

Réseaux de Capteurs Sans Fils

Y. Challal



Contributeurs

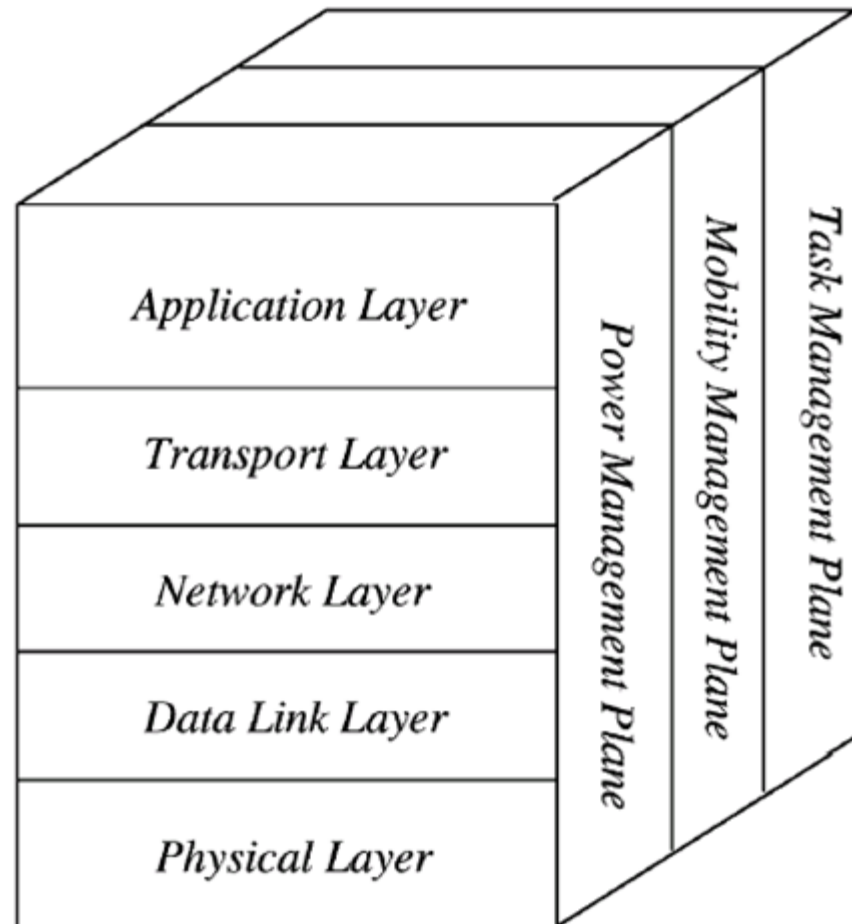
- **Hatem Bettahar**
- **Boushra Maala**
- **Abdelraouf Ouadjaout**
- **Noureddine Lasla**
- **Mouloud Bagaa**
- **Ben Hamida Fatima Zohra**

- **Chenyang Lu (Virginia)**
- **Kemal Akkaya and Mohamed Younis**
- **C. Intanagonwiwat, R. Govindan, D. Estrin, et. al., presented by Romit Roy Choudhury (Illinois)**
- **Martin Haenggi, « Wireless Sensor Networks »**

La communication dans les RCSF



La pile protocolaire



ZIGBEE / IEEE 802.15.4



Introduction

- **Un des soucis majeurs traités dans les communications sans fils, jusqu'à un futur proche, est la bande-passante.**
- **Quelques applications: "home automation", sécurité, agriculture, industrielles etc. relaxent le besoin en bande-passante pour un besoin de moindre coût et de basse consommation d'énergie.**
- **Les standards existants n'étaient pas appropriés à cause de leur complexité, leur coût élevé, et la consommation d'énergie induite.**

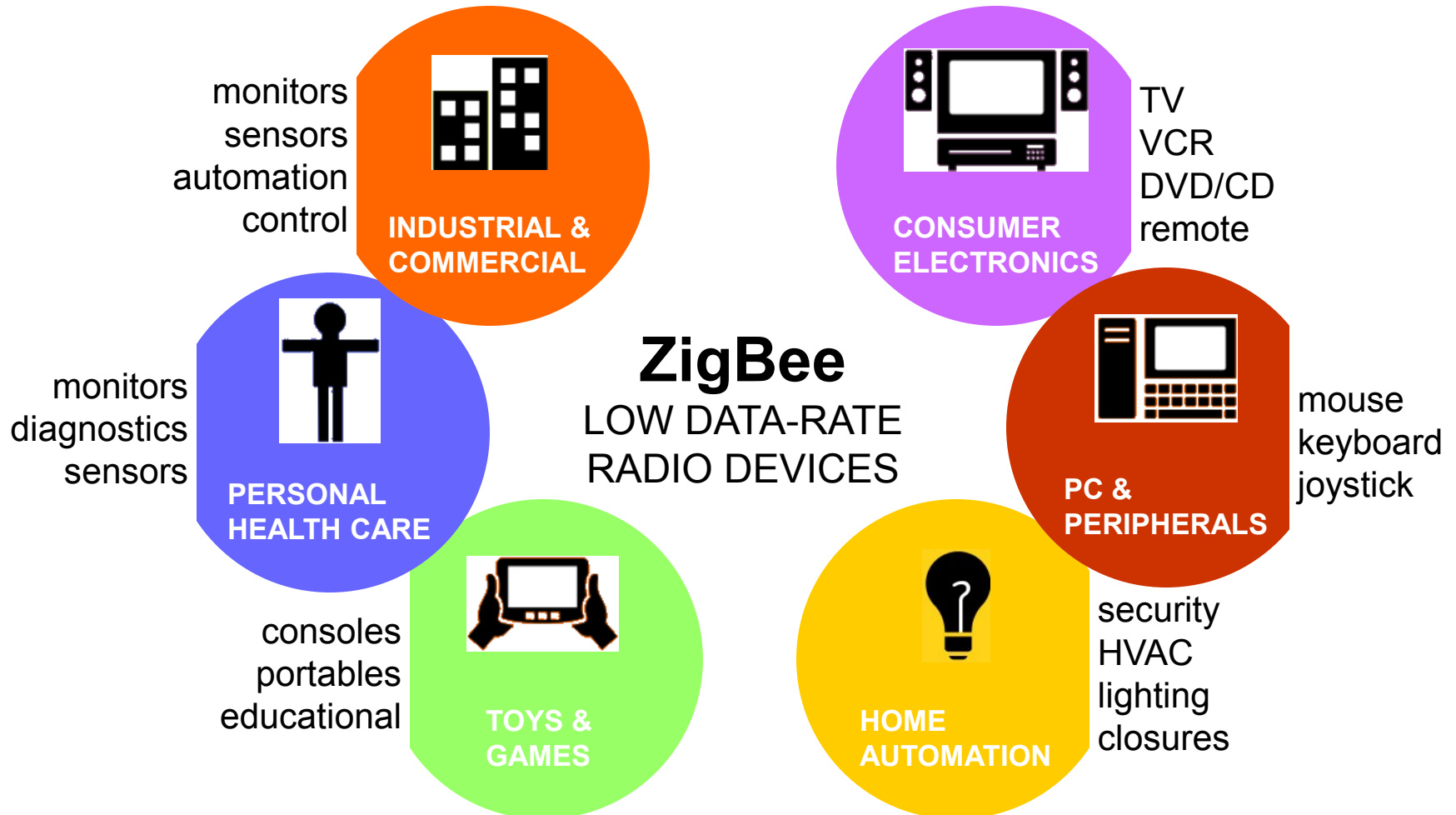
C'est quoi ZigBee?

