

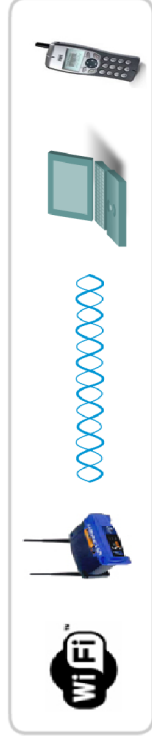
Licence SEICOM Module M3-2 « Communications sans fil – WPAN 802.15.4 – ZigBee »

Ph. Le Gal
P. Tasse



Les différents types de réseaux sans fil (1)

- Les standards IEEE couvrent la couche Physique et la couche Liaison de donnée du modèle OSI.
- IEEE 802.11a/b/g/n (Wi-Fi) : Wireless LAN (WLAN)
 - Longue portée pour les réseaux de grande taille
 - Architecture réseau basée sur des points d'accès
 - Vitesses 11 – 54 - XXX... Mb/s



Communications sans fil – WPAN



Caractéristiques générales IEEE 802.15.4
Généralités sur ZigBee
Architecture du protocole
La couche MAC
La couche PHY
Modulation numérique
DSSS

Les différents types de réseaux sans fil (2)

- IEEE 802.15 : Wireless Personal Area Network (WPAN)
- Bluetooth : IEEE 802.15.1
 - Beaucoup d'applications variées (PDA, périphérique, etc.)
 - Portée de quelques dizaines de mètres à 1 Mb/s.

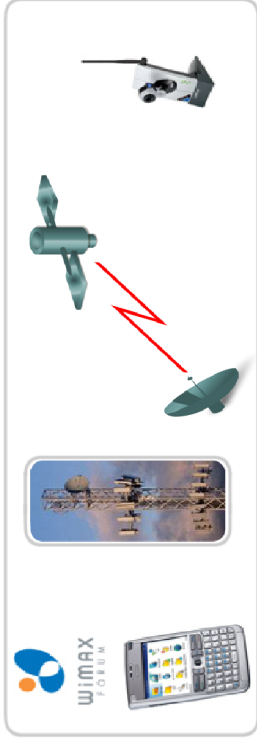


- Zigbee IEEE 802.15.4 et BLE
 - Communication de petites radios, à consommation réduite pour les réseaux à dimension personnelle (Wireless Personal Area Networks : WPANs)
 - Portée de quelques dizaines de mètres à 250Kb/s.
- WBAN : IEEE 802.15.6 - spécifique pour le corps humain



Les différents types de réseaux sans fil (3)

- IEEE 802.16 : WiMAX (Worldwide Interoperability for Microwave Access)
 - Liaison Point – Multipoint proposant une couverture de quelques kilomètres
 - Accès sans fil large bande.
- GSM : Global System for Mobile Communications
 - GPRS : protocole d'échange de données via le réseau de téléphonie mobile cellulaire.



Module M3-2 – Communications sans fil – LRWPAN
802.15.4 – BLE et ZigBee

5

Les concurrents (2)

- **Wavenis** : pile de protocole sans fil développée par Corionis pour le contrôle et la supervision de système d'automatisation pour le résidentiel et les immeubles.
- **Les solutions IP** : IETF IPv6 over Low-power WPAN (6LoWPAN) Working Group (WG) propose des mécanismes pour la transmission de paquets IPv6 au dessus des réseaux IEEE 802.15.4.

Module M3-2 – Communications sans fil – LRWPAN
802.15.4 – BLE et ZigBee

7

Les concurrents (1)

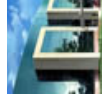
- **Wifi** : vitesse et consommation élevées. Pas adapté pour le domaine de l'automatisme sauf pour la transmission audio/vidéo.
- Infra-rouge : Aucun standard, point à point (TV, porte de garage).
 - Le Zigbee peut être une solution pour centraliser les commandes au travers d'un WPAN : Télécommande Freebox
- Z-Wave (Zensys) : automatisme dans le domaine du résidentiel.
- Insteon : réseau maillé pour applications spécialisées dans l'automatisation résidentielle.

Module M3-2 – Communications sans fil – LRWPAN
802.15.4 – BLE et ZigBee

6

Introduction Zigbee (1)

- Le **ZigBee** est une nouvelle technologie sans fil basé sur le standard **802.15.4**
- Entièrement basé sur des standards
- Utilisable dans les applications suivantes :
 - **industrielles** : automatisme, remplacement de capteurs filaires, capteurs intelligents
 - **domotique** : gestion d'immeuble
 - **domestique** : maison intelligente
- Plus de 80 millions de modules produits fin 2006, 400 millions prévus en 2019.
- Inter-opérable et utilisable à travers le monde entier



Module M3-2 – Communications sans fil – LRWPAN
802.15.4 – BLE et ZigBee

8

- Basse vitesse de transmission des données
- Basse consommation d'énergie :
 - Pile de protocole simple nécessitant peu de ressource de calcul, donc peu d'énergie.
 - Puissance d'émission variable pour assurer des petites et moyennes couvertures radio (typiquement de 10 à 20m pour 1dBm)
 - Plusieurs années en fonctionnement sur pile ou batterie.
- Bas coût (~2€ l'unité) : à moduler en fonction du niveau d'intégration.
- Permet de constituer des réseaux de petite ou grande taille, sécurisés et fiables.

Les applications (1)

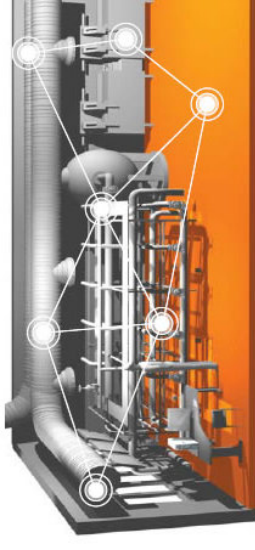
- **Surveillance** : alarmes incendie, capteur de pression...
- Contrôle et **automatisme** pour industrie et le résidentiel
 - chauffage, ventilation, air conditionné,
 - sécurité,
 - éclairage et contrôle à distance de store, fenêtres, portes...
- **Géolocalisation** :
 - suivi d'inventaire en temps réel,
 - balisage de sites de catastrophes, etc.
- **Agriculture** de précision : mesure de PH, pesticide, humidité, etc.



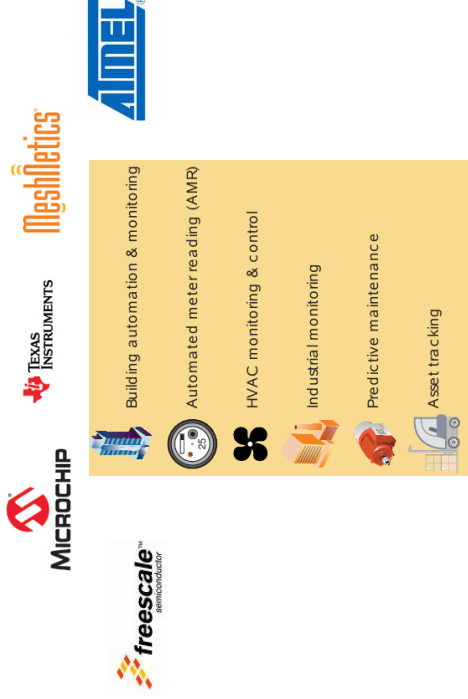
- **Bluetooth Low Energy** qui depuis l'arrivée du Wibree (autre nom du BLE, conçu par Nokia) s'est positionné sur les objets connectés (montres, tablettes, etc.).
- Orienté vers l'IOT (Internet des Objets)
- Ces dernières années il a tendance à supplanter le zigbee.
- 28 milliards d'objets d'ici 2020 (estimation du Harvard Business Review)

Les applications (2)

- Domaine de la **santé** : mesure, diagnostic.
- **Identification** : badges et tags actifs.
- Loisir :
 - jeux interactifs,
 - appareils électroniques grand-public, télécommande universelle, etc.
- **Périphériques** informatiques : souris, clavier, joystick, etc.



