DHx : « Data High » sans correction d'erreur, ce qui donne un débit effectif plus élevé.

# Paquets ACL

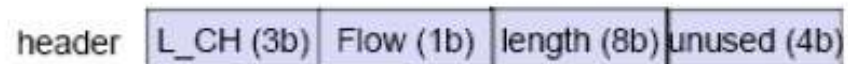
Nb Slot	Type	En-tête (octet)	Données Utiles (octet)	FEC	CRC	Débit max. symétrique (Kb/s)	Débit max asymétrique (Kb/s)	
							descendant	montant
1	DM1	1	0-17	2/3	Oui	108.8	108.8	108.8
1	DH1	1	0-27	Non	Oui	172.8	172.8	172.8
3	DM3	2	0-121	2/3	Oui	258.1	387.2	54.4
3	DH3	2	0-183	Non	Oui	390.4	585.6	86.4
5	DM5	2	0-224	2/3	Oui	286.7	477.8	36.3
5	DH5	2	0-339	Non	Oui	433.9	723.2	57.6
1	AUX1	1	0-29	Non	Non	185.6	185.6	185.6

# Paquets ACL

## Représentation de la charge utile par type de paquet ACL :



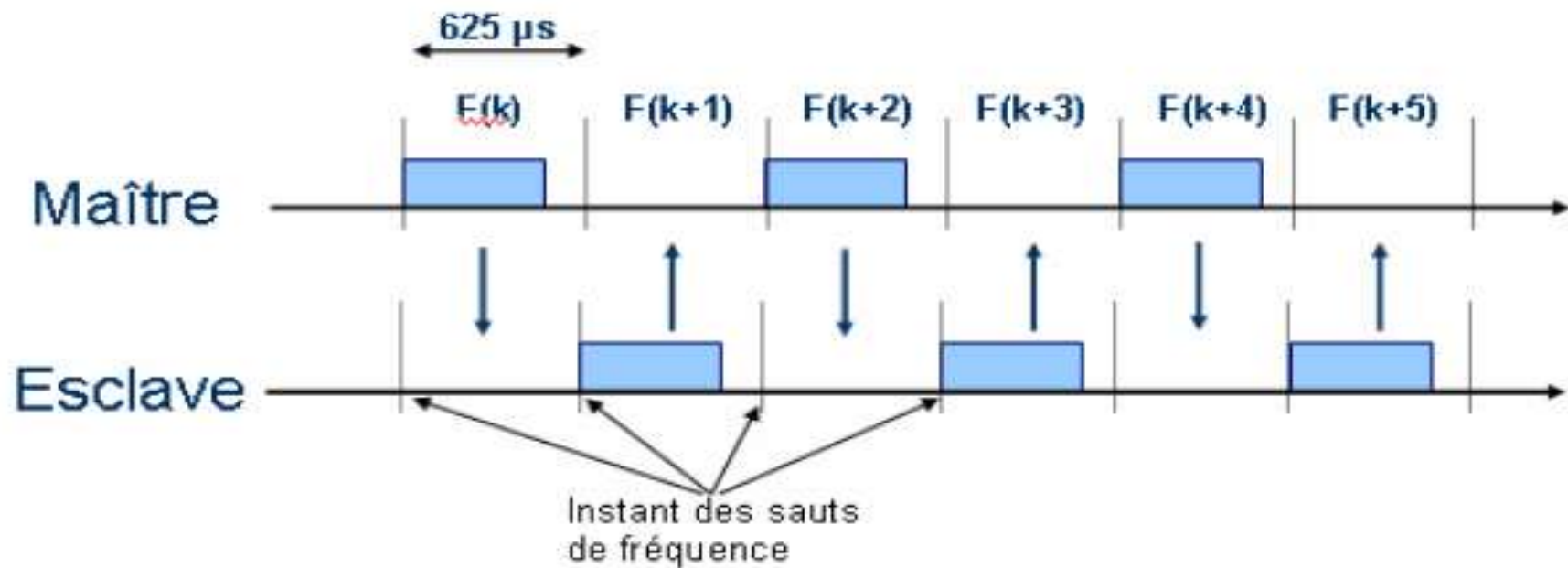
Et voici la structure de l'entête utilisé dans le payload :



# Illustration du canal de transmission

## A. Communication single-slot

Le canal de communication est divisé en time slots numérotés d'une durée de  $625\mu\text{s}$  chacun. Le TDD (Time Division Duplex) est utilisé, c'est à dire que les unités Maître et Esclaves transmettent alternativement (une unité Maître transmet dans les slots pairs et les unités Esclaves dans les slots impairs).



## Illustration du canal de transmission

Les transmissions effectuées par les unités Bluetooth sont effectuées par paquets. Un paquet correspondant aux données transmises et reçues par les différentes entités Bluetooth.

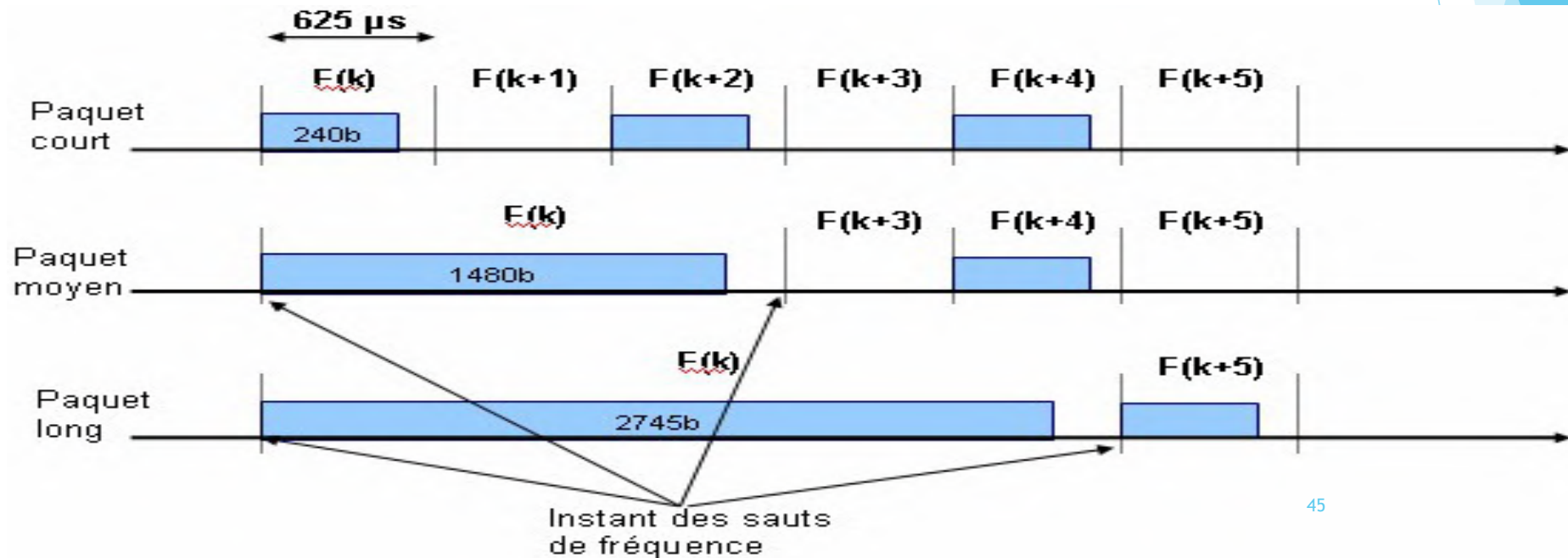
Chaque slot pour une communication maître esclave est systématiquement suivie par un slot esclave maître. Un esclave est uniquement autorisé à émettre dans un slot donné si le maître l'a adressé dans le slot précédent.

Toute communication directe entre esclaves est impossible, ils doivent passer par le maître du piconet. Le maître gère l'ordonnancement des esclaves selon l'algorithme Round Robin.

# Illustration du canal de transmission

## B. Communication Multi-slot

Lorsqu'un paquet a une taille de 1 slot on parle de transmission/réception single slot, et lorsqu'un paquet possède une taille supérieure à 1 time slot (3 ou 5 slot), on parle de Multi-slot. Le saut de fréquence appliqué au paquet est celui du premier slot de ce paquet.



## Illustration du canal de transmission

Bluetooth peut donc utiliser 3 types de paquets :

- des paquets de données courts : 1 time-slot, 240 bits au maximum
- des paquets de données moyens : 3 time-slot, 1480 bits au maximum
- des paquets de données long : 5 time-slot, 2745 bits au maximum

Le débit peut donc varier selon les types paquets utilisés dans un sens puis dans l'autre. Par exemple :

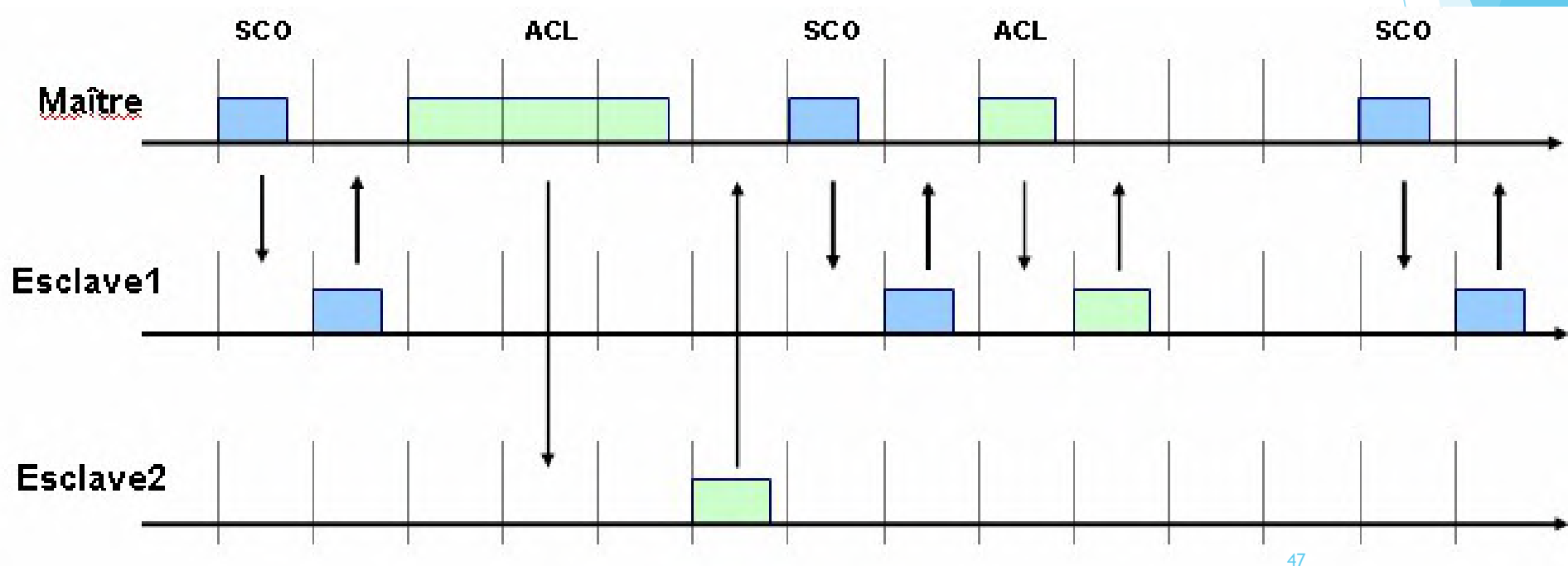
- Paquet long, court dans l'autre sens :  $D1 = 2745 \text{ bits} / 6 * 625 \text{ us} = 732 \text{ kbits/s}$   
 $D2 = 240 \text{ bits} / 6 * 625 \text{ us} = 64 \text{ kbits/s}$
- Paquet long dans les deux sens  $D1 = 2745 \text{ bits} / 10 * 625 \text{ us} = 439 \text{ kbits/s} = D2$

Le débit maximal de 732Kbits/s n'est obtenu que s'il s'agit de la connexion asymétrique avec un paquet long d'un sens et un paquet court dans l'autre sens.

# Illustration du canal de transmission

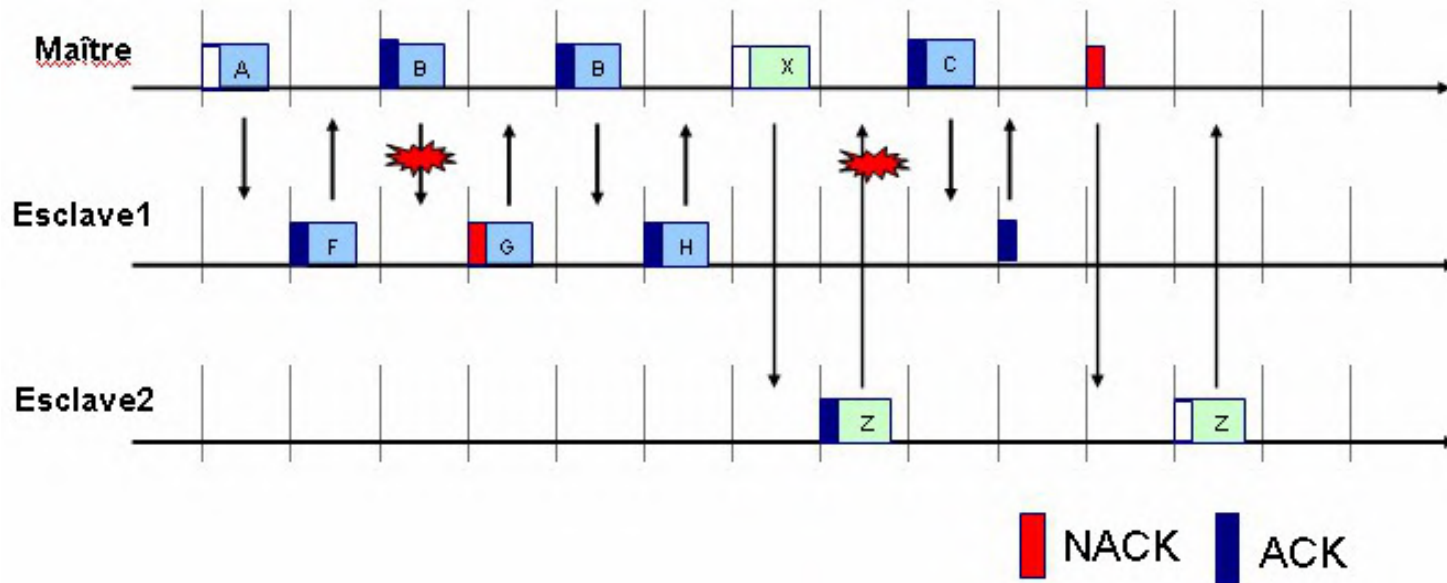
Exemple : communication le maître échange des données avec 2 esclaves du picotnet :

- Esclave 1 un lien SCO et un lien ACL
- Esclave 2 un lien ACL



# Illustration du canal de transmission

## C. Retransmission Automatique



La transmission du paquet B vers l'esclave 1 a été perturbée, l'acquittement n'a pas eu lieu (NACK) et le paquet est renvoyé dans le slot suivant : c'est la retransmission automatique.

La transmission du paquet Z envoyé par l'esclave 2 vers le maître a été perturbée. Dans ce cas, le maître averti l'esclave dès qu'il est disponible pour recevoir une nouvelle retransmission du paquet.

## Illustration du canal de transmission

En résumé, la technique temporelle synchronisée consiste :

- Temps divisé en tranches de longueur égale = slots
- 1 Slot = temps de transmission

Le temps est découpé en slots :

- 1600 slots/s
- 1 slot : 625 microsecondes de long
- Un terminal utilise 1 fréquence sur 1 slot, puis, par un saut de fréquence (Frequency Hop), il change de fréquence sur la tranche de temps suivante, etc.
- Un client Bluetooth utilise de façon cyclique toutes les bandes de fréquence.
  - o Les clients d'un même piconet possèdent la même suite de sauts de fréquences
  - o Lorsqu'un nouveau terminal veut se connecter, il doit commencer par reconnaître l'ensemble des sauts de fréquences pour pouvoir les respecter
- Une communication s'exerce par paquet (1, 3 ou 5 slots) : le saut de fréquences a lieu à la fin de la communication d'un paquet

# Réseau Zig-Bee





# Introduction

L'idée initiale du projet ZigBee date de 1998 ; une première proposition (v0.1) a été présentée courant 2000 puis rapidement une seconde (v0.2) à la fin de la même année. Après une soumission à l'IEEE mi-2001, la ZigBee Alliance a été créée pour développer et promouvoir la norme IEEE 802.15.4 ratifiée en mai 2003. La production de modules compatibles fut alors prévue et les premiers produits (puces radio, piles protocolaires, modules intégrés, kits de développement, etc.) sont apparus ; ils sont disponibles depuis début 2005.

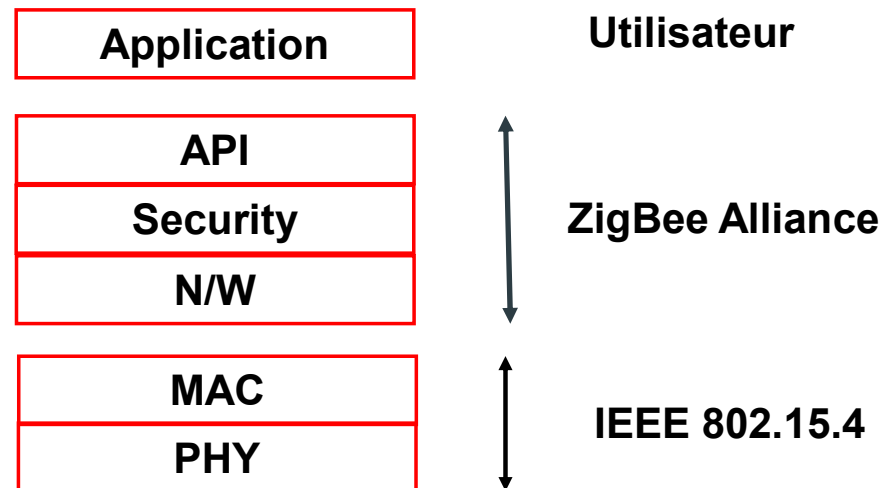
Le protocole ZigBee s'appuie sur ce standard IEEE 802.15.4 pour les couches physique et liaison, qui sont les couches 1 et 2 du modèle OSI ainsi que sur le développement des couches réseau et applicative par la ZigBee Alliance.