- **L'alliance ZigBee est**
 - Une association de companies travaillant ensemble pour développer un standard global et ouvert pour les communications sans fils avec un coût réduit et une basse consommation de l'énergie

- **C'est devenu le nom commun du standard**



Applications



Besoins marketing (1)

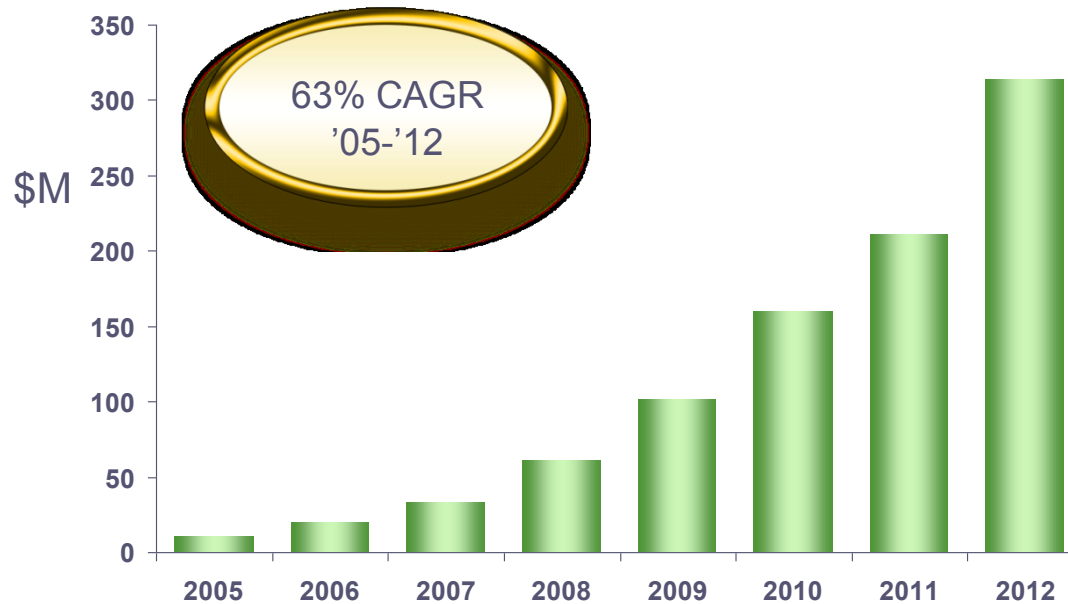
- **Usage sans restrictions géographiques**
- **Pénétration à travers les murs et plafonds**
- **Installation automatic/semi-automatic**
- **Possibilité de rajouter/retirer des dispositifs**
- **Coût avantageux**

Besoins marketing (2)

- **Débit : 10k-115.2kbps**
- **Portée radio: 10-75m**
- **Jusqu'à 65k noeuds par réseau**
- **Jusqu'à 100 réseaux co-localisés**
- **Jusqu'à 2 ans de durée de vie de batterie standards Alkaline**

Prévisions de marché

Worldwide IEEE 802.15.4 and ZigBee®
Chipset Revenue



Source: ABI Research, 2007



Histoire de ZigBee

➤ **Pas de solution adéquate pour:**

- Smart badges
- Home Automation
- Jeux Interactifs

➤ **IEEE 802.15.4 task group avait comme objectif la conception d'un standard avec**

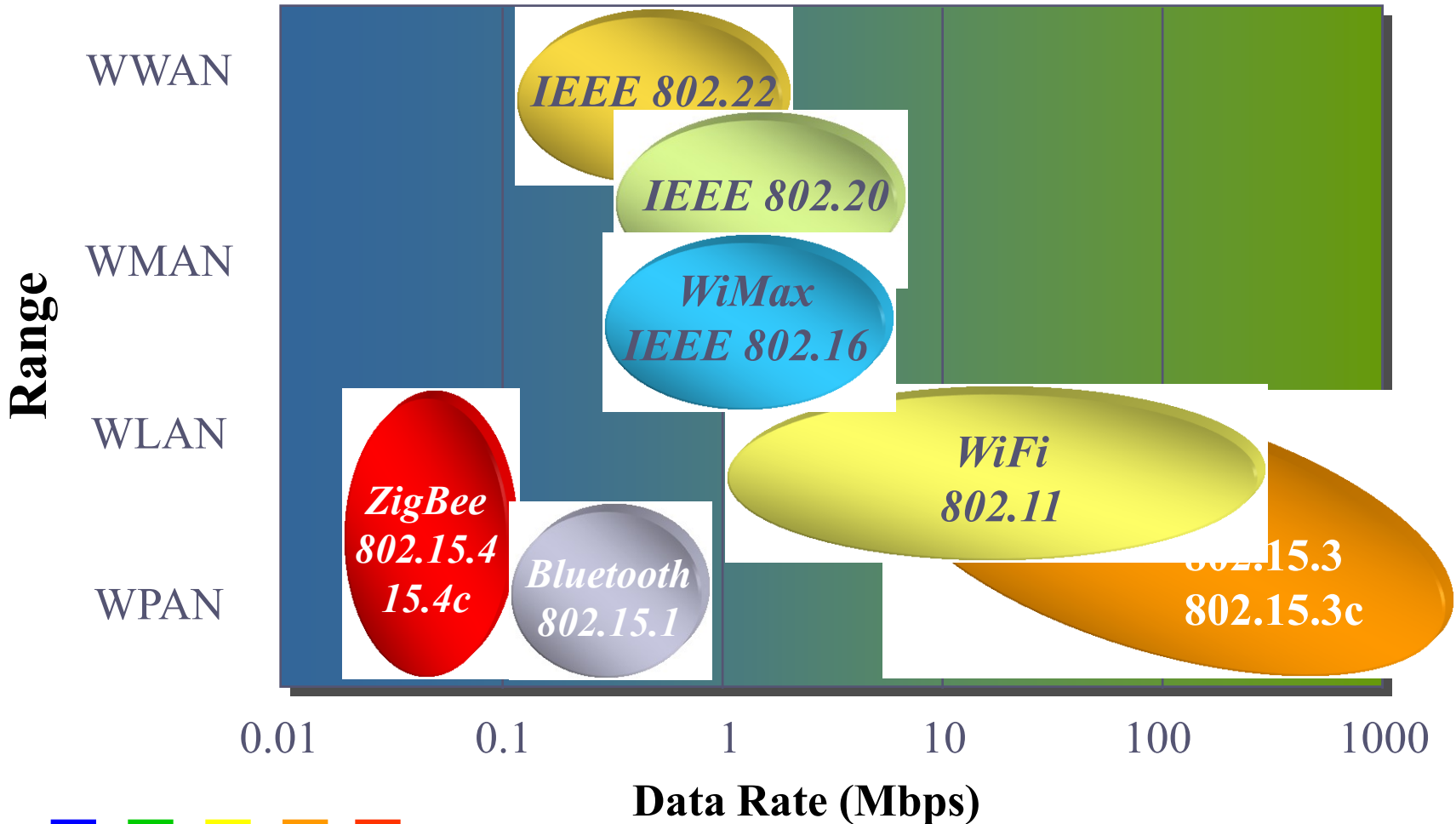
- Faible débit
- Longue durée de batterie
- Très faible complexité

➤ **En 2003, le standard a été achevé**

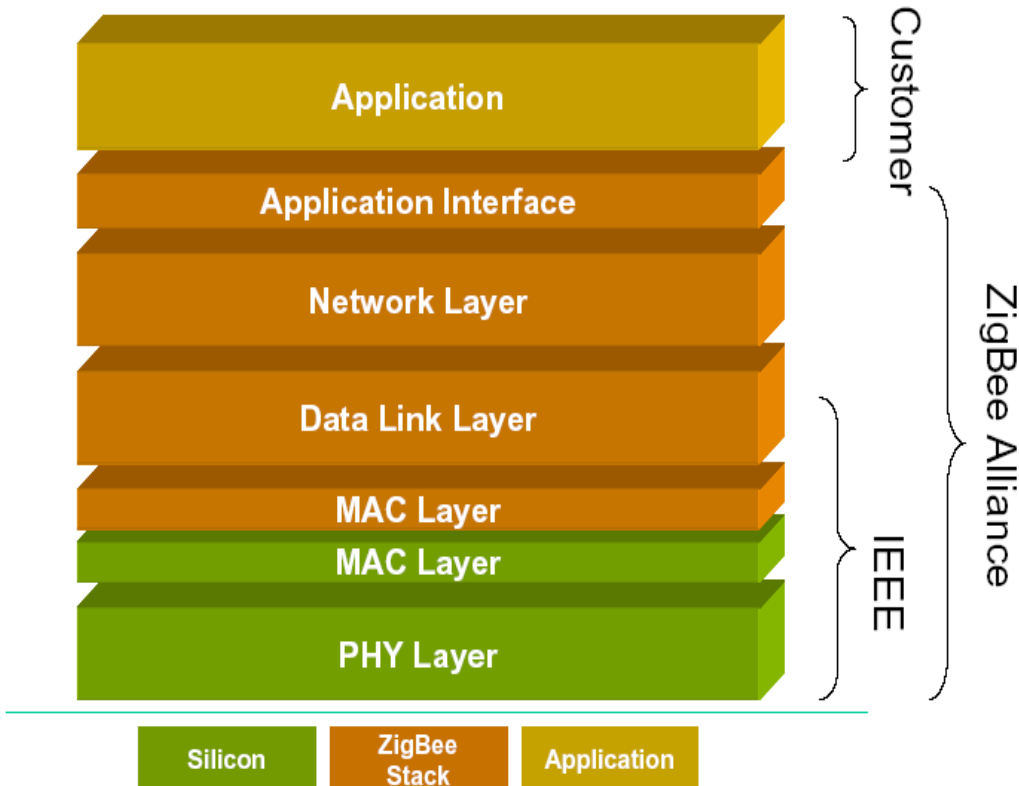
Market Name	ZigBee®	---	Wi-Fi™	Bluetooth™
Standard	802.15.4	GSM/GPRS CDMA/1xRTT	802.11b	802.15.1
Application Focus	Monitoring & Control	Wide Area Voice & Data	Web, Email, Video	Cable Replacement
System Resources	4KB - 32KB	16MB+	1MB+	250KB+
Battery Life (days)	100 - 1,000+	1-7	.5 - 5	1 - 7
Network Size	Unlimited (2 ⁶⁴)	1	32	7
Bandwidth (KB/s)	20 - 250	64 - 128+	11,000+	720
Transmission Range (meters)	1 - 100+	1,000+	1 - 100	1 - 10+
Success Metrics	Reliability, Power, Cost	Reach, Quality	Speed, Flexibility	Cost, Convenience



