

# Les réseaux de capteurs

[www.elabedabir.weebly.com](http://www.elabedabir.weebly.com)

fppt.com

## Contenu

1. Introduction et Applications
2. Conception des WSN
3. Les protocoles de communication pour les WSN
4. Mécanismes d'accès au canal
5. Sécurité dans les WSN

2

## CHAPITRE 1

### Introduction et applications

3

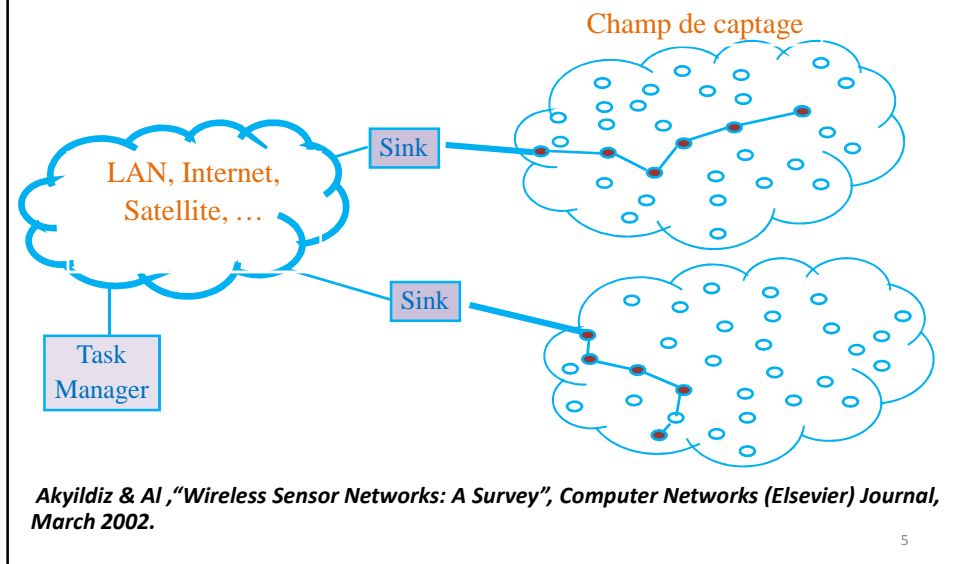
## Définition

□ Un réseau de capteurs peut être défini comme une infrastructure comprenant des **éléments** capables d'effectuer des **mesures** de phénomènes physiques environnants, offrant une capacité de **calcul et de stockage** souvent **limitées**, souvent dotés de moyens de **communication**.(E. Fleury, D. Simplot-Ryl)

□ **Capteurs / Actionneurs**: actionner un moteur, allumer une lampe, ...

4

## Architecture des WSN



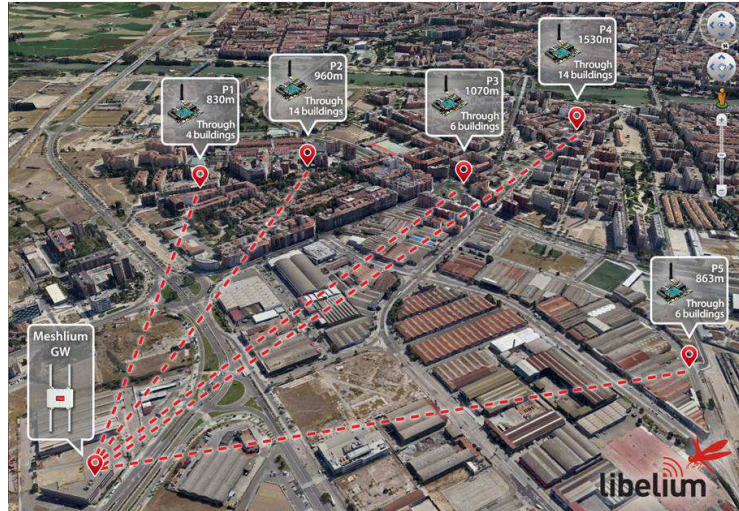
5

## Architecture des WSN (2)

- ❑ Les nœuds capteurs
  - Chargés de mesurer une valeur relative à leur environnement (température, pression, luminosité)
  - Simples ou capteurs-actionneurs
- ❑ Les agrégateurs (têtes de réseau / cluster)
  - Chargés d'agréger les données plusieurs capteurs et de les envoyer en un seul message au puits → limiter le trafic sur le réseau
  - A la tête d'un cluster → optimisation du routage
- ❑ Les puits (*sink*)
  - Nœud final du réseau.
  - Reçoit l'ensemble des valeurs mesurées par le réseau
- ❑ Les passerelles (*gateway*)
  - Relie le réseau de capteurs sans fils à un réseau plus traditionnel

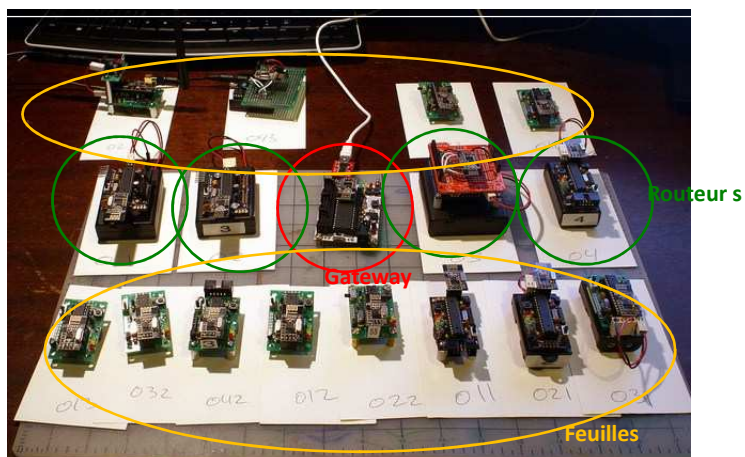
6

## Grandeur nature cela donne...



7

## En maquette cela donne...



➤ Basés sur des modules radio nRF24 sur Arduino

8

## WSN et IoT?

*IoT is brain, WSN is senses ...*

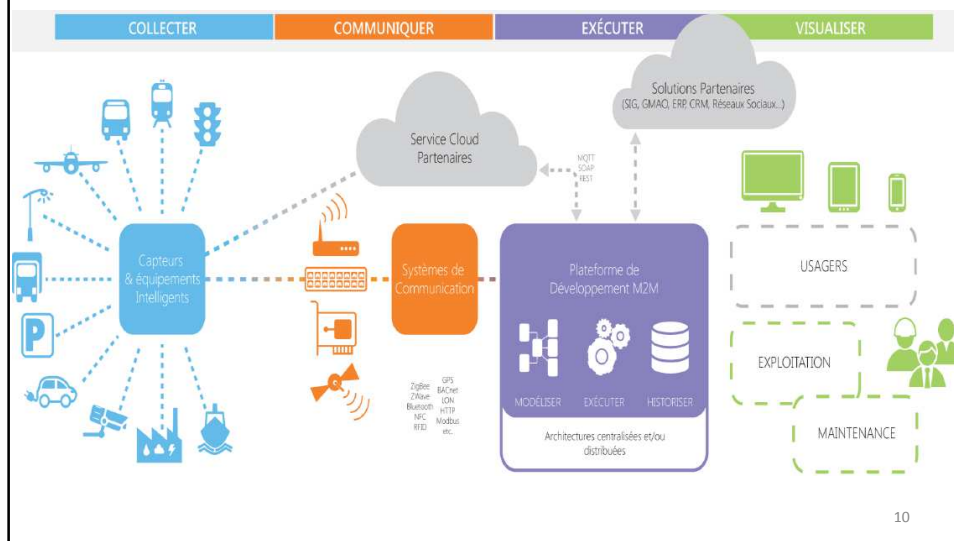
*WSN is a subset of IoT*

*Alors, application IoT ou WSN?*

- ☐ Un WSN n'est pas forcément connecté à Internet (Les capteurs routent leurs données vers le sink)
- ☐ Dans l'IoT, le routage n'est pas implémenté (Les capteurs transmettent directement leurs données vers l'Internet)
- ☐ IoT rassemble tous types d'objets (capteur, humain, caméra, téléphone,...)
- ☐ WSN est un réseau ad hoc

9

## WSN et IoT?



10

## Applications des WSN

### APPLICATIONS:

Militaire, Environnementales, Sanitaire, Domotique, Astronomie, Processus chimiques, Volcanologie, Minage, Sauvetage en catastrophe....

### TYPES DE CAPTEURS:

Sismique, Magnétique, Thermal, Visuel, Infrarouge, Acoustique, Radar...

### TACHES DES CAPTEURS:

Température, Humidité, Mouvements des voitures, Eclairage, Pression, Composition du sol, Bruits, Présence ou absence d'un type d'objets, Caractéristiques d'un objet (vitesse, direction, taille,...).

11

## Caractéristiques des WSN

- Très grand nombre de nœuds → problème de **scalabilité** (facteur d'échelle)
- Les nœuds doivent être très **proches** les uns des autres → **Haute interférence**
- Flux de données **asymétriques**.
- Le transfert de données est déclenché par les requêtes ou par les événements.
- Energie limitée** .
- Souvent des topologies statiques.
- Coût bas, taille et poids faibles.
- Enclins à des **défaillances** multiples (taux d'erreurs, connectivité limitée).
- Transmissions en **multipoint** (plutôt que point à point) → **Contention**
- Pas d'identification globale (@IP).
- Sécurité limitée (niveau physique/ niveau communication).

12

## WSN vs MANET

### MANET

- Composés d'objets ayant un intérêt propre et sont souvent utilisés directement par des êtres humains (PDA, portables,...)
- Différents degrés de mobilité

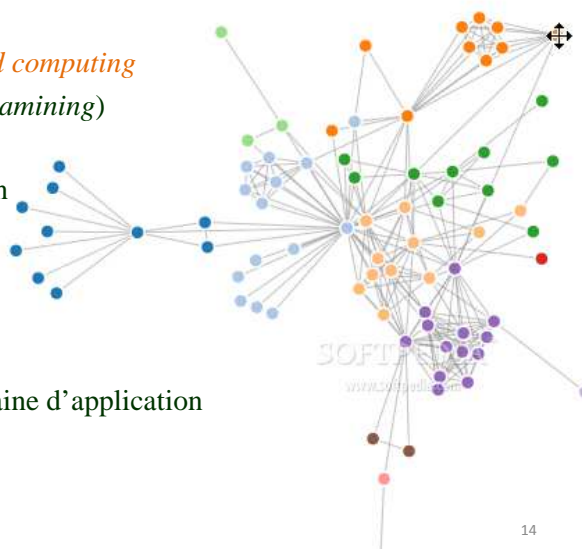
### WSN

- Déployées dans un environnement hostile, ont une **application commune** et sont orientées vers la **collecte des données**.
- Peu mobiles
- Capacités de **calcul /Energie limitées**
- Débits réduits

13

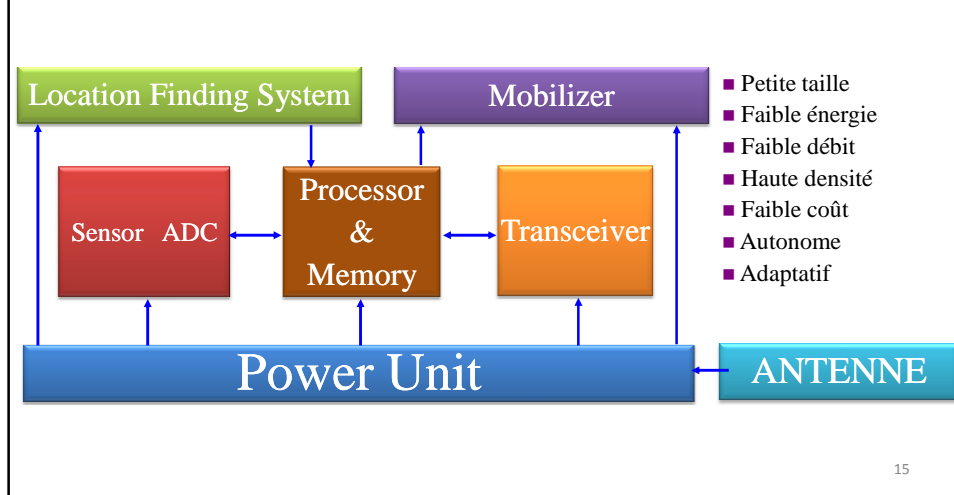
## Pluridisciplinarité des WSN

- Réseaux et systèmes
- Internet of things, cloud computing*
- Fouille de données (*datamining*)
- Energétique
- Graphes et modélisation
- Ondes & propagation
- Systèmes embarqués
- Conception logicielle
- ...
- Expertise selon le domaine d'application
- Juridique
- Environnementales
- Economiques, ...



14

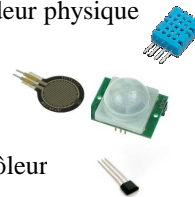
## Anatomie d'un nœud capteur (Mote en anglais)



## Anatomie d'un nœud capteur (2)

### □ Détecteur

- Capteur: dispositif qui génère une image d'une grandeur physique
  - analogique
  - précision, rapidité, sensibilité
- Convertisseur analogique/ numérique
  - signal numérique compatible avec le microcontrôleur (SPI / UART / I2C / CAN / ...)

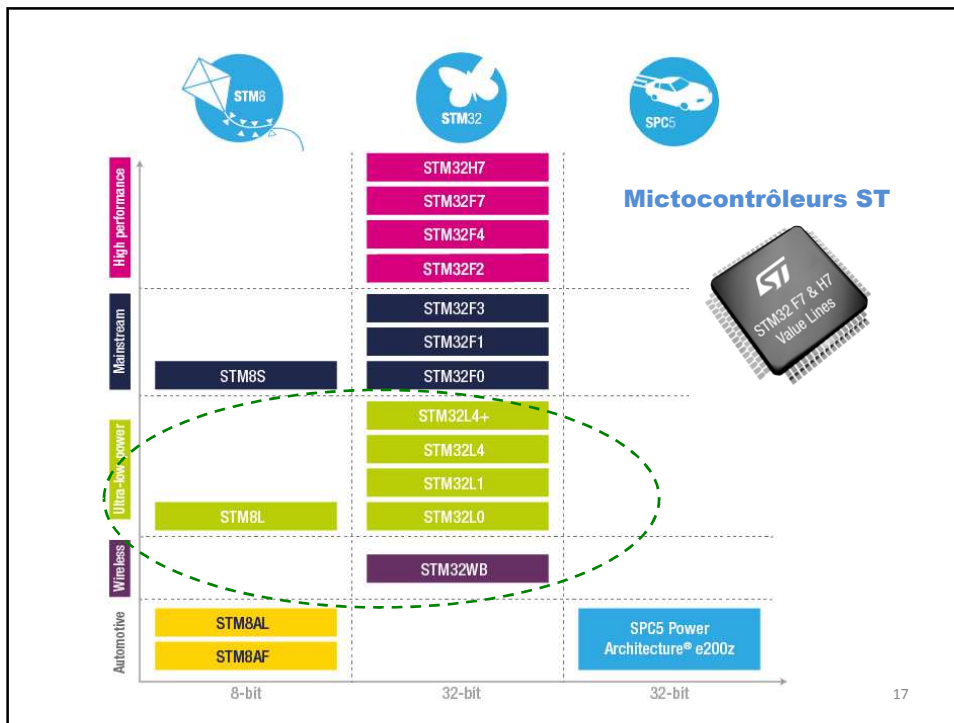


### □ Microcontrôleur et mémoire

- **microcontrôleur**: traite les données reçues du convertisseur analogique-numérique et transmet les données utiles à l'émetteur-récepteur : *Intel StrongARM, Texas Instruments MSP, Atmel ATMega, STM*
- **mémoire RAM** : nécessaire pour le fonctionnement de l'application
- **mémoire flash (EEPROM)**: Système d'exploitation + Données mesurées
- Carte SD

16

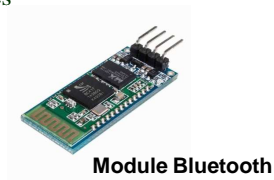




17

## Anatomie d'un nœud capteur (3)

- Emetteur/ transmetteur (transceiver)
  - Module RF
  - Transmet les données captées/ relayées