# ZigBee - IEEE 802.15.4

## Objectifs du Standard

- ▶ Faible portée, Faible débit, Faible Consommation
- ▶ Applications :
  - ▶ Domotique
  - ▶ Automobile
  - ▶ Applications Industrielles
  - ▶ Jeux
  - ▶ Mesures
- ▶ ZigBee crée par ZigBee Alliance pour le contrôle, commande et la gestion des réseaux de capteurs,

# ZigBee - IEEE 802.15.4



## Zigbee : Définition et domaines d'application

➤ La pile de protocole ZigBee repose sur une solide fondation constituée par le standard IEEE 802.15.4 qui représente les couches basses physique et MAC (Medium Access Control). Utilisant une technologie simple de transmission par paquets, ce standard a été spécifiquement étudié pour minimiser la consommation en énergie globale du réseau, et permettre d'alimenter les noeuds par simples piles, si nécessaire.

➤ Avec un total de 27 canaux de communications possibles, partagés sur 3 bandes de fréquences (868 MHz, 915 MHz et 2,4 GHz), le protocole ZigBee/802.15.4 s'affirme comme un standard de couverture mondiale.

Le temps de réveil d'un noeud ZigBee avant l'envoi d'une information est de l'ordre de 15 ms, assez rapide pour pouvoir satisfaire les besoins en termes de rapidité de transmission pour les applications de contrôle et de sécurité.

## Zigbee : Définition et domaines d'application

Les autres caractéristiques principales du protocole sont résumées comme suit :

- Débit maximum : 868 MHz : 20 kbits/s ; 915 MHz : 40 kbits/s ; 2,4 GHz : 250 kbits/s
- Portée radio : 10-20 m
- Temps de réveil : 15 ms (Bluetooth : 3s)
- Canaux : 868 MHz : 1 canal ; 915 MHz : 10 canaux ; 2,4 GHz : 16 canaux
- Bandes de fréquence : 2 couches physiques : 868 MHz/915 MHz et 2,4 GHz
- Adressage : Longues 64 bits (IEEE) ou raccourcies 16 bits
- Accès radio : CSMA-CA

# Zigbee : Définition et domaines d'application

Zigbee s'applique à différents domaines tels que :

- Domotique en milieu résidentiel : l'éclairage, les volets roulants, les systèmes d'alarme ou le contrôle du chauffage à l'intérieur du domicile par exemple, avec toutes les télécommandes associées. Outre la possibilité de faire interagir ces différentes fonctions à l'intérieur de la maison, le fait d'utiliser une technologie sans-fil telle que ZigBee permet de réduire les coûts d'installation, mais aussi de donner de la flexibilité permettant aux particuliers de modifier et de faire évoluer leurs installations.
- Domotique et contrôle de locaux professionnels : On retrouve dans les environnements de bureaux et de locaux professionnels les mêmes applications qu'en milieu résidentiel. Toutefois, les finalités peuvent varier, par exemple la gestion des thermostats pourra être dépendante de la demande en énergie d'un bâtiment afin de pouvoir lisser la consommation globale d'un site. À ces applications vient s'ajouter également par exemple la possibilité de faire du contrôle d'accès couplé à des systèmes d'alarme centralisés.

# Zigbee : Définition et domaines d'application

## Zigbee s'applique à différents domaines tels que :

- Contrôle industriel : La plupart des domaines où ZigBee est implémenté en milieu industriel ont rapport à la surveillance, au contrôle et au relevé d'informations sur une chaîne de fabrication.
- Médical : Surveillance de patients, gestion d'équipements de mesures en milieu hospitalier.
- Informatique : Périphériques de contrôle tels souris, clavier, stylets, pavés tactiles, pointeurs de contrôle/commande. Par rapport à la traditionnelle technologie infrarouge, le profil ZigBee Input Device vise à donner plus de souplesse aux utilisateurs de ce genre d'interfaces homme/machine, notamment en terme de distance de travail et de consommation d'énergie. Le profil autorise également des communications bidirectionnelles pour des produits dotés de fonctionnalités plus étoffées que leurs homologues à liaison infrarouge et pouvant être mis à jour par téléchargement par l'interface air.

## La pile de protocole Zigbee

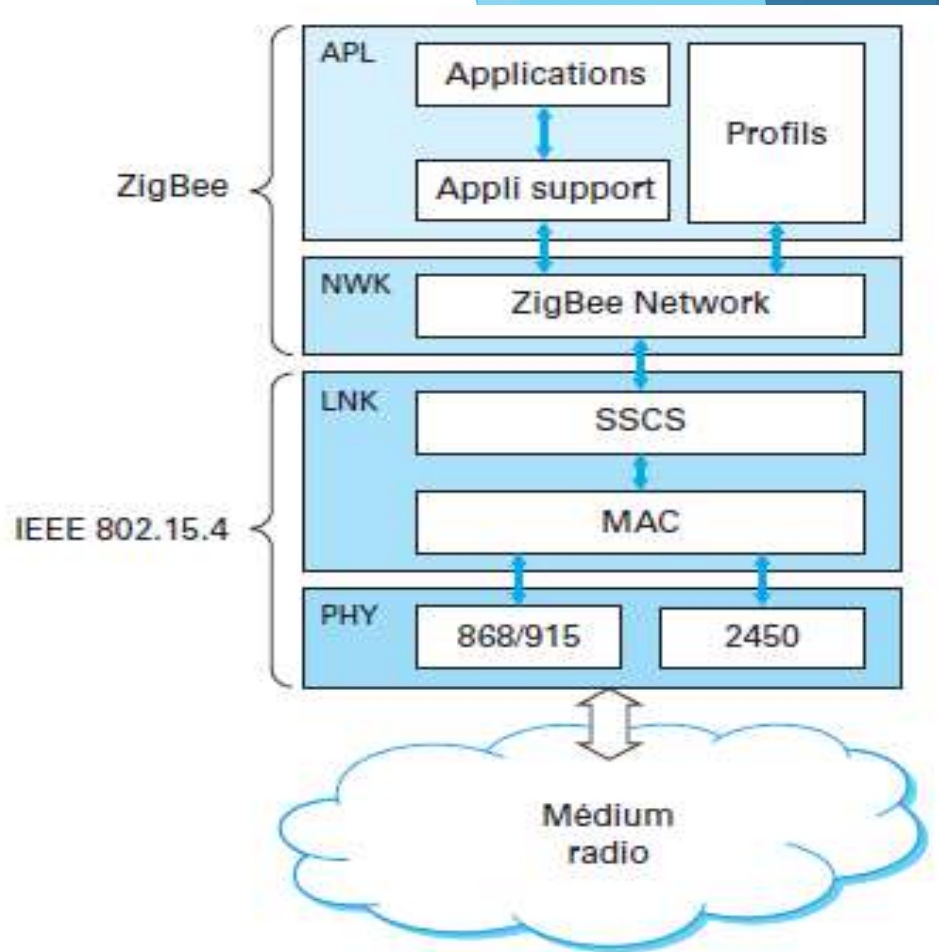
### Zigbee s'applique à différents domaines tels que :

- La spécification d'un protocole complet de communication, qu'il soit filaire ou non, passe par l'établissement des règles qui régiront les transmissions entre chaque noeud du réseau. Ces règles sont contenues dans une pile logicielle qui sera implémentée dans chaque noeud du réseau.
- Pour un protocole sans-fil, il est indispensable de définir à la base quelles seront les fréquences d'émission et de réception des signaux, avec quels débits seront envoyés les signaux et quel sera le type de modulation et de codage numérique des informations. Toutes ces spécifications sont contenues dans la couche physique (PHY ; Physical Layer) définie par l'IEEE qui se divise en deux parties suivant la bande de fréquences utilisée (868/915 MHz ou 2400 MHz).

## La pile de protocole Zigbee

Au-dessus de cette couche vient s'appuyer la couche d'accès au médium (MAC : Medium Access Control Layer), c'est la charnière centrale de la pile logicielle, qui définit et gère la façon dont un noeud ZigBee va « prendre la parole » dans le réseau et pouvoir émettre un message ou recevoir de l'information circulant sur celui-ci. Puis, lorsque les couches PHY et MAC sont fixées, il faut ensuite définir précisément les règles d'établissement d'un réseau, de l'association et de l'interconnexion des noeuds, ainsi que la structure détaillée des messages qui seront échangés (format des trames). Ces fonctions sont assurées par la couche de gestion du réseau (NWK, Network Layer).

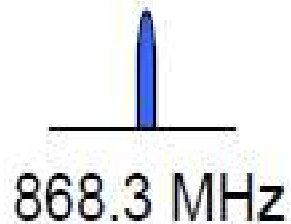
Enfin la couche de plus haut niveau, appelée couche d'application, déterminera la façon dont sont utilisés tous les niveaux inférieurs pour une application donnée, notamment la signification des informations contenues dans une trame.



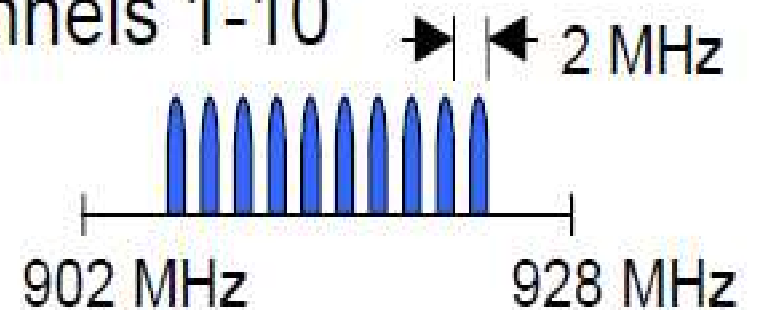
## Couche PHY : Bandes de fréquence utilisées

**868 MHz/  
915 MHz  
PHY**

Channel 0

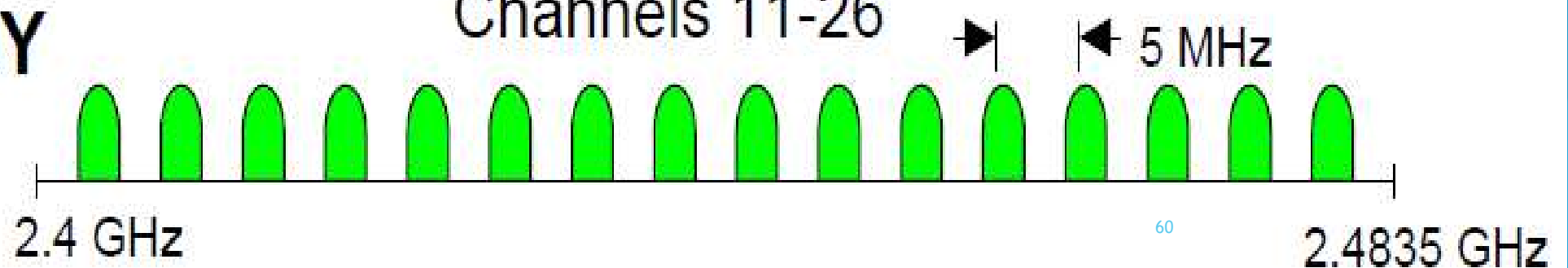


Channels 1-10



**2.4 GHz  
PHY**

Channels 11-26



## Couche PHY : Bandes de fréquence utilisées par Zigbee

### Canaux

- 16 canaux dans la bande 2.4 GHz ( Bande ISM)
- 10 canaux dans la bande 915 MHz ( Bande ISM)  
aux USA et en Australie
- 1 canal en European dans la bande 868 MHz

## Couche PHY de 802.15.4

PHY	Bande (MHz)	Nbre canaux (n°)	Région	Étalement de spectre		Données		
				Débit Chip (kChip/s)	Modulation	Débit binaire (kbit/s)	Débit Symboles (kSymb/s)	Symboles
868/915	868 - 868.6	1 (0)	Europe	300	BPSK	20	20	Binaires
	902 - 928	10 (1 - 10)	USA	600	BPSK	40	40	Binaires
2450	2400 - 2483.50	16 (11 - 26)	Toutes	2 000	O-QPSK	250	62.5	16-ary orthogonal

## Bandes de fréquences utilisées par Zigbee

802.15.4 utilise (Figure):

- 16 canaux (250 kbit/s) dans la bande de fréquence de 2.4 à 2.4835 GHz,
- 10 canaux (40 kbit/s) dans la bande de fréquence de 902 à 928 MHz,
- 1 canal (20 kbit/s) dans la bande de fréquence de 868 à 868.6 MHz.

En pratique c'est la bande 2,4 GHz qui est utilisée par les équipements ZigBee du marché.

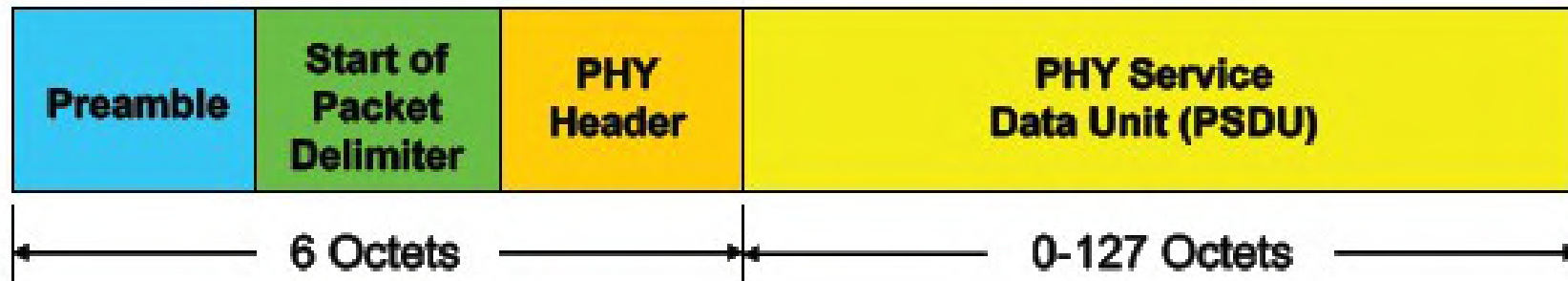
Un réseau Zigbee doit utiliser un des 16 canaux de la bande de fréquence 2,4 GHz.

Tous les nœuds dans le même réseau doivent utiliser le même canal afin de communiquer physiquement. Cela signifie aussi que les réseaux peuvent être physiquement séparés et n'interféreront pas s'ils utilisent différents canaux.

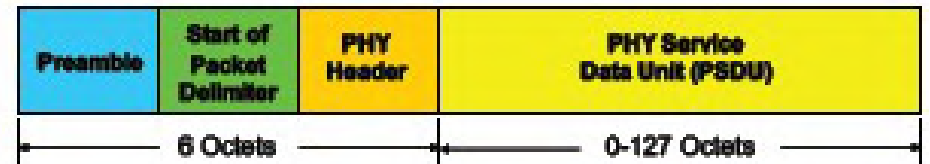
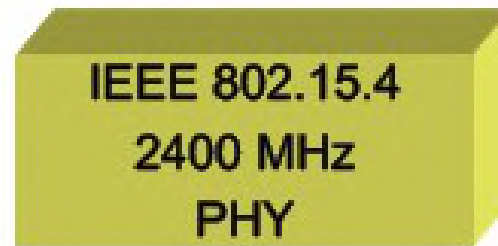
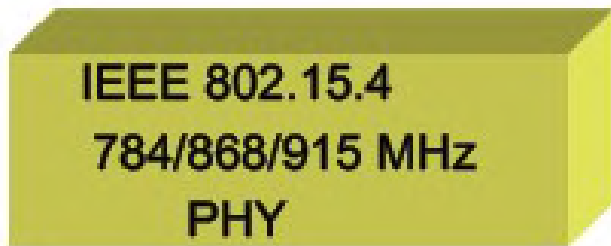
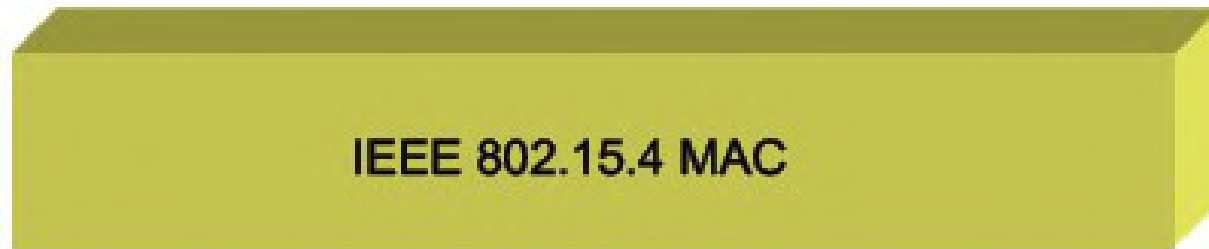
# Couche PHY de 802.15.4

## Les Différents champs du paquet :

- Préambule (32 bits) – synchronization
- Délimiteur du paquet (8 bits)
- Entête PHY (8 bits)
- Données (0 to 1016 bits)