ZigBee: positionnement



Architecture ZigBee/802.15.4



➤ IEEE 802.15.4 Working Group

- Définition des couches basses: MAC et PHY

➤ ZigBee Alliance

- Plus de 50 companies.
- Définition des couches supérieures: du routage à l'application

Aperçus de la couche MAC IEEE 802.15.4

- **Utilise deux modes d'adressage 64-bit & 16-bit IEEE**
- **Accès canal CSMA-CA**
- **Simple structure de trame**
- **Possibilité de "beaconing"**
 - Réveil périodique, vérification de l'arrivée d'un beacon
- **Economie de l'énergie**
 - Mise en veille entre deux beacons
 - Les noeuds ne devant pas router ou recevoir les données aléatoirement peuvent se mettre en veille.
- **Transmission fiable de données**
- **Sécurité AES-128**

Network Beacon

- **Identifie le réseau**
- **Décrit la structure de la super-trame**
- **Indique la présence de données**
- **Présent uniquement lorsque le réseau est actif**
- **Optionnel**



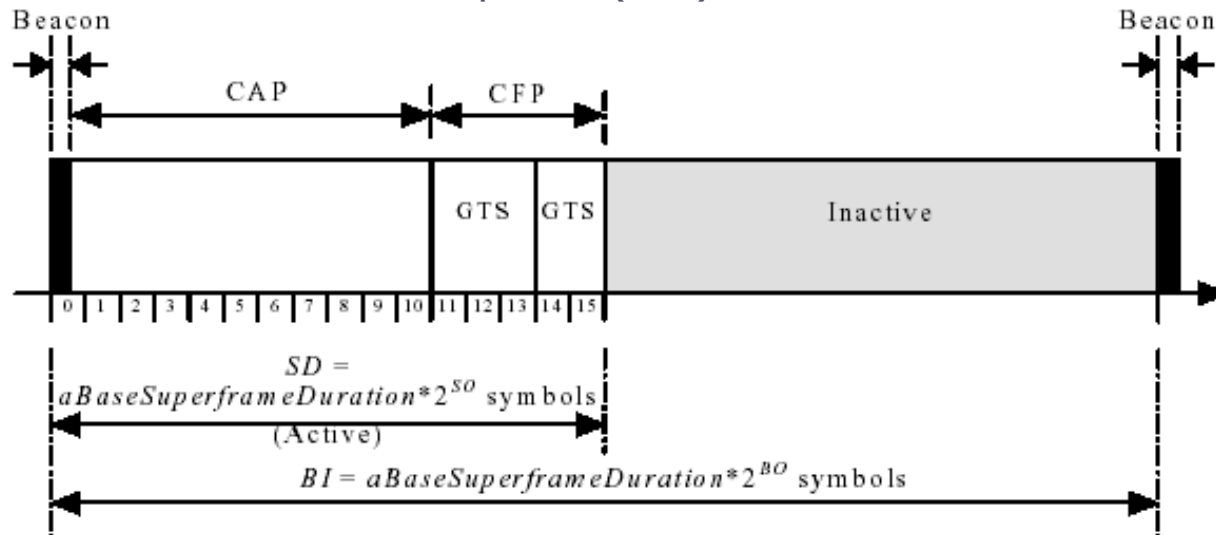
Mécanisme d'accès au canal

- **Deux types de mécanismes d'accès au canal, selon la configuration du réseau:**
 - Pas d'utilisation de beacon → CSMA/CA sans slots
 - Utilisation de beacon → CSMA/CA avec slots
 - ✓ Utilisation de la structure super-trame

Structure Super-Trame

➤ La super-trame est composée de deux parties:

- Inactive: toutes les stations dorment
- Active:
 - ✓ Période active composée de 16 slots
 - ✓ Deux parties dans les 16 slots
 - Contention access period (CAP)
 - Contention free period (CFP)



Structure Super-trame (cont.)

- **Deux paramètres:**
 - SO: détermine la longueur de la période active
 - BO: détermine la longueur d'une période de beacon.
- **Dans CFP, un GTS peut être constitué de plusieurs slots, attribué à un seul noeud, pour transmission (t-GTS) ou réception (r-GTS).**
 - GTS = guaranteed time slots
- **Dans CAP, le concept de slots n'est pas utilisé.**
 - CAP est divisé en de plus petits slots de contention.
 - Chaque slot de contention a une longueur de 20 symboles.
 - ✓ C'est la plus petite unité de contention backoff.
 - Les noeuds entrent en contention suivant CSMA/CA avec slots.