Les principaux acteurs du marché



Caractéristiques générales de l'IEEE 802.15.4 (1)

- Protocole de communication pour les **LR WPAN** (Low Rate Wireless Personal Area Network)
- La norme 802.15.4 définit la couche physique (**PHY**) et **MAC** du ZigBee
- Topologie Etoile ou Maillée avec dans chaque cas, un **coordonnateur** PAN chargé d'organiser les communications
- Deux modes de communication :
 - Réseau avec trames de balisage "**beacon**" émises régulièrement par le coordonnateur pour synchroniser les échanges.
 - Réseau sans trames de balisage (non-beacon) où les communications sont libres.

Communications sans fil – WPAN

Introduction
Caractéristiques générales IEEE 802.15.4
Généralités sur ZigBee
Architecture du protocole
La couche MAC
La couche PHY
Modulation numérique
DSSS

Caractéristiques générales de l'IEEE 802.15.4 (2)

- Adresses de 16 ou 64 bits
- **CSMA/CA** (Carrier Sense Multiple Access by Collision Avoidance) et slotted CSMA/CA:
 - Émission après écoute et attente aléatoire. Attente ACK puis ré-émission après attente aléatoire si pas ACK.
 - Méthode plus gourmande en temps que le CSMA/CD qui n'est pas utilisable en technologie radio.
- **RSSI** (Received Signal Strength Indicator) et **LQI** (Link Quality Indicator)

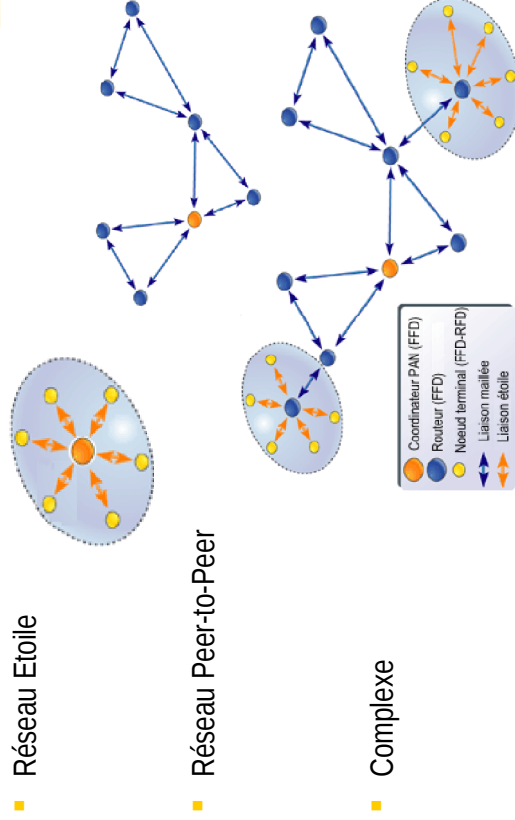
Caractéristiques générales de l'IEEE 802.15.4 (3)

- Canaux :
 - 16 canaux de 2.4 à 2.4835GHz (Bande de fréquence utilisable dans le monde - 250Kbit/s max)
 - 10 canaux de 902 à 928MHz (Bande de fréquence utilisable au USA – 40Kbit/s)
 - Peu de références sur le marché
 - 1 canal de 868 à 868.6MHz (Bande de fréquence utilisable en Europe - 20Kbit/s)
- Risque d'**interférence** avec d'autres bande (ex: 2,4GHz-Wifi) : probabilité d'interférence réelle mais faible du fait du coefficient d'utilisation du ZigBee qui reste peu élevé.
- Distance de transmission de 10 à 100m en fonction de la consommation et de l'environnement.

Caractéristiques générales de l'IEEE 802.15.4 (4)

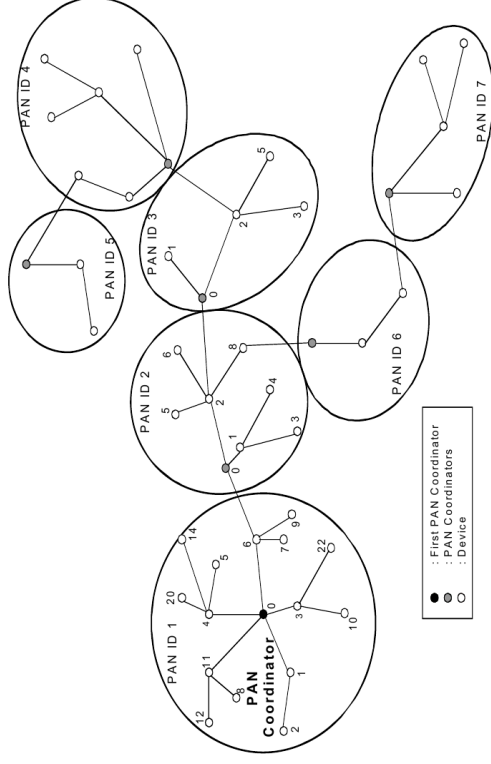
- Deux types de modules :
 - **FFD** (Full Function Device) : 3 rôles possible : coordinateur PAN, routeur ou dispositif terminal
 - **RFD** (Reduce Function Device) : dispositif terminal (End Device = capteur)
- Tous les modules doivent utiliser le même canal pour dialoguer.
- Les FFDs communiquent avec des FFDs et des RFDs
- Les RFDs communiquent avec un FFD uniquement

Topologies réseau (1)



Topologies réseau (2)

- Réseau Etoile : la communication se fait entre un module et un seul nœud central, le coordinateur PAN.
- Réseau Peer-To-Peer : Il doit y avoir un coordinateur PAN. La communication peut se faire de module à module dans la limite de la zone couverture d'un module.
- Un module est associé au PAN par son coordinateur.
- Le coordinateur PAN choisit un identificateur de réseau unique et peut changer l'adresse 64bits d'un module par une adresse 16bits.
- Cet identificateur PAN autorise deux modules à utiliser l'adresse courte pour communiquer et permet la communication entre réseaux PAN indépendants.