# Architecture



# Réseau Zigbee

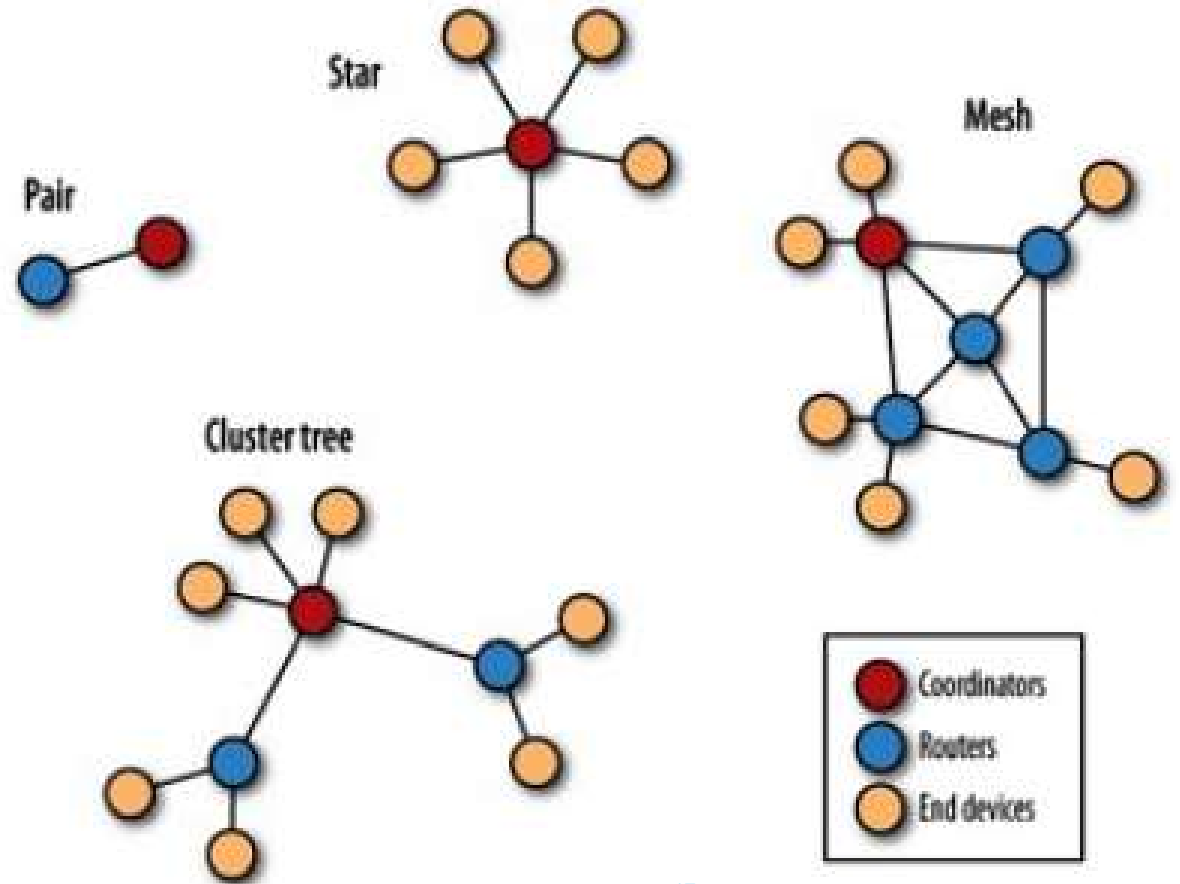
Un réseau Zigbee se compose de trois types de nœuds :

- Nœud de type « **end-device** » (équipement RFD : **Reduced Function Device**). Il s'agit de nœuds simples réalisant une seule fonction : allumage d'une lampe, d'un appareil de détection ...
- Nœud de type « **routeur** » (équipement FFD : **Full Function Device**). Ces nœuds permettent la transmission de messages. Ils sont indispensables pour étendre le réseau par acheminements des trames d'un nœud à un autre. Ils permettent aussi aux autres modules de s'enregistrer sur le même réseau, et non exclusivement chez le coordinateur.
- Nœud de type « **coordinateur** ». Ce type de nœud unique dans un réseau assure les fonctions telles que l'authentification, l'initiation de la communication, la sécurité et l'ajout des nœuds au réseau ... Il doit être actif en permanence pour répondre à tout moment aux requêtes des autres éléments du réseau. Il est donc alimenté en permanence.

# Les types d'équipement et topologie ZigBee

Les réseaux Zigbee peuvent présenter plusieurs types de topologie :

- Point à point (Pair).
- Etoile (Star).
- Arbre (Clustertree).
- Maille (Mesh).



## Topologies de réseau Zigbee

Trois types de topologie sont possible pour un réseau Zigbee :

□ Topologie en étoile: Dans la topologie en étoile, le réseau est contrôlé par seulement un dispositif appelé le Coordinateur ZigBee. C'est ce noeud coordinateur qui a en charge d'initialiser et de maintenir les autres dispositifs sur le réseau qui communiquent directement avec lui. Cette configuration est relativement simple. Tout message doit passer par le coordinateur, car il est celui qui les route à leur destination. Les end devices ne peuvent pas communiquer entre eux directement. Toute forme de réseau ZigBee doit consister au moins en un coordinateur ZigBee qui est la seule entité pouvant former le réseau initial.

## Topologies de réseau Zigbee

□ Topologie maillée : La topologie maillée emploie des routeurs en plus du coordinateur. Ces routeurs peuvent passer les messages à d'autres routeurs et aux end devices. Le coordinateur qui est une forme spéciale de routeur gère le réseau. Il peut aussi router les messages. Les end devices peuvent être attachés à tout routeur ou au coordinateur; Les end devices peuvent gérer et recevoir des informations, mais nécessitent leur parent afin de communiquer avec les autres noeuds. L'algorithme de routage suggéré par la ZigBee Alliance pour les réseaux maillés est AODV (Ad hoc On-Demand Vector Routing). Ce protocole de routage est peu gourmand en énergie et ne nécessite pas de grande puissance de calcul, il est donc facile à installer sur des petits équipements.

## Topologies de réseau Zigbee

□ Topologie en arbre : Dans la topologie en arbre, chaque routeur forme un sous-réseau où les autres dispositifs lui sont rattachés. Les routeurs étant eux-mêmes rattachés au coordinateur ou à un routeur de plus haut niveau. Cette configuration n'est pas très différente de celle maillée.

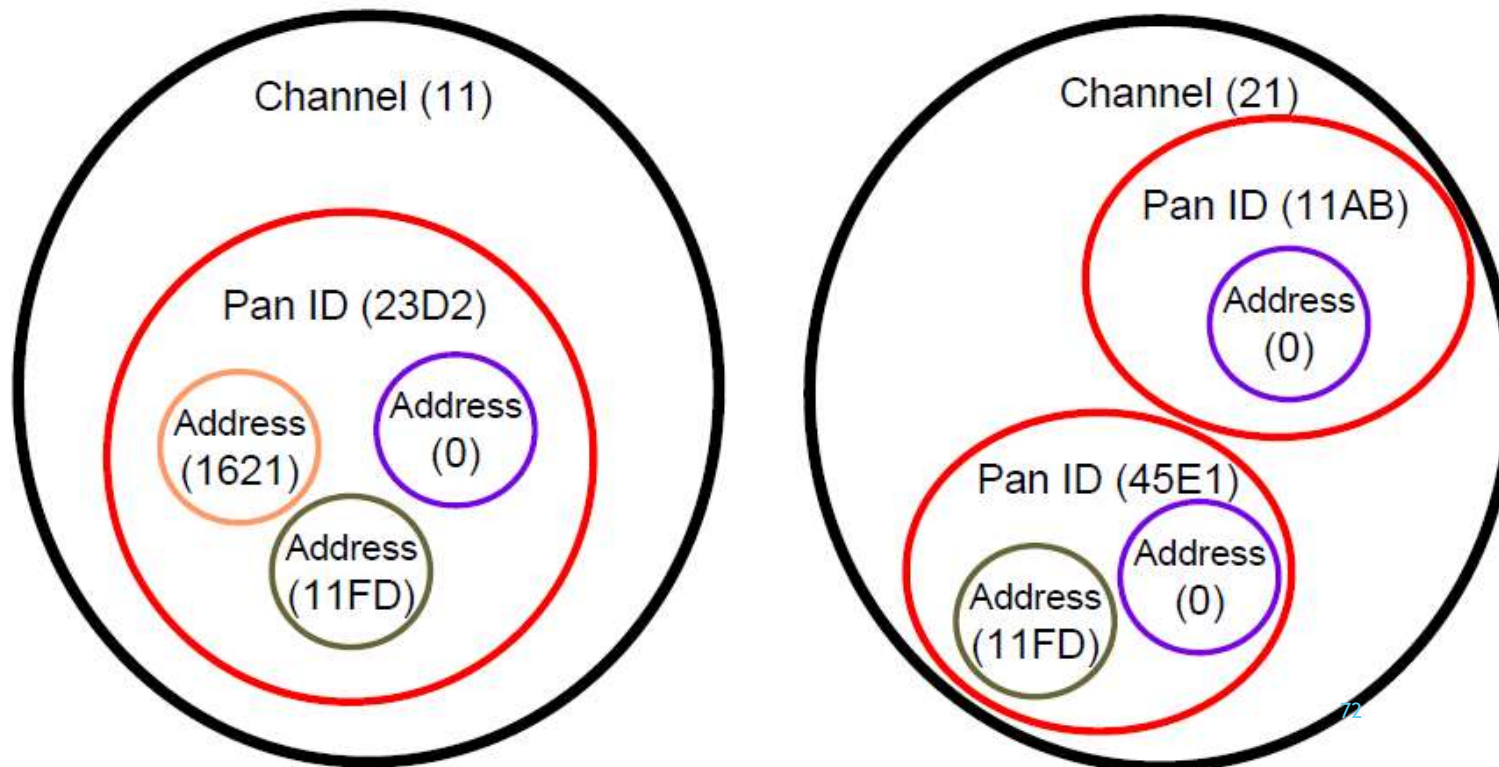
## Adressage Réseau

Chaque noeud dans un réseau doit disposer d'une adresse unique IEEE 802.15.4 composée de 64 bits.

La couche Network (NWK) du protocole ZigBee affecte une adresse sur 16 bits en plus de l'adresse IEEE. Une table de correspondance simple permet de mapper chaque adresse IEEE de 64 bits en une adresse unique NWK de 16 bits. Les messages de la couche NWK nécessitent l'usage de l'adresse NWK.

## Bandes de fréquence utilisées par Zigbee

Dans l'exemple de la figure ci-dessous, le premier réseau utilise le canal 11 de la bande de fréquence 2,4 GHz, alors que le second et le troisième réseau utilisent le canal 21 de la bande de fréquence 2,4 GHz. Le coordinateur est associé à l'adresse réseau 0. Dans le premier réseau, le coordinateur a assigné deux adresses réseau 1621 et 11FD (rappelons que l'adresse réseau est définie sur 2 octets). Dans le second réseau, son coordinateur a assigné l'adresse 11FD. Dans le troisième réseau, aucun device ne s'est enregistré pour l'instant.



## La couche liaison LNK de 802.15.4

Le niveau liaison de 802.15.4 (niveau 2 OSI) comprend une sous-couche d'accès au médium (MAC) et une sous-couche de convergence (SSCS).

### Format de la trame

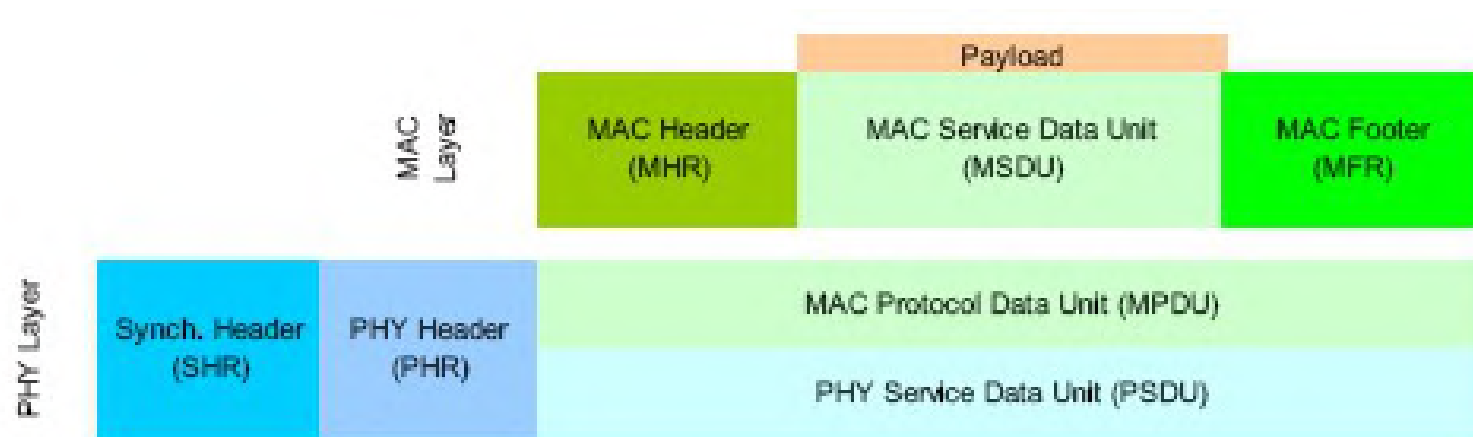


Le niveau liaison spécifié par le standard IEEE 802.15.4 décrit un format de trame générique et les champs qui la composent : en-tête MAC (MHR, *MAC HeadeR*), données MAC (MSDU : *MAC Service Data Unit*) et pied de trame MAC (MFR : *MAC FootR*). Les champs sont les suivants :

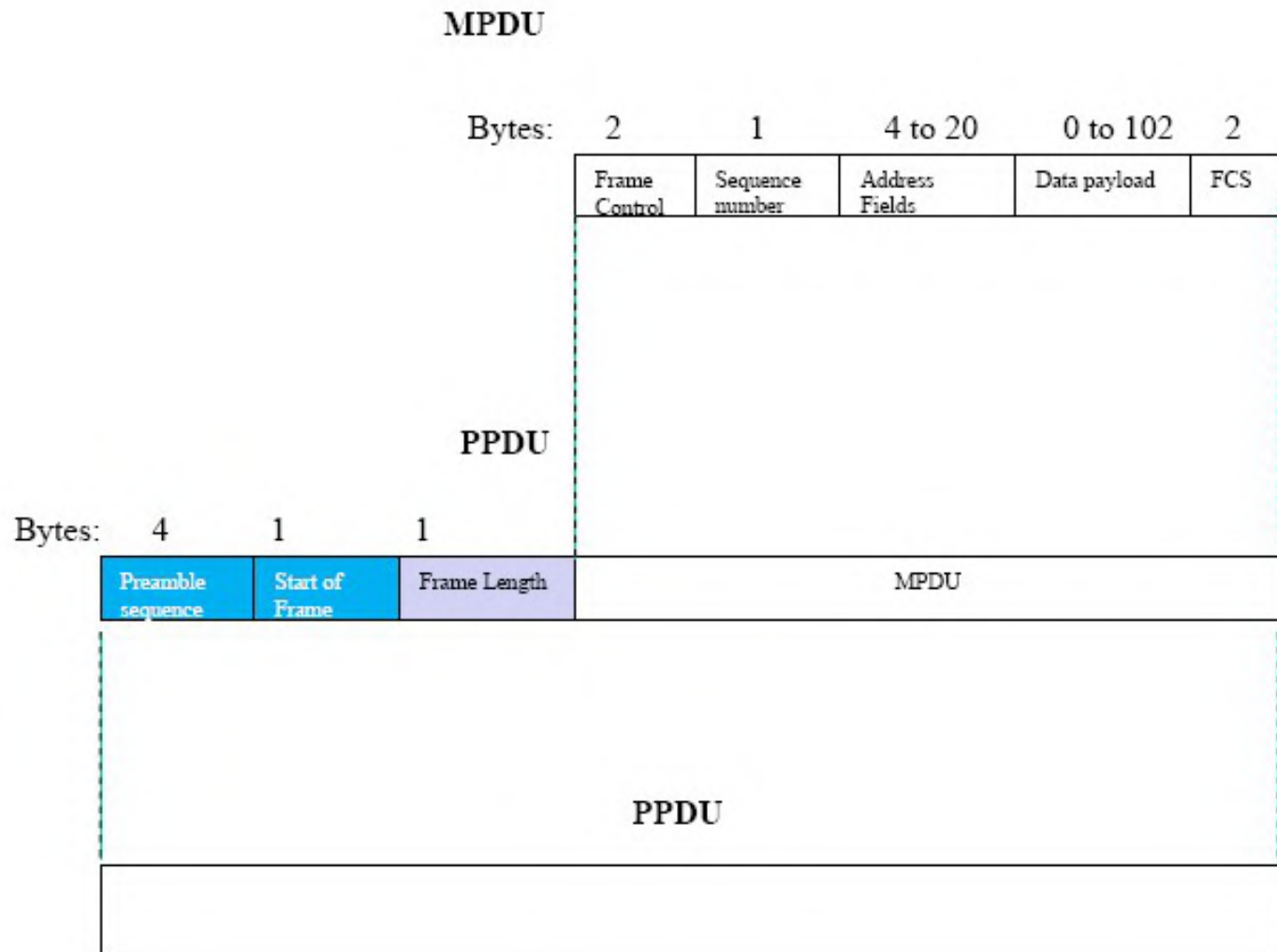
- le contrôle de trame (2 octets) : permet d'identifier le type de trame (donnée, balise acquittement ou commande), le mode d'adresse, la demande ou non d'acquittement, etc. ;
- le numéro de séquence (1 octet) : octet permettant la numérotation de chaque trame ;
- l'adressage (1 à 20 octets) : contient les adresses source et destination de la trame ;
- les données : les données utiles (typiquement un datagramme réseau) ;
- la séquence de contrôle (2 octets) : un CRC (Code de Redondance Cyclique) normalisé ITU-T sur 16 bits ( $x^{16} + x^{12} + x^5 + x^1$ ).