18

## Anatomie d'un nœud capteur (4)

### ☐ Unité d'alimentation

- Répartition optimale de l'énergie disponible aux autres modules
- Gestion de systèmes de recharge d'énergie

### ☐ Mobilisateur (optionnel)

- Chargé de déplacer le nœud capteur en cas de nécessité

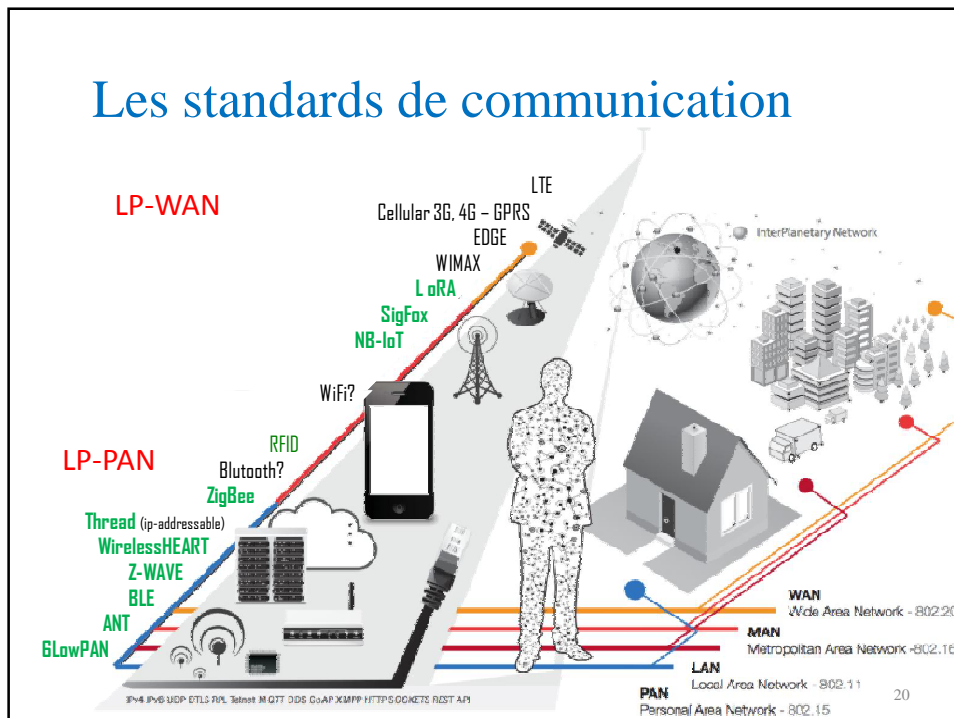
### ☐ Système de localisation (GPS)

- Utile en cas de routage géographique



19

## Les standards de communication



## Les standards de communication (2)

- ❑ **802.15 .4** → WPAN (2.4 GHz, 250Kbps)
- ❑ **Bluetooth** (802.15.1)
- ❑ Surcouches **ZigBee, 6LoWPAN, Miwi, OCARI...**

Protocole	Zigbee	Bluetooth	Wi-Fi
IEEE	802.15.4	802.15.1	802.11a/b/g
Besoins mémoire	4-32 Kb	250 Kb +	1 Mb +
Autonomie avec pile	Années	Jours	Heures
Nombre de nœuds	65 000+	7	32
Vitesse de transfert	250 Kb/s	1 Mb/s	11-54 et + Mb/s
Portée	100 m	10-100 m	300 m

H. Bettaher & Al, « Les Réseaux de capteurs », Université de Technologie de Compiègne

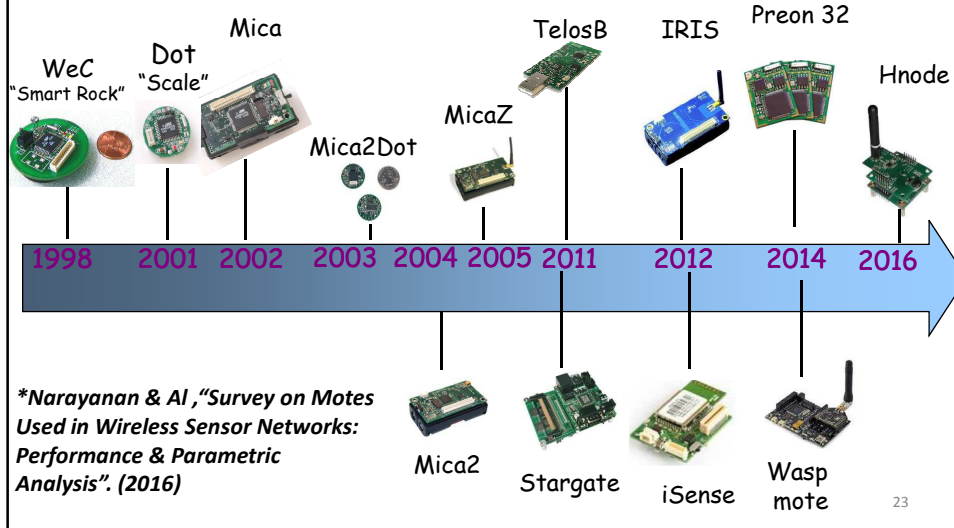
21

## Les standards de communication (3)

	Bluetooth	Bluetooth LE /Smart	WIFI	WIFI	WIFI (Next generation)	NFC	Zigbee	Z-Wave	ANT +
Specification	802.15.1	802.15.1	802.11g	802.11n	802.11y	NFCIP-1	802.15.4	Z-Wave alliance	ANT
Frequency	2.4 GHz	2.4 GHz	2.4 GHz	2.4GHz / 5 GHz	3.7GHz (US)	13.56 MHz	868 MHz (EU) 915MHz (US) 2.4GHz	868MHz (EU, China, India, Russia,...) 900MHz (North America, Brazil, HongKong, Australia, Japan,...)	2.4GHz
Range indoor (m)	30	10	25	50	50	0.2	30	45	10
Range max (m)	100	50	75	125	5000	0.2	1500	150	80
Data speed max	3 Mbit/s	1 Mbit/s	54 Mbit/s	540 Mbit/s	54 Mbit/s	424 kbit/s	250 kbit/s	100 kbit/s	<100kbit/s
Data speed typ.	2.1Mbit/s	270 kbit/s	25 Mbit/s	200 Mbit/s	23 Mbit/s	2.5kbit/s	150 kbit/s	40 kbit/s	20 kbit/s
Peak current	150 mA	20mA	150 mA	150 mA	-	15 mA	50 mA	20 mA	95 mA
Sleep current	5 mA	1 uA	100 uA	100 uA	-	10 uA	5 uA	2.5uA	1 uA
Battery life	Month	Year	Day	Day	-	Month/Year	Month/Year	Year	Year
Network topologies	Star	Star	Star	Star	Star	Peer to peer only	Star, Tree, Mesh	Star, Tree, Mesh	Star, Tree, Mesh
Typically :	- Headsets - Computer peripherals	- Mobile phones - Sport trackers - eHealth devices - Wireless sensors	- PC (networking) - WLAN	- same as 802.11g with improved performances - Outdoor LAN	- wireless link between hotspot	- transport ticket - secure payment - door opening	- home automation - wireless sensor networks - smart metering	- home automation	- sport trackers - eHealth devices
Official Website Link	<a href="https://www.bluetooth.org/en-us">https://www.bluetooth.org/en-us</a>	<a href="https://www.bluetooth.org/en-us">https://www.bluetooth.org/en-us</a>	<a href="https://www.wifi.org/">https://www.wifi.org/</a>	<a href="https://www.wifi.org/">https://www.wifi.org/</a>	<a href="https://www.wifi.org/">https://www.wifi.org/</a>	<a href="http://www.nfc-forum.org/home/">http://www.nfc-forum.org/home/</a>	<a href="http://www.zigbee.org/">http://www.zigbee.org/</a>	<a href="http://www.z-wave.com/">http://www.z-wave.com/</a>	<a href="http://www.chipsant.com/">http://www.chipsant.com/</a>

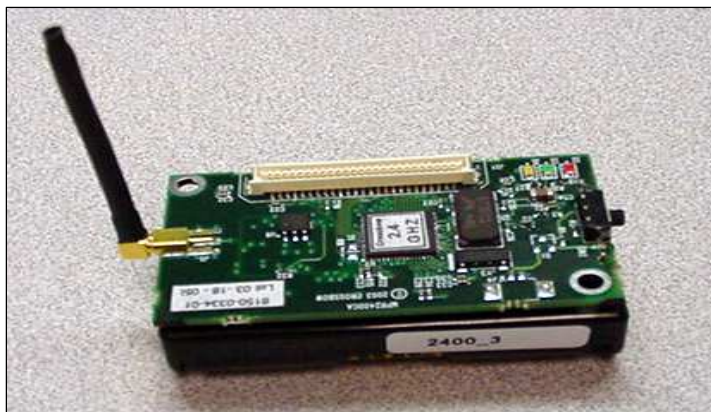
22

## Evolution des nœuds capteurs\*



23

## Exemple de capteur ( MICAz/ ZigBee)



24

## Caractéristiques d'un nœud capteur MICAz

Processor/Radio Board	MICAz/ ZigBee (2015)
Speed	4-8-16 MHz
Program Flash	128 Kbytes
Measurements Flash (Serial)	512 Kbytes
SRAM	4K bytes
Configuration EEPROM	4K bytes
Radio Frequency	2.4 GHz
Data Rate	250 kbits/sec
Power	0.75 mW
Radio Range	Outdoor: 100 m, Indoor : 30 m
Energy	2 x AA batteries; Solar Energy



25

## Des OS pour les WSN\*

	Modèle de programmation	Gestion de la mémoire	Protocole de communication	Langage de programmation	Shell	SGF
<b>TinyOS</b>	Thread & Event	-Statique -Pas de protection	- Messages	NesC	NA	Niveau unique
<b>MANTIS</b>	Thread	-Dynamique -Pas de protection	- Modèle en couches	C	Shell Unix-like	NA
<b>LiteOS</b>	Thread & Event	-Dynamique -Avec protection	- Fichiers	LiteC++	Au niveau du coordinateur	LiteFS
<b>Nano-RK</b>	Thread	-Statique -Pas de protection	- Similaire sockets	C		NA
<b>Contiki</b>	Thread & Event	-Dynamique -Pas de protection	uIP (micro IP)	C	Shell Unix-like	Coffee

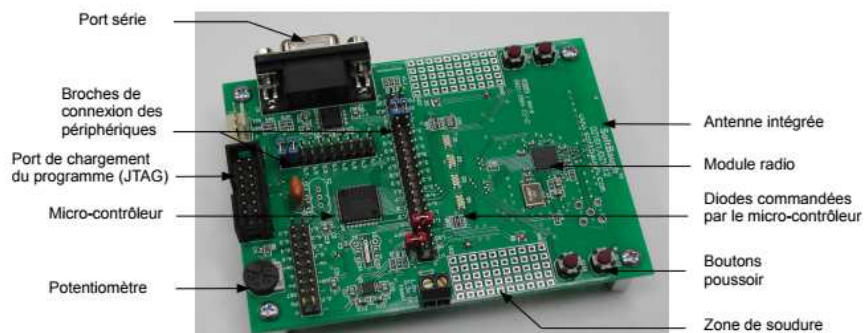
\*Rajan & Al, "A Survey Report on Operating Systems for Tiny Networked Sensors ". (2015)<sup>26</sup>

## Plateformes de prototypage

Carte	Fabricant	Microcontrôleur	Chargement des programmes	Langage de programmation
SoftBaugh	SoftBaugh	Texas Instruments MSP430	Port JTAG	C
 Arduino	OpenGPL	Atmel AtMega2560	USB	IDE/C++
 Waspote	Libelium	Atmel AtMega1281	USB	IDE/C++

27

## La carte SoftBaugh



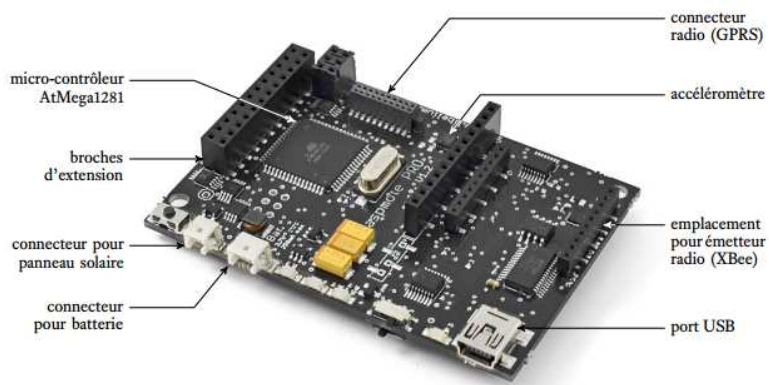
28

## La carte Arduino Mega 2560



29

## La carte Waspote



30

## Plateformes de prototypage d'objets connectés

### La famille *WiNo\**

	TeensyWiNo/WiNoRF22	WiNoLoRa	DecaWiNo
Portée radio	100 m en intérieur (modulation GFSK)	30 km en ligne de vue	20 m en ligne de vue
Débits supportés	0,123 à 256 kbit/s	0,3 à 20 kbit/s	110, 850 et 6800 kbit/s
Bande de fréquence	433 / 470 / 868 / 915MHz (ISM)	868 MHz	3,5 GHz à 6.5 GHz
Ressources disponibles	API : réception / transmission de messages radio ; configuration de l'émetteur-récepteur		
Applications	Monitoring à distance Réseaux multi-sauts à grande échelle	Monitoring à distance Réseaux mono-sauts à grande échelle	Mesure de distance par temps de propagation Échange à haut débit entre nœuds voisins

*\*Adrien van den Bossche , Réjane Dalcé , Thierry Val, "Enabling Fast-prototyping of Connected Things using the WiNo\* family", ISTE 2017*

31

## Applications

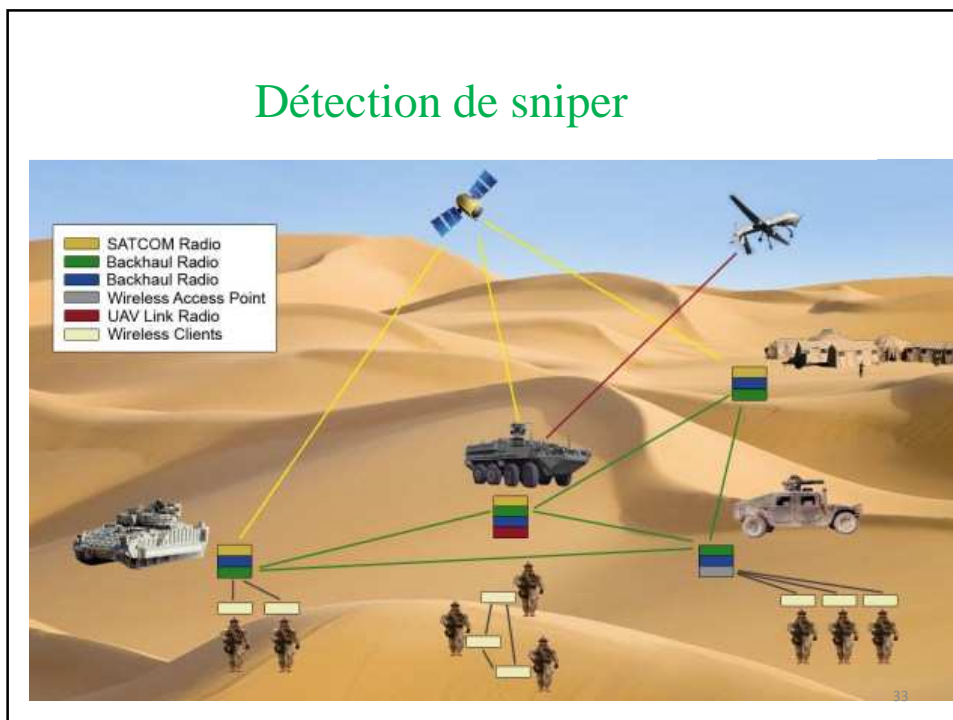
### Militaires

- Surveillance des forces alliées, de l'équipement et des munitions
- Surveillance des champs de bataille
- Reconnaissance des forces opposées
- Ciblage de terrain
- Evaluation des dommages
- Détection et reconnaissances d'attaques biologiques et chimiques
- Détection d'intrusion (champs de mines)
- Détection de tir à pistolet (petit calibre)
- Amélioration des systèmes de navigation

32



## Détection de sniper

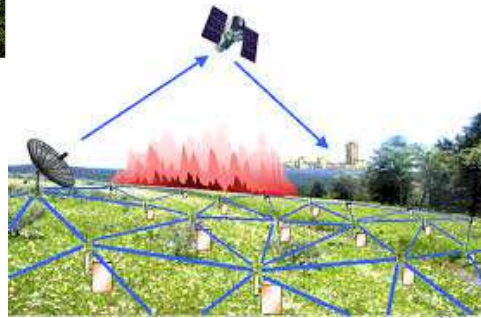
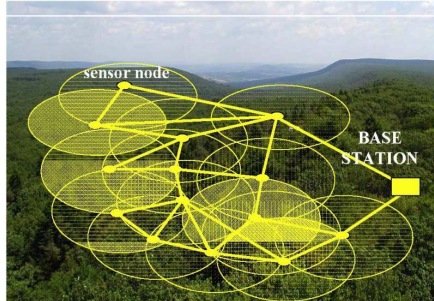


## Applications (3)

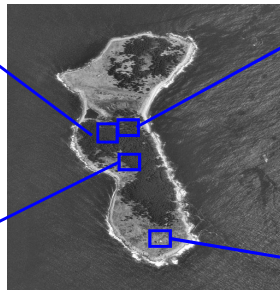
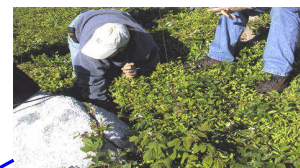
### Environnementales

- Suivi des mouvements d'oiseaux, animaux, insectes
- Surveillance des conditions environnementales affectant les cultures et bétail
- Irrigation
- Détection chimiques et biologiques
- Surveillance d'activité sismique
- Surveillance du sol, milieu marin ou atmosphérique
- Recherche météorologique
- Etude de la pollution
- Cartographie de la complexité biologique
- Détection d'inondation, tempêtes, incendies de forêt.