21

ZigBee : Généralités

- ZigBee est un réseau « self-forming » :
 - Dans un réseau mesh, le premier FFD qui démarre peut se déclarer PAN coordinateur et les autres dispositifs rejoignent le réseau en envoyant des requêtes d'association.
- ZigBee est un réseau « self-healing » :
 - Dans un réseau mesh, il y a plus d'une route pour transmettre un message d'un dispositif à un autre. Quand la meilleure route n'est plus opérationnelle (obstacle à la transmission RF ou un défaut d'alimentation), le réseau peut sélectionner une autre itinéraire pour router le message.
- ZigBee est un réseau « ad-hoc » :
 - A opposer au réseau de type « infrastructure » où le point d'accès au routeur est désigné, ZigBee utilise un protocole réactif (ADOV) qui construit la table de routage lorsqu'un nœud en effectue la demande sans connaître le topologie du réseau

23

Communications sans fil – WPAN


Introduction
Caractéristiques générales IEEE 802.15.4
Généralités sur ZigBee
Architecture du protocole
La couche MAC
La couche PHY
Modulation numérique
DSSS

22

ZigBee : Généralités

- **Xbee :**
"XBee" est une famille de composants sans-fil prêts à l'emploi développés par Digi (anciennement MaxStream). Ils implémentent différents protocoles, dont 802.15.4 et sa version de plus haut-niveau ZigBee (d'où leurs noms), ainsi que des protocoles de réseau ad-hoc ("mesh") spécifique (sans coordinateur).

24

	RF4CE			PRO							IP			
Application Profile	ZRC	ZID	Z3S	ZLL		ZHA	ZBA	ZTS	ZRS	ZHC	ZSE 1.X	ZSE 2.0		
						<div>ZGP optional</div>					ZigBee IP (IETF-based)	Alternate IP Transport		
Network	ZigBee RF4CE			ZigBee PRO									Alternate MAC	
MAC	IEEE 802.15.4 – MAC													Alternate PHY
PHY	IEEE 802.15.4 – sub-GHz (specified per region)				IEEE 802.15.4 – 2.4 GHz (worldwide)									Alternate PHY

Travail dirigé

Caractéristiques d'un module ZigBee

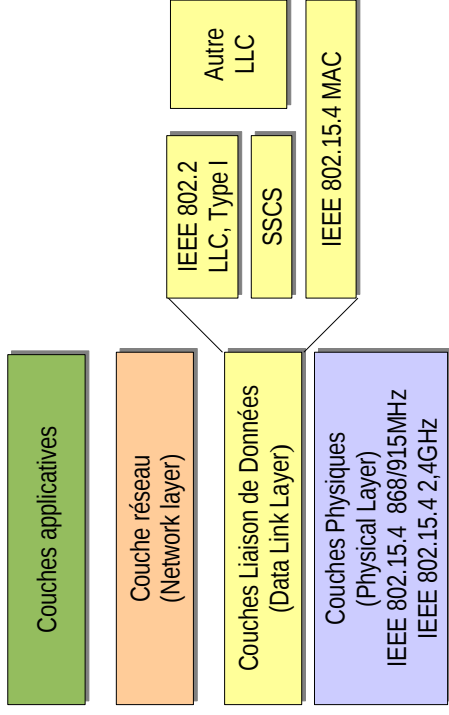


Communications sans fil – WPAN

- Introduction
- Caractéristiques générales IEEE 802.15.4
- Généralités sur ZigBee
- Architecture du protocole
 - La couche MAC
 - La couche PHY
 - Modulation numérique DSSS

Architecture (1)

- Le protocole 802.15.4 occupe les couches basses du modèle OSI :



Module M3.2 – Communications sans fil – LRWPAN
802.15.4 – BLE et ZigBee

29

Architecture (3)

- Couche MAC :**

- Fourni des services à la couche LLC IEEE 802.2 type 1 au travers de la couche SSCS (Service Specific Convergence Sublayer)
- Utilisable directement par une autre LLC propriétaire afin d'étendre les services 802.2 et proposer des topologies plus complexes
- Association et désassociation au réseau PAN
- Accès au canal
- Transmission des trames de balisage "Beacons" (pour le coordinateur)
- Synchronisation aux trames de balisage "Beacons »
- gestion du mécanisme GTS (Guaranteed Time Slot)
- Assurer une liaison fiable entre deux entités MAC avec :
 - validation des trames
 - gestion des acquittements des trames
 - retransmission des trames

Module M3.2 – Communications sans fil – LRWPAN
802.15.4 – BLE et ZigBee

31

Architecture (2)

- Couches **applicatives** : gérées individuellement par les applications
- Couche Réseau :**
 - Responsable de la topologie (construction et maintenance)
 - Gestion de l'adressage, du routage et de la sécurité
 - Propose des services aux couches supérieures
- Couche Liaison de données : deux sous-couches**
 - Couche LLC (Logical Link Control) : standard 802.2, commune à plusieurs autres standards (802.3, 802.11)
 - Couche MAC (Medium Access Control) : imposée par l'implémentation matérielle

Module M3.2 – Communications sans fil – LRWPAN
802.15.4 – BLE et ZigBee

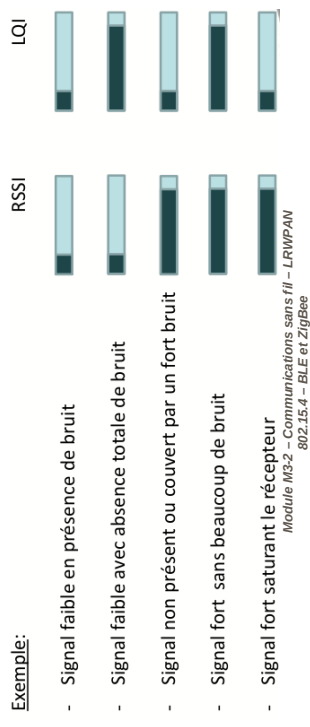
30

Architecture (4)

- Couche physique (PHY) :**

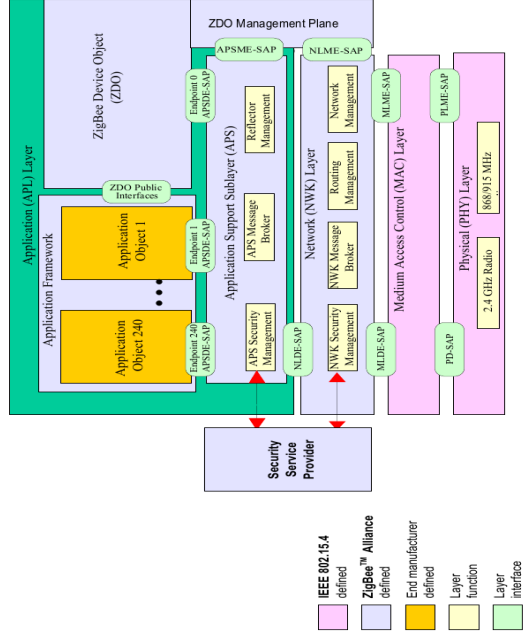
- Activation/désactivation du transceiver radio
- Détection d'énergie (ED, RSSI)
- Indicateur de qualité de liaison (LQI)
- Sélection du canal
- CCA (Clear Channel Assessment) : détection de l'état du canal (libre ou occupé)
- Émission/Réception des paquets

Exemple:



Module M3.2 – Communications sans fil – LRWPAN
802.15.4 – BLE et ZigBee

32

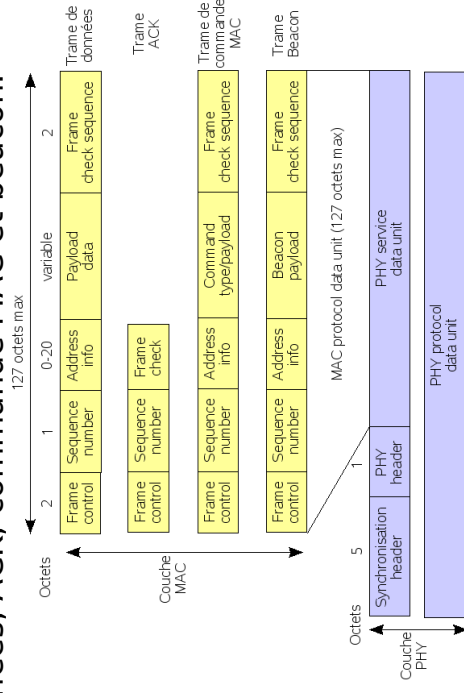


Exemple d'application



Structure des trames (1)

- Le 802.15.4 définit 4 types de trame de base : Données, ACK, commande MAC et beacon.