# ZigBee : Types de Trame

- ▶ Trame de Donnée
- ▶ Trame Beacon (Balise)
- ▶ Trame Acquiescement
- ▶ Trame de Commande MAC

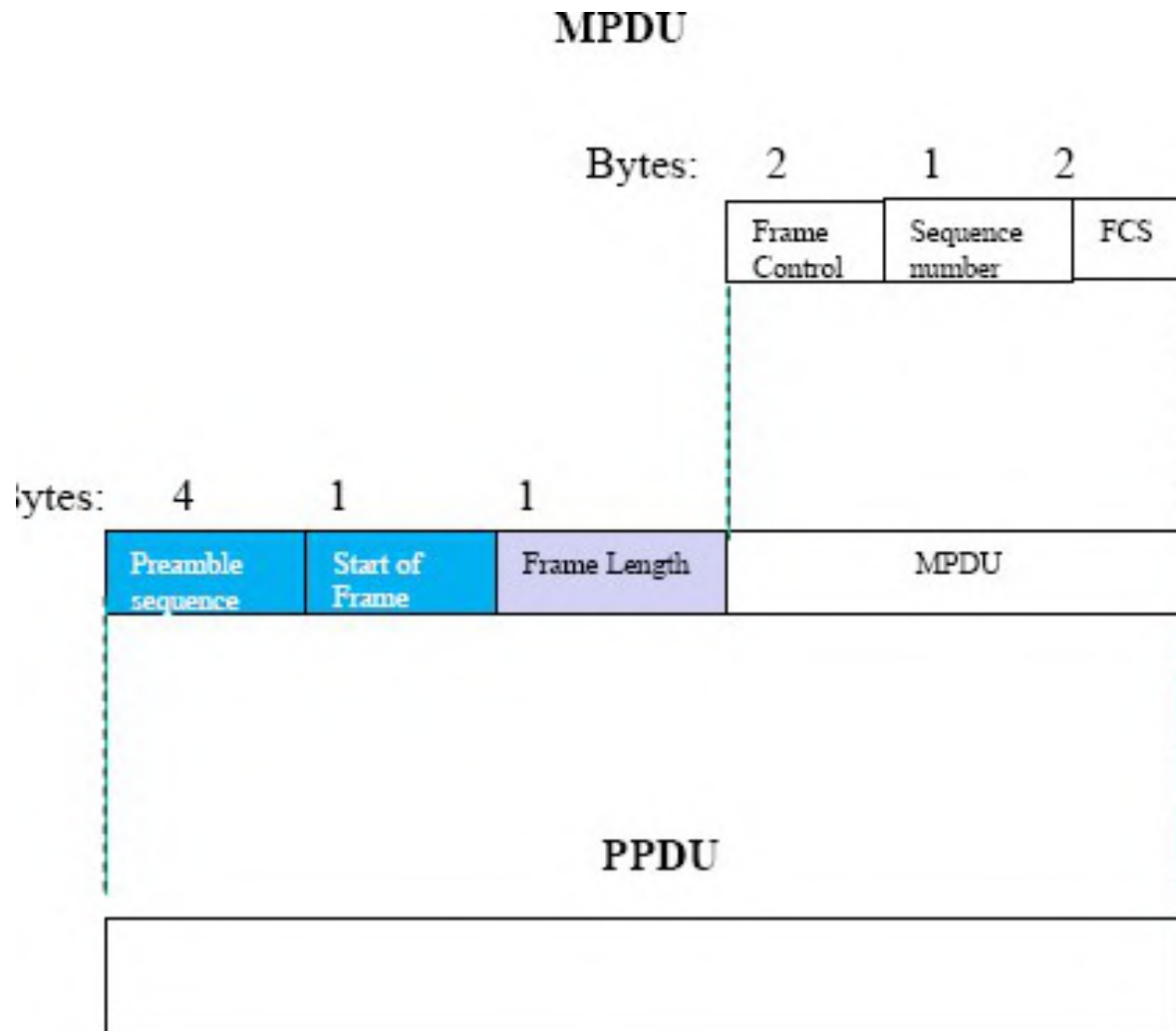


# Structure de la Trame de Données



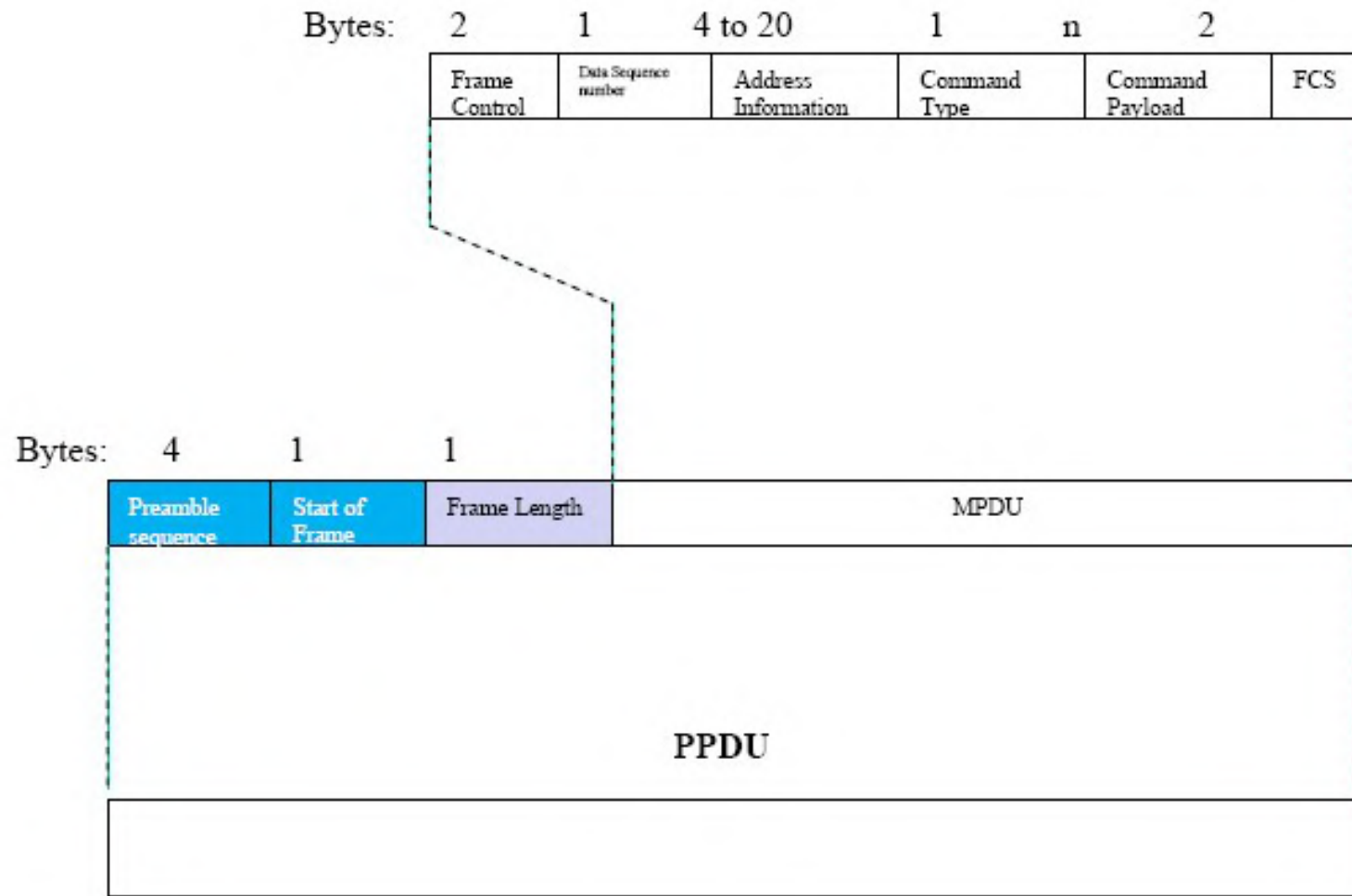


# Structure de la Trame d'Acquitement



# Structure de la Trame Commande

## MPDU



## La sous-couche MAC

### Types d'accès au médium :

La sous-couche MAC gère les accès au médium radio, résolvant notamment les problèmes d'accès concurrents.

802.15.4 propose deux modes pour l'accès au médium : un mode non coordonné (totalement CSMA/CA) et un mode coordonné, ou *beacon mode*, disponible uniquement dans une topologie étoile où le coordinateur de cette étoile envoie périodiquement des trames balises (*beacon*) pour synchroniser les noeuds du réseau. L'emploi du mécanisme CSMA/CA dans le mode non coordonné est relativement classique et 802.15.4 n'offre que peu d'innovations par rapport aux autres technologies sans fil dans ce mode ; en revanche, le mode coordonné permet d'entrevoir des applications intéressantes mettant en oeuvre une qualité de service.

## La sous-couche MAC

### ➤ Le mode non coordonné, totalement CSMA/CA :

Dans le mode non coordonné, il n'y a pas d'émission de *beacon* donc pas de synchronisation entre les différents noeuds du réseau. Les noeuds voulant émettre des données doivent utiliser le protocole CSMA/CA « non slotté », c'est-à-dire que le début d'une émission se fait dès que le médium est jugé libre, sans attendre le début d'un éventuel slot. Cependant, même si l'algorithme est dit « non slotté », il se base tout de même sur une unité temporelle discrète appelée *période de backoff pour pouvoir retarder plus ou moins l'émission d'une trame* et éviter les collisions.

## La sous-couche MAC

### ➤ Le mode coordonné, ou balisé

Dans le mode coordonné, une ou plusieurs entité(s) du réseau diffuse(nt) périodiquement des trames appelées balises, ou *beacon*.

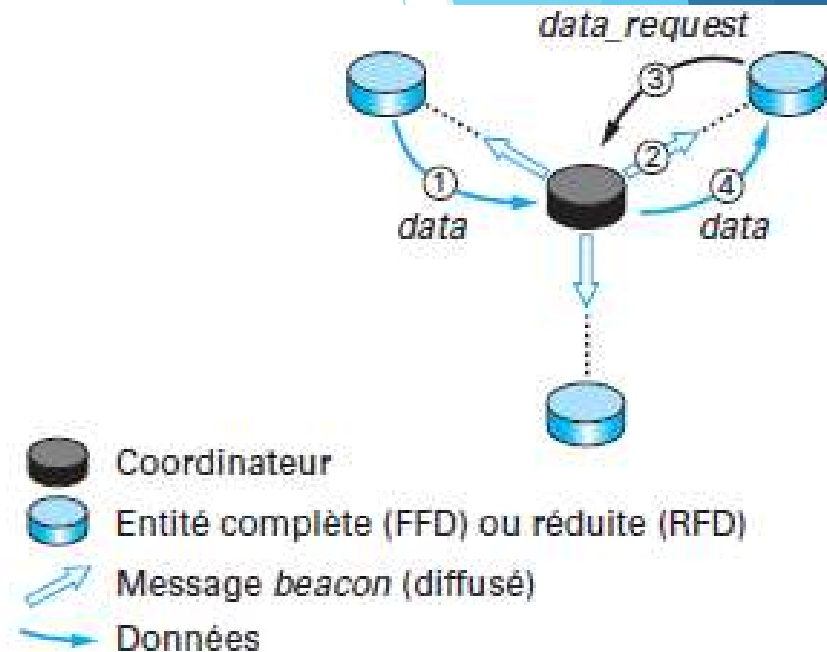
*Tout* membre du réseau qui entend cette balise peut utiliser la réception de cette trame pour se synchroniser avec son émetteur et se servir de lui comme relais.

Ce mode de fonctionnement permet les meilleures performances sur le plan énergétique car une fois l'information transmise au relais, le noeud communicant peut somnoler. De plus, les messages en attente étant stockés dans la mémoire du relais, un noeud peut choisir de se réveiller selon ses besoins, et demander alors les données en attente. On parle alors de transfert de données indirect dans une topologie en étoile, car tout échange sur le réseau passe par le relais. On appellera par la suite ce relais le coordinateur d'étoile.

## La sous-couche MAC

### Principe du transfert de données dans une étoile :

- le transfert de données direct est illustré par l'envoi du message(1) de type data. Le noeud envoie directement ses données au coordinateur de l'étoile puis se rendort ;
- le noeud de destination récupère ses données de manière indirecte : le message *beacon* (2) annonce les données en attente pour tous les noeuds ; le noeud de destination écoute le *beacon*, constate que des données sont en attente et les réclame par le message *data\_request* (3). Le *coordinateur* peut alors transmettre les données en attente en envoyant le message *data* (4).



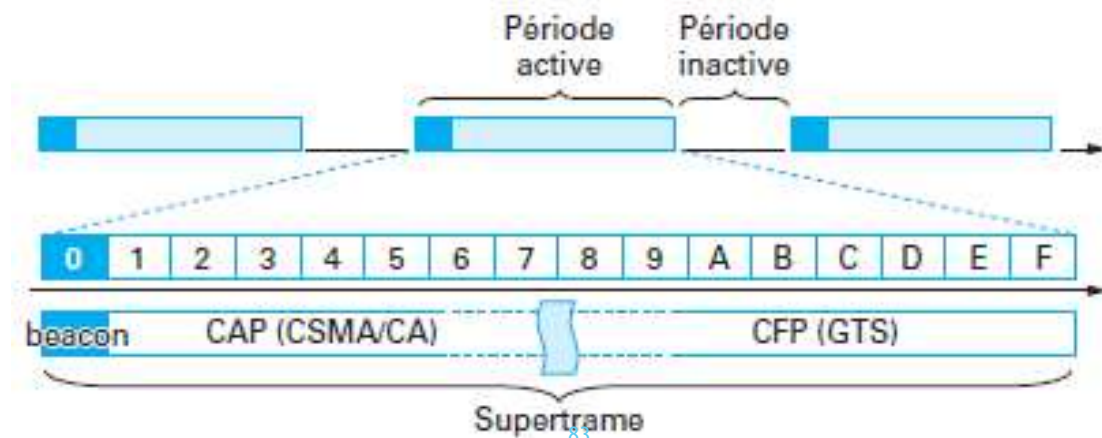
# La sous-couche MAC

## Notion de supertrame

L'espace temporel entre deux trames balises est appelé supertrame. Une supertrame est toujours divisée en 16 slots temporels de durées égales, la trame balise occupe toujours le premier slot ; elle permet donc de diffuser la synchronisation pour tous les noeuds à portée radio, mais également l'identifiant du PAN et la structure dynamique de la présente supertrame, en fonction des demandes qui ont été faites par les noeuds membres de l'étoile.

La supertrame possède deux paramètres fondamentaux :

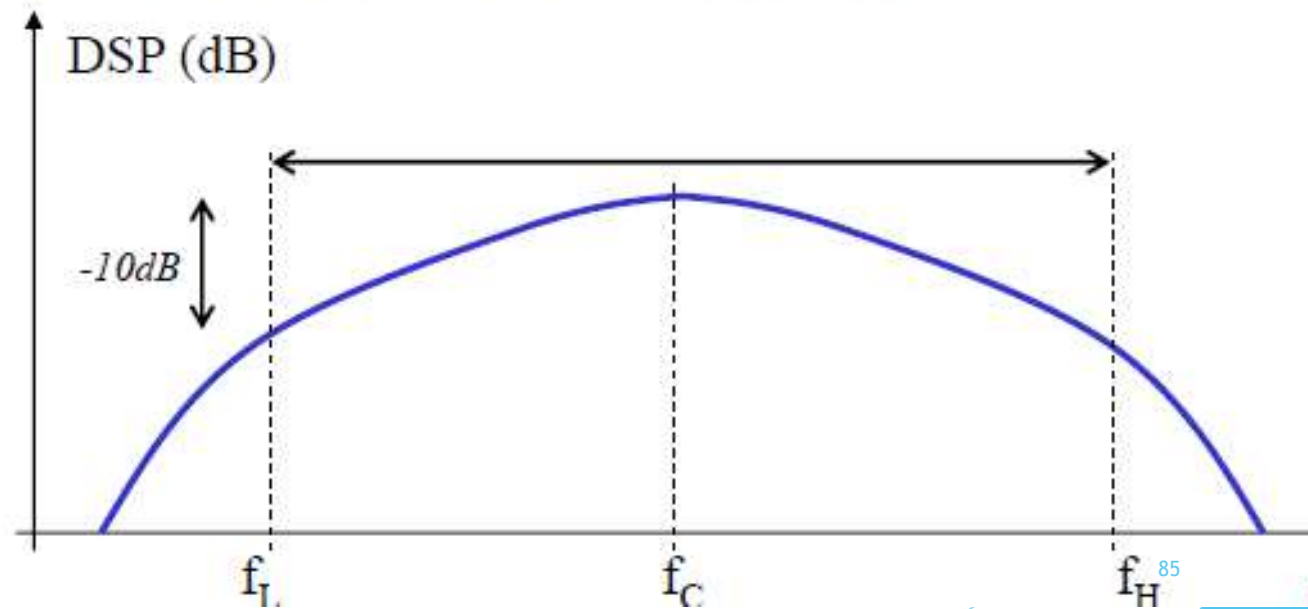
- BO (*Beacon Order*), qui fixe l'intervalle de temps entre l'envoi de deux messages beacon par le coordinateur ;
- SO (*Superframe Order*), qui fixe la durée active de la supertrame.



# Réseau UWB Ultra Wide Band

## Définition d'un signal UWB (Ultra Large Bande)

- **Bande fractionnelle mesurée à -10dB supérieure à 20%**  
$$\frac{f_{H(-10dB)} - f_{L(-10dB)}}{f_c} > 20\%$$
  
ou
- **Bande supérieure à 500MHz**



# Fondement Théorique

## ■ Théorème de Shannon sur la capacité du canal

- Avec :

C : Capacité du canal (bit/s)

B : largeur de bande (Hz)

P : Puissance du signal reçu (W)

$N_0$  : Densité spectrale de puissance de bruit (W/Hz)

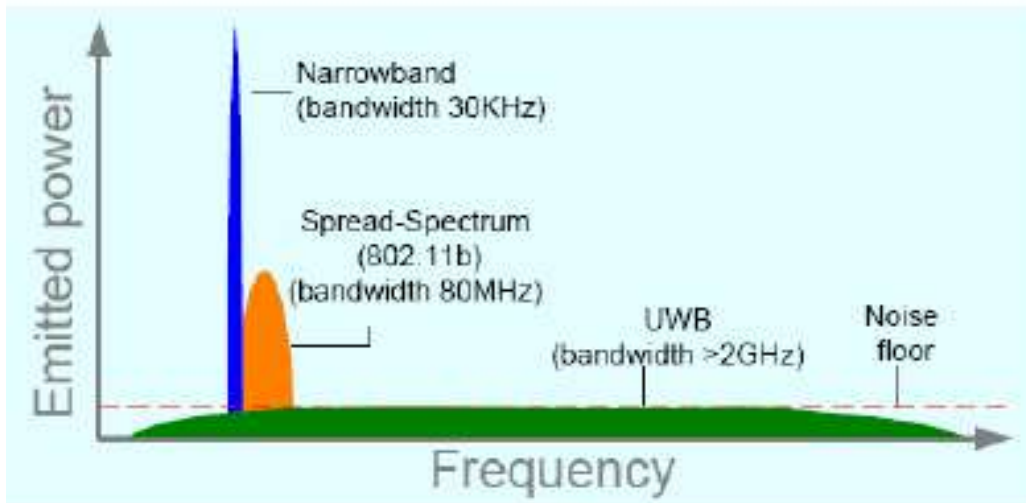
$$C = B \cdot \log_2 \left( 1 + \frac{P}{B \cdot N_0} \right)$$

## ■ Une grande largeur de bande permet de :

- Réduire les problèmes de multi-trajets ;
- Augmenter la capacité du canal ;
- Réduire la densité spectrale de fréquence.