## Détection d'incendies



## Surveillance d'habitat



## Surveillance du niveau d'eau dans les rivières



37

## Applications (5)

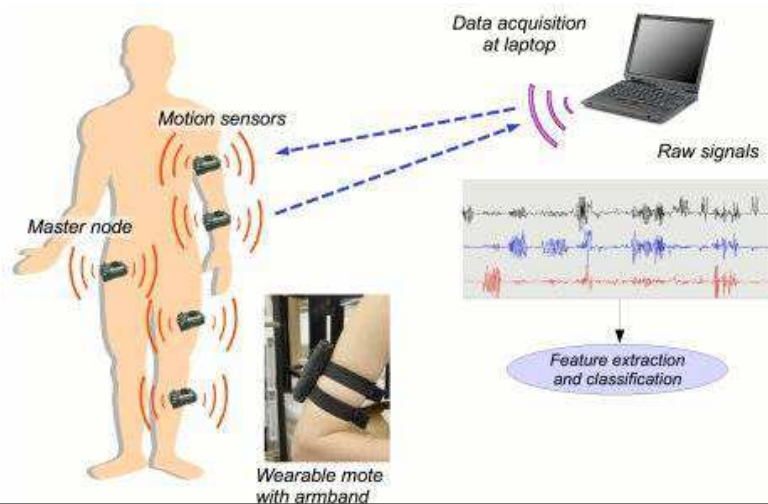
### Suivi médical

- Surveillance des patients
- Diagnostics
- Suivi des médecins et des patients dans un hôpital
- Administration de médicaments dans les hôpitaux

38

## CodeBlue: application de suivi médical

→ WBAN (*Wireless Body Area Networks*)



39

## Applications (6)

### Trafic routier

- Surveillance du trafic, détection d'accidents, assistance
- Reconnaissance de stationnement dans une ville (communication voiture à voiture)
- Suivi et détection de véhicules.

→ VANET (*Vehicular Ad hoc Networks*)

40

## Applications (7)

### Encore plus d'applications...

- Bâtiment, construction de ponts
- Surveillance de la qualité des produits
- Maisons intelligentes (*smart houses*), espaces intelligents (*smart spaces*)
- Maintenance prédictive des grandes machines / équipements
- Traçage de la température pour chauffage électrique
- Détection d'intrusion dans les sites industriels

41

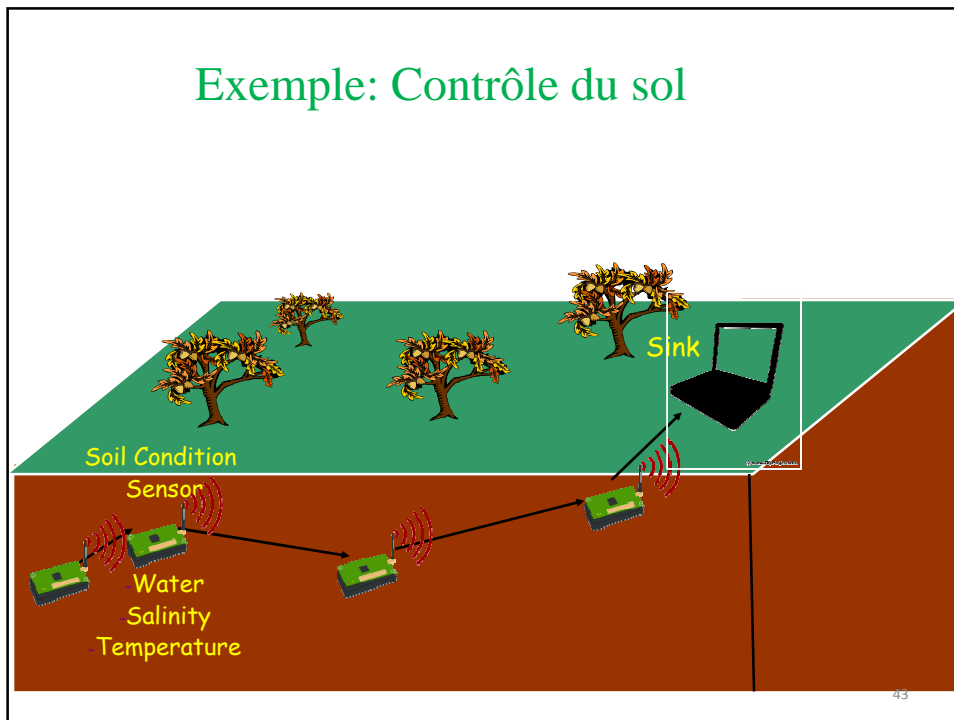
## Wireless Underground Sensor Networks (WUSN)

### Applications

- Contrôle de l'état du sol
- Communication vocale dans des environnements souterrains (grottes, mines,...)
- Surveillance du tremblement de terre
- Cours de golf, football, baseball,...
- Localisation de personnes dans un bâtiment effondré
- Patrouille frontalière

42

## Exemple: Contrôle du sol



## Exemple: Communications de tunnels

- Catastrophes dans les mines



-Anti-terrorisme



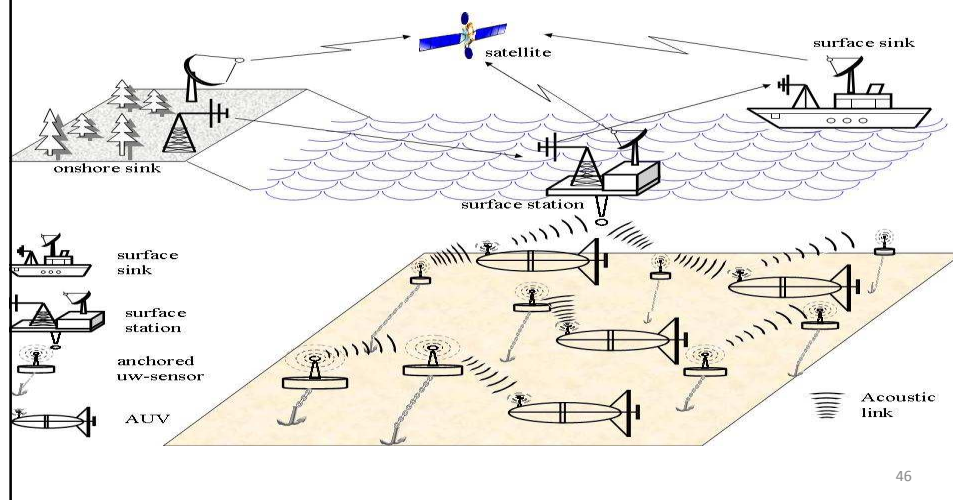
## Wireless Underwater Sensor Networks

### Applications

- Réseau autonome d'échantillonnage d'océans (AOSN)
- Surveillance de la pollution ou autres (chimique, biologique)
- Prévention de catastrophes
- Navigation assistée
- Domaine pétrolier
- Reconnaissance de mines
- Pêche

45

## Architecture dynamique 3D des WUSN



## Ocean Sampling Sensors



Spread Spectrum Modem  
<http://www.dspcomm.com/>



Precision Marine Geodetic Systems  
<http://www.link-quest.com>



Acoustic Transponders  
<http://www.link-quest.com> <sup>47</sup>

## Ocean Sampling Sensors



Surface station  
<http://www.link-quest.com>



Drift buoy  
<http://www.mbari.org/aosn/>

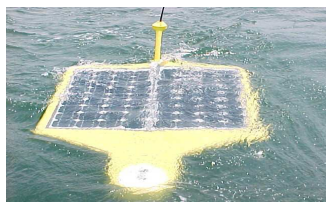


## Autonomous Underwater Vehicules (AUV)

*Planneurs sous marins*



CARIBOU by Bluefin Robotics Corporation



Solar recharged AUV

<http://www.mbari.org/aosn>



Phantom HD2 ROV

<http://www.link-quest.com> <sup>49</sup>

## CHAPITRE 2

### Conception des WSN

## Facteurs affectant la conception des WSN

- A. Coûts de production
- B. Contraintes matérielles
- C. Topologie du réseau
- D. Environnement d'exploitation (dépend des applications)
- E. Support de transmission
- F. Consommation d'énergie (durée de vie)

51

## A. Coûts de production

- Liés au facteur d'échelle
- Le coût des capteurs doit être faible pour que les réseaux de capteurs puissent être justifiés !!!
- PicoNode: **moins de 1 \$**
- Système Bluetooth: **environ 10 \$**,
- L'OBJECTIF DE COÛTS D'UN NOEUD CAPTEUR doit être inférieur à **1 \$ !!!!!!! Low Cost**
- Actuellement varie de **25 \$ à 180 \$** (Encore très cher !!!!)

52

## B. Contraintes matérielles

- ❑ Taille /poids du nœud capteur : miniaturisation
- ❑ Capteurs plus performants
- ❑ Réduire l'impact sur l'environnement
- ❑ Capacité d'adaptation aux environnements hostiles (fortes chaleurs eau, ...)
- ❑ Être autonome et sans surveillance (dans des champs d'ennemi, au fond d'un océan, ...)
- ➔ Assurer une bonne robustesse /tolérance au fautes

53

## C. Topologie du réseau

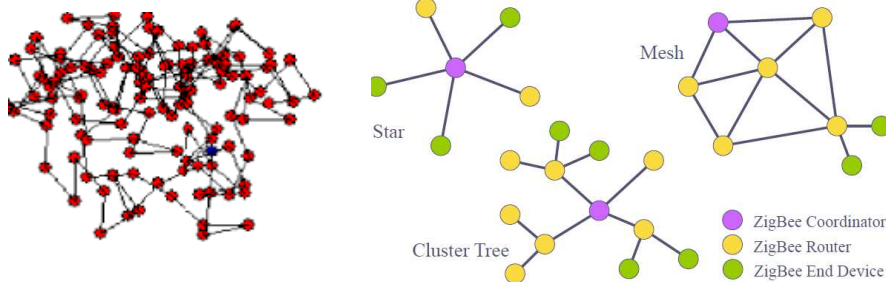
- ❑ Maintenance et changement de la topologie
  - Phase de pré-déploiement et de déploiement
  - Phase Post-déploiement
  - Re-déploiement de nœuds supplémentaires

54

## C. Topologie du réseau

### Phase de pré-déploiement et de déploiement

- ❑ Largués des avions → déploiement aléatoire
- ❑ Planifiée, fixe → déploiement régulier



55

## C. Topologie du réseau(2)

### Phase de post-déploiement

Les changements de topologie peuvent se produire:

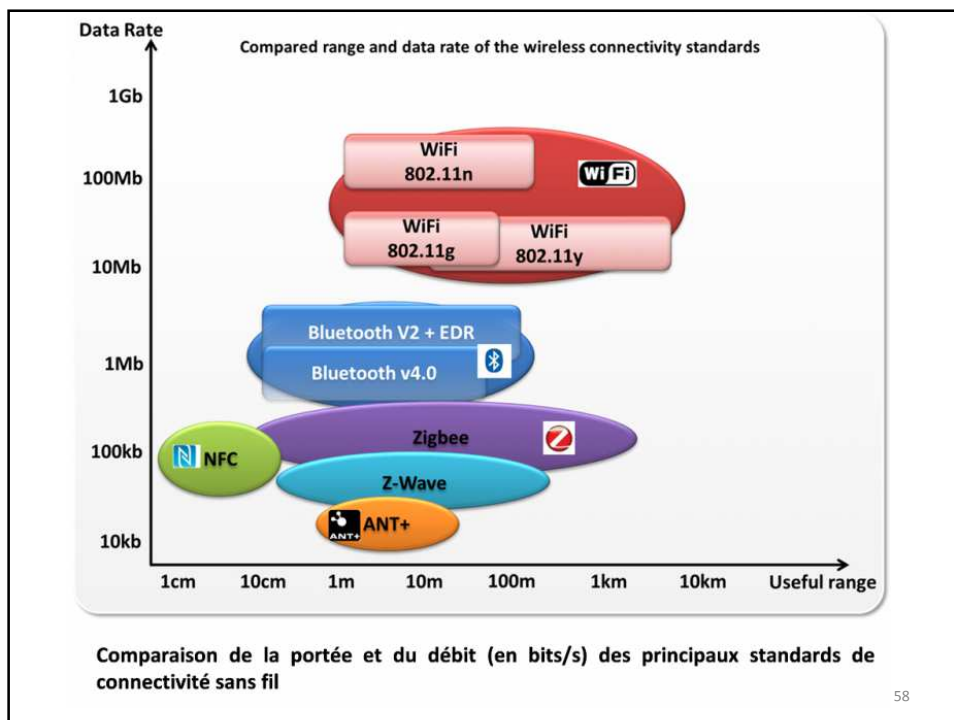
- Les nœuds peuvent se déplacer pour compenser les lacunes de déploiement
- Accessibilité (due au brouillage, bruit, obstacles en mouvement, etc.)
- Energie disponible
- Dysfonctionnement
- Les nœuds peuvent être passivement déplacés par une force extérieure (vent, eau,...)
- Les nœuds peuvent activement rechercher des domaines "intéressants"

56

## E. Standards de transmission

- ❑ Radio, infrarouge ou optiques
- ❑ Bandes ISM (industriel, scientifique et médical)
- ❑ RAISONS: fréquences libres, grande attribution du spectre et grande disponibilité
- ❑ Standards de communication **normalisés** ou non ?

57



## F. Consommation d'énergie

❑ Les nœuds capteurs ont des sources d'alimentation limitées

➔ **Durée de vie** dépend de la durée de vie de la **batterie**

*Quel instant significatif de l'épuisement?*

**Objectif:** fournir autant d'énergie que possible à moindre **coût / volume / poids / recharge**

❑ Batteries primaires - **non rechargeables**

❑ Batteries secondaires – **rechargeables**: combinée à une forme de récupération d'énergie (solaire, variation de température, vibrations, bruits acoustiques, ...)

59

## F. Consommation d'énergie (2)

❑ Un nœud capteur peut être **initiateur de données** ou un **relais**.