Communications sans fil – WPAN

Introduction

Caractéristiques générales IEEE 802.15.4

Généralités sur ZigBee

Architecture du protocole

La couche MAC

La couche PHY

Modulation numérique

DSSS

- La structure de la trame MAC est flexible pour s'adapter aux différentes applications
 - MPDU = MHR + MSDU + MFR (MAC Protocol Data Unit = MAC Header + MAC Service Data Unit + MAC Footer)
- MHR (MAC Header) :
 - Le champ Frame Control indique type de trame MAC et spécifie le format du champ adresse
 - Le champ Sequence Number assure l'ordre à la réception et permet l'acquittement des trames MAC
 - Le champ adresse est variable de 0 à 20 octets en fonction du type trame
- MSDU (MAC Service Data Unit) :
 - La trame de données permet une charge utile jusqu'à 104 octets.
- MFR (MAC Footer) :
 - Le FCS (Frame Check Sequence) assure que la trame est transmise sans erreur.
 - CRC sur 16 bits

Module M3-2 – Communications sans fil – LRWPAN
802.15.4 – BLE et ZigBee

37

Travail dirigé



Décodage de trames ZigBee

Module M3-2 – Communications sans fil – LRWPAN
802.15.4 – BLE et ZigBee

39

- Les types de trame MAC :
 - La trame de données
 - La trame ACK permet de garantir à l'expéditeur que sa trame a été reçue sans erreur. La trame ACK est émise juste après la réception pendant le "Quiet Time" d'entre deux trames.
 - La trame de commande MAC permet le contrôle et la configuration à distance des nœuds par le coordinateur PAN.
 - Les trames de balisage (Beacon) réveillent les modules clients qui attendent leur adresse et se rendorment s'ils ne la reçoivent pas. Les trames beacon sont importantes dans les réseaux maillés et les clusters d'étoile pour que les nœuds soient synchronisés avec une consommation d'énergie minimum.

Module M3-2 – Communications sans fil – LRWPAN
802.15.4 – BLE et ZigBee

38

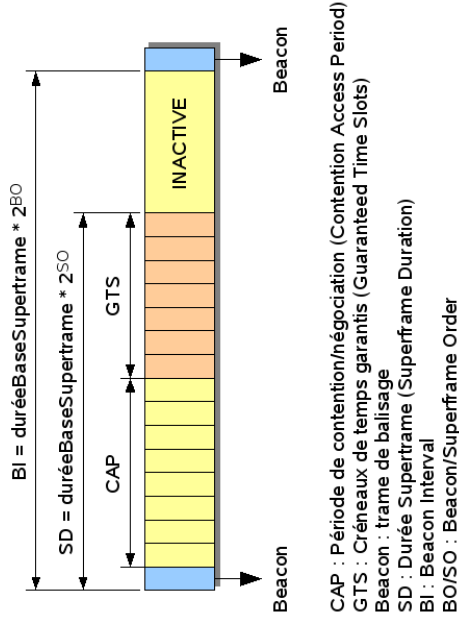
Couche MAC : Accès au canal

- Certaines applications nécessitent la mise en place d'une structure de communication appelée **Supertrame** afin de garantir une latence courte.
- Dans ce mode, le coordinateur PAN transmet des **balises de supertrame (beacon)** à intervalles fixes (de 15ms à 252s).
- Le temps entre deux balises beacon est divisé en 16 créneaux.

Module M3-2 – Communications sans fil – LRWPAN
802.15.4 – BLE et ZigBee

40

Structure de la Superframe (1)



Couche MAC : Accès au canal

- Les trames beacons contiennent la structure de la superframe afin que les modules sachent quand la période de contention/négociation (CAP) débute afin d'entrer en compétition pour l'accès au canal.
- Si un module demande d'émettre pendant la période GPS au cours de la période CAP, le coordinateur PAN lui assignera du temps GPS dans la superframe suivante en modifiant la trame beacon.
- Le module décodera alors la trame beacon afin de connaître le début de la période GTS pour émettre.

Structure de la Superframe (2)

- CAP** (Contention Access Period) : période de contention/négociation pendant laquelle les modules ZigBee peuvent entrer en compétition pour accéder au canal en CSMA-CA et transmettre les données.
- GTS** (Guaranteed Time Slots) : créneaux de temps garantis pendant lesquels certains modules basse-vitesse ont l'exclusivité sur le canal et peuvent transmettre directement les données. Il peut y avoir jusqu'à 7 créneaux GTS.
- INACTIVE** : période de repos (mode powersave) pour le coordinateur PAN et les modules (aucune transmission sur le réseau PAN)
- SD** (Superframe Duration) : Durée totale de la superframe = CAP + GTS + 1 beacon
- BI** (Beacon Interval) : temps entre deux beacons
- BO/SO** (Beacon/Superframe Order) : paramètres compris entre 1 et 15 permettant de calculer la structure de la superframe (BI, SD et INACTIVE)

Méthodes d'accès au canal (1)

- Réseau sans trames balises "Beacon" : CSMA-CA non-beacon slotted (carrier-sense medium-access with collision avoidance) avec acquittement des paquets reçus correctement.
 - Le module contrôle si un module est déjà en émission sur le canal
 - Si c'est OUI, il s'inactive pendant un temps aléatoire puis recommence
 - Après plusieurs essais infructueux, le module indique une erreur de transmission.
 - Si le canal est libre, il transmet la trame et attend l'acquittement qui doit être renvoyé par le récepteur dès réception de la trame (pas de CSMA pour l'acquittement).