# Fondement Théorique

$J_c$



System	Transmission Power [W]	Bandwidth [Hz]	Power Spectral Density [W/MHz]	Classification
Radio	50 kW	75 kHz	666,600	narrowband
TV	100 kW	6 MHz	16,1700	narrowband
GSM-900	320 W	200 kHz	1,600	narrowband
GSM-1800	20 W	200 kHz	100	narrowband
WCDMA	20 W	5 MHz	4	wideband
WLAN	1 W	20 MHz	0.05	wideband
<b>UWB</b>	<b>1 mW</b>	<b>7.5 GHz</b>	<b>0.013</b>	<b>ultrawideband</b>

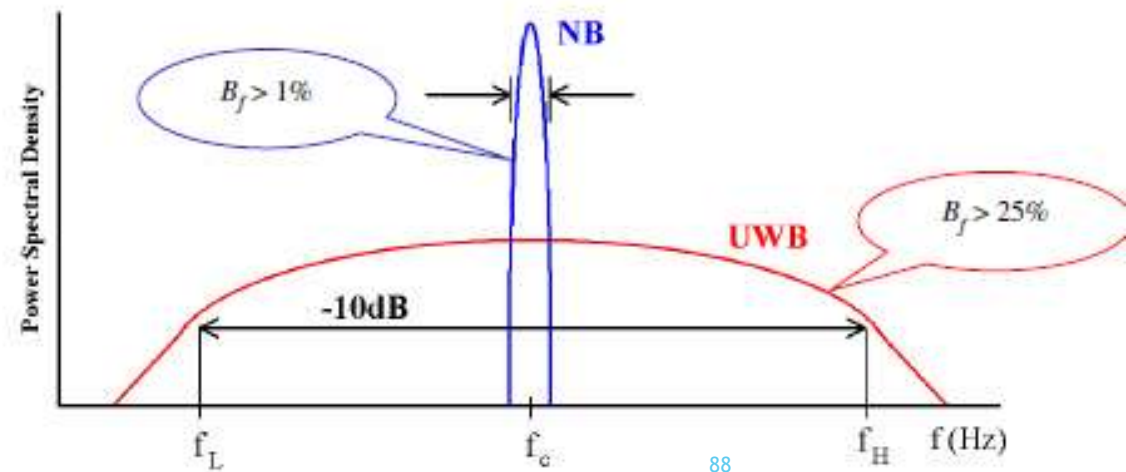
# Fondement Théorique

## ■ FCC Definition

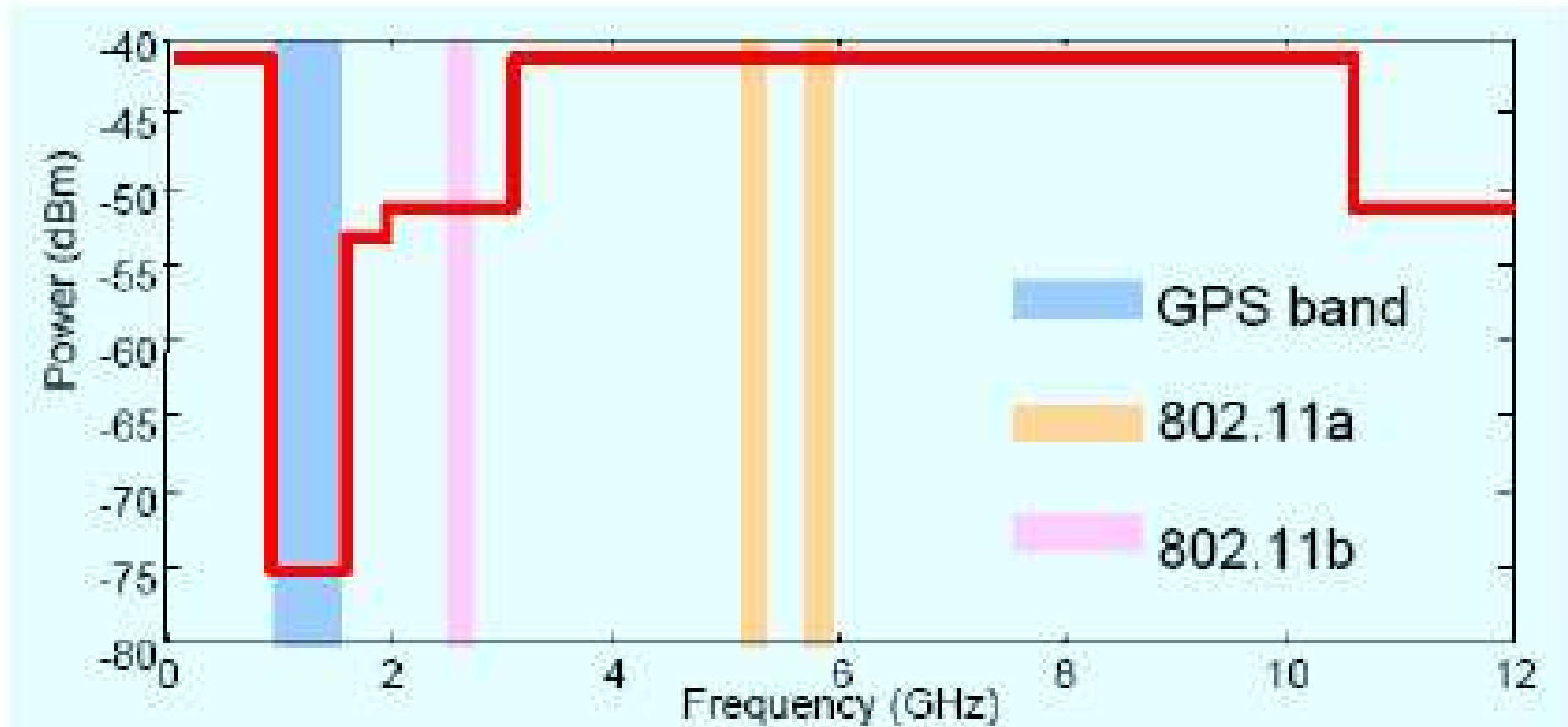
- $B_f > 20\%$  (measured at -10 dB)
- total BW > 500 MHz

## ■ Common Definition

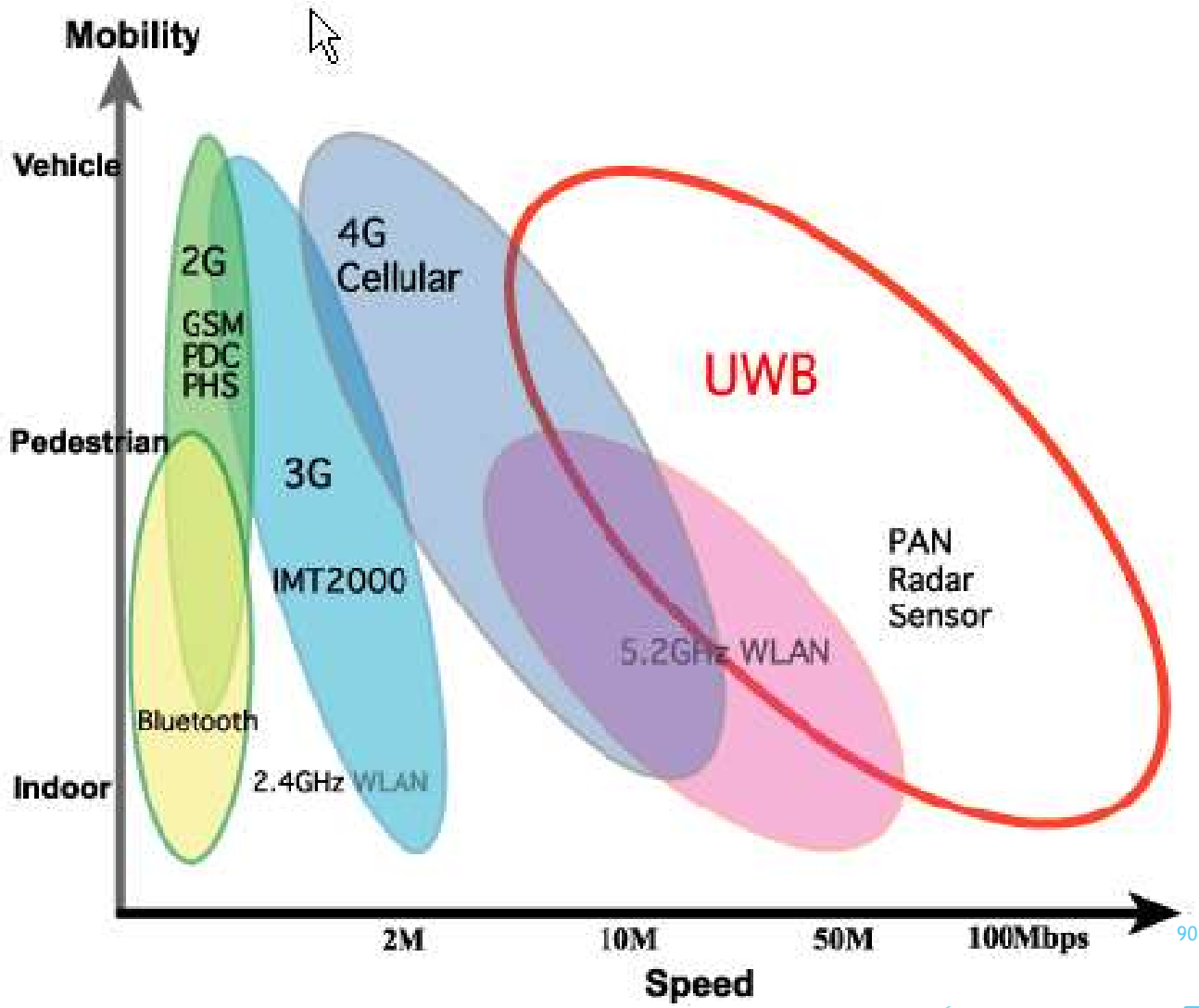
- $B_f > 25\%$
- total BW > 1.5 GHz



# Masque spectral



# Standards



# Deux Types de Communications UWB

## ■ ULB à impulsions (I-UWB, IR-UWB)

- Absence de porteuse
- Communication par séries d'impulsions

$$s(t) = \sum_{i=-\infty}^{+\infty} A_i(t) \cdot p(t - iT_f)$$

## ■ ULB multiporteuses (MC-UWB)

- OFDM : forme de modulation la plus commune

$$s(t) = \sum_{i=1}^N d_i(t) \cdot e^{j2\pi i T / T_s}$$

## *Premiers réseaux PAN à haut débit*

- Spécifications des couches MAC et PHY
- L'objectif initial était d'atteindre un débit d'au moins 20 Mb/s, avec une portée et une puissance identiques à Bluetooth, en utilisant la bande 2.4 GHz ISM (pas UWB)
- Les premiers travaux de standardisation UWB : extension du 802.15.3:
  - ◆ WiMedia MB-UWB (Multi-Band OFDM)
  - ◆ UWB Forum DS-UWB (Direct Sequence)

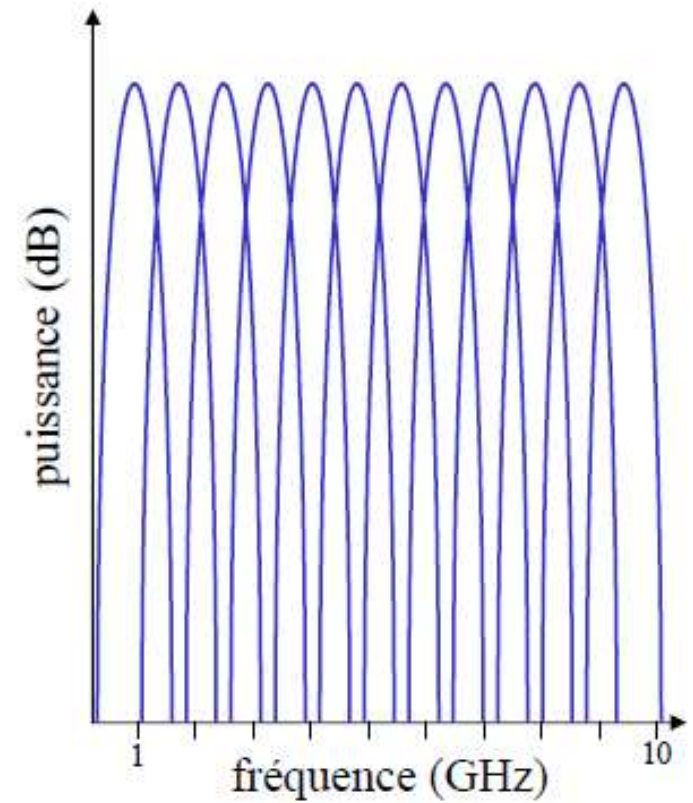
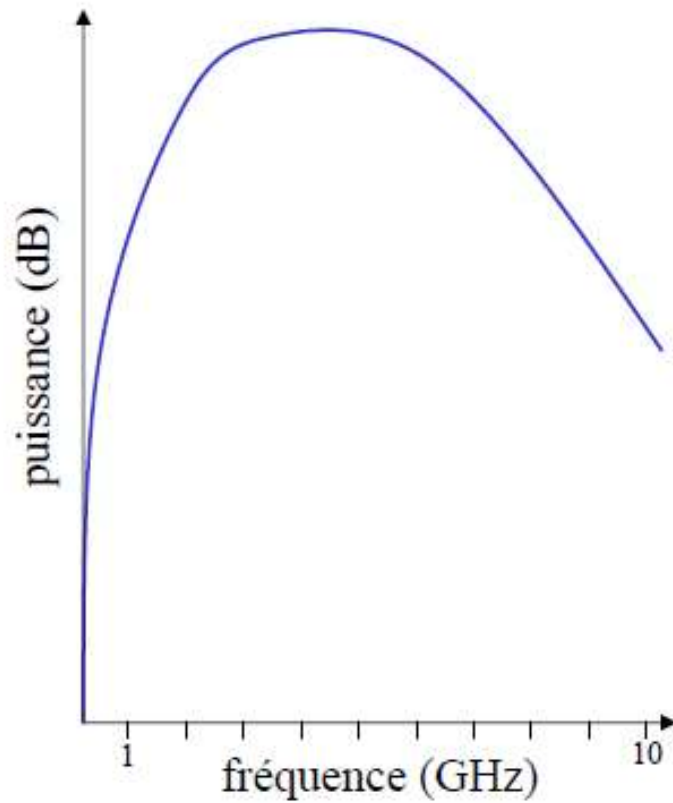
# Deux Types de Communications UWB

Spectres typiques

I-UWB

versus

MC-UWB



# Deux Types de Communications UWB

## ■ ULB à impulsions (I-UWB, IR-UWB)

- Absence de porteuse
- Communication par séries d'impulsions

$$s(t) = \sum_{i=-\infty}^{+\infty} A_i(t) \cdot p(t - iT_f)$$

## ■ ULB multiporteuses (MC-UWB)

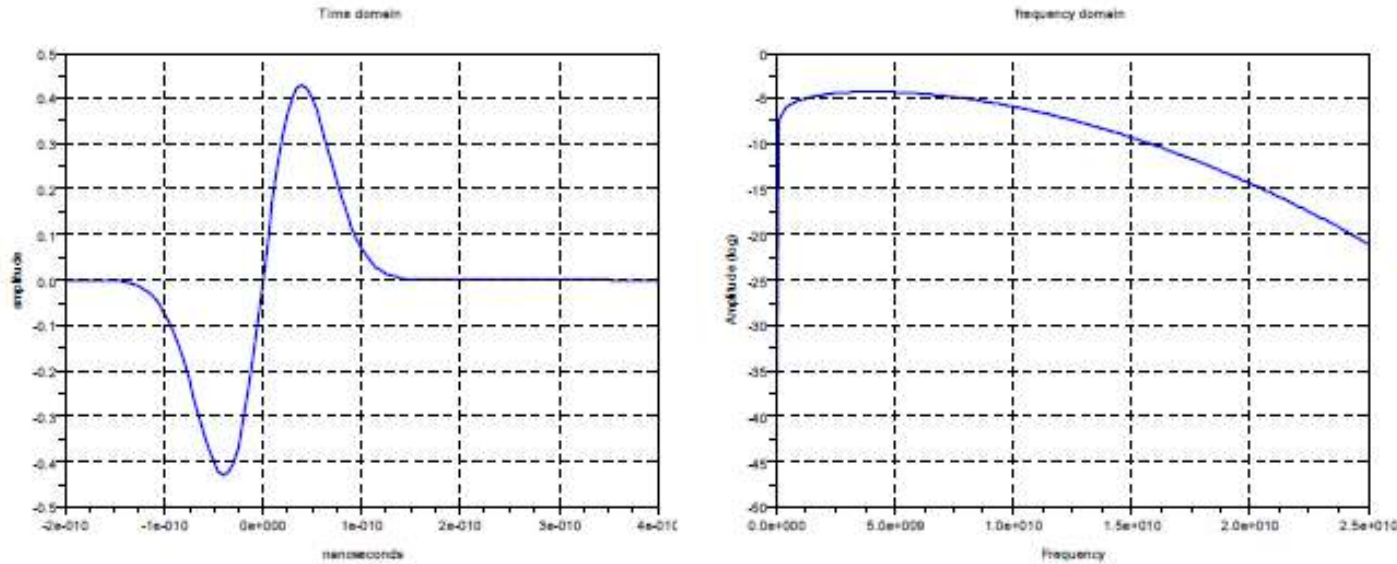
- OFDM : forme de modulation la plus commune

$$s(t) = \sum_{i=1}^N d_i(t) \cdot e^{j2\pi i T / T_s}$$

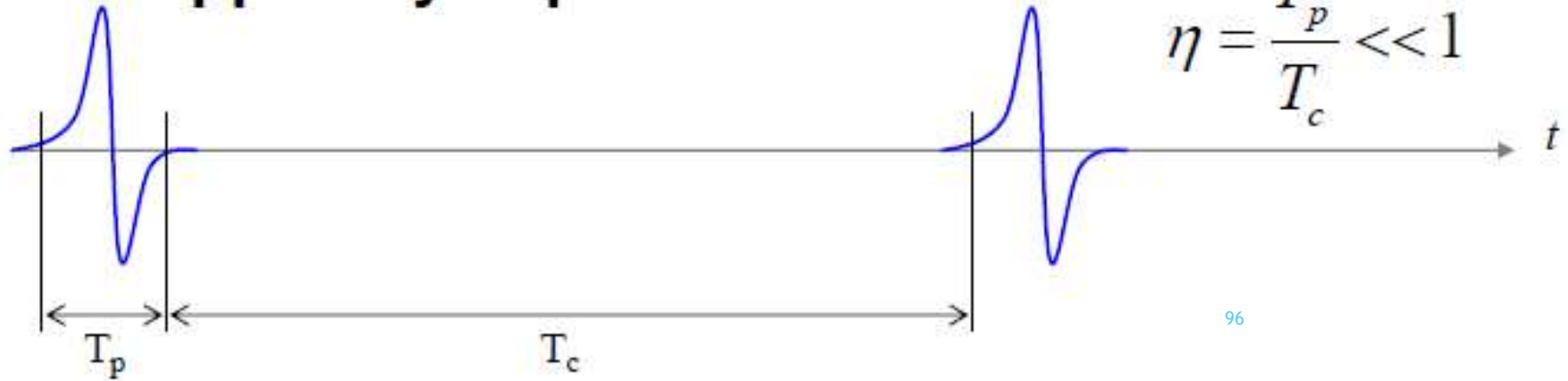
# Caractéristiques du signal IR-UWB

- Impulsions très courtes en bande de base à très faible rapport cyclique ;
- Signal très large bande donc à grande diversité fréquentielle : robuste aux interférences ;
- Signal à très faible DSP donc systèmes à faible consommation d'énergie ;
- Sauts temporels pseudo-aléatoires : si le code est long, signal proche d'un bruit blanc : systèmes «discrets» ;
- Très forte résolution temporelle : peut permettre la séparation de trajets et une localisation précise.