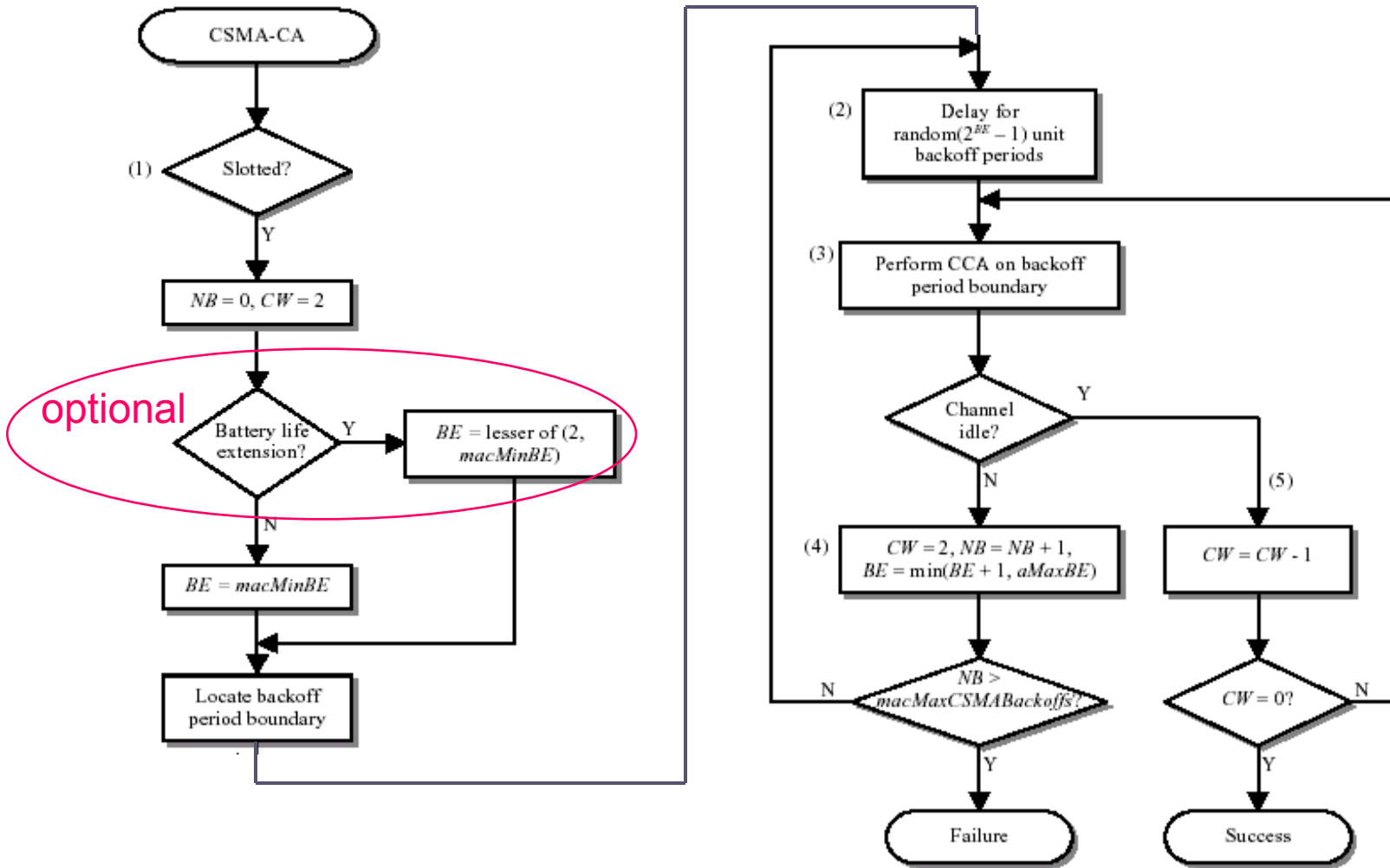
Algorithme CSMA/CA avec slots

- **La frontière d'une période de backoff de chaque noeud du PAN doit être alignée sur la frontière d'un slot de la super-trame du coordinateur du PAN**
 - i.e. le début du premier backoff de chaque noeud doit être aligné sur le début de la transmission d'un beacon.
 - La sous-couche MAC doit assurer que la couche PHY commence toutes les transmissions sur les frontières d'une période de backoff

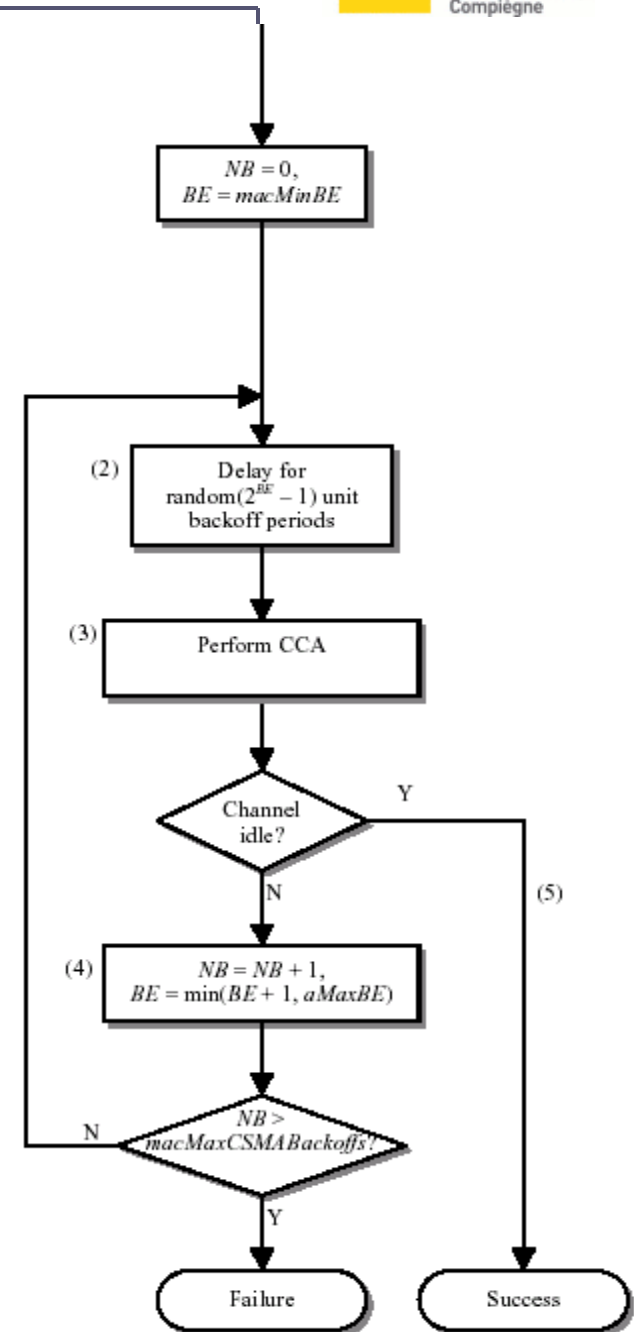
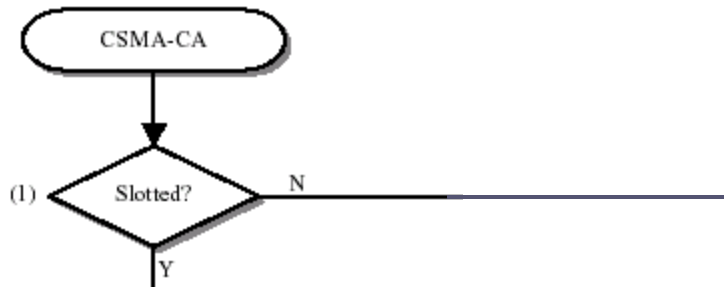
Algorithme CSMA/CA

- **Chaque noeud doit maintenir trois variables pour chaque tentative de transmission**
 - NB: nombre de fois que l'algorithme CSMA/CA fait backoff durant la tentative de transmission en cours
 - BE: "backoff exponent" qui détermine le nombre de périodes backoff qu'un noeud doit attendre avant de tenter d'accéder au canal.
 - **CW: (Contention Window)**
 - ✓ Longueur de la fenêtre de contention, le nombre de slots backoff sans aucune activité de canal avant de commencer la transmission
 - ✓ Initialisé à 2 et remis à 2 si le canal est détecté occupé.
 - Une station doit détecter 2 CCA (Clear Channel Activity) avant d'entrer en contention.

CSMA/CA avec slots



CSMA/CA sans slots



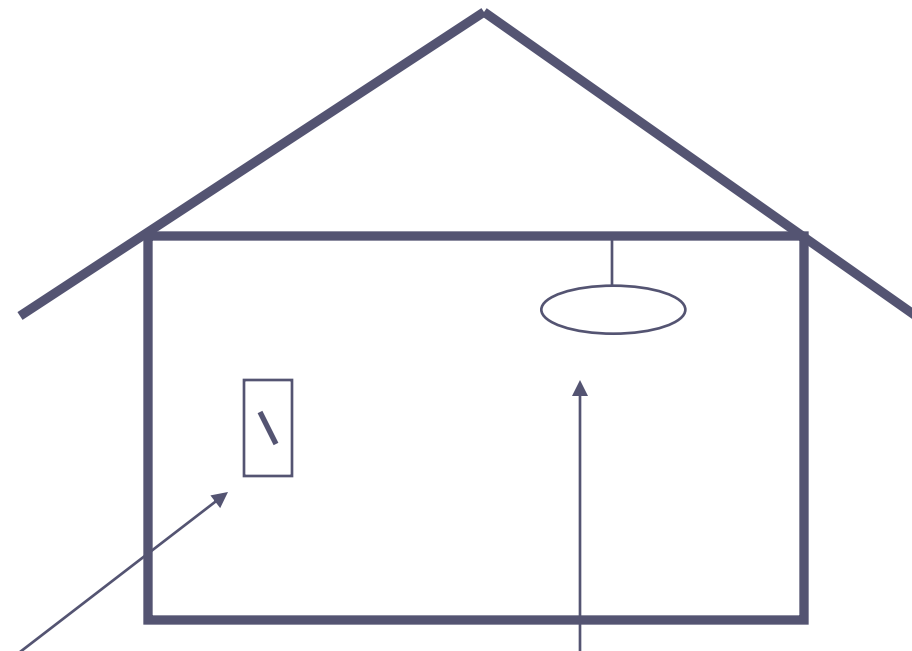
Concept de CW non utilisé.