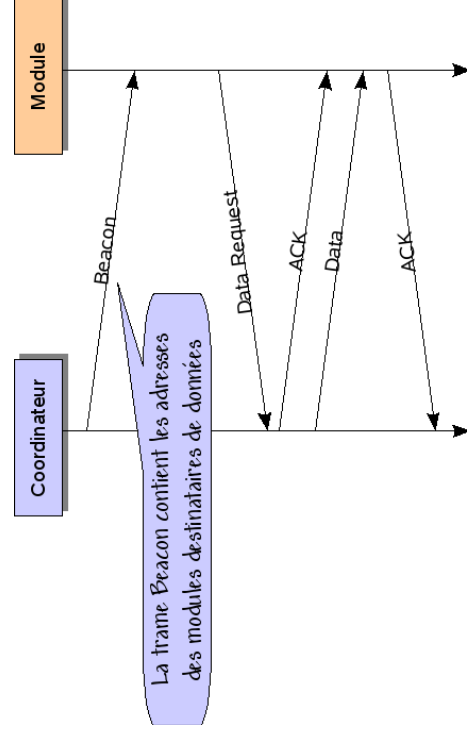
■ Réseau avec trames balises "Beacon" : CSMA-CA beacon slotted

- Les modules peuvent émettre pendant la période de contention (CAP).
- Le module attend le créneau de temps suivant et écoute pour savoir si un module utilise déjà ce créneau
- Si le créneau est occupé, le module s'inactive pendant un nombre aléatoire de créneaux et réessaye.
- Après plusieurs essais infructueux, le module indique une erreur de transmission.
- Si le créneau est libre, il transmet la trame et attend l'acquiescement qui doit être renvoyé par le récepteur dès réception de la trame (pas de CSMA pour l'acquiescement).
- Si le nombre de créneaux restant n'est pas suffisant pour transmettre toutes les données, le module attendra le beacon suivant.

- Trois types de communication :
 - coordinateur vers module
 - module vers coordinateur
 - entre deux modules
- Pour une topologie étoile, seules les deux premières communications sont possibles.
- Pour une topologie peer-to-peer, les trois types de communication sont possibles.

Transmission des données sur un réseau « Beacon » (1)

■ Coordinateur vers Module :

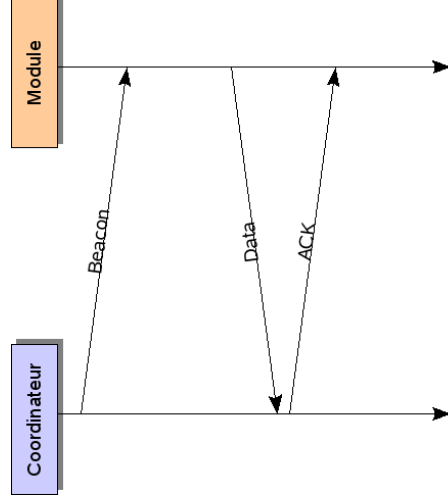


Transmission des données sur un réseau « Beacon » (2)

- Coordinateur vers Module :
 - Le coordinateur veut transmettre des données à un module
 - Il l'indique dans le champ des adresses en attente de la trame beacon
 - Les modules réceptionnent la trame beacon et décodent le champ des adresses en attente
 - Si un module trouve son adresse dans la liste, il réalise qu'il doit recevoir des données du coordinateur
 - Il émet une requête de demande de données vers le coordinateur
 - Le coordinateur acquiesce la commande et transmet les données (avec éventuellement un acquiescement de la part du module)

Transmission des données sur un réseau « Beacon » (3)

■ Module vers Coordinateur :



Module M3.2 – Communications sans fil – LRWPAN
802.15.4 – BLE et ZigBee

49

Transmission des données sur un réseau non « Beacon » (1)

- Le coordinateur reste en permanence en attente de données (alimentation secteur)
- Si le coordinateur veut transmettre à un module, il attend que celui-ci prenne contact avec lui pour lui transmettre des données via une requête de transmission de données.
- Si le module veut transmettre, il utilise la méthode CSMA-CA
- Il n'y a pas de période de transmission garantie (GTS) car pas de synchronisation entre les modules : attention au réseau chargé.
- Généralement utilisé dans les réseaux où les modules restent endormis la plupart du temps et se réveillent sur un événement pour transmettre une alerte au coordinateur.

Module M3.2 – Communications sans fil – LRWPAN
802.15.4 – BLE et ZigBee

51

Transmission des données sur un réseau « Beacon » (4)

■ Module vers Coordinateur :

- Le module écoute les trames beacon
 - Dès qu'il trouve un beacon, il se synchronise avec la structure de la supertrame pour trouver le début et la fin de la période de contention CAP
 - Il rentre en compétition pour l'accès au canal sur un créneau de temps
 - Il transmet les données dès que son tour arrive
 - Le coordinateur peut transmettre un acquittement si cela est demandé
- ### ■ Transmission entre modules
- non défini, plusieurs formes possibles

Module M3.2 – Communications sans fil – LRWPAN
802.15.4 – BLE et ZigBee

50

Communications sans fil – WPAN

Introduction
Caractéristiques générales IEEE 802.15.4
Généralités sur ZigBee
Architecture du protocole
La couche MAC
La couche PHY
Modulation numérique
DSSS

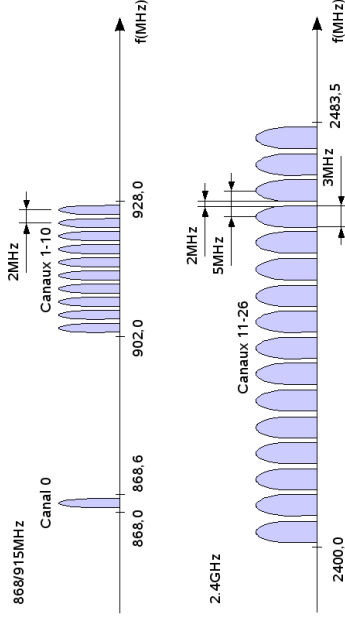
Module M3.2 – Communications sans fil – LRWPAN
802.15.4 – BLE et ZigBee

52

- Méthode **DSSS** (Direct Sequence Spread Spectrum) : étalement de spectre à séquence directe (composants à faible coût)
- Deux options pour la couche PHY:
 - 2,4GHz ISM (Industrial Scientific Medical) / 250 kbit/s : disponibilité mondiale, pour les applications demandant un temps de latence court et une vitesse de transmission élevée
 - 868/915MHz ISM : 868/20kbit/s pour l'Europe et 915/40kbit/s pour les USA. Pour les applications demandant une grande couverture avec moins de modules et où la vitesse est moins cruciale.

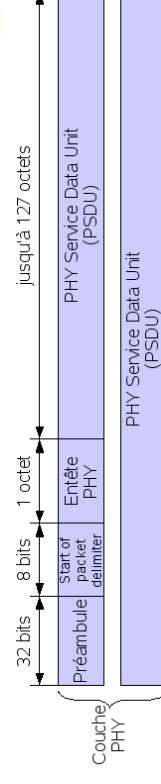
Sélection d'un canal

- La couche PHY contient des fonctions de détection d'énergie reçue (ED, RSSI), d'indicateur de qualité de liaison (LQI) et de commutation permettant la sélection d'un canal pour la transmission
- La couche MAC propose une fonction de scrutation des canaux à la recherche des trames beacon.
- Ces mécanismes permettent d'assurer la fiabilité d'un réseau même en présence d'interférences (micro-onde, wifi, ...)