❑ La conservation d'énergie et la gestion de l'alimentation sont vitales

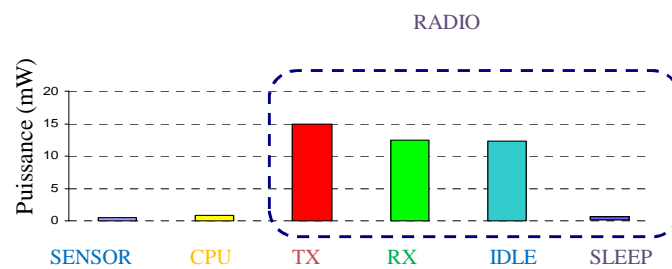
➔ Nécessité de mettre au point des protocoles de communication qui soient adaptés au paramètre de puissance

60

## F. Consommation d'énergie (3)

□ Trois domaines pour la consommation d'énergie:

- Communication
- Traitement des données
- Détection



61

## F. Consommation d'énergie (4)

Formule détaillée pour la consommation d'énergie:

$$P_c = N_T [ P_{te}(T_{on} + T_{st}) + P_O(T_{on}) ] + N_R [ P_{re}(R_{on} + R_{st}) ]$$

où

$P_{te}$  : puissance de transmission

$P_{re}$  : puissance de réception

$P_O$  : puissance de sortie du transmetteur

$T_{on}$  : temps d'activité du transmetteur

$R_{on}$  : temps d'activité du récepteur

$T_{st}$  : temps de démarrage du transmetteur

$R_{st}$  : temps de démarrage du récepteur

$N_T / N_R$  : Nombres d'opérations de mise en marche du transmetteur/  
récepteur par unité de temps

62

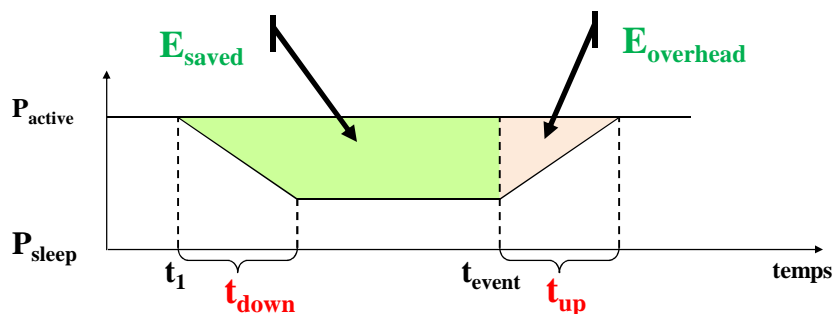
## Plusieurs modes de consommation d'énergie

- Plusieurs modes possibles → modes de sommeil « plus profonds »
  - Dépend fortement du matériel
  - ex: MSP430 .: quatre modes de sommeil différents  
Atmel ATmega: six modes différents
- Basculer d'un mode à un autre
  - **Problématique:** Le temps et la consommation d'énergie nécessaires pour atteindre les modes supérieurs sont **non négligeables**
    - Introduit un overhead
    - Payante ssi  $E_{\text{saved}} > E_{\text{overhead}}$

63

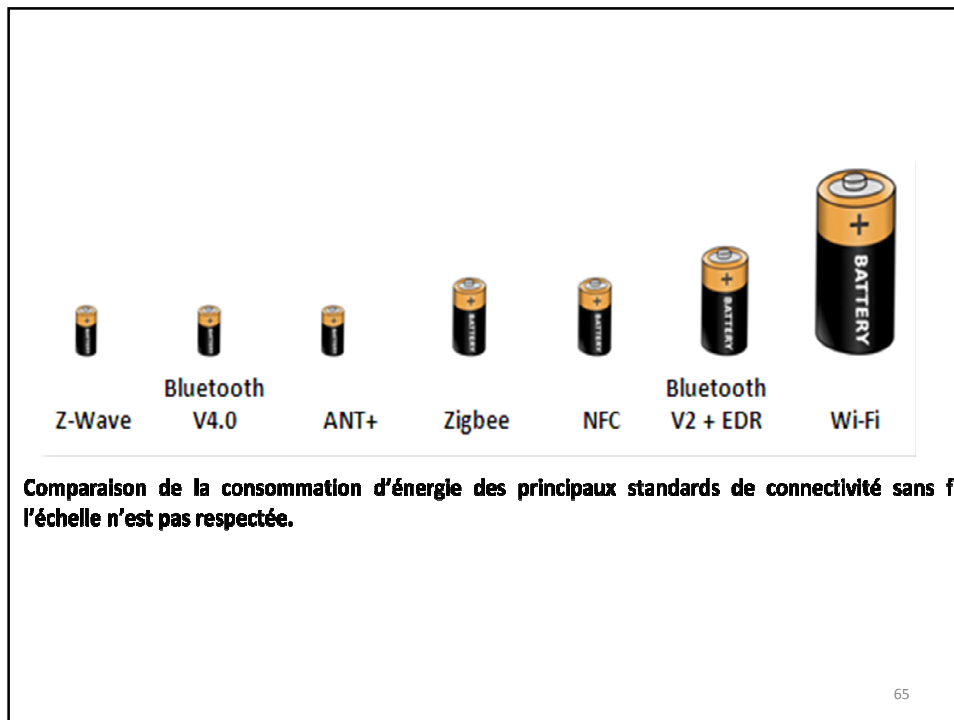
## Plusieurs modes de consommation d'énergie (2)

- Basculement entre les modes déclenché par les événements




64





## Consommation d'énergie pour la détection

- Dépend de:
  - L'application
  - La nature de détection: sporadique ou constante
  - La complexité de détection
  - Les niveaux de bruit ambiant



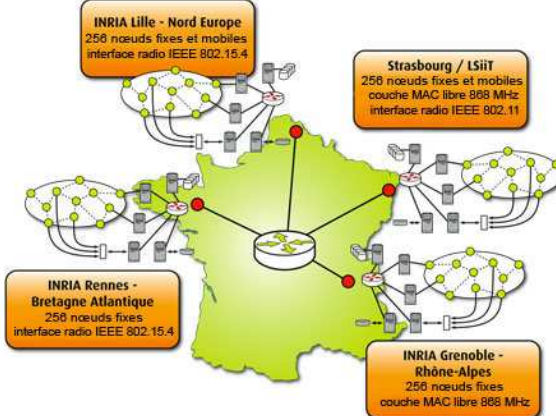
**INRIA**  
INSTITUTE OF INFORMATION SCIENCES IN FRANCE

## SENSLAB

PLATEFORME DE RÉSEAUX DE CAPTEURS SANS FIL À GRANDE ÉCHELLE

Équipes de développement Inria : DYONISOS, D-NET, POPS




**INRIA Lille - Nord Europe**  
250 nœuds fixes et mobiles  
interface radio IEEE 802.15.4

**Strasbourg / LSiiT**  
250 nœuds fixes et mobiles  
couche MAC libre 868 MHz  
interface radio IEEE 802.11

**INRIA Rennes - Bretagne Atlantique**  
250 nœuds fixes  
interface radio IEEE 802.15.4

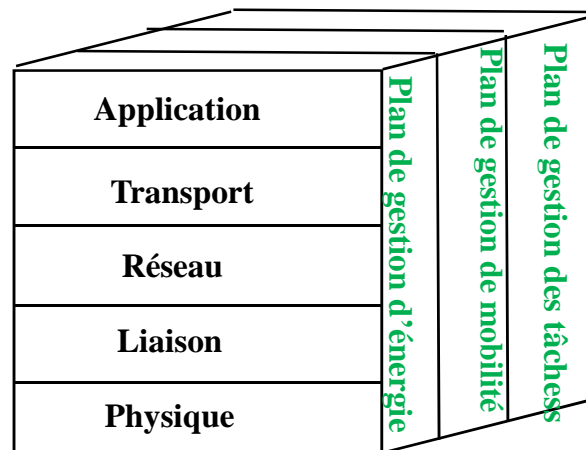
**INRIA Grenoble - Rhône-Alpes**  
250 nœuds fixes  
couche MAC libre 868 MHz



## CHAPITRE 3

### Les protocoles de communication pour les WSN

## Pile protocolaire



69

## Pile protocolaire (2)

- ❑ La couche physique :
    - Spécifications des caractéristiques matérielles, des fréquences porteuses, etc...
  - ❑ La couche liaison :
    - Livraison entre nœuds
    - Contrôle d'erreurs, accès au media,...
  - ❑ La couche réseau :
    - Routage fiable des données captées vers le sink
      - Optimisation de l'énergie des capteurs.
      - Pas de système d'adressage global pour le grand nombre de nœuds
      - Flux à sens unique
      - Redondance des données
- Nouveaux algorithmes pour le problème de routage dans les WSN

70

## Pile protocolaire (3)

- La couche transport :
  - Livraison de bout en bout
  - Fragmentation, contrôle de flux, contrôle de congestion
  - Gestion éventuelle des erreurs de transmission
  
- La couche application :
  - Assure l'interface avec les applications
  - C'est le niveau le plus proche des utilisateurs,
  - Gérée directement par les logiciels

71

## Plans de gestion

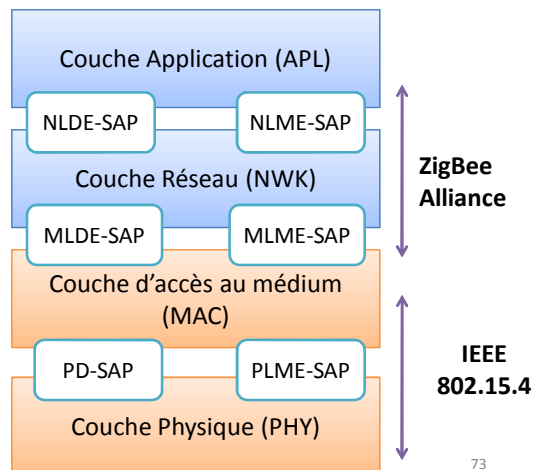
- Plan de gestion d'énergie :
  - Contrôle l'utilisation de la batterie
    - Ex: le capteur éteint son récepteur après la réception d'un message
    - Si le niveau d'énergie devient bas, le nœud diffuse à ses voisins une alerte les informant qu'il ne peut pas participer au routage, l'énergie restante est réservée au captage
  
- Plan de gestion de mobilité :
  - Détecte et enregistre le mouvement du nœud capteur
    - Le nœud peut garder trace de ses voisins
    - Déléguer la réalisation de tâches aux voisins
  
- Plan de gestion de tâche :
  - Balance et ordonnance les différentes tâches de captage de données dans une région spécifique.
  - Il n'est pas nécessaire que tous les nœuds de cette région effectuent la tâche de captage au même temps (selon leur niveau de batterie)

72

## Pile protocolaire IEEE802.15.4/ ZigBee

- ❑ Basée sur la norme IEEE 802.15.4 pour les couches basses
- ❑ Rajoute les couches de gestion du réseau, des objets et applicatives

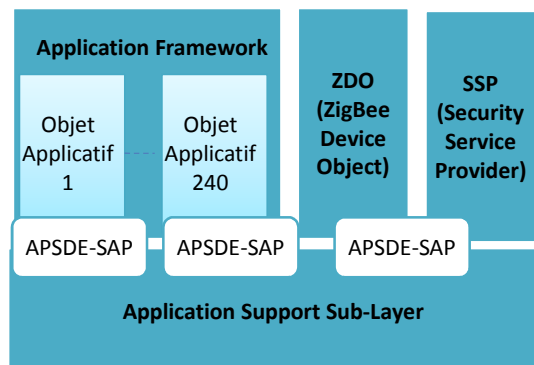
- NLDE : Network Layer Data Entity
- NLME: Network Layer Management Entity
- MLDE : MAC Layer Data Entity
- MLME : MAC Layer Management Entity
- PD : Physical Layer Data
- PLME : Physical Layer Management Entity



73

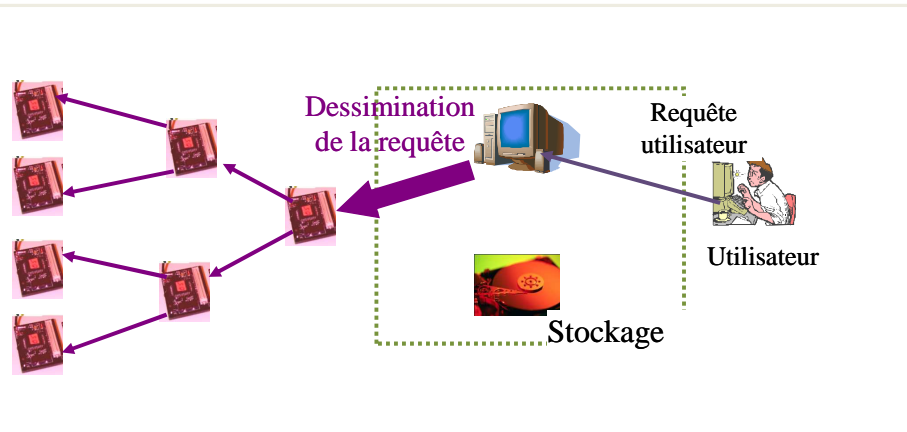
## La couche Application de ZigBee

- ❑ Offre des profils (standards) prédéfinis
  - Home Automation,
  - Remote Control
  - Smart Energy
  - Health Care
  - Retail Services (achats)...
- ❑ ZDO → Découverte des dispositifs et des services
- ❑ Les objets appartenant à un même profil peuvent communiquer entre eux grâce à une table de correspondance:
  - *binding table*
- ❑ Tous les constructeurs n'implémentent pas tous les standards



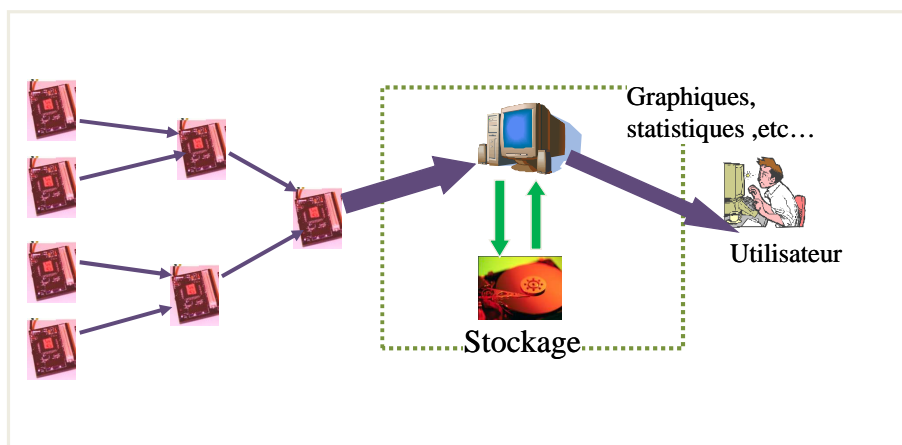
74

## Traitement des requêtes



75

## Traitement des requêtes (2)



76

### Traitement des requêtes (3)

- L'utilisateur transmet une requête et reçoit une (des) réponse(s) de la part de nœuds capteurs valides. Exemple:

Quelle aire a une humidité supérieure à 50?

Type = humidity

Timestamp =01/18/2007/16:35:28

Location =[60N,120W]

Humidity >50

77

### Traitement des requêtes (4)

- Exemple: (Requête pour le suivi d'animaux)

Type = four legged animal (Détecter la position de l'animal)

Interval= 30 s (envoyer la réponse chaque 30 s)

Duration= 1h (.. Pour l'heure qui suit)

Rec = [-100,100,200,400] (provenant des nœuds capteurs à l'intérieur du rectangle)

78

## Traitement des requêtes (5)

- Un nœud capteur qui détecte l'animal génère les données suivantes:

*Type* = four legged animal (type de l'animal observé)

*Instance* = elephant (instance de ce type)

*Location* = (125,220) (position du nœud)

*Intensity* = 0.6 (amplitude du signal)

*Confidence* = 0.85 (intervalle de confiance)

*Timestamp* = 01:20:40 (temps de génération de l'événement)

79

## Les protocoles de la couche Application

- *Sensor Management Protocol (SMP)*

- Installer de règles liées à l'agrégation des données,
- Echanger des données de localisation
- Distribution de clés de sécurité
- Activer/ désactiver des nœuds
- Interroger la configuration des nœuds capteurs
- Déplacer des nœuds, ...