Couche Routage

➤ Composants du réseau

- ZigBee Coordinator
 - ✓ Créateur du réseau
- ZigBee Router
 - ✓ Routage multi-sauts
- ZigBee End Device
 - ✓ Très basse énergie



Interrupteur (ZE)
Etat : En veille,
excepté quand
appuyé

Source lumineuse
(ZC or ZR)
Etat: Toujours active



Types de noeuds IEEE 802.15.4

➤ Il existe deux types de noeuds

- A full function device (FFD)
- A reduced function device (RFD)

➤ FFD

- N'importe quelle topologie
- Communique avec n'importe quel noeud
- FFD peut fonctionner en trois modes
 - ✓ Device
 - ✓ Coordinator
 - ✓ PAN coordinator

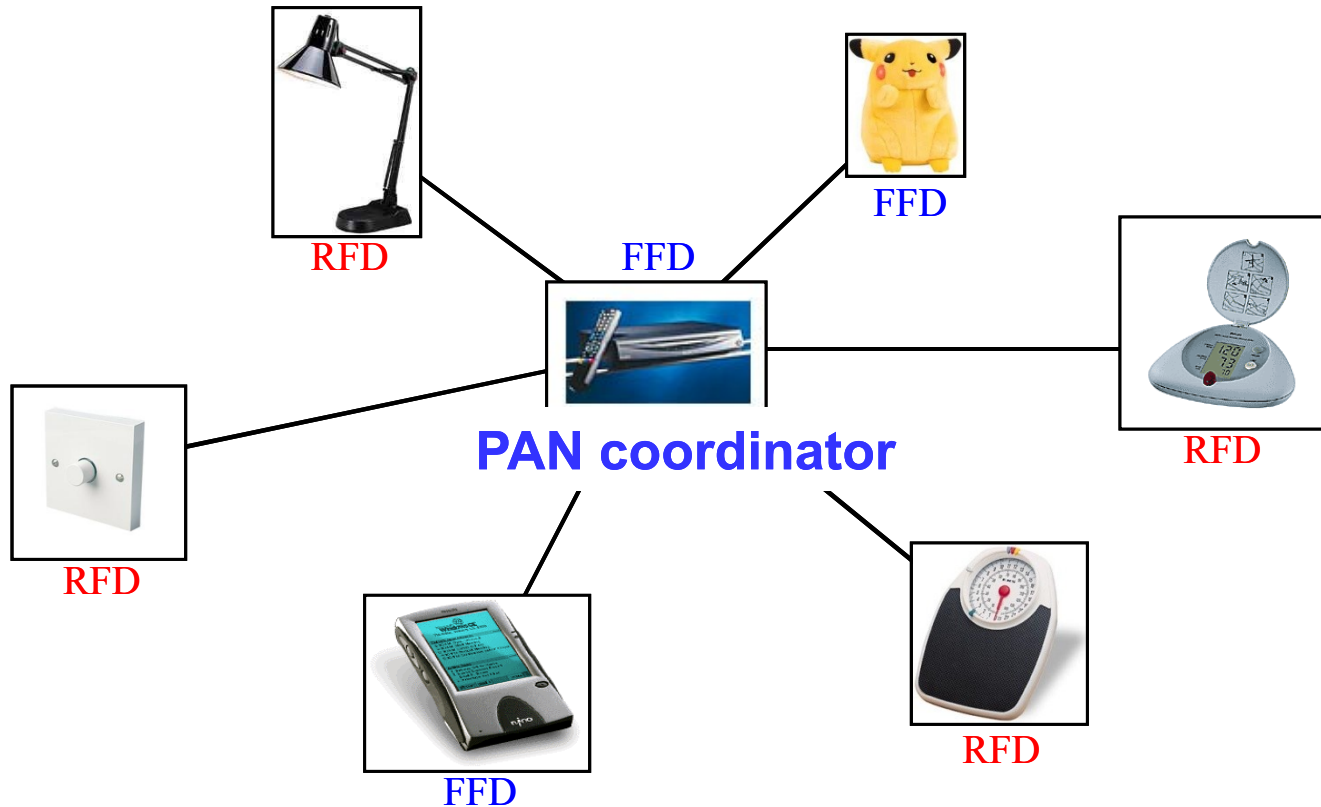


➤ RFD

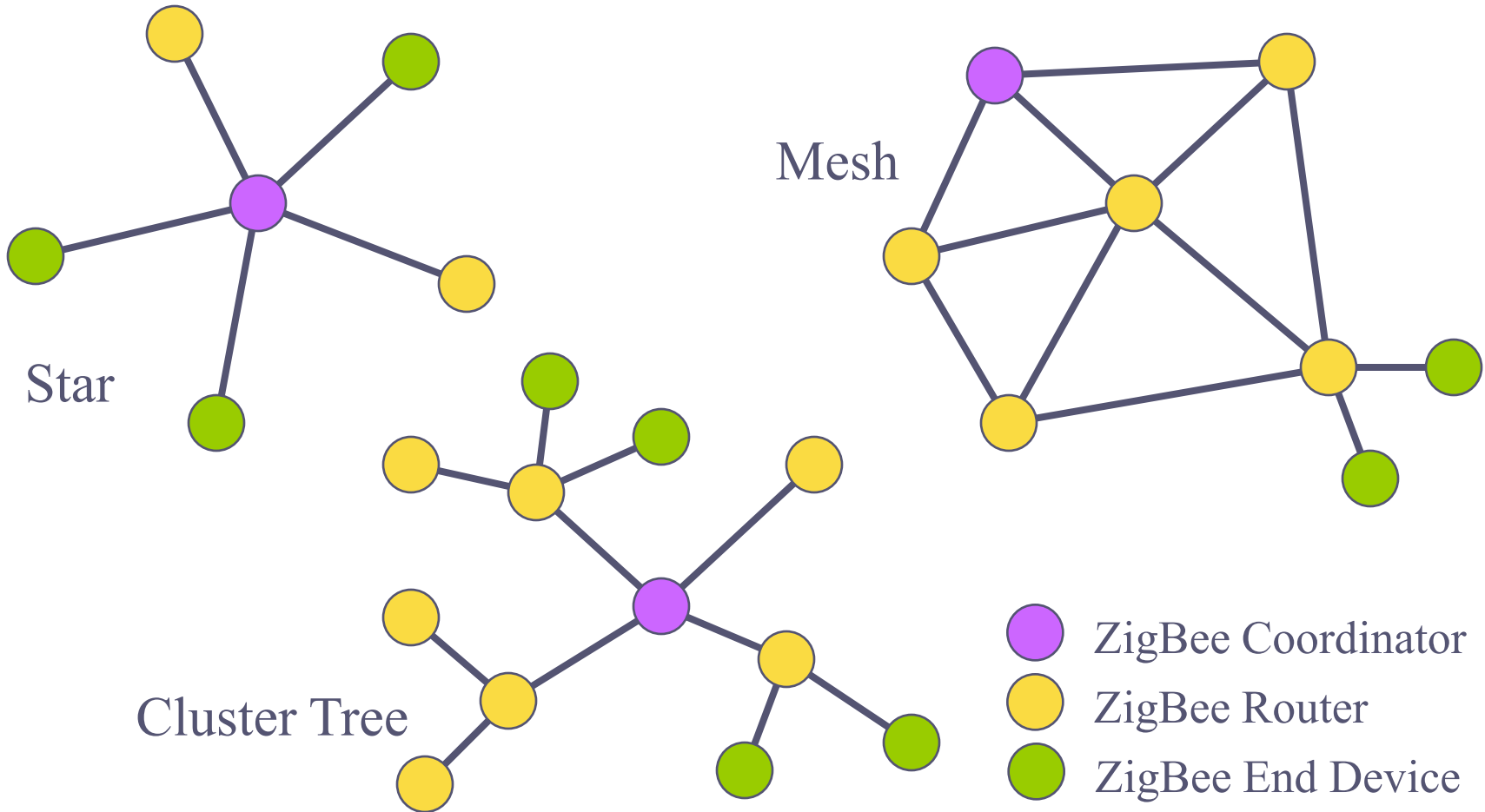
- Topologie en étoile uniquement
- Communique uniquement avec le coordonnateur du réseau
- Implémentation très simple
- RFD peut fonctionner en un seul mode
 - ✓ Device