# Modulation IR-UWB



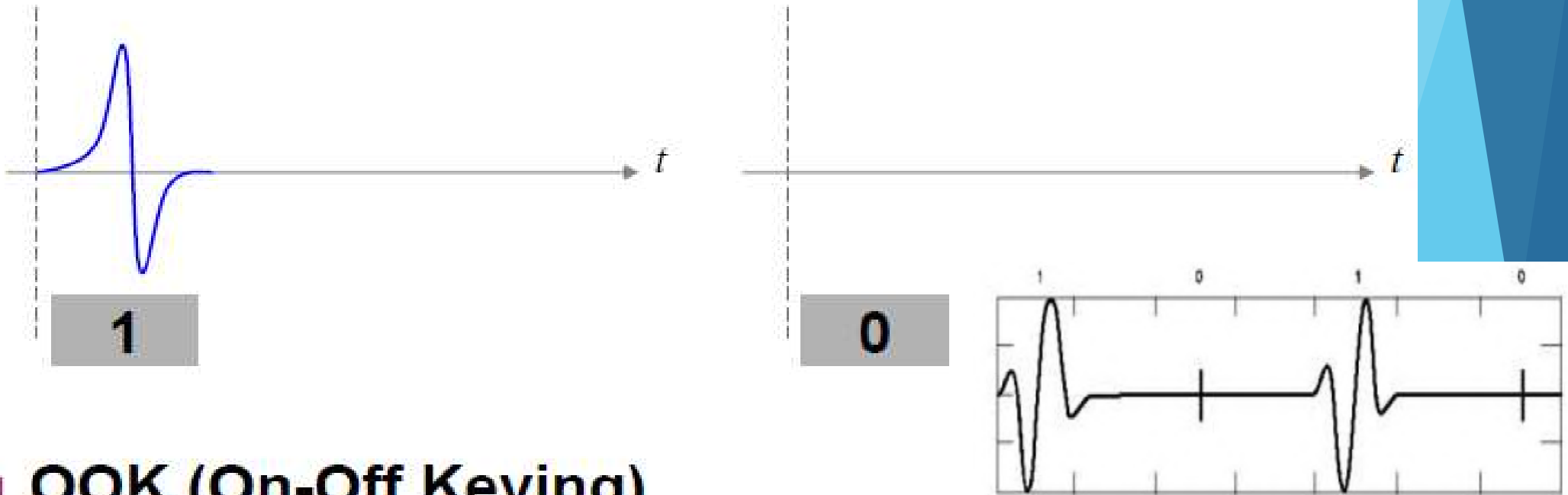
## ■ Rapport cyclique très faible



# Schémas de Modulation

- **Modulation en tout ou rien**
- **Modulation par la position de l'impulsion**
- **Modulation à deux états de phase**
- ...
- **Modulations hybrides**
  - Ex. : PPM + BPSK

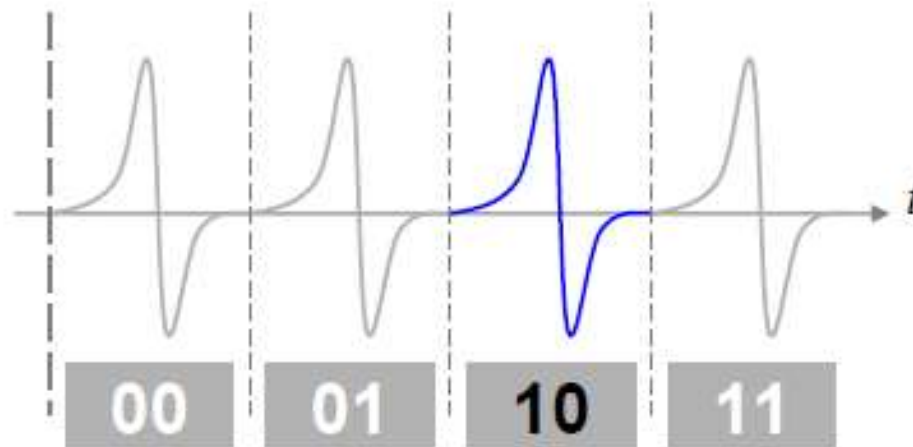
## Modulation en tout ou rien



### ■ OOK (On-Off Keying)

- Évite la périodicité si la séquence est non périodique.
- Mise en œuvre simple à l'émission et à la réception.
- Possibilité d'impulsions deux fois plus puissantes qu'en PPM si équi-répartition des symboles.

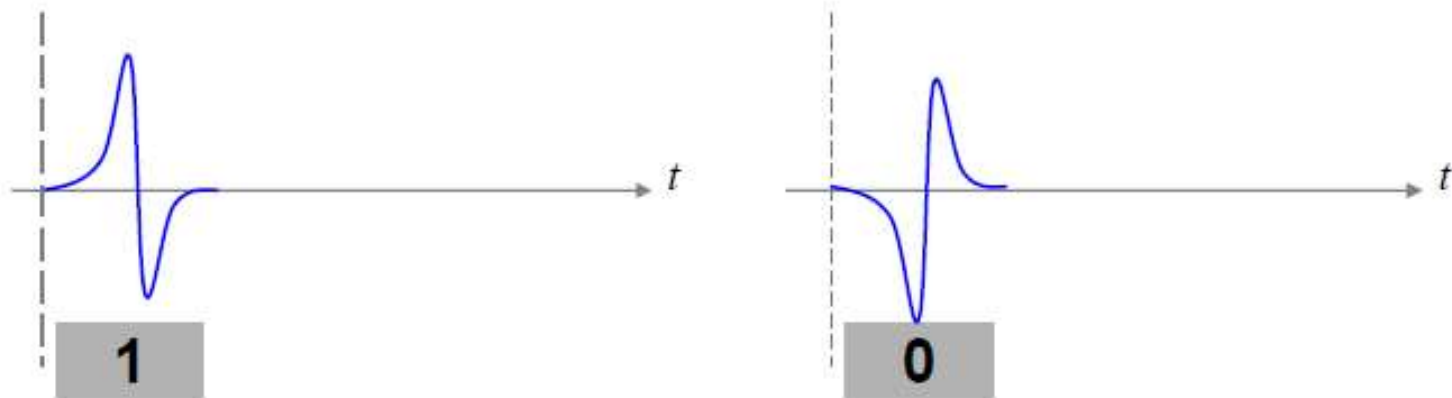
# Modulation par la position de l'impulsion



## ■ Pulse Position Modulation (PPM)

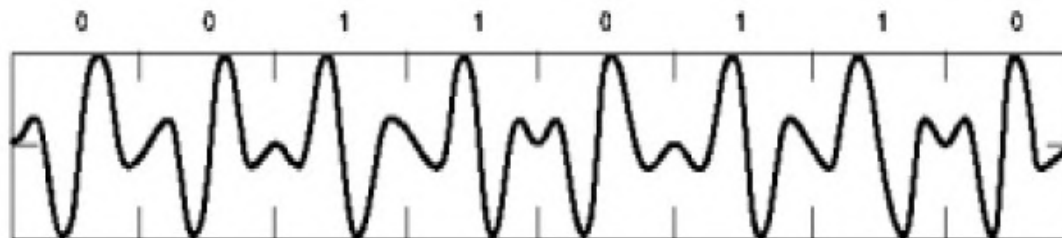
- Pas de périodicité du train d'impulsions
- Possibilité de symboles à grand nombre d'états
- Mise en œuvre simple à l'émission par contrôle de l'instant d'impulsion

# Modulation à deux états de phase



## ■ Bipolar Signaling Keying (BPSK)

- A taux d'erreur binaire identique, requiert un SNR inférieur de 3dB à celui d'une modulation PPM
- Synchronisation simple
- Alternance d'impulsions et d'impulsions inversées supprime les raies spectrales dues à la périodicité du signal



# Gaussienne, monocycle et dérivées

- **Gaussienne**

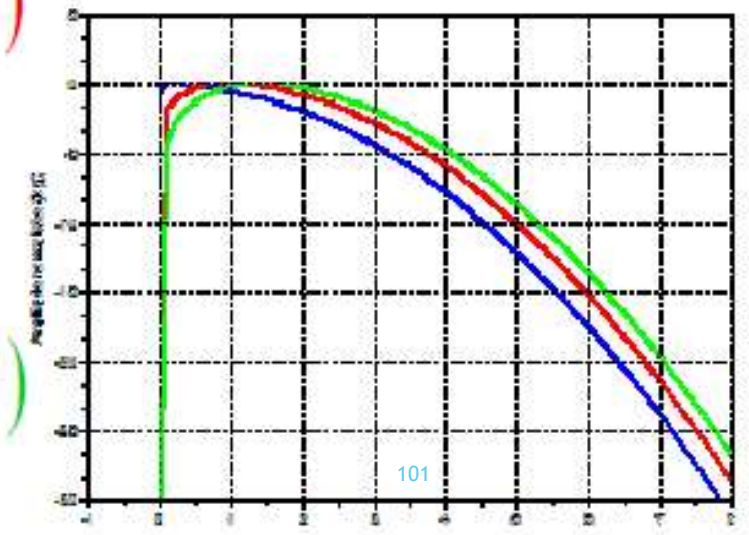
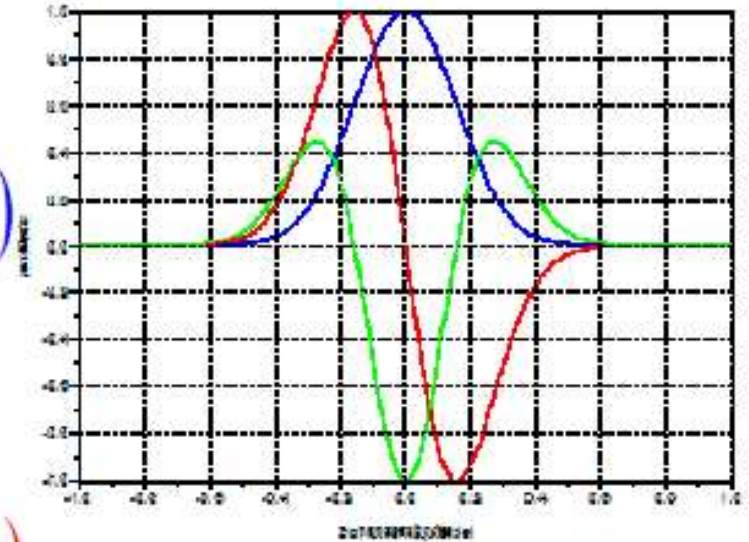
$$y(t) = K \cdot \exp(-\alpha \cdot t^2)$$

- **Dérivée première**

$$y(t) = -2 \cdot K \cdot \alpha \cdot t \cdot \exp(-\alpha \cdot t^2)$$

- **Dérivée seconde**

$$y(t) = K \cdot (4 \cdot \alpha^2 \cdot t^2 - 2 \cdot \alpha) \cdot \exp(-\alpha \cdot t^2)$$

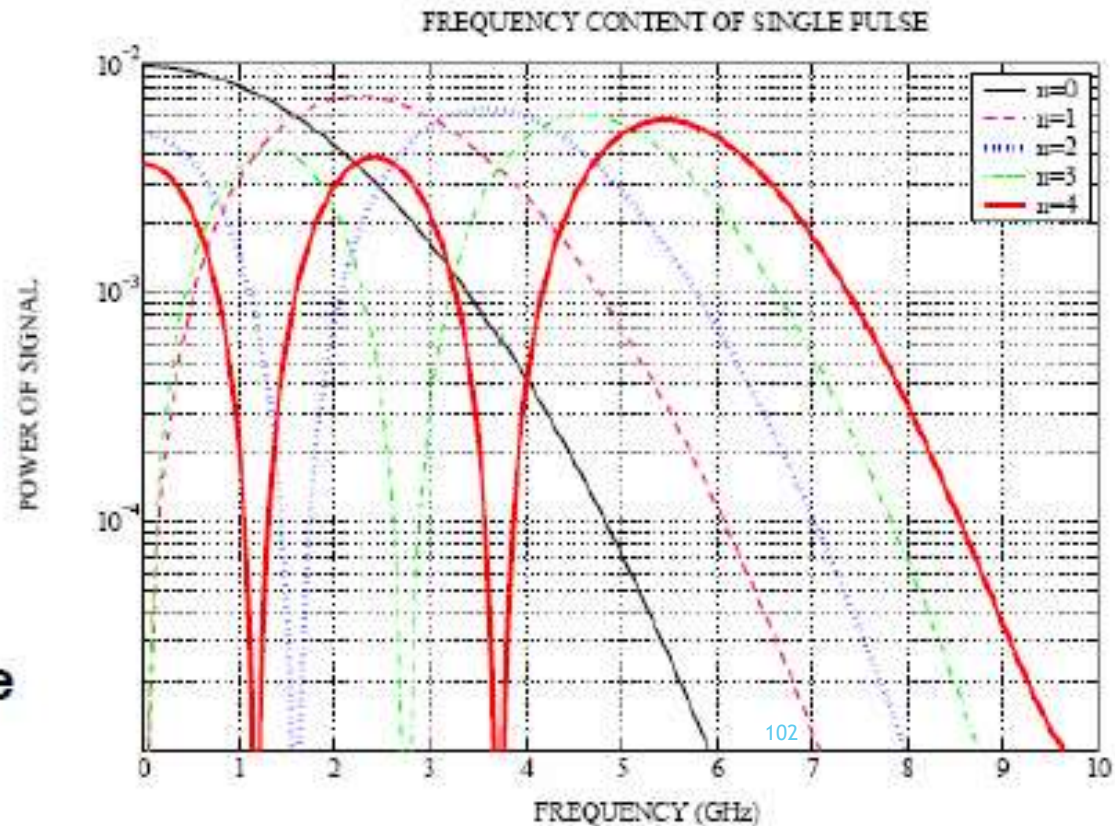


# Impulsions en polynômes d'Hermite modifiés

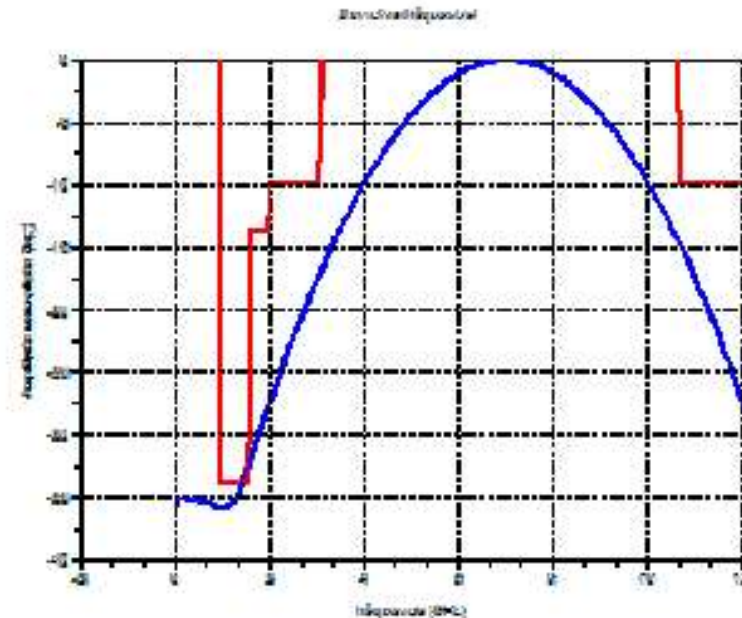
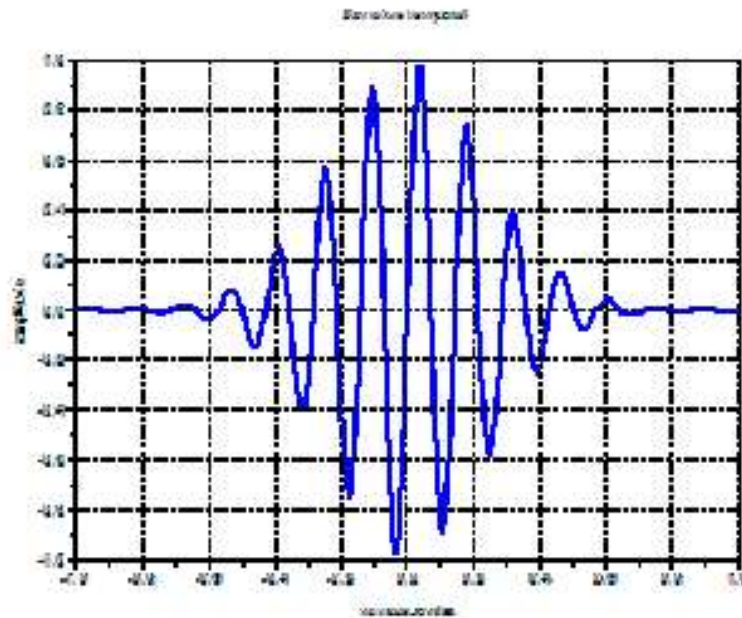
$$h_n(t) = (-1)^n \cdot \exp\left(-\frac{t^2}{4}\right) \cdot \frac{d^n}{dt^n} \left(-\frac{t^2}{2}\right) \text{ avec } n \in \mathbb{N}$$

## ■ Propriétés :

- Durée d'impulsion quasi-identique  $\forall n$ .
- Largeur de bande quasi-identique  $\forall n$ .
- L'impulsion possède une composante continue.
- Le nombre de passage à zéro est égal à  $n$ .