Num. Canal	Fréquence centrale (MHz)
0	868,3
c=1..10	906+2(c-1)
c=11..26	2405+5(c-11)

Structure d'un paquet

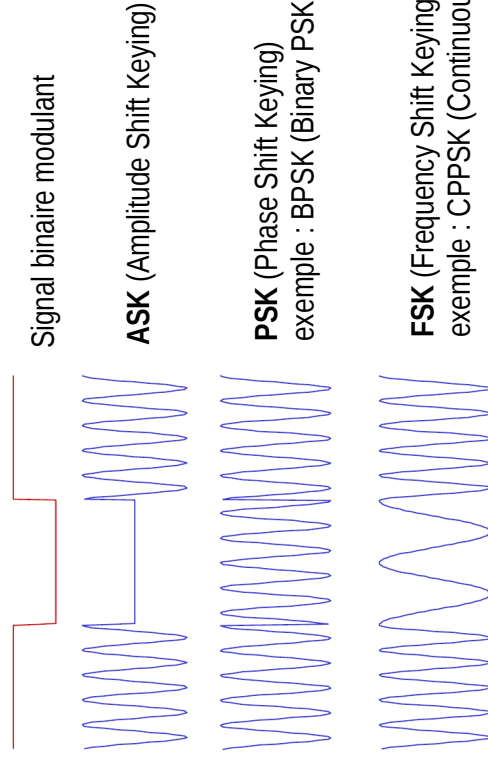


- Préambule (32 bits) : synchronisation, acquisition de symbole (chip timing)
- Start-of-packet-delimiter (8 bits) : fin du préambule
- Entête PHY (7 bits sur 1 octet) : contient la longueur du PSDU
- PSDU : charge utile

Rappel modulation numérique

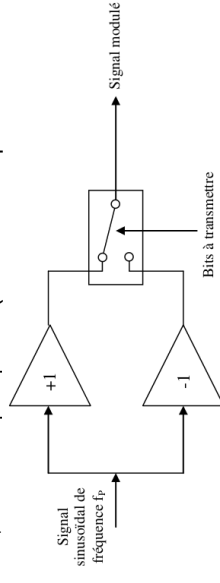
- La **modulation** d'un signal, c'est la **transformation** que subit ce signal afin de l'adapter au support de communication avant sa transmission.
- On utilise généralement une **porteuse** (signal de haute fréquence) dont les paramètres (amplitude, phase ou fréquence) varient en fonction du message à transmettre.
- Un **démodulateur** fera l'opération inverse du côté du récepteur pour reconstituer le message transmis.

Principales modulations numériques de base



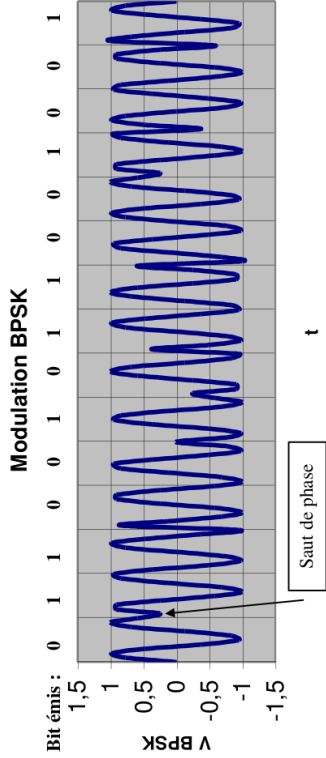
Modulation BPSK (1)

- Les modulations de phase (Phase Shift Keying ou PSK) sont les modulations numériques les plus employées.
- La plus simple des modulations de phase numériques est la modulation BPSK (Binary Phase Shift Keying) appelée aussi MDP2 (Modulation de Phase à 2 états).
 - Un symbole "0" est codé $A \cdot \cos(\omega_p t + \varphi_0)$
 - Un symbole "1" est codé $A \cdot \cos(\omega_p t + \varphi_1)$
 - En général, on choisit $\varphi_1 - \varphi_0 = \pi$ (on transmet la porteuse et son inverse).

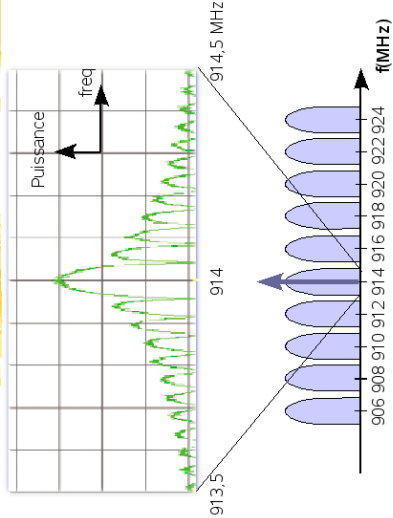


Modulation BPSK Bande 868/915 MHz (20/40kbit/s) (1)

- La technique de modulation diffère en fonction des bandes de fréquences utilisées.
- Pour les canaux 0 à 10, la modulation BPSK (Binary Phase Shift Keying) est utilisée.



Exemple de spectre BPSK sur la bande 915 (canal 5)

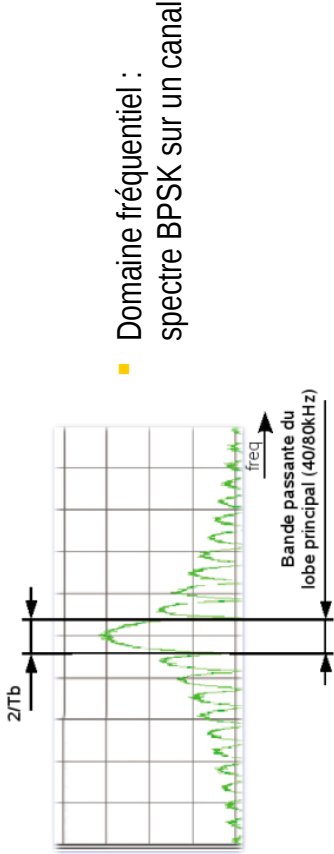
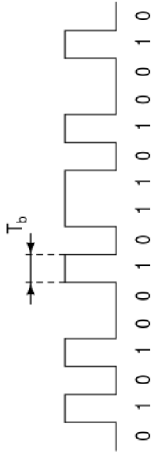


Bande 915 MHz - Canaux 1-10

- On remarque que toute la puissance du signal RF est concentrée sur une petite largeur de bande autour de la fréquence de la porteuse (ici 914MHz). Est-ce un problème ?

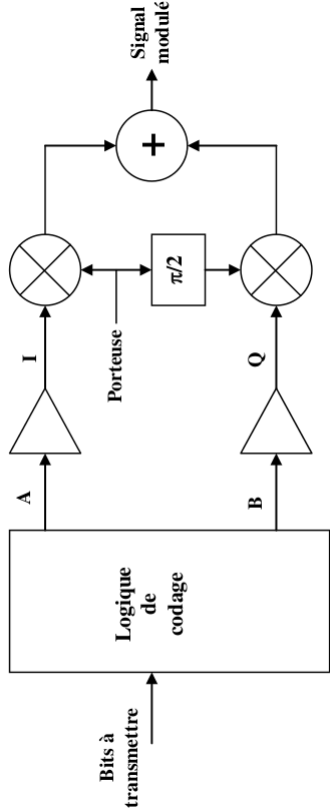
Modulation BPSK Bande 868/915 MHz (20/40kbit/s) (2)

- Domaine temporel
(20/40kbit/s, bande 868/915 MHz, $T_b = 50/25\mu s$:



Modulation QPSK (1)

- La modulation QPSK (ou MDP4) est une modulation à 4 états de phase. Elle peut être réalisée avec deux modulateurs à deux états de phase attaqués par des oscillateurs locaux en quadrature (déphasés de $\pi/2$).