- *Task Assignment and Data Advertisement Protocol (TADAP)*

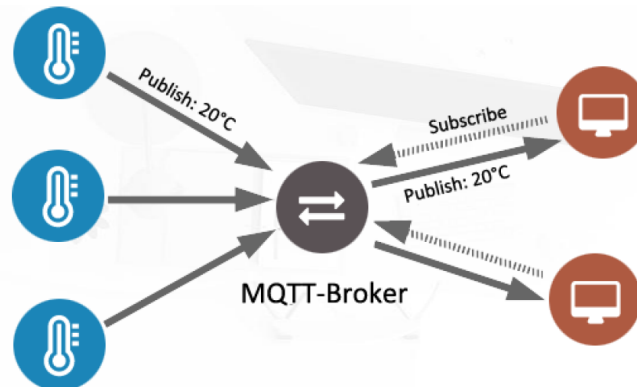
- Manifester les intérêts des utilisateurs pour certaines données
- Annoncer la disponibilité des données au niveau des nœuds capteurs

80



## Les protocoles de la couche Application (2)

### □ Message Queuing Telemetry Transport (MQTT)



81

## Les protocoles de la couche Application (3)

### □ Gestion des requêtes

- Délivrer les requêtes,
- Répondre aux requêtes
- Collecter les réponses aux requêtes

- *Sensor Query and Tasking Language (SCTL)*
- *Sensor Query and Data Dissemination Protocol (SQDDP)*
- *Constrained Restful Environment (CoAP)*
- *HTTP !!*

82

## *Sensor Query and Tasking Language (SCTL)*

- ❑ SCTL est un langage de script procédural
- ❑ Il fournit des interfaces pour:
  - l'accès au matériel du noeud capteur :
    - `getTemperature`, `turnOn`
  - La découverte du voisinage:
    - `isNeighbor`, `getPosition`
  - La communication
    - `tell`, `execute`.

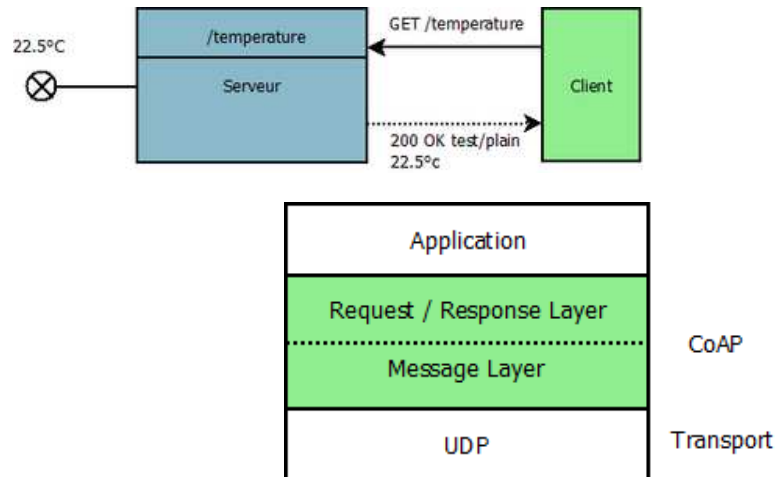
83

## *Sensor Query and Tasking Language (2)*

- ❑ La commande upon permet de créer un “bloc de gestion d'événement” (*event handling block*) pour trois types d'événements:
  1. Evénements générés à la réception d'un message par un noeud capteur (**RECEIVE**)
  2. Evénements déclenchés périodiquement (**EVERY**)
  3. Evénements causés par l'expiration d'un timer (**EXPIRE**).

84

## Constrained Restful Environment (CoAP)



85

## Approches principales pour le traitement des requêtes

- ❑ **Push-based** (Annonce de la disponibilité de nouvelles données)
  - Transmission de l'information initiée par le nœud capteur
  - Les nœuds capteurs annoncent les données disponibles aux utilisateurs
  - Ces derniers interrogent les données qui les intéressent.
- ❑ **Pull-based** (manifestation d'intérêt)
  - Transmission de l'information à la requête du puits
  - Les utilisateurs envoient leur intérêt à un nœud capteur/ un sous-ensemble des nœuds ou au réseau entier.
  - Cet intérêt peut être au sujet d'un certain attribut / type d'événement déclenché.
- ❑ **Push/ Pull**

Les nœuds capteurs / puits impliqués activement

86

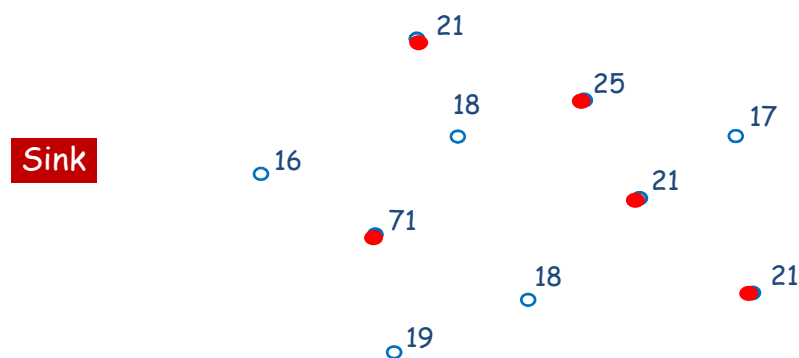
## Types de requêtes

- ❑ **Requêtes centrées sur les données** (basées sur les attributs)
  - Ex: les emplacements des nœuds qui détectent une température supérieure à 20°C
  
- ❑ **Requêtes géographiques** (basées sur la position):
  - Rapporter les valeurs à certaines coordonnées {x, y, z}
  - Ex: les températures lues par les nœuds dans une région A

87

## Requêtes centrées sur les données

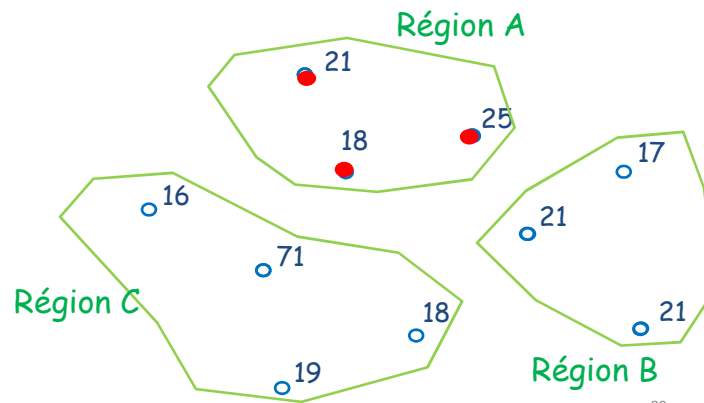
Les nœuds ayant détecté une température >20° C devront envoyer leurs positions respectives



88

## Requêtes géographiques

Les nœuds de la région A devront envoyer leurs températures respectives

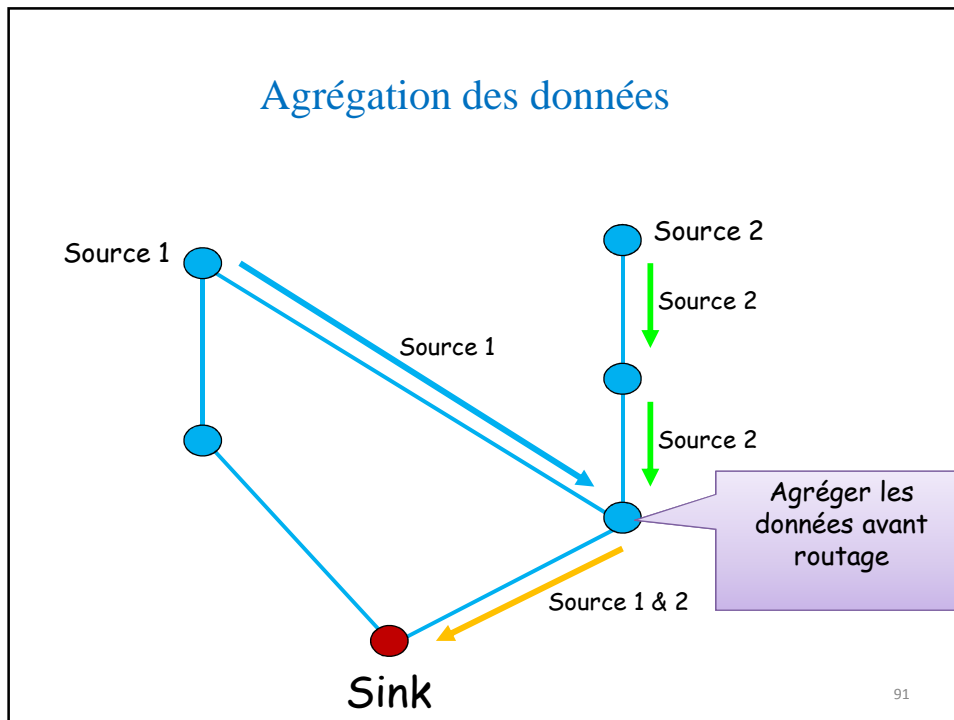


89

## Agrégation/ Fusion des données

- ❑ L'agrégation combine les données provenant de plusieurs nœuds en une information significative → **Minimiser l'énergie et les transmissions**
- ❑ Fonctions simples:
  - Moyenne, max, min, ...
  - Suppression des doublons
- ❑ Fonctions plus sophistiquées
  - Exploiter la corrélation spatiale et temporelle

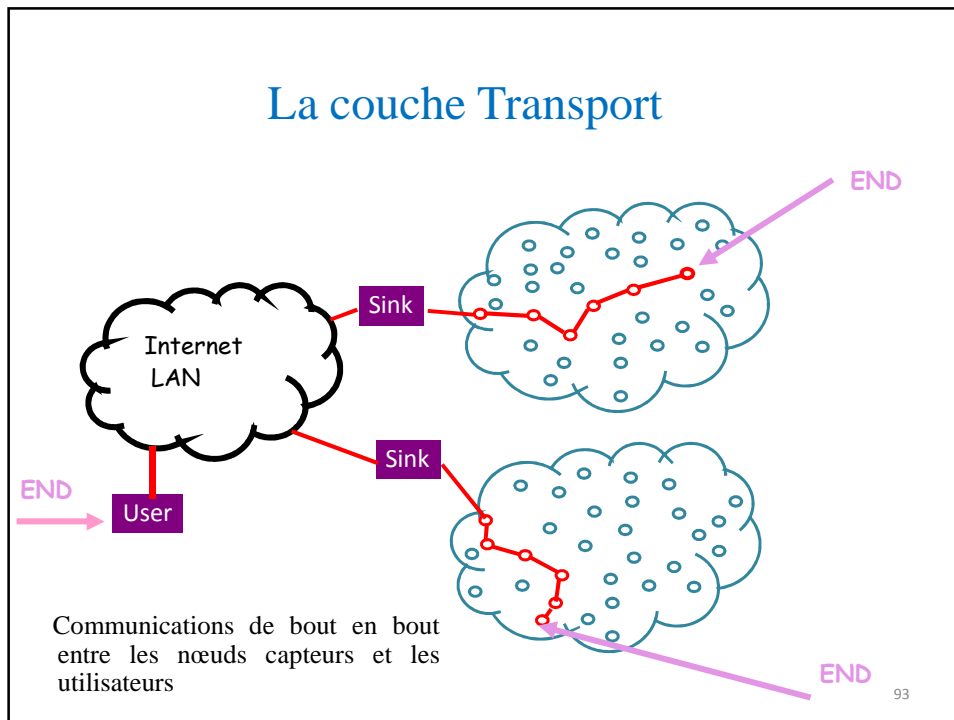
90



### Défis de l'agrégation des données

- Des réseaux non fiables et non prédictibles
  - Quel nœud est habilité à agréger le trafic?
  - A quel moment?
  - Nécessite une attente au niveau des agrégateurs pour recevoir les informations venant de leurs voisins → les délais augmentent
  - Nombre de nœuds supposés répondre?
  - Présence de nœuds malicieux

## La couche Transport



93

## Nouvelles contraintes de transport

### ❑ Inaptitude de TCP:

- Ressources limitées (énergie, capacité de calcul, **stockage**, débits...)
- Contrôle de **congestion** / **retransmissions** dans les réseaux sans fil
- Lourdeur de déploiement
- **Connexions multiples**

### ❑ Réseau hétérogène

- Implémenté principalement au nœud **puits** avec un minimum de fonctionnalités aux **nœuds capteurs**

### ❑ Auto-organisé

- Adaptatif aux topologies dynamiques (mobilité des nœuds / panne / arrêt temporaire,...)

### ❑ Contraintes d'adressage / routage

- **Aucune hypothèse de l'existence d'un adressage / routage de bout en bout**

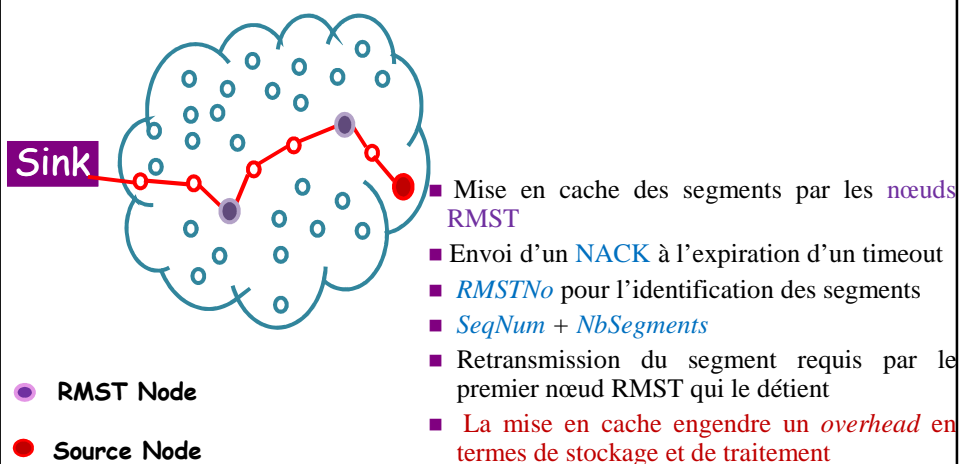
94

## Les protocoles de la couche Transport

- ❑ RMST (*Reliable Multi-segment Transport*)
- ❑ PSFQ (*Pump Slowly Fetch Quickly*)
- ❑ ESRT (*Event-to-Sink-Reliable Transport*)

95

## RMST (*Reliable Multi-Segment Transport*)



96



## La couche Réseau

### Pourquoi ne pas utiliser les protocoles de routage usuels?

- Capteurs multiples pour atteindre un objectif commun
- Les nœuds intermédiaires réalisent l'agrégation des données + mise en cache + routage
- Routage contraint (énergie, capacités...)
- Pas d'identifiant global pour les nœuds capteurs
  - IP or not IP? (Groupe ROLL de l'IETF, 6LowPAN)
  - Routage normalisé / propriétaire? (ZigBee NWK)

97

## La couche Réseau de ZigBee

- Capacité d'établir un nouveau réseau
- Rejoindre et quitter un réseau (join/leave)
- Possibilité de configurer un nouveau dispositif selon le fonctionnement souhaité
- Adressage : la capacité d'un coordonnateur à attribuer adresses aux nouveaux dispositifs joignant le réseau
- Routage adapté à la topologie : transmettre un NPDU à un équipement de destination
- Découverte de voisins: découvrir, enregistrer et transmettre les informations au voisinage sur un seul saut
- Découverte de route : établir éventuellement des tables de routage

98

## Types d'équipements ZigBee

### □ Le coordinateur ZigBee (ZC)

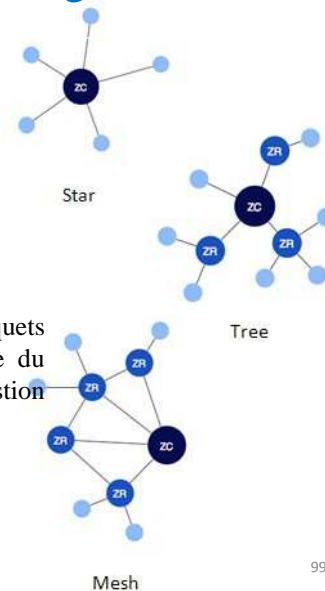
- Un et un seul
- Tiers de confiance
- Racine du réseau et passerelle vers les autres réseaux
- Alimentation permanente