# Gaussienne modulant une sinusoïde

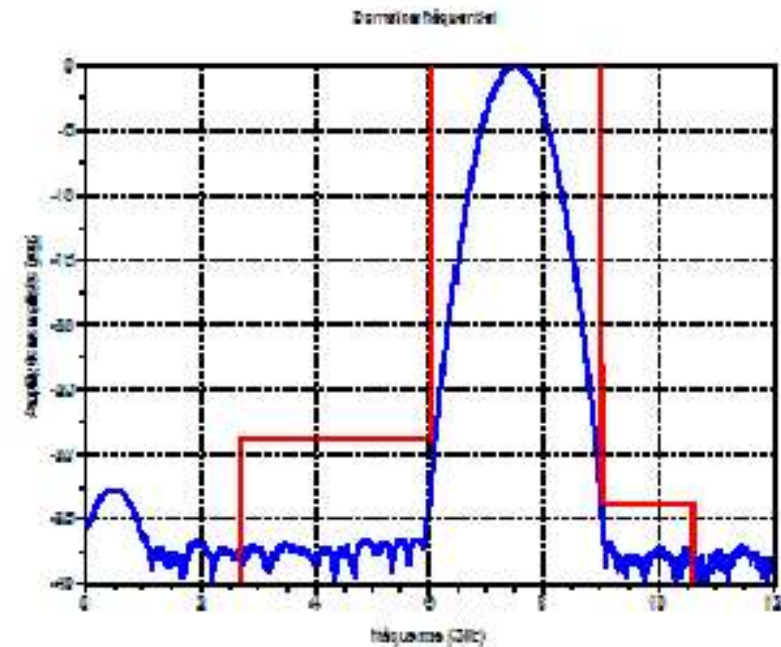
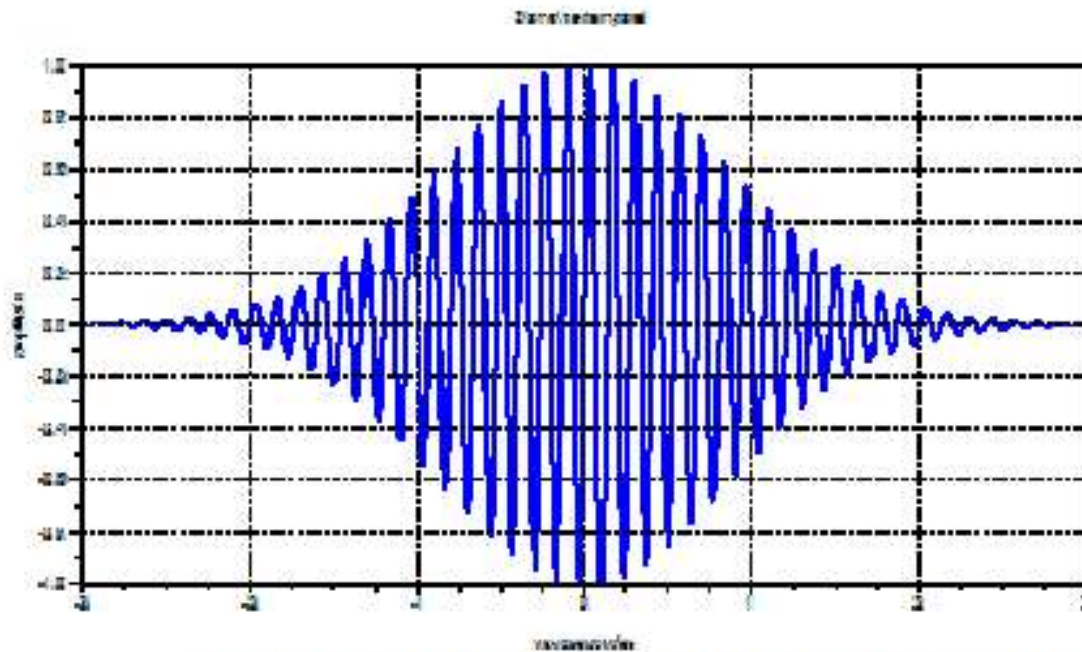


- **Fenêtrage d'une fonction sinusoïdale par une gaussienne.**

$$y(t) = A \cdot \sin(2\pi \cdot F_c \cdot t) \cdot \exp(-\alpha \cdot t^2)$$

- Exemple pour le masque FCC

# Gaussienne modulant une sinusoïde

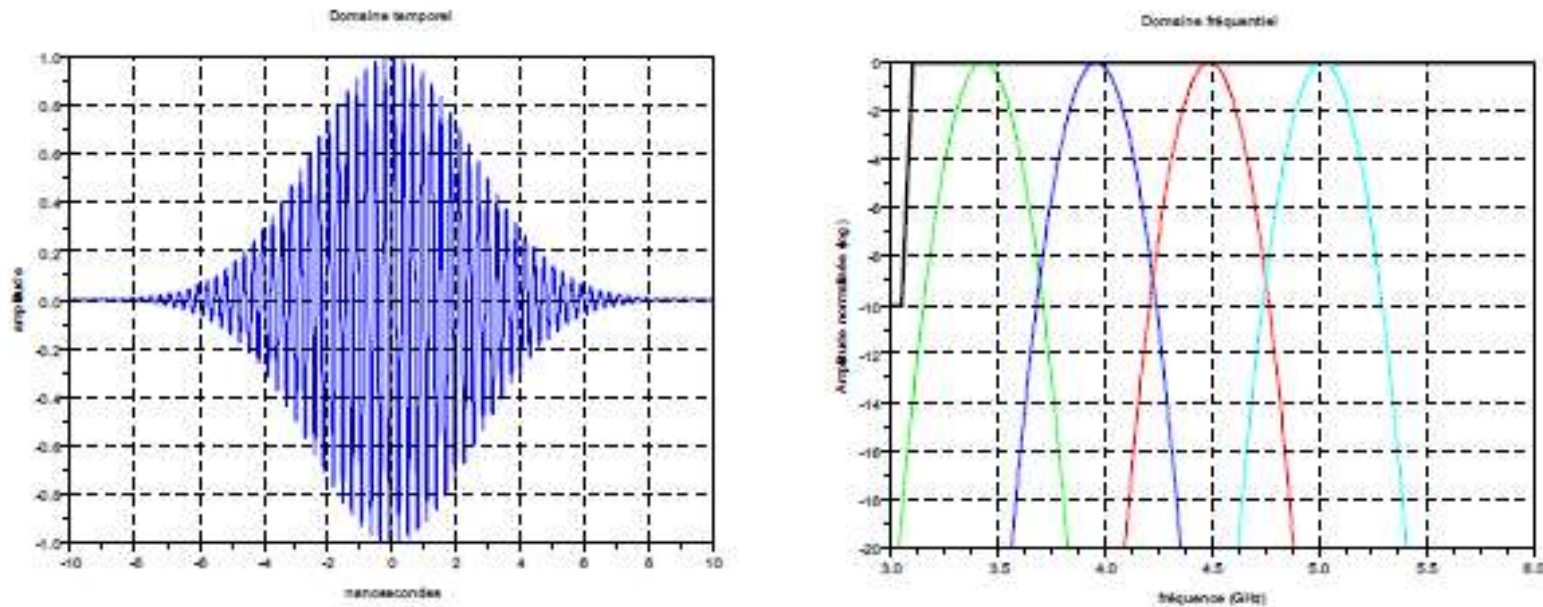


- Fenêtrage d'une fonction sinusoïdale par une gaussienne.

$$y(t) = A \cdot \sin(2\pi \cdot F_c \cdot t) \cdot \exp(-\alpha \cdot t^2)$$

- Exemple pour le masque européen

# Gaussienne modulant une sinusoïde

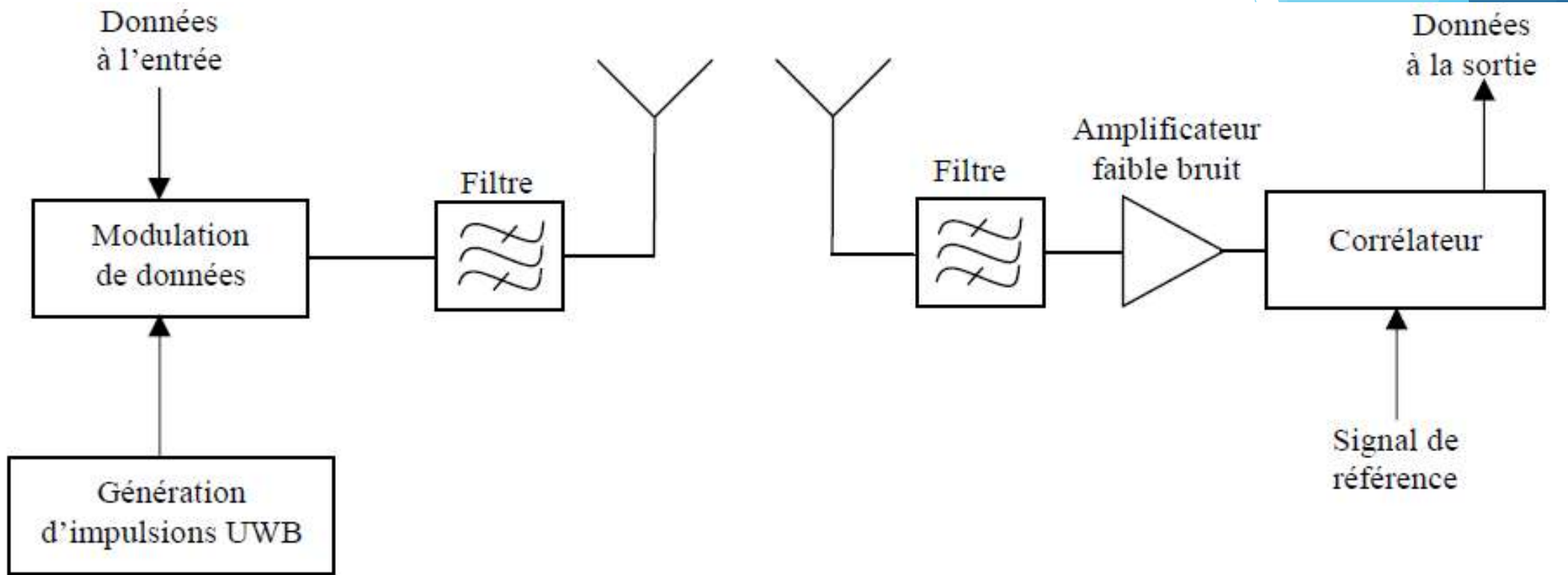


- Fenêtrage d'une fonction sinusoïdale par une gaussienne.

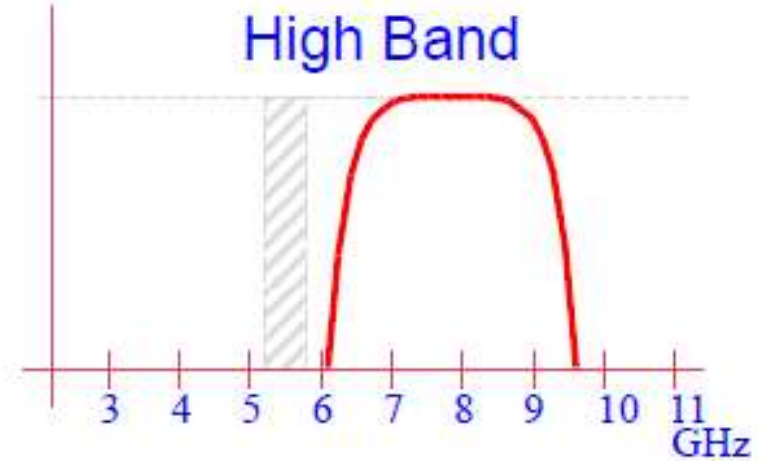
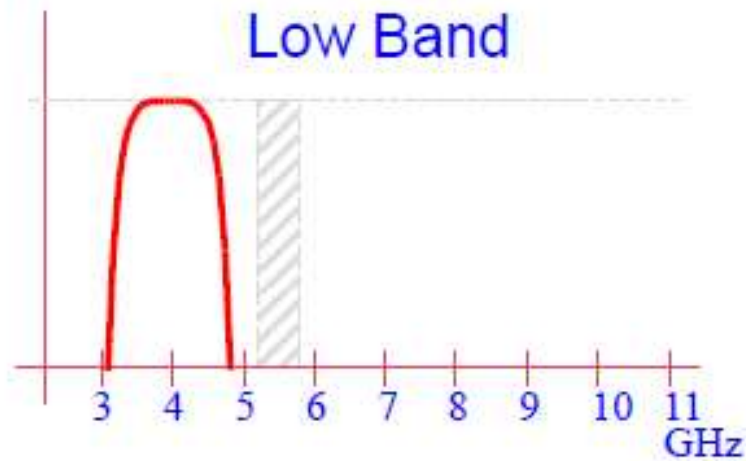
$$y(t) = A \cdot \sin(2\pi \cdot F_c \cdot t) \cdot \exp(-\alpha \cdot t^2)$$

- Exemple pour une bande de 500MHz

# L'architecture Emetteur/Récepteur de l'ULB



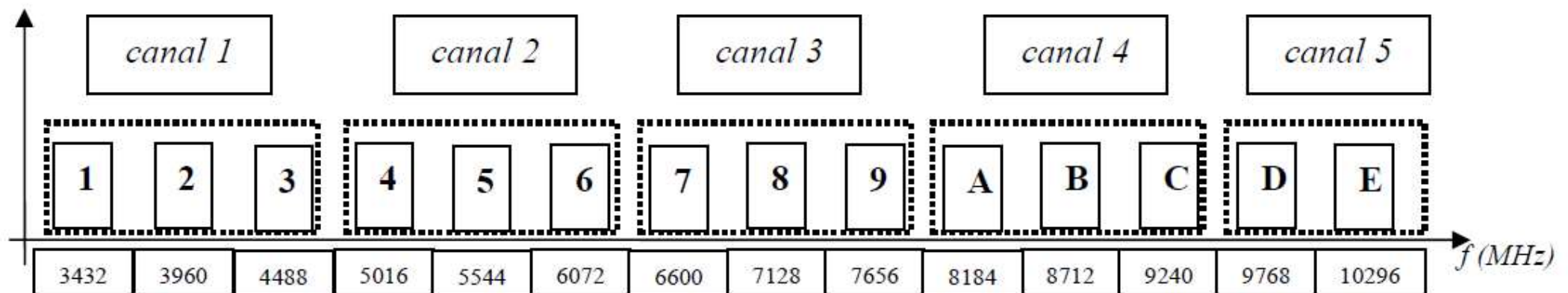
## Bandes Utilisées en DS-UWB



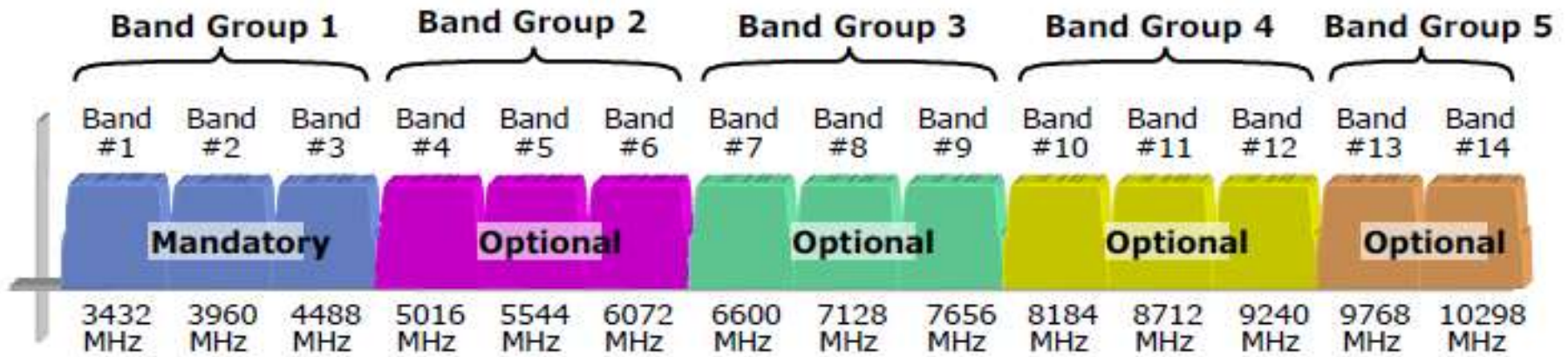
- Chaque piconet opère dans l'une des deux bandes
  - ◆ Low band (3.1 à 4.9 GHz) – obligatoire
  - ◆ High band (6.2 à 9.7 GHz) – Optionelle

# Architecture MBOA

L'approche MBOA (Multiband OFDM Alliance) utilise une forme d'onde OFDM "classique" où le spectre total ULB disponible est divisé en plusieurs sous-bandes de 528 MHz (14 sous bandes au maximum, regroupées par 3 ou 2 en 5 canaux) (figure 4). Chaque sous bande est elle-même décomposée en 128 sous porteuses de 4 MHz de large.