Exemple



Topologies réseaux



Types de Messages

➤ Périodiques

- Usage d'un système de beaconning
- Ex) Système de mesure

➤ Intermittents

- Sans beaconning
- Ex) Interrupteur

➤ Répétitifs à basse latence

- Allocation de slot de temps
- Ex) Système de sécurité

Sécurité de ZigBee

- **ZigBee est connu pour être “highly secure”**
- **Repose sur une architecture centralisée**
 - Le coordinateur joue le rôle d'un centre de confiance
- **Types de clés:**
 - Master key
 - ✓ Installée out-of-band
 - Network key
 - ✓ Partagée entre tous les noeuds
 - ✓ Pas de protection contre les intrus internes
 - Link key
 - ✓ Dérivée de la Master key

Trust Center

- **Peut être le coordinateur ou un noeud dédié dans le réseau**
- **Confiance lors d'un Join**
 - Authentification des requêtes Join
- **Network**
 - Mise à jours et distribution des “network keys”
- **Configuration de bout en bout**
 - Assiste l'établissement de la “link-key”



Gestion de l'énergie

- **Protocoles conçus pour les dispositifs à basse consommation de l'énergie**
- **Les noeuds esclaves initient tous les transferts**
- **Les périodes de mise en veille sont définies par les applications**
- **Les noeuds se réveillent**
 - Interruption externe due à une stimulation d'un utilisateur
 - Intervalle défini par l'applicatif
 - Cycle de vérification et contrôle de "bonne santé" du réseau



Approches pour réduire la consommation d'énergie

- **Réduction du volume de données transmis**
- **Réduction de la fréquence de transmission de données**
- **Réduction de l'overhead de la trame**
- **Réduction de la complexité**
- **Réduction de la portée**
- **Implémentation de mécanismes stricts pour la gestion de l'énergie (extinction, mode veille)**

ZigBee vs. Bluetooth

- **Portée plus grande**
 - 100m vs. 10m
- **Débit plus faible**
 - 20 to 250 Kbps vs. 1 Mbps
- **Energie plus basse**
 - Multi-year vs. multi-day battery life
- **Nombre de noeud**
 - 65,000 nodes vs. 7 slaves per network

Conclusions

- **ZigBee est bénéfique pour les applications avec un débit bas et une basse consommation d'énergie**
 - Control
 - Automation
 - Monitoring
- **Centralized trust center facilite la gestion de la sécurité**

PROCOLES DE ROUTAGE



Routage: Contraintes

➤ Limitations

- Contraintes d'énergie
- Bande-passante

➤ **Toutes les couches doivent tenir compte de la limitation d'énergie**

➤ **Maximisation de la durée de vie du réseau.**

Routage: contraintes

- **Absence d'adressage global**
- **Données redondantes**
- **Réseau à sources multiples / destination unique**
- **Gestion des ressources**
 - Énergie de transmission
 - Énergie à bord
 - Capacité de calcul
 - Stockage

Routage: Architecture & Conception

➤ **Dynamisme du réseau**

- Noeuds mobiles ou stationnaires?
- Événements statiques (température)
- Événements dynamiques (détection de mouvements)

➤ **Déploiement des noeuds**

- Déterministe – Placement manuel
- Auto-organisé – Placement aléatoire

➤ **Considérations énergétiques**

- Communication Direct vs Multi-sauts: Direct Préféré – Motes près du Sink.
Multi-sauts – inévitable dans les déploiements auto-organisés

➤ **Modèles de transmission de données**

- Continue
- Orienté événements
- Orienté requêtes
- Hybrides



Routage: Architecture & Conception

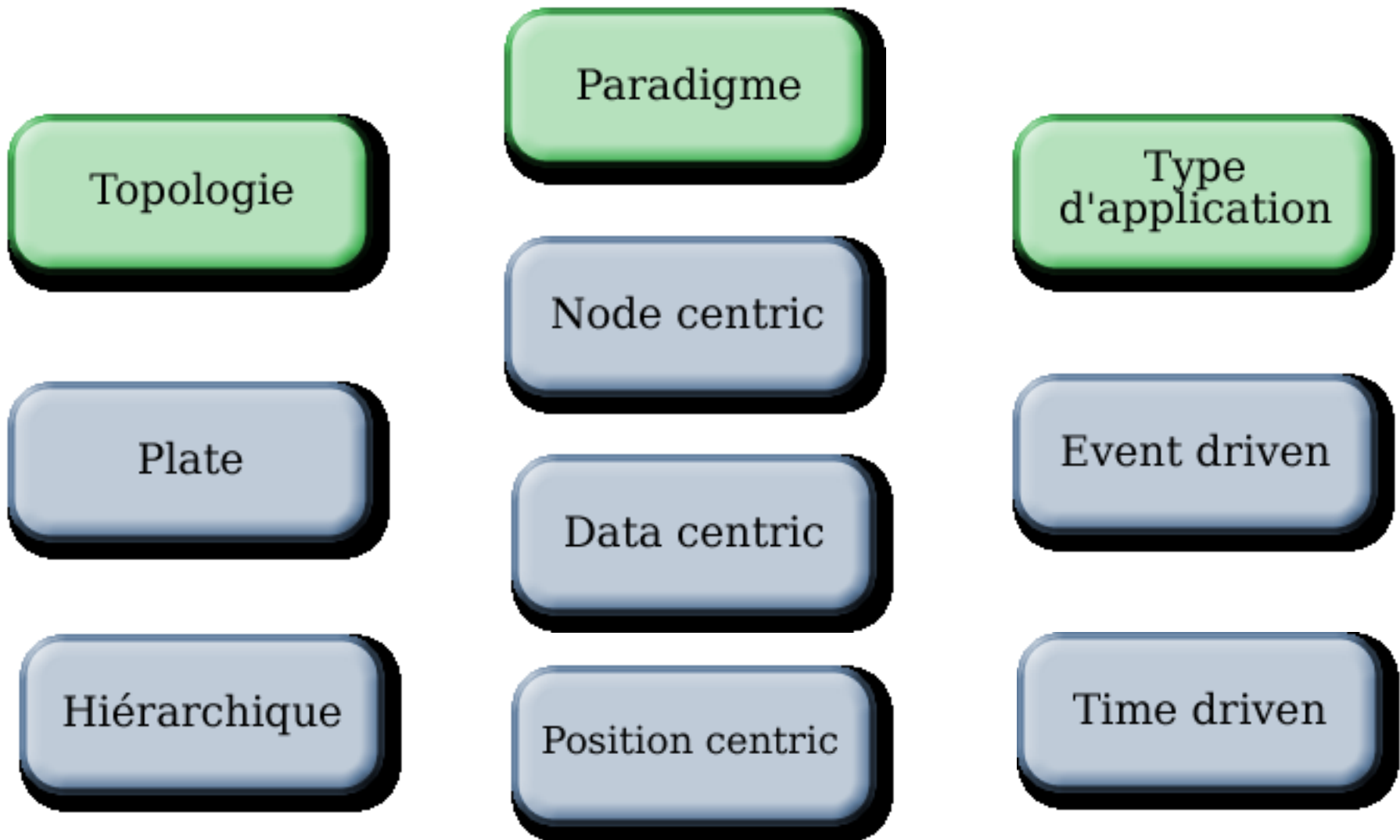
➤ Capacité des noeuds

- Homogènes
- Hétérogènes
- Noeuds dédiés à une tâche particulière (relayage, captage, agrégation)

➤ Agrégation/Fusion de données

- Agrégation – Combiner des données pour éliminer les redondances
- Fusion de données si Agrégation par techniques de traitement de signal
- L'agrégation économise l'énergie