### □ Le routeur ZigBee (ZR)

- Equipement intermédiaire qui route les paquets au sein du réseau (extension de l'étendue du réseau, routes de secours en cas de congestion ou de panne)

### □ L'équipement terminal Zigbee (ZED)

- Ne communique qu'avec un routeur ou le coordinateur
- Endormi la plupart du temps

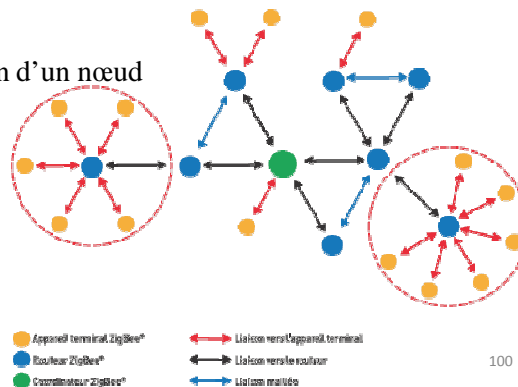


99

## Types d'équipements ZigBee (2)

Les commandes de base :

- Passer en mode coordinateur:
  - ZIGBEE COORDINATOR AT
- Passer en mode routeur/ ZED
  - ZIGBEE ROUTER AT » ou « ZIGBEE END DEVICE AT »
- Afficher la configuration d'un nœud
  - SHOW DEFAULTS



100

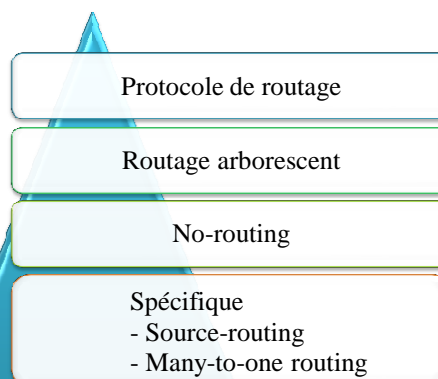
## Topologie maillée

- ❑ Un réseau composé des routeurs et de terminaux Zigbee.
- ❑ Chaque routeur est généralement connecté par plusieurs chemins et achemine les paquets de données de ses voisins.
  - Communications multi-sauts
  - Choix du meilleur chemin
  - Tolérance aux pannes et aux interférences
- ❑ Avantages :
  - Robustesse
  - Les routeurs vont trouver des routes de secours
  - Extensibilité
  - Augmentation du diamètre du réseau
  - Couverture de zones difficilement accessibles, signaux faibles, ...
- ❑ Inconvénients
  - Complexité

101

## Le routage ZigBee

- ❑ Pas de routage au sens classique:
  - ➔ Les données se propagent jusqu'au sink



102

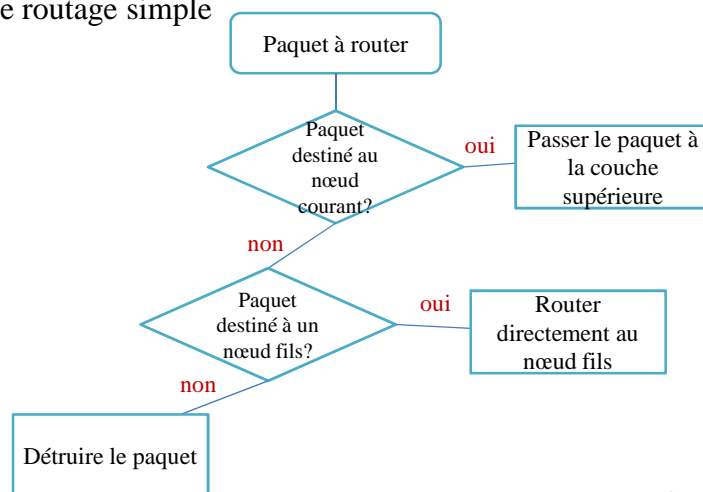
## No-routing

- Un coordinateur et un ou plusieurs end-devices qui lui sont directement connectés
  - Topologie en étoile
  - Le coordinateur connaît tous ses end-devices
  - Apprentissage fait lors de la première connexion
  - Un end-device communique uniquement avec son coordinateur

103

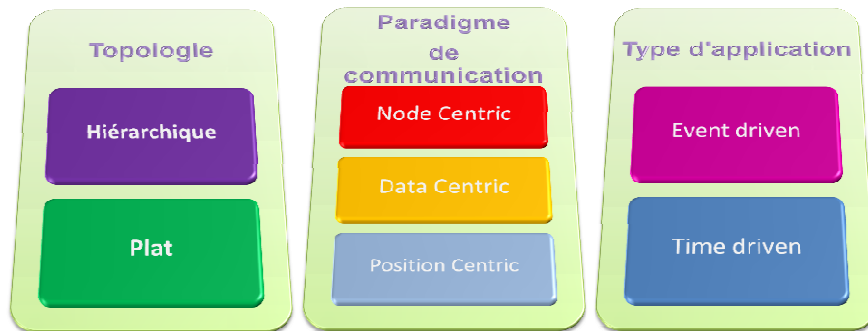
## No-routing (2)

- Processus de routage simple
- Exemple:



104

## Taxonomie des protocoles de routage



105

## Taxonomie des protocoles de routage (2)

- ❑ **Event driven**
  - ➔ Les données ne sont envoyées et routées que suite à l'occurrence d'un événement bien précis
- ❑ **Time driven**
  - ➔ Les données sont prélevées et routées périodiquement
- ❑ **Centré sur les nœuds**
  - ➔ Adressage des nœuds
- ❑ **Centré sur les données**
  - ➔ l'identification des nœuds devient un facteur secondaire
- ❑ **Centré sur la position**
  - ➔ Focalisé sur la position géographique des nœuds qui devient moyen principal d'adressage et de routage géométrique

106

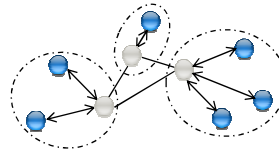
## Taxonomie des protocoles de routage (3)

### □ Plat

- Même niveau de responsabilité des nœuds
- Routage :
  - ✓ Proactif: Recherche de chemins périodique
  - ✓ Réactif : Recherche de chemins à la demande

### □ Hiérarchique

- Plusieurs niveaux de responsabilité des nœuds
- Organisation en clusters



107

## Taxonomie des protocoles de routage (3)

### □ DATA CENTRIC PROTOCOLS

Flooding, Gossiping, SPIN, Directed Diffusion,  
 SAR (Sequential Assignment Routing) , Rumor Routing, Constrained  
 Anisotropic Diffused Routing, COUGAR, ACQUIRE

### □ HIERARCHICAL PROTOCOLS

LEACH, PEGASIS, TEEN, APTEEN

### □ LOCATION BASED (GEOGRAPHIC) PROTOCOLS

MECN, SMECN, GAF, GEAR, PRADA

108

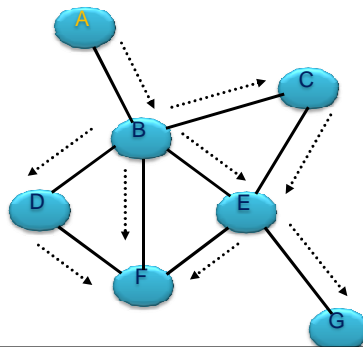
## Approches conventionnelles

### □ L'inondation (*Flooding*)

→ Diffuser les données à tout le voisinage

### □ Le gossiping (*Bavardage*)

→ Envoyer les données à un seul voisin choisi aléatoirement



109

## Lacunes de l'inondation et du bavardage

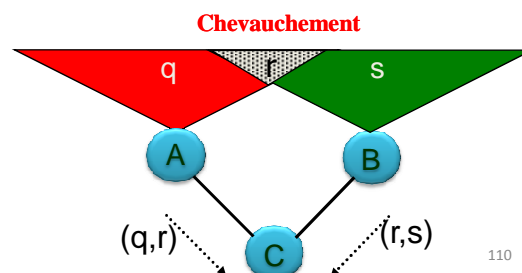
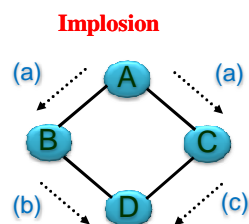
(+) Simples

(-) Implosion → volume de trafic important

(-) Chevauchement des données (*overlap*)

(-) Ressources aveugles → aucune connaissance du niveau d'énergie

(-) Inefficacité en terme énergétique



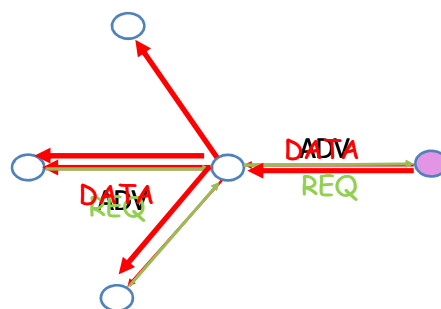
110

## SPIN (*Sensor Protocol for Information via Negotiation*)

- ❑ Utilise trois types de messages: **ADV**, **REQ** et **DATA**
- ❑ Pour une nouvelle donnée, un nœud capteur diffuse un paquet d'annonce **ADV** (*advertisement*) qui contient les nouvelles données (méta-données) → **push-based**
- ❑ Les nœuds intéressés envoient une demande **REQ**
- ❑ Les données sont envoyées aux nœuds demandeurs dans des paquets **DATA**
- ❑ La procédure est itérée jusqu'à ce que tous les nœuds auront obtenu une copie.

111

## SPIN (2)



112



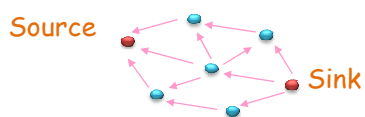
## SPIN (3)

- (+) Simple
- (+) Optimise la consommation d'énergie de 70 %
- (+) Un nœud ne répond plus à aucun message ADV en cas de bas niveau d'énergie
- (+) Pas de redondance de données
- (+) Evite l'implosion
  
- (-) Temps de convergence (la technique d'inondation converge beaucoup plus rapidement)

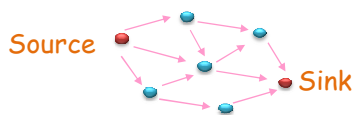
113

## Directed Diffusion (DD)

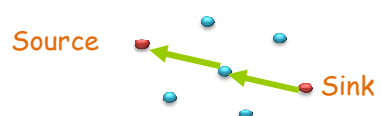
□ Basé sur le modèle *Publish / subscribe* (→ Pull-based)



1. Interest Propagation



2. Gradient Setup



3. Reinforcement



4. Data Delivery

114

## Nomination des données

- ❑ Requête : description de l'intérêt (tâche)

### Exemple

Type = *GetTemperature*  
 Zone = [100, 100, 120, 120]  
 Interval = 10 ms  
 Duration = 1 mn

- ➔ Une réponse d'un capteur pourra être formulée ainsi :

Type = *GetTemperature*  
 Location = (110, 115)  
 Temperature = 32  
 Timestamp = 11:32:10

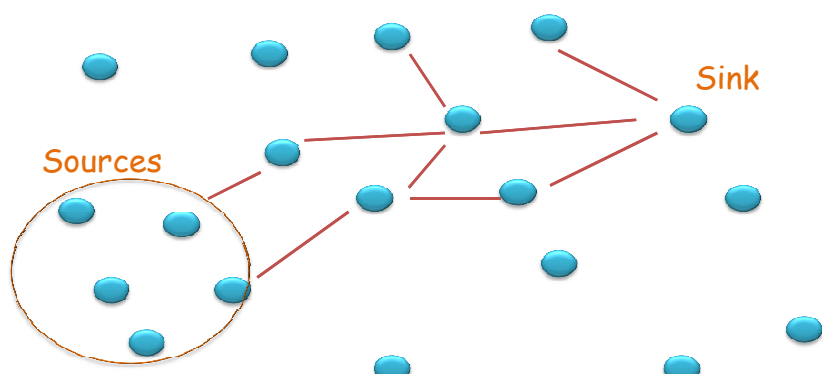
115

## Propagation de l'intérêt

- ❑ Le puits propage son **intérêt** à un débit initialement faible (phase d'exploration)
- ❑ Chaque nœud contient un **cache** d'intérêts :
  - La description de l'intérêt
  - Un ensemble de gradients.
- ❑ **Gradient** : vecteur représentant l'intérêt
  - Une direction (nœud émetteur de l'intérêt)
  - Amplitude (débit des données)
  - Durée de validité

116

## Propagation de l'intérêt (2)



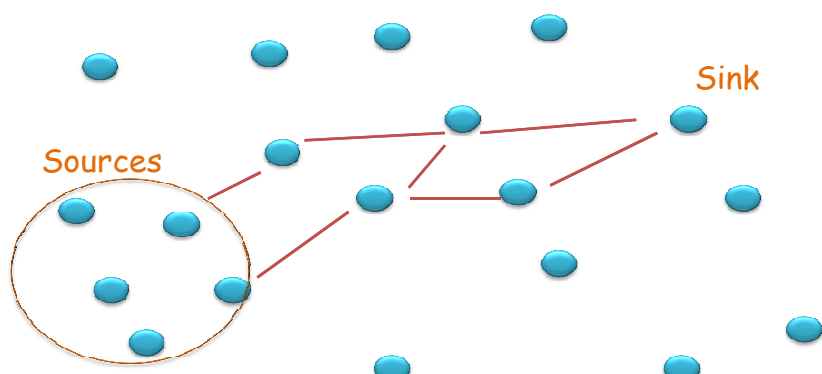
117

## Etablissement des gradients

- ❑ Lorsqu'un nœud reçoit un intérêt, il parcourt son cache :
  - Si le cache ne contient aucune entrée relative à l'intérêt reçu, une nouvelle entrée est créée avec un gradient vers le voisin émetteur.
  - Dans le cas contraire, le nœud recherche un gradient vers le voisin émetteur, et met à jour en conséquence l'entrée en question.
- ❑ Après le traitement du cache, le nœud relaie l'intérêt vers ses voisins (inondation)

118

## Etablissement des gradients (2)



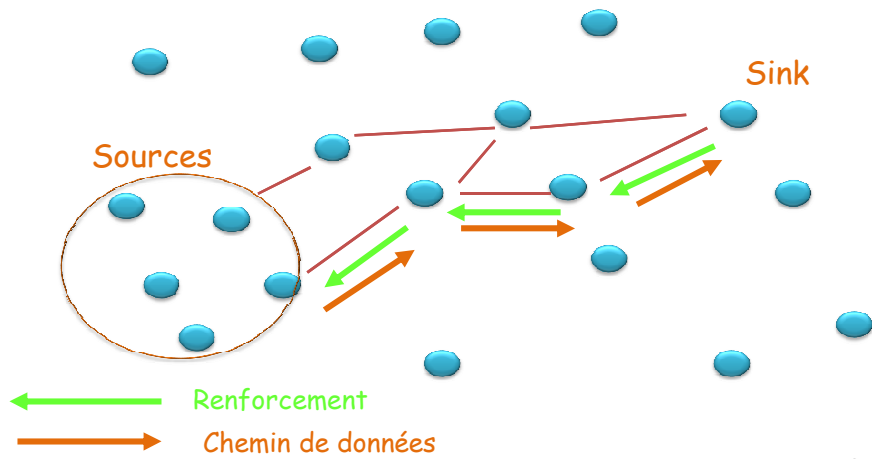
119

## Renforcement de chemin

- ❑ Renforcement positif:
  - ❑ Clôture la phase d'exploration → phase de collecte
  - ❑ Un nœud renforce l'un de ses voisins :
    - Selon son cache de données
    - Selon des critères de renforcement (taux de pertes, délais, ...)
- ❑ Renforcement négatif :
  - Le puits peut envoyer un renforcement négatif sur le chemin en panne en spécifiant le débit de base (exploratoire), et en procédant à un renforcement positif d'un autre chemin