# Architecture MBOA



Link Margin Ref. (0 dB). -02.7 dB

-04.9 dB

-06.5 dB



Channel Number	Band Group 1 Length 6 TFC					
	1	2	3	1	2	3
1	1	2	3	1	2	3
2	1	3	2	1	3	2
3	1	1	2	2	3	3
4	1	1	3	3	2	2

## MBOA PHY Specification 1.0

- Band Switching
  - Within Band Set #1
  - 3.168 – 4.752 GHz
- Bands 1, 2 and 3
  - Each occupy 528 MHz
- Band Subcarriers
  - 128 tone OFDM
  - Tone width: 4.125 MHz
  - Tone modulation: QPSK

**Global Solution:** Flexible band plan and use of OFDM subcarriers allows for "spectrum shaping" which can be used to meet worldwide regulatory requirements

# MBOA

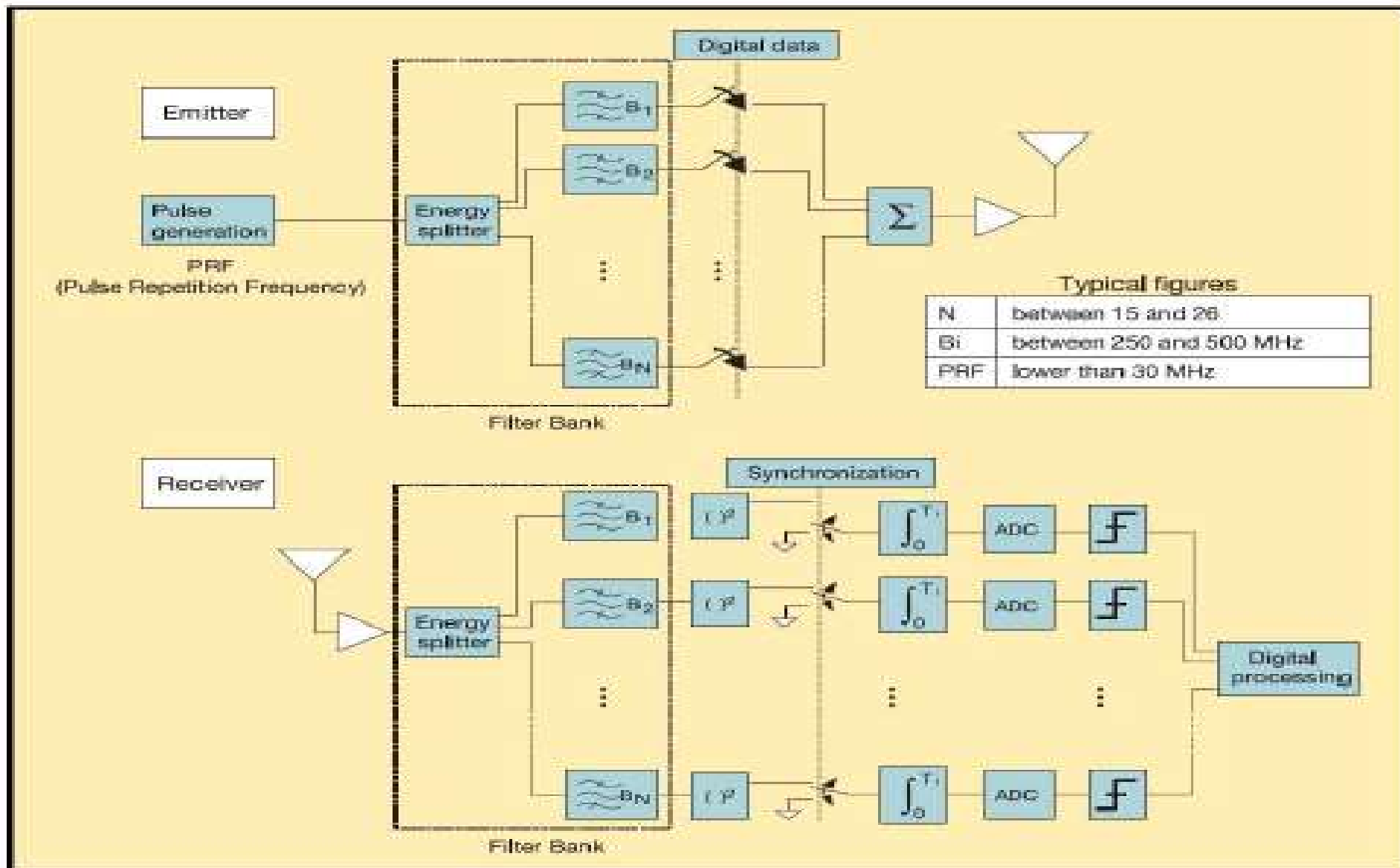
Les caractéristiques principales de l'approche OFDM dans une sous bande de 528 MHz sont résumées dans le tableau ci-dessous :

Paramètre	Valeur
Taille de la FFT/IFFT	128
Fréquence d'échantillonnage	528 MHz
Bande de transmission	507.37 MHz
Nombre de porteuses pour les données	100
Nombre de porteuses pilotes	12
Nombre de porteuses de garde	10
Nombre total de porteuses utilisées	122
Espacement entre sous porteuses	4.125 MHz (=528 MHz/128)
Durée des 128 échantillons ( $T_{FFT}$ )	242.42 ns
Durée du préfixe cyclique ( $T_{PC}$ )	60.61 ns (32 échantillons)
Durée de l'intervalle de garde ( $T_{GI}$ )	9.47 ns
Durée du symbole OFDM ( $T_{SYM}$ )	312.5 ns ( $(T_{FFT}+T_{PC}+T_{GI})$ )

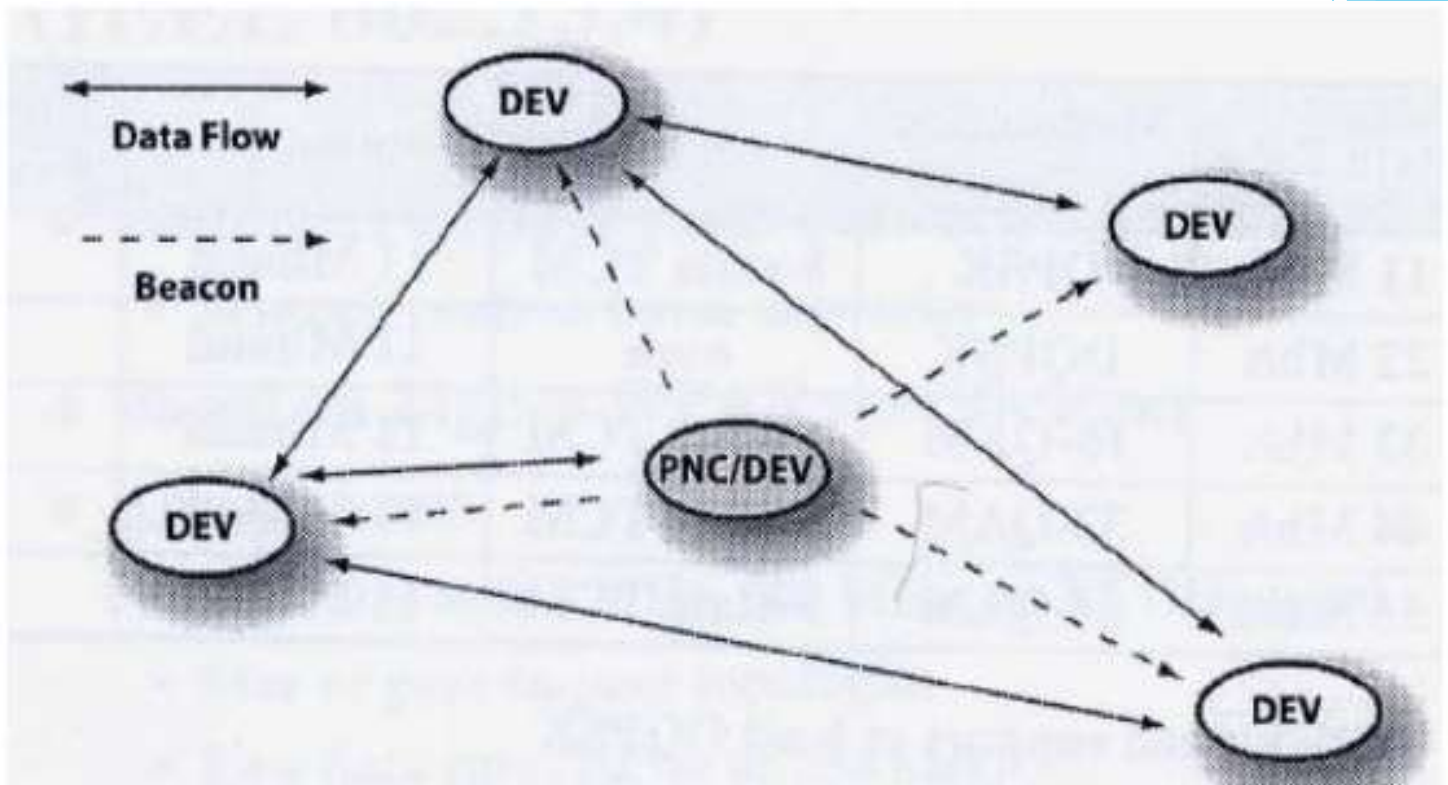
## Architecture MBOOK

Le principe de cette nouvelle architecture consiste à diviser le spectre ultra large de l'impulsion [3,1-10,6 GHz] en plusieurs sous-bandes étroites de 250 et 500 MHz. Chacune des sous-bandes est utilisée pour porter un bit en utilisant une modulation tout ou rien. La démodulation est basée sur le principe de détection non cohérente d'énergie.

# Architecture MBOOK



## Topologie d'un piconet



DEV = Device (esclave)

PNC = Pico-Network Controller (maître)

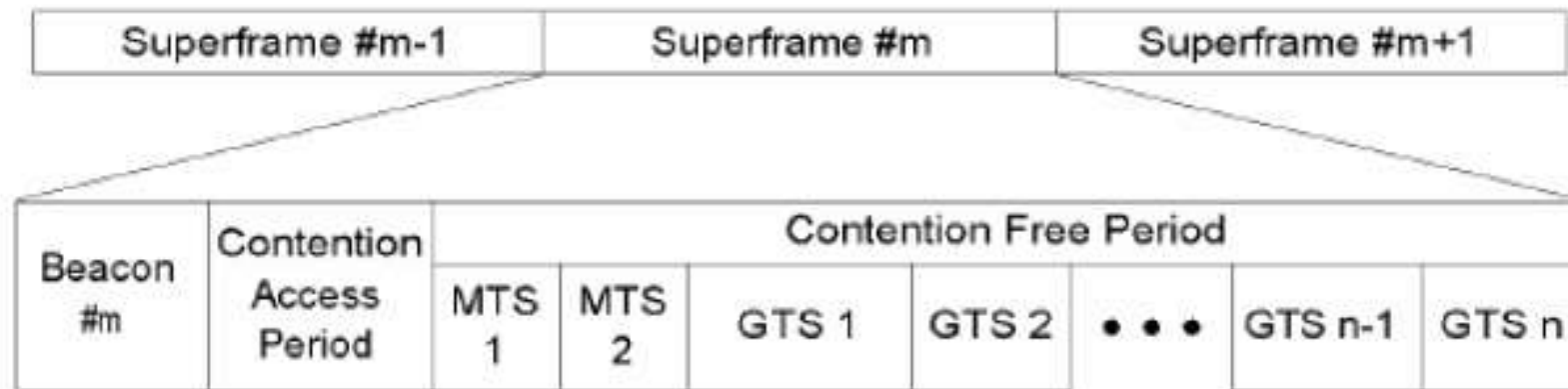
## Formation d'un piconet

- Un DEV qui est capable d'être PNC et qui veut démarrer un piconet cherche un canal libre
- S'il y en a un: Il envoie une trame de balise et se déclare PNC
- Sinon il essaye de créer un piconet dépendant d'un existant
  
- Ce n'est donc pas forcément le plus "capable" qui devient le PNC ; cela peut être renégocié lors de l'association d'un nouveau DEV. On maintient les allocations en cours
  
- Pour étendre la portée d'un piconet, on peut créer un piconet enfant. Il a un ID spécifique et utilise des slots de son réseau père. Les procédures d'association/sécurité sont identiques
- Fin d'un piconet : le PNC peut décider la fin du piconet (Piconet Shutdown) ; un piconet dépendant peut continuer à fonctionner (la dépendance disparaît du Beacon)

## Association un piconet

- Envoi d'une requête d'association (le noeud annonce ses capacités)
- Le PNC lui attribue un identifiant
- Broadcast sa présence dans le beacon suivant
  
- Déassociation : envoi d'un message au PNC qui prévient l'ensemble des noeuds ; la référence est gelée un certain temps
  
- Piconet voisin : idem que le piconet fils. Seule différence le PNC du piconet voisin ne fait pas partie du piconet père

## MAC 802.15.3 : superframe



- Balise : début de la trame, synchronisation, information de gestion + allocation des slots de la superframe
- Période avec contention pour effectuer les requêtes :
  - ◆ En accès aléatoire
  - ◆ CSMA/CA pour 802.15.3 et Aloha discrétisé pour 802.15.3a

## Format des trames 802.15.3

octets: 0 or 4	$L_m$	1	3	1	1	2	2
FCS	Frame payload	Stream index	Fragmentation control	SrcID	DestID	PNID	Frame control
MAC frame body		MAC header					

### Formats de l'entête et du corps de la trame

- PNID = identifiant du pico-net
- Src et Dest ID = identifiant (certains sont réservés pour PNC, Broadcast, Multicast, terminaux non associés, PNC piconets voisins)
- Stream Index = pour les flux synchrones attribués par le PNC (dans le beacon)
- Fragmentation control = numéro de SDU, numéro de fragment, nombre total de fragments

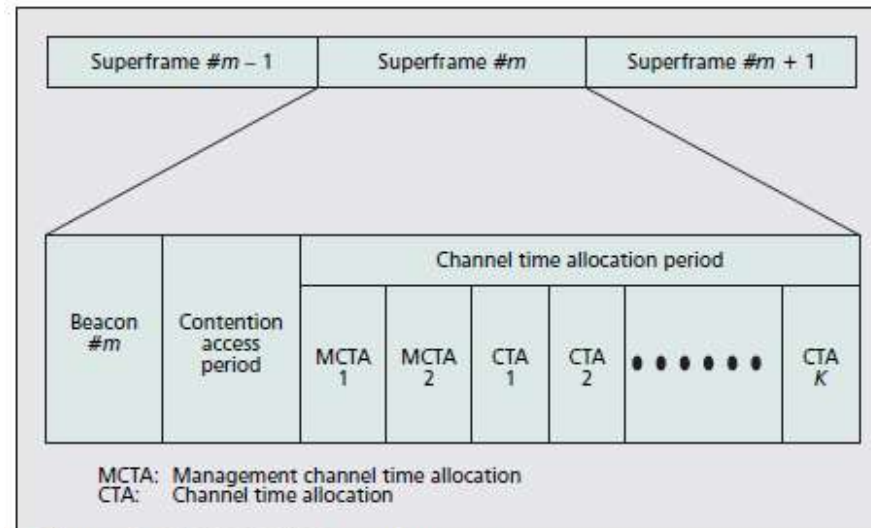
## Format des trames 802.15.3

bits: b15–b11	b10	b9	b8–b7	b6	b5–b3	b2–b0
Reserved	More data	Retry	ACK policy	SEC	Frame type	Protocol version

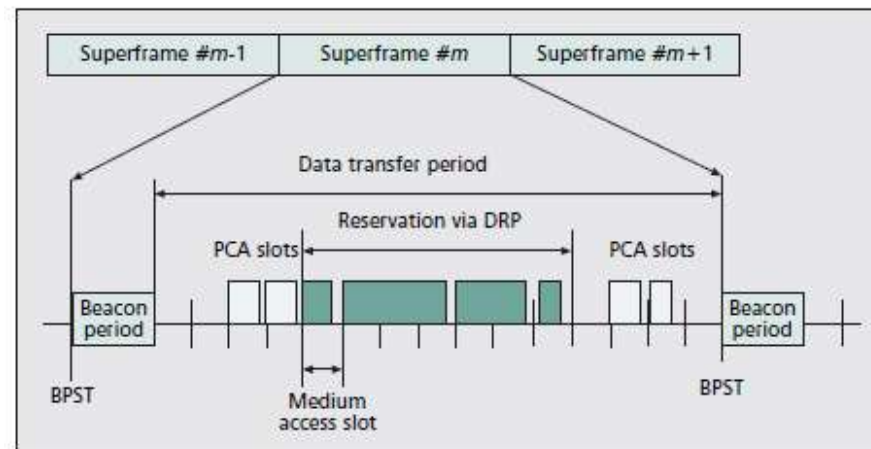
### Format du champ contrôle de la trame

- Version de protocole : figé (pour l'instant)
- Type de trame : Beacon, Imm-Ack, Delayed Ack, Command, Data
- SEC = trame sécurisée ?
- Ack policy = type d'acquittement utilisé
  - ◆ Sans ack, ack immédiat, ack différé, demande ack (différé)
- More Data = en cas de fragmentation

# Utilisation des CTA (Channel Time Allocation)



■ Figure 1. IEEE 802.15.3 superframe structure.



# Principe de l'UWB

- **Diffusion de courtes impulsions numériques à travers un large spectre**
- **Impulsion entre quelques pS et nS**
- **Dans un système d'accès multiple, un utilisateur dispose d'un code « pseudo – aléatoire » : PN**
- **L'émetteur et le récepteur UWB sont étroitement couplé au moyen d'un système d'accusé de réception**
- **Emission des signaux au niveau de bruit radioélectrique ambiant**

# Avantages & inconvénients

## Avantages :

- **Faible consommation d'énergie**
- **Faible détection**
- **Haute immunité aux effets multiples à la décoloration**
- **Débit important**
- **Disponibilité des informations de localisation précises**

## Inconvénients :

- **Difficile pour gérer les imputions extrêmement courtes**
- **Maximum d'acquisition (1ms)**
- **Interférences extérieures provenant d'autres systèmes**

# Conclusion

**UWB est une technologie radio :**

- Niveau d'énergie très faible**
- Communication à haut débit**

**UWB est une technologie de transmission d'informations réparties sur une large bande passante**

- Partager le spectre avec d'autre utilisateur**

## Conclusion : les limites des WPAN

Malgré leur consommation faible en énergie, les réseaux PAN présentent certaines limites liées principalement à :

- la portée
- Le débit
- la vitesse du transfert des données (plusieurs périphériques fonctionnent sur la longueur d'onde de 2,4 GHz, ceci à pour conséquence de ralentir les transferts de données)
- Le nombre de périphériques connectés (7 périphériques pour le Bluetooth)