Protocoles de dissémination dans RCSF



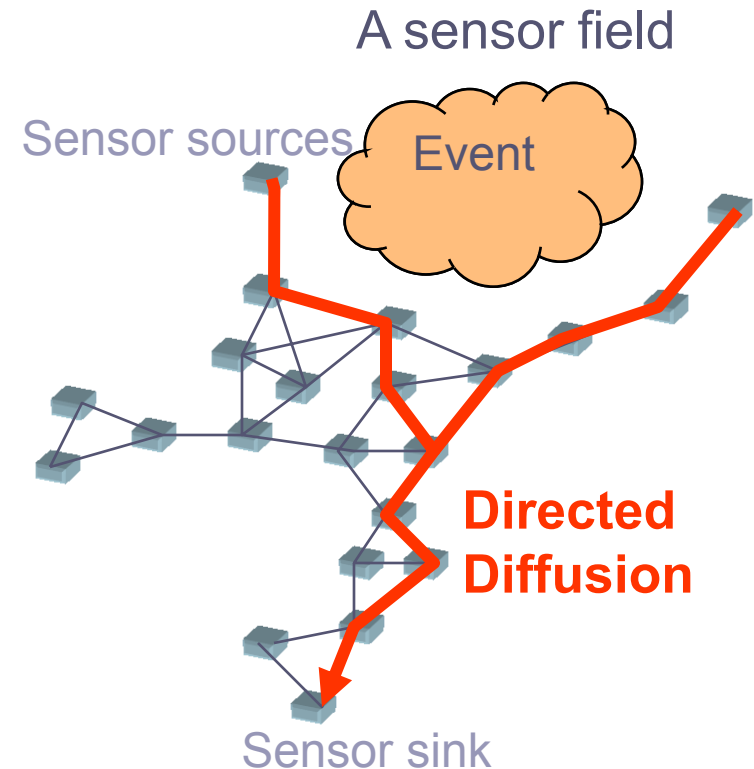
Directed Diffusion



SIT-60

Directed Diffusion: Le Problème

- Une région nécessite la surveillance d'événements (gaz toxique, mouvement de véhicules, vibrations sismiques, température, etc.)
- Déploiement de capteurs formant un système distribué
- A l'occurrence d'un événement, l'information captée et/ou traitée délivrée à l'initiateur de la requête



Directed Diffusion: solution

- **Propose un paradigm application-aware pour faciliter l'aggrégation efficace, et le transport de données captées à l'initiateur de la requête**
- **Challenges:**
 - Adaptation au facteur d'échelle
 - Consommation d'énergie efficace
 - Robustesse / Tolérance aux fautes dans les zones extérieures
 - Routage efficace (multiple paires source / destination)
- **Réseaux IP typiques**
 - Nécessite une identification unique des noeuds
 - L'application est de bout-en-bout
- **Directed diffusion – utilise publish/subscribe**
 - L'initiateur exprime un intérêt en utilisant une liste valeurs/attributs
 - Les sources Capteurs qui peuvent servir l'intérêt répondent avec des données

DD: Nommage de données

➤ Expression d'un intérêt

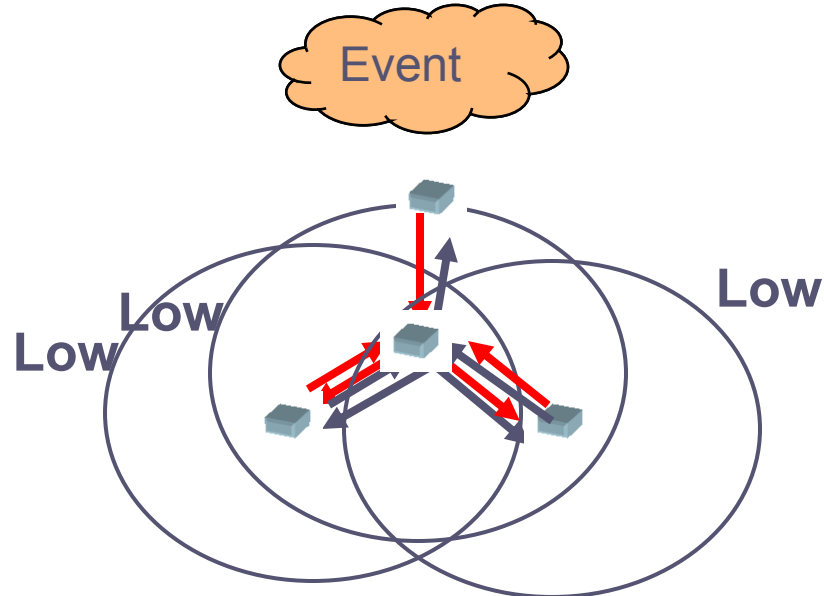
- Usage de paires valeur-attribut
- Ex.,

```
Type = Wheeled vehicle // detect vehicle location  
Interval = 20 ms // send events every 20ms  
Duration = 10 s // Send for next 10 s  
Field = [x1, y1, x2, y2] // from sensors in this area
```

DD: Installation des Gradients

- **Le “sink” (initiateur de la requête) diffuse un intérêt exploratoire, $i1$**
 - Dans l’objectif de découvrir des routes entre sources et sink
- **Les voisins mettent à jour leur cache d’intérêts et rediffusent $i1$**
- **Chaque noeud installe un Gradient pour $i1$ vers le noeud lui en transmis $i1$**
 - Pas de routes vers les sources
 - Gradient – un lien inverse pondéré
 - Gradient faible → Quelques paquets par unité de temps

DD: Gradient exploratoire

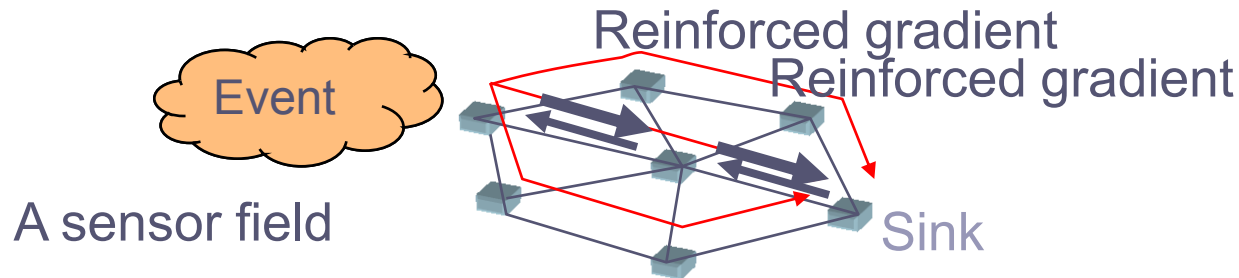


Gradients bidirectionnels établis sur tous les liens à travers la diffusion

DD: Propagation de données-événements

- **Apparition de Event e_1 , correspond à i_1 dans le cache du capteur**
- **La réponse à l'intérêt i_1 est diffusée en unicast suivant le gradient**
 - Diffusion initialement exploratoire (bas débit)
- **Les filtres de caches suppriment les données déjà vues**
 - Évitement du problème des gradients bidirectionnels

DD: Renforcement

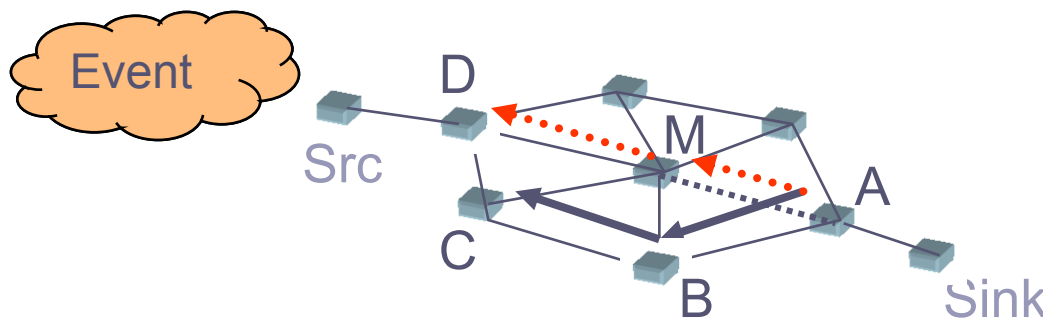


- **A partir des gradients exploratoires, renforcement du chemin optimal pour recevoir les données à haut débit → Unicast**
 - En demandant un débit plus élevé pour *i1* sur le chemin optimal
 - Les gradients exploratoires existent toujours – intéressant pour la tolérance aux fautes

DD: Panne / Recouvrement de route

- **Panne de lien détectée par un débit réduit, perte de données**
 - Choisir le meilleur lien suivant

- **Renforcement négatif du lien en panne**
 - Soit renvoyer *i1* avec débit de base (exploratoire)
 - ou, laisser les caches des voisins expirer dans le temps



Link A-M lossy
 A reinforces B
 B reinforces C ...
 D need not
 A (-) reinforces M
 M (-) reinforces D