Modulation QPSK (2)

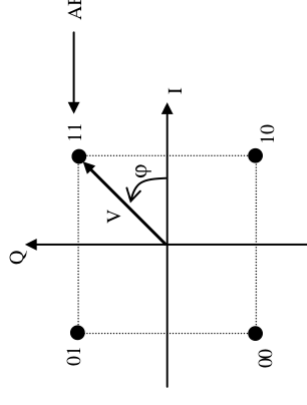
- Si la porteuse est de la forme $V \cdot \cos(\omega \cdot t)$, alors le signal modulé s'écrit :
- $S(t) = I(t) \cdot \cos(\omega \cdot t) + Q(t) \cdot \cos(\omega \cdot t + \pi/2)$
- A et B sont des variables binaires de niveau 0 ou 1. Elles sont obtenues à partir des bits à transmettre en prenant 1 bit sur 2.
- I et Q sont des signaux analogiques obtenus à partir des signaux A et B par amplification et adaptation de niveau et d'impédance.
- I et Q sont des signaux symétriques d'amplitude comprise entre $+V$ et $-V$.
- La relation entre les signaux A et B et I et Q est la suivante :
 - 0 sur A correspond à $-V$ sur I ; 0 sur B correspond à $-V$ sur Q
 - 1 sur A correspond à $+V$ sur I ; 1 sur B correspond à $+V$ sur Q

Exercice modulation QPSK

- On souhaite transmettre le message suivant : 01111001
- 1- Déterminez la suite des bits A et B sachant que le premier bit du message est un bit A et le second, un bit B.
- 2- Représentez les différentes positions du point sur la constellation ainsi que le trajet parcouru par ce point.

Modulation QPSK (3)

- En fonction des états de I et de Q, la phase du signal modulé peut prendre quatre valeurs.
- Sur la figure ci-dessous :
 - V représente l'amplitude du signal modulé.
 - ϕ représente le déphasage du signal modulé par rapport à I.



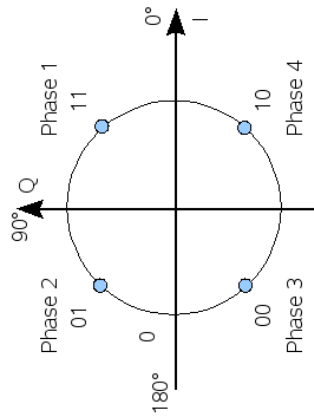
Modulation O-QPSK - Bande 2.4 GHz (250 kbit/s) (1)

- Pour les canaux 11 à 26 (bande 2.4 GHz), la modulation O-QPSK (Orthogonal Quadrature Phase Shift Keying) est utilisée.
- Avec la O-QPSK quatre états de phase sont définis ce qui permet d'augmenter le nombre de bits transmis dans le même temps.
- L'émission des bits de données sur les canaux I et Q sont décalés légèrement afin que le signal RF ne passe jamais par le point central de la constellation (émetteur coupé : ce qui est prohibitif pour la rendement de l'émetteur).

Modulation O-QPSK - Bande 2.4 GHz (250 kbit/s) (3)

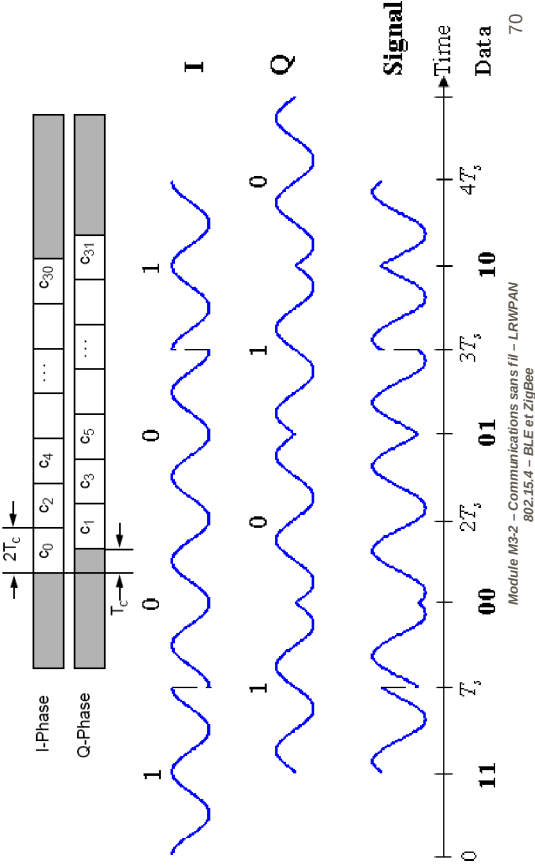
Modulation O-QPSK - Bande 2.4 GHz (250 kbit/s) (3)

- Les bits de données sont regroupés par 4 (appelé symbole).
- Pour chaque symbole, on applique un PN-Code de 32 chips.
- La vitesse du PN-Code est 2 Mchip/s
- $T_{chip} = 1/2.e6 = 0.5\mu s$
- La vitesse des données est 250 kbit/s
- $T_{bit} = 1/250000 = 4 \mu s$
- Nombre de chips/bit = $4/0.5 = 8$



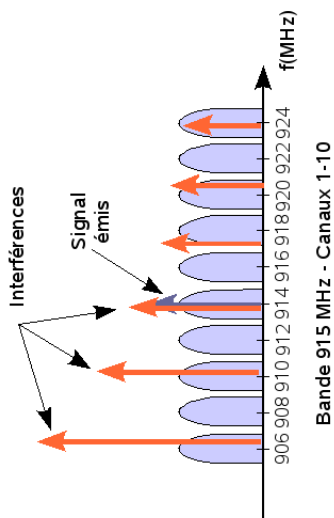
Communications sans fil – WPAN

Introduction
Caractéristiques générales IEEE 802.15.4
Généralités sur ZigBee
Architecture du protocole
La couche MAC
La couche PHY
Modulation numérique
DSSS



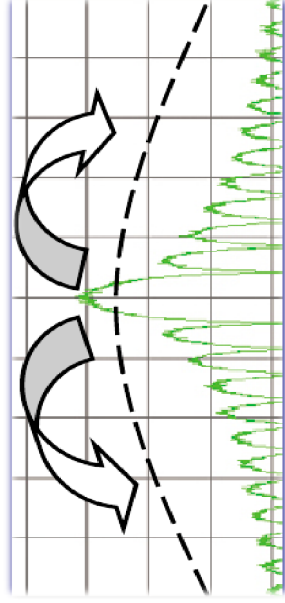
Interférences

- 802.15.4 utilise une porteuse faible puissance ($< -3dBm$)
- Une interférence de bande passante étroite et proche de la portuse peut facilement masquer le transmetteur (émission Electro-Magnétique PC, TV, etc.)



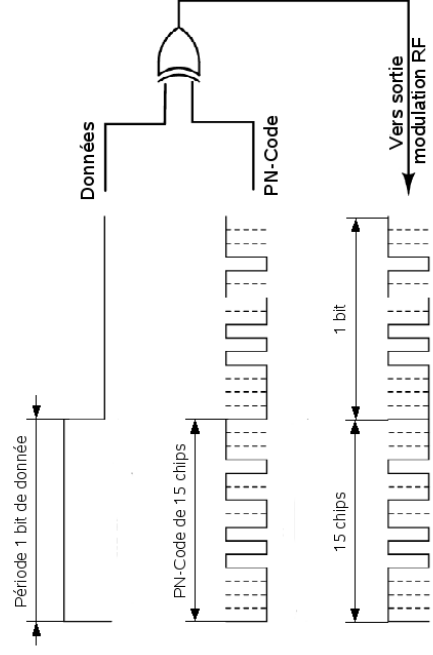
Solution : DSSS

- La norme 802.15.4 étale la puissance de la porteuse sur une bande passante plus large
- Comment étaler la bande passante si la bande passante des données est 20/40 kbit/s ?
- DSSS (Direct Sequence Spread Spectrum) : Étalement de spectre à séquence directe.