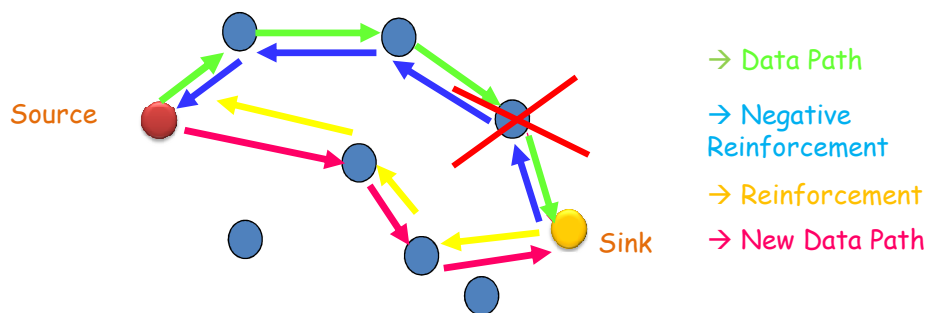
120

## Renforcement et propagation des données



121

## Renforcement négatif



122

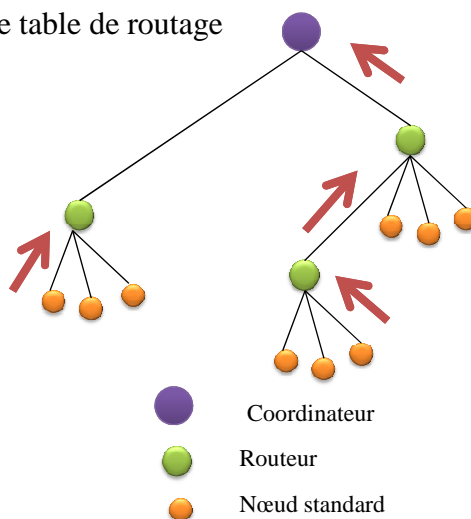
## Routage hiérarchique

- ❑ La topologie est en arbre
  - Tout nœud a au plus un père (tous en ont un et un seul sauf le coordinateur)
- ❑ Le routage utilise la structure **arborescente**
  - On n'utilise pas la table de routage
  - On n'utilise pas les raccourcis, on surcharge le **coordinateur**
- ❑ Le routage est défini lors de l'attribution des adresses
  - Le routage n'est pas souple
- ❑ Le plus efficace en terme énergétique
- ❑ Possibilité d'agrégation et de fusion de données

123

## Routage arborescent (2)

- ❑ N'utilise pas de table de routage



124

## Adressage ZigBee

- ❑ Toute entité 802.15.4 possède une adresse unique appelée adresse MAC:
  - codée sur 64 bits (8 octets)
  - également appelée **adresse étendue**
  - peut être utilisée dans les dialogues au sein du PAN
- ❑ Une **adresse courte** (16 bits) est préférée
  - A cause des débits de transmission
  - Attribuée par le coordinateur au moment de l'association au réseau
  - Formée du PAN Id + Node Id
- ❑ ZigBee ne prévoit aucune règle pour l'adressage
  - Cette tâche est laissée pour les couches supérieures (**adressage libre**)

125

## Allocation des adresses

- ❑ Constantes fixées par le coordinateur Zigbee
  - $Dm$ : nombre maximal de fils (non routeur) par routeur
  - $Rm$ : nombre maximal de routeurs parmi ces fils
  - $Lm$ : profondeur maximale de l'arbre
- ❑ Chaque nœud a une adresse qui dépend de sa position dans l'arbre
- ❑ Chaque nœud prend le plus petite adresse disponible
- ❑ Chaque routeur alloue une adresse à chacun de ses fils en fonction de sa plage d'adresses qui dépend de sa position dans l'arbre
- ❑ Le nombre d'adresses associées à un routeur du niveau  $d < Lm$  est définie par la récurrence suivante :
  - $A(d) = 1 + Dm + Rm$  si  $d = Lm - 1$
  - $A(d) = 1 + Dm + Rm.A(d+1)$  si  $0 \leq d < Lm - 1$

126

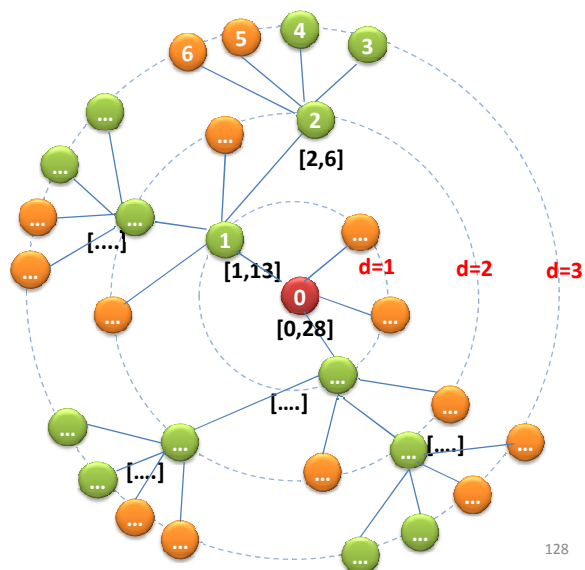
## Allocation des adresses (2)

- Un routeur à une profondeur  $d$  reçoit la plage d'adresses  $[x, x + A(d)]$
- Le routeur aura l'adresse  $x$  et affectera:
  - La plage  $[x + (i-1).A(d+1)+1, x + i . A(d+1)]$  à son  $i^{\text{ème}}$  fils routeur où  $1 \leq i \leq Rm$
  - L'adresse  $x + Rm.A(d+1) + j$  à son  $j^{\text{ème}}$  fils feuille où  $1 \leq j \leq Dm$

127

## Allocation des adresses (3)

Exemple  
 $Dm = 2, Rm = 2, Lm = 3$



128

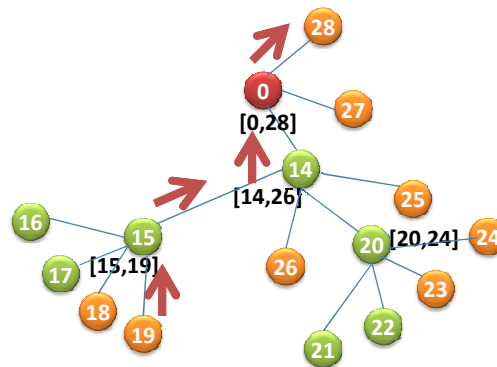




## Le routage arborescent (2)

### Par exemple

- ❑ Le nœud 14:
  - Parent 0
  - Plage [15, 19] =>15
  - Plage [20, 24] => 20
  - Terminaux = {25, 26}
- ❑ S'il reçoit un message pour 29
  - 29 n'est pas élément de [14, 26]
  - Retransmis vers 0
- ❑ S'il reçoit un message pour 23
  - 23 est élément de [20, 24]
  - Retransmis vers 23



Paquet émis du nœud 19 au nœud 28

131

## Routage maillé

- ❑ Basé sur AODV (*Ad hoc On Demand Distance Vector Routing Algorithm*)
- ❑ Chaque routeur possède une table de routage (RT)
- ❑ Un routeur utilise un algorithme de découverte des routes
- ❑ Pour construire et mettre à jour cette table de routage
  - Une entrée de la table de routage :
    - <Destination address, Next hop address toward destination, Entry status (active, discovery, inactive)>
- ❑ Quand un routeur doit acheminer un paquet vers une destination inconnue, il lance la procédure de découverte de routes (s'il a suffisamment de ressources, sinon il utilise le routage arborescent)

132

## Règles de routage

- ❑ Si le nœud dispose d'une **table de routage** et il existe une entrée dans la table alors l'utiliser
- ❑ Sinon, s'il n'existe pas une entrée dans la table de routage et il existe une place libre alors lancer une procédure de **RouteDiscovery**
- ❑ Sinon, router le long de l'arbre en utilisant le routage **hiérarchique**

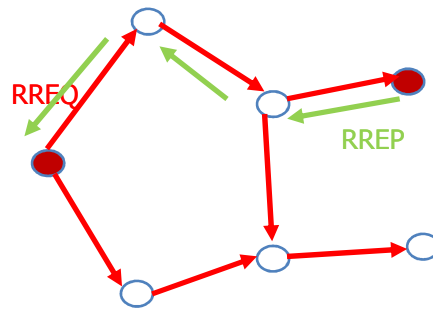
133

## Routage ZigBee

- ❑ Basé sur « *Ad hoc On-Demand Vector Routing* »
- ❑ Fonctionnement
  - Lorsqu'une source veut atteindre une destination, elle diffuse par inondation un **RREQ** jusqu'à atteindre la destination
  - Chaque routeur intermédiaire lorsqu'il reçoit un RREQ ne le propage que s'il propose une meilleure route
    - Il compare celui reçu avec le meilleur stocké dans sa table de découverte de routes
    - Clef de recherche : Source Add + RREQ ID + destination Address
    - Valeur comparée : Forward cost
  - La destination renvoie un **RREP** sur le chemin de moindre coût vers la source
  - Lors de la réception d'un **RREP**, les routeurs et la source mettent à jour leur table de routage à partir de la table de découverte de routes (changement du status)

134

## Route Discovery



135

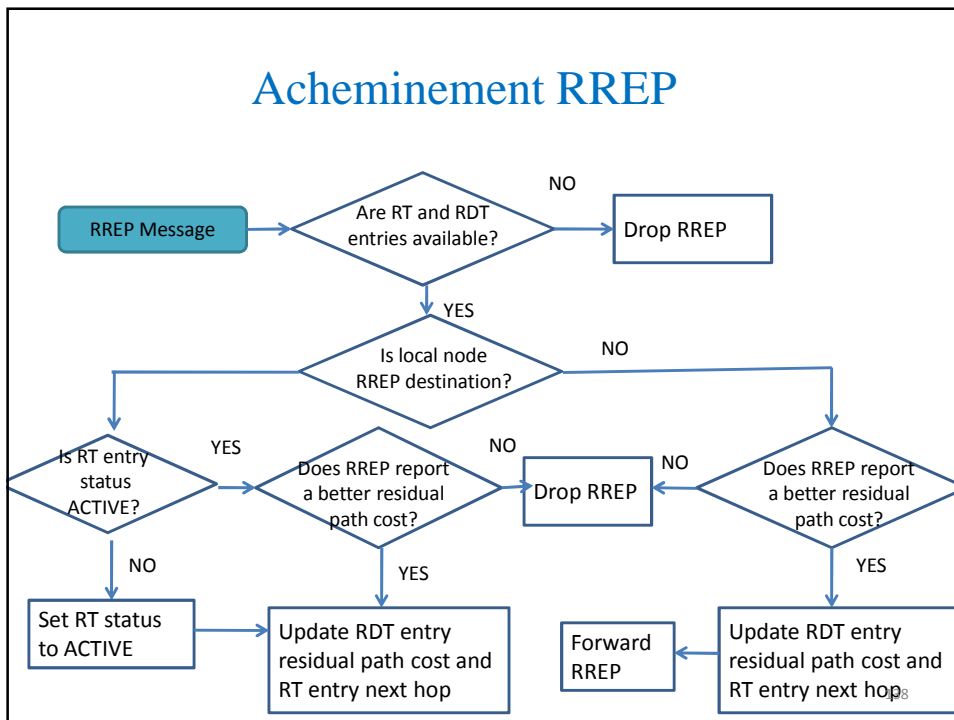
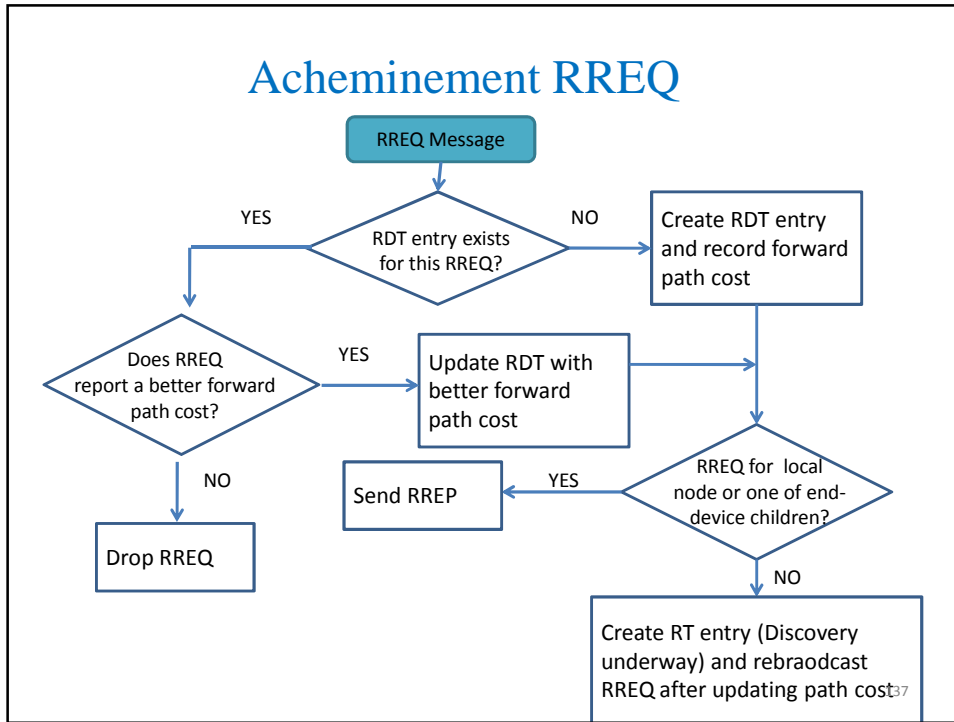
## Table de découverte de routes

### Route Discovery Table (RDT)

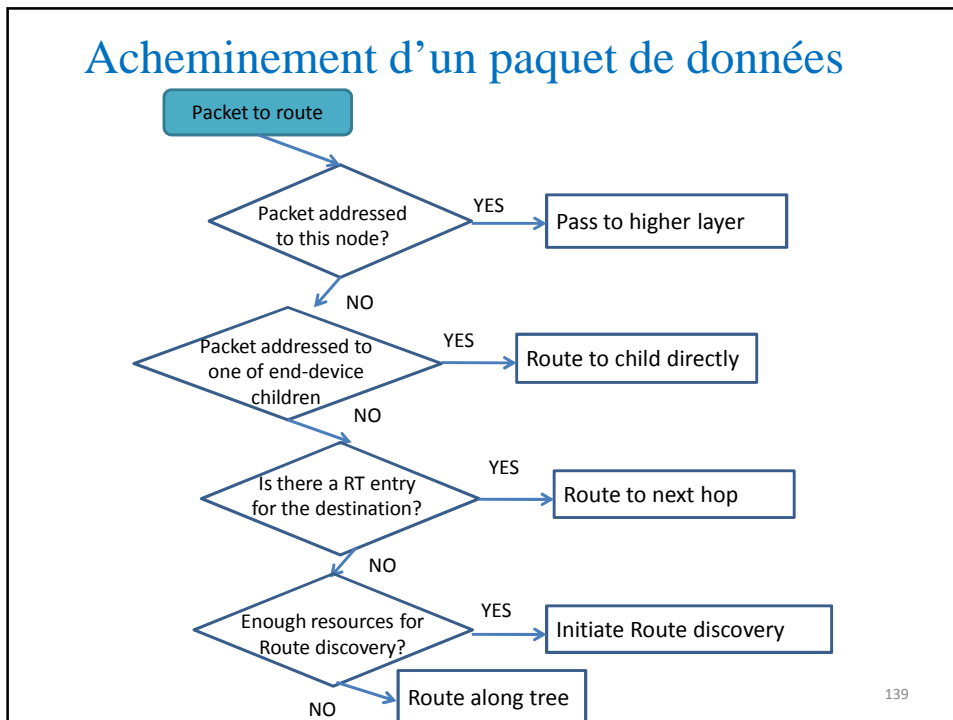
- maintenue par les routeurs et le coordinateur
- Attention : distincte de la table de routage

Field Name	Description
RREQ ID	Unique ID (sequence number) given to every RREQ message being broadcasted
Source Address	Network address of the initiator of the RREQ
Sender Address	Network address of the device that sent the most recent lowest cost route request command frame corresponding to this entry's Route request identifier and Source address
Forward Cost	The accumulated path cost from the RREQ originator to the current device
Residual Cost	The accumulated path cost from the current device to the RREQ destination