SPIN

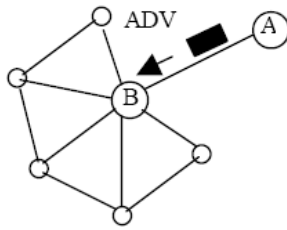


SIT-60

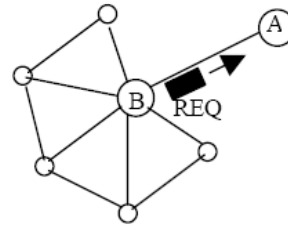
SPIN

- **Sensor Protocols for Information via Negotiation (SPIN)**
- **Résoudre les problèmes de l'inondation:**
 - Implosion (plusieurs copies d'une même données)
 - Chevauchement (densité du réseau)
 - Épuisement des ressources
- **Deux principes:**
 - La négociation
 - Adaptation aux ressources
- **Trois étapes:**
 - ADV: métadonnée
 - REQ: intérêt
 - DATA: donnée

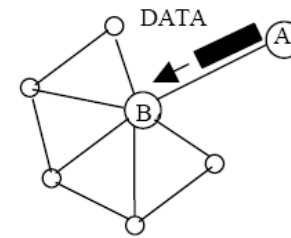
SPIN



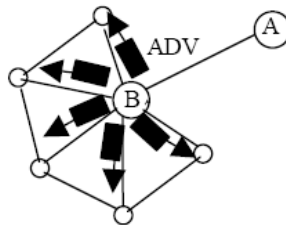
(a)



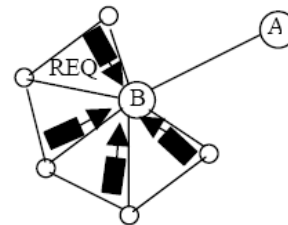
(b)



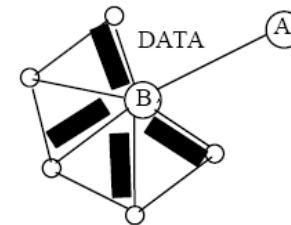
(c)



(d)



(e)



(f)

MCFA



SIT-60

MCFA

➤ **MCFA (Minimum Cost Forwarding Algorithm)**

➤ **Trois buts:**

- Optimalité: choix chemin de coût minimum
- Simplicité: faible mémoire, pas d'identification, un message / nœud pour la construction des routes
- Scalabilité

➤ **Coût:**

- Chaque nœud maintient une variable de coût vers puits
- Le coût considéré dépend de l'application (saut, énergie, etc.)

➤ **Deux phases:**

- Établissement des valeurs de coût
- Relais des paquets

MCFA: Établissement des valeurs de coût

- **Puits: $ADV=0$ + inondation**
- **Nœuds: considérer le coût le plus petit → attendre l'arrivée de l'optimum global:**

```
Init
```

```
Self.cost <- inf
```

```
OnRecvADV (cost, from)
```

```
If (cost+linkCost (from) < self.cost)
```

```
    Self.cost <- cost+linkCost (from)
```

```
    initBackof (cost+linkCost (from) )
```

```
onBackoffTimeout ()
```

```
    broadcastADV (self.cost)
```

MCFA: Relais des paquets

- Pas d'identification
- Pas de table de routage
- Routage basé sur le coût local → le paquet contient le coût vers le puits:

```
OnRecvData (cost, from)
```

```
  If (cost-linkCost(from)=self.cost)  
    broadcastData(self.cost)
```


Rumour Routing



Rumour Routing

- **Minimiser l'inondation**
- **Repose sur le résultat suivant:**
 - D'après des simulations Monte-Carlo:
 - ✓ la probabilité que deux lignes se croisent au sein d'un rectangle = 0,69
 - ✓ La probabilité qu'une ligne croise une des cinq lignes passants par un point = 0,997
- **Si on considère le puits et la source comme deux points, et en établissant un nombre réduit de mi-chemins depuis la source et le puits, on aura une forte chance que deux mi-chemins se joignent, créant ainsi un chemin complet entre la source et la destination, tout en évitant l'inondation.**
- **RR: utilise des agents pour établir les table de relais:**
 - Un agent est un paquet avec un grand TTL qui traverse le réseau pour construire les routes
 - Deux types d'agents:
 - ✓ Agent événement
 - ✓ Agent requête



Rumour Routing: Agent d'événement

- Chaque noeud maintient une table de relais locale, qui contient, pour chaque intérêt, le prochain saut vers le puits et vers la source, ainsi qu'une métrique qui représente le nombre de saut vers chaque extrémité.
- Lorsqu'un noeud observe un nouvel événement, il crée un nouvel agent suivant une certaine probabilité, et l'envoie à un voisins.
- L'agent contient la table d'événements parcourus au sein du chemin ainsi que le nombre de sauts vers la source de chaque événement. De plus, l'agent doit transporter avec lui la liste des noeuds parcourus ainsi que leurs voisin directs.

Rumour Routing: Agent d'événement (suite)

➤ Lorsqu'un nœud reçoit un agent, il effectue les opérations suivantes:

- Si l'agent contient un nouvel événement, une nouvelle entrée dans la table locale est créée.
- Le nœud met à jour sa table locale et/ou la table de l'agent pour les entrées communes, suivant le nombre de sauts optimal
- Si le nœud connaît des événements non connus par l'agent, il ajoute les entrées nécessaires dans la table de l'agent.
- Le nœud choisit comme prochain saut un de ses voisins n'appartenant pas à la liste des nœuds de l'agent, et modifie en conséquence sa table locale pour le prochain saut vers le puits
- Le nœud ajoute à la liste des nœuds parcourus son identificateur, ainsi que ceux de ses voisins.
- Le message est envoyé au nœud choisi.

Rumour Routing: Agent de requête

- **Lorsque le puits désire prélever une donnée du réseau**
 - il consulte sa table locale pour une route fraîche.
 - Si aucune entrée n'est trouvée, il initialise un agent de requête.
- **L'agent contient seulement la liste des noeuds visités.**
- **Lorsqu'un noeud reçoit un agent de requête**
 - il vérifie l'existence d'un chemin dans sa table locale.
 - Si ce n'est pas le cas, il choisit un voisin aléatoire et lui transmet l'agent, tout en ajoutant son identificateur dans la liste transportée par l'agent.

MECN



SIT-60

MECN & SMECN

- Utilise GPS basse énergie
- Applicable plus aux RSCF non mobiles
- Identifie une région de *relai*
- Détermine un sous-réseau pour le relai du trafic
- Auto-reconfiguration
- Adaptatif dynamiquement

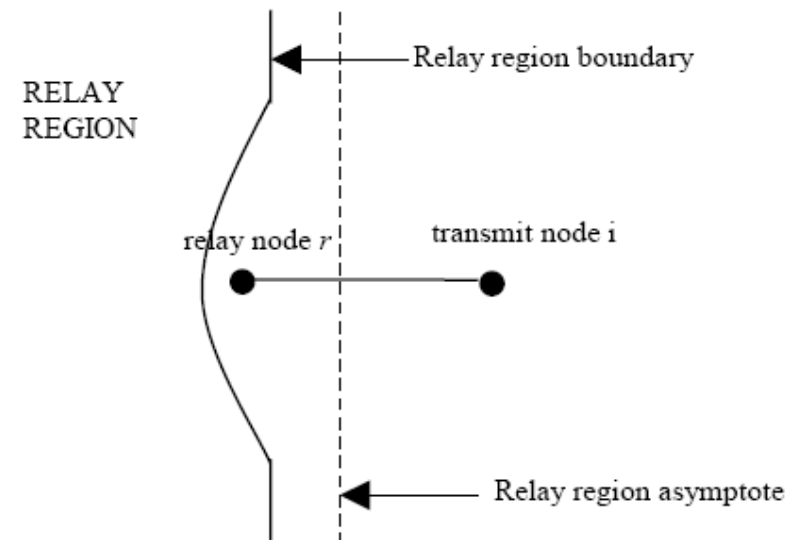


Fig. 10: Relay region of transmit-relay node pair (i, r) in MECN.

GAF



SIT-60

GAF

- **Forme une grille virtuelle sur une zone couverte**
- **Les noeuds utilisent GPS pour s'associer aux cellules**
- **Les noeuds sont autorisés à se mettre en veille s'ils sont équivalents**
- **Gère la mobilité**