DSSS : le chipping

- Le chipping se fait en 'XOR'ant le signal BPSK avec le PN-code :

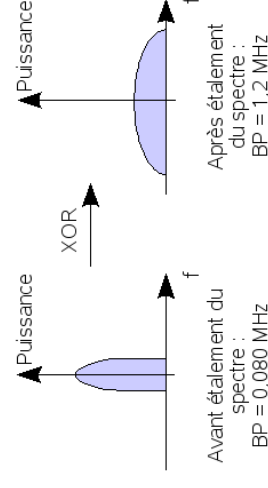


DSSS : Étalement de spectre

- L'étalement de spectre est réalisé en multipliant le flux de données par un PN-code haute vitesse (technique du chipping).
- DS-Spreader : modulateur DSSS
- PN-Code = Pseudo Noise Code = spreading code = chips PN : code pseudo aléatoire possédant un spectre particulier.

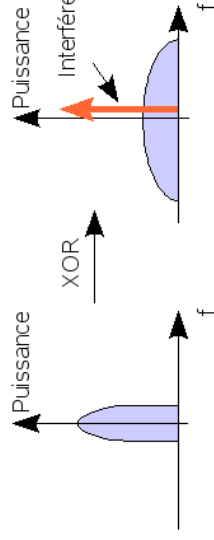
DSSS (1)

- Le flux de chips à une bande passante plus large que le flux de données :
 - 40kbit/s => 15 chips/bit => 600 kchips/s
 - Bande passante = 1,2 MHz



DSSS (2)

- Qu'apporte le DSSS en cas d'interférence de faible largeur de bande ?
- Nous pouvons constater que seule une partie du spectre est corrompue par l'interférence



- Comment reconstruire le flot de données original avec seulement une partie du canal non corrompu ?

Module M3.2 – Communications sans fil – LRWPAN
802.15.4 – BLE et ZigBee

77

Comment choisit on le PN-Code ? (1)

Bit en entrée	PN-Code ($C_0..C_{14}$)
0	111101011001000
1	000010100110111

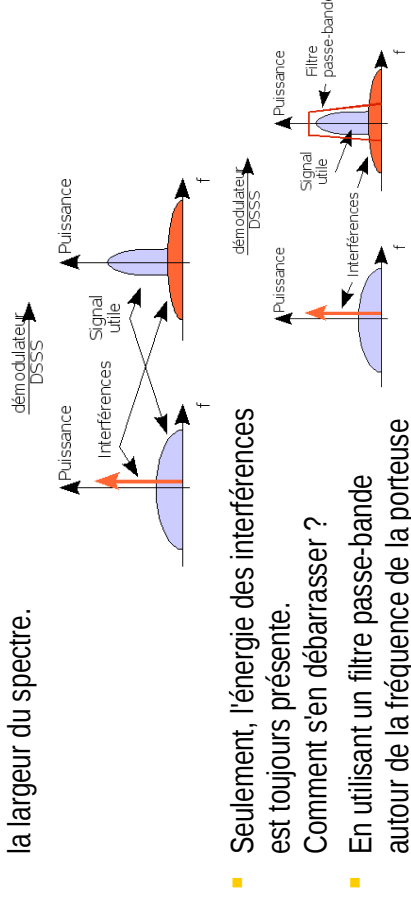
- Pourquoi les concepteurs de ZigBee ont-ils choisi ce PN-Code ?
- Est-ce que le code suivant conviendrait ?
 - [110011001100110]
 - [001100110011001]

Module M3.2 – Communications sans fil – LRWPAN
802.15.4 – BLE et ZigBee

79

DSSS (3)

- Le démodulateur DSSS reconstitue le flux de données original.
- L'effet sur les interférences est le même qu'à la modulation DSSS : la puissance des interférences de bande passante étroite est étalée sur la largeur du spectre.

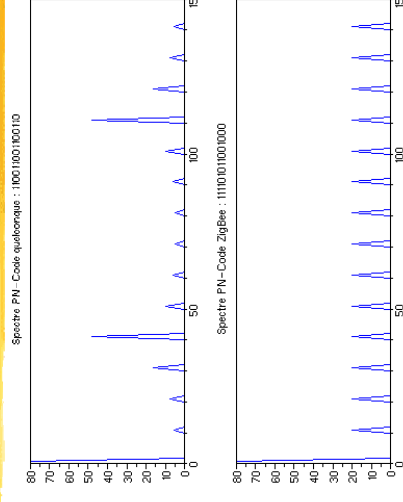


- Seulement, l'énergie des interférences est toujours présente. Comment s'en débarrasser ?
- En utilisant un filtre passe-bande autour de la fréquence de la porteuse

Module M3.2 – Communications sans fil – LRWPAN
802.15.4 – BLE et ZigBee

78

Comment choisit on le PN-Code ? (2)



- Le PN-Code quelconque présente deux pics qui concentrent toute l'énergie du signal.
- Le PN-Code ZigBee étale l'énergie sur toute la bande de fréquence. L'objectif est donc atteint avec ce code spécifique.

Module M3.2 – Communications sans fil – LRWPAN
802.15.4 – BLE et ZigBee

80

Data symbol (decimal)	Data symbol (binary) ($b_0 b_1 b_2 b_3$)	Chip values ($c_0 c_1 \dots c_{30} c_{31}$)
0	0000	11011001110000110101001000101110
1	1000	11101101100111000011010100100010
2	0100	00101110110110011100001101010010
3	1100	00100010111011011001110000110101
4	0010	01010010001011101101100111000011
5	1010	00110101001000101110110110011100
6	0110	11000011010100100010111011011001
7	1110	1001110000110101010010001011101101
8	0001	10001100100101100000011101111011
9	1001	10111000110010010110000001110111
10	0101	01111011100011001001011000000111
11	1101	01110111101110001100100101100000
12	0011	00000111011110111000110010010110
13	1011	01100000011101111011100011001001
14	0111	10010110000001110111101110001100
15	1111	11001001011000000111011110111000

Bande de Fréquences	2.4 GHz	868 MHz	915 MHz
Vitesse Data	250 Kbit/s	20 Kbit/s	40 Kbit/s
Canaux	16 ($N^{\circ}11 \sim 26$)	1 ($N^{\circ}0$)	10 ($N^{\circ}1 \sim 10$)
DSSS	32-chip PN code	15-chip PN code	
Modulation des chips	O-QPSK	BPSK	
Bits Data/Symbole	4	1	
Vitesse Symbole	62.5 Ksym/s	20 Ksym/s	40 Ksym/s
Vitesse Chip	2.0 Mchips/s	0.3 Mchips/s	0.6 Mchips/s
Sensibilité	-85dBm	-92dBm	
Puissance d'émission	0dBm (1m W)		