136



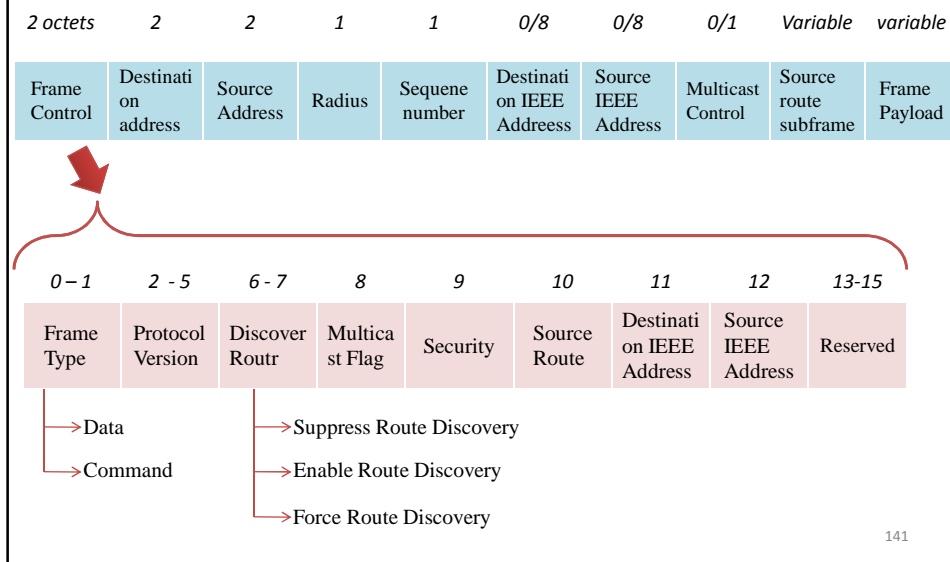
## Acheminement d'un paquet de données



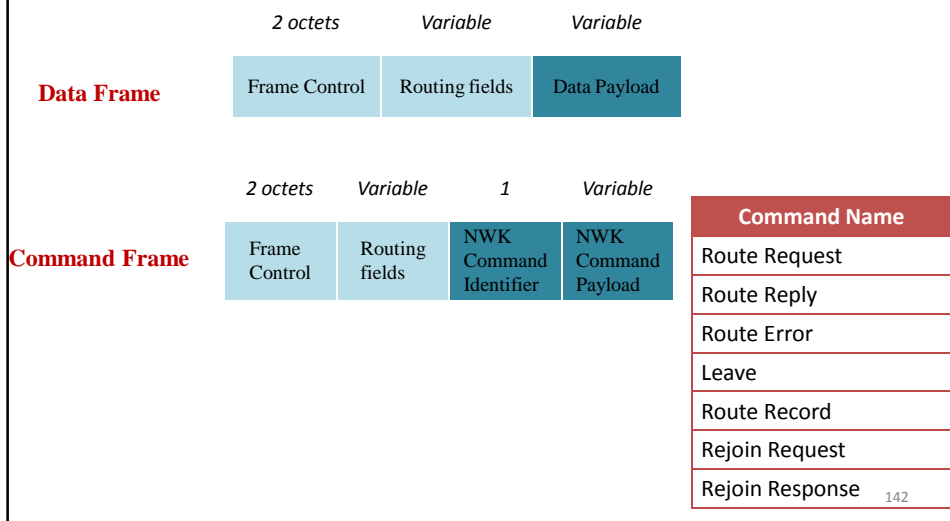
## LEACH

*Low-energy Adaptive Clustering Hierarchy*

## Format général de paquet NWK



## Format général de paquet NWK (2)



## CHAPITRE 4

### Mécanismes d'accès au canal

143

### Objectifs des protocoles MAC pour les WSN

- Evitement de la collision
- Efficacité en terme énergétique**
- Facteur d'échelle
- Equité, maximisation du débit perçu
- Intégrité des données

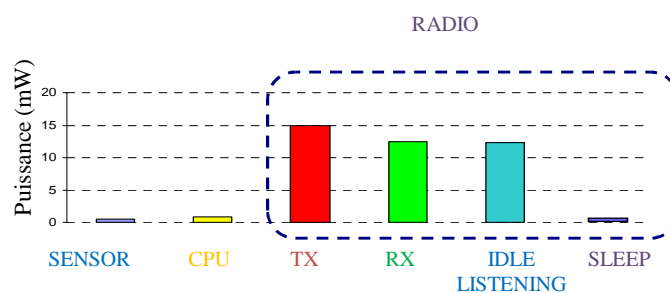
#### Contraintes

- Haute densité des nœuds → augmente la probabilité de collision
- Minimiser l'overhead
- Périodicité des communications
- Eviter l'écoute inactive (*idle listening*)
- Capacités de calcul limitée → Ne pas implémenter des algorithmes complexes
- Taille de trame très réduite

144



## Objectifs des protocoles MAC pour les WSN (2)



145

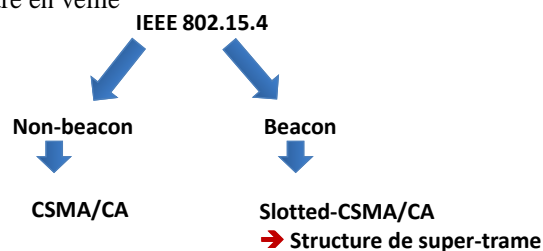
## Taxonomie des protocoles MAC

- ❑ Contention (RANDOM/CSMA)-Based MAC Protocols  
Sleep-MAC, BMAC, T-MAC, CCMAC, ...
- ❑ Reservation-Based (TDMA BASED) MAC Protocols  
TRAMA, FLAMA, etc...
- ❑ HYBRID (CSMA/TDMA) MAC Protocols  
ZMAC, ....

146

## La couche MAC de IEEE 802.15.4

- ❑ Accès canal CSMA-CA : Inspiré du 802.11 sans RTS/CTS
- ❑ Permet d'utiliser le mécanisme de *beaconing*
  - réveil périodique
  - vérification de l'arrivée d'un beacon
- ❑ Economise l'énergie à travers la mise en veille entre deux beacons
  - ❑ Les nœuds ne devant pas router ou recevoir les données aléatoirement peuvent se mettre en veille



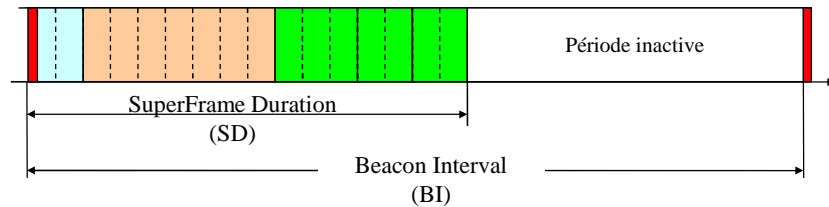
147

## La couche MAC de IEEE 802.15.4 (2)

- ❑ Sans beacon
  - Mode non coordonné
  - Transmission dès que le périphérique obtient le canal
  - L'équipement Zigbee reste constamment actif
  - Le récepteur des routeurs est constamment actif
  - Accès au canal : CSMA/CA sans « slot »
- ❑ Avec beacon
  - Mode coordonné (balisé)
  - Les routeurs transmettent périodiquement une trame balise « beacon » pour confirmer leur présence / synchroniser les nœuds
  - Les nœuds capteurs peuvent s'endormir entre deux beacons

148

## Structure de la super-frame



SO = Superframe order  
BO = Beacon order

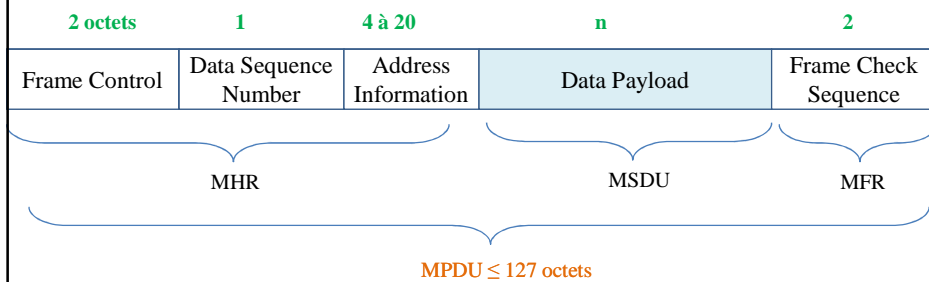
➤  $SD = \text{NumberSlots} * \text{BaseSlotDuration} * 2^{SO}$   
où  $0 \leq SO \leq 15$

➤  $BI = \text{NumberSlots} * \text{BaseSlotDuration} * 2^{BO}$   
où  $0 \leq SO < BO \leq 14$

➔ Nombre de beacons par seconde?

149

## Data Frame



150

## Frame Control

Bits 0-2	3	4	5	6	7-9	10-11	12-13	14-15
Frame Type	Security Enabled	Frame Pending	ACK Request	Intra PAN	Reserved	Dest. Addressing Mode	Reserved	Source Addressing Mode
<b>Addressing Mode</b>	Définit le type d'adressage (8, 64 ou non présente)							
<b>Intra PAN</b>	Spécifie si le paquet reste dans le même PAN ou doit être transmis sur un autre							
<b>ACK Request</b>	Spécifie si le destinataire doit émettre un ACK							
<b>Frame Pending</b>	Indique au destinataire la présence d'autres données qui lui sont destinées							
<b>Security Enabled</b>	Validation de cryptage MAC							
<b>Frame Type</b>	Type de trame (Data/Command/Beacon/ACK)							

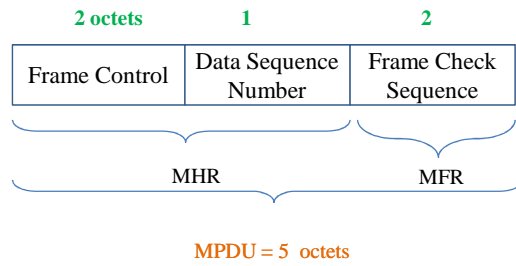
151

## Address Information

0/2 octets	0/2/8	0/2	0/2/8
Destination PAN Identifier	Destination Address	Source PAN Identifier	Source Address

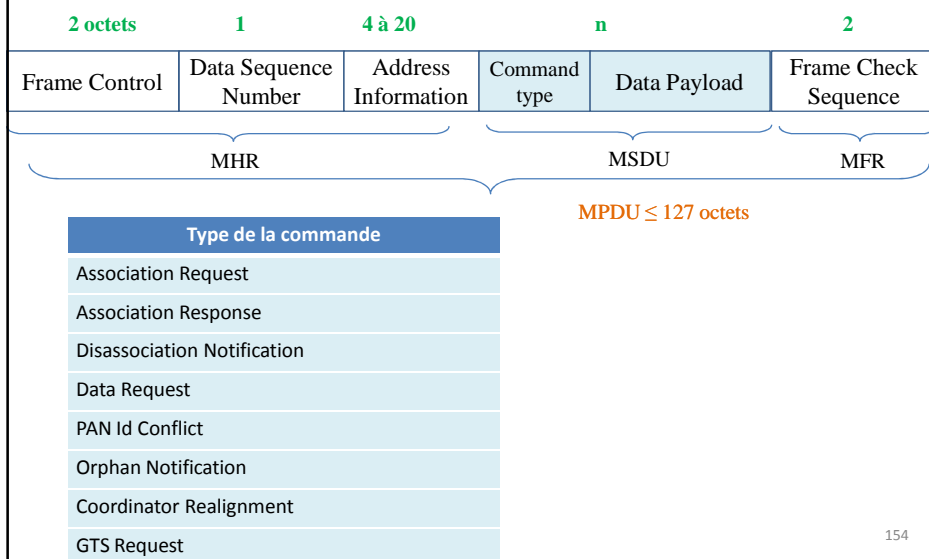
152

## ACK Frame

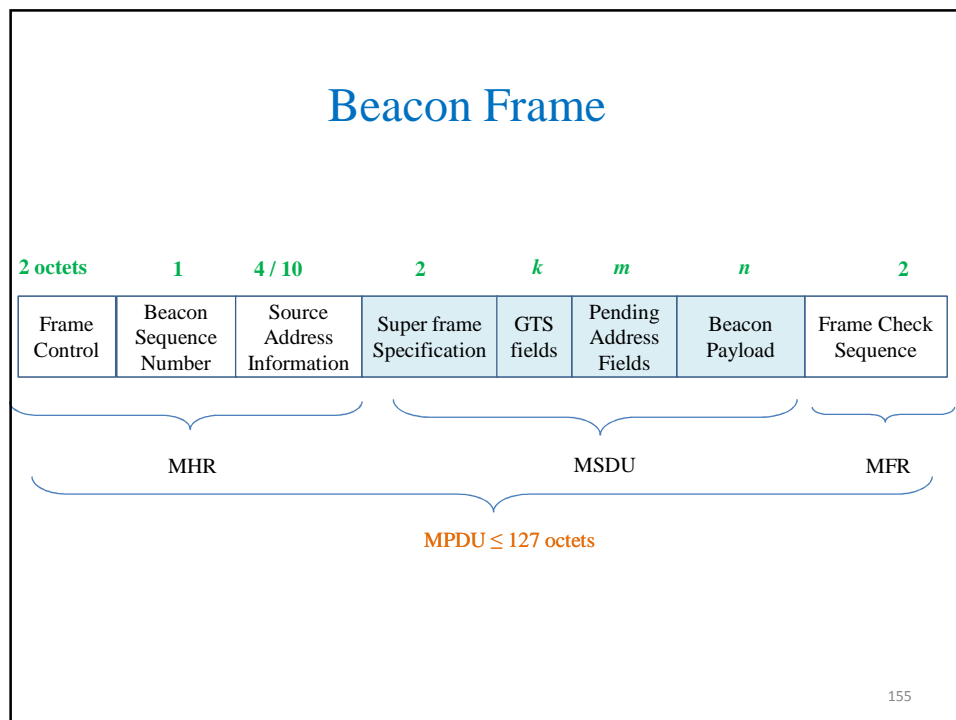


153

## Command Frame



154



## Canaux IEEE 802.15.4

- ❑ ZigBee offre un total de 27 canaux répartis sur trois bandes:
  - 868 MHz pour la région Europe
  - 915 MHz pour l'Amérique du Nord
  - 2,4 GHz pour une couverture mondiale
- ❑ IEEE802.15.4 prévoit deux couches physiques différentes:
  - une pour le 868/915 MHz **PHY868/915**
  - une pour 2,4 GHz **PHY2450** (majoritaire)

156

## Codage ZigBee

- ❑ Codage DSSS (*Direct Sequence Spread Spectrum*)
  - *Binary phase-shift keying* (BPSK) pour les bandes des 868 Mhz et 915 MHz
    - 1 bit par symbole
  - *Offset quadrature phase-shift keying* (OQPSK) pour la bande 2,4 GHz
    - 4 bits par symbole
- ❑ Distance de transmission
  - Entre 10 and 75 mètres
  - Jusqu'à 1500 mètres pour **XbeePro!!!**

157

## Caractéristiques des couches PHY

PHY	Bande (MHz)	Nombre de canaux	Région	Etalement de spectre		Données		
				Débit Chip (Kchip/S)	Modulation	Débit Binaire (bits/s)	Débit Symboles (Ksymbol/s)	Symboles
868/915	868-868.6	1 (0)	EUR	300	BPSK	20	20	Binaires
	9.2-928	10 (1-10)	USA	600	BPSK	40	40	Binaires
2450	2400-2483.5	16 (11-26)	All	2000	O-QPSK	250	62.5	16-aires Orthogonaux

158

## CHAPITRE 5

### Sécurité dans les WSN

159

- <http://comp.ist.utl.pt/ece-wsn/doc/slides/>
- <https://www.techniques-ingenieur.fr/base-documentaire/technologies-de-l-information-th9/internet-des-objets-42612210/>
- <http://www.wi6labs.com/2016/03/16/quelle-technologie-radio-pour-les-objets-connectes-deuxieme-partie/>

160



## Autre exemple de requête (BD distribuée)

*Select* [ task, time, location, [distinct | all], amplitude,  
 [[avg | min | max | count | sum ] (amplitude)]]  
*from* [any , every ]  
*where* [ power available [ $<|>$ ] *PA* |  
 location [in | not in] *RECT* |  
 $t_{min} < \text{time} < t_{max}$  |  
 task = *t* |  
 amplitude [ $<|==|>$ ] *a* ]  
*group by* task  
*based on* [time limit =  $l_t$  | packet limit =  $l_p$  |  
 resolution = *r* | region = *xy*]